普通高中课程标准实验教科书

物 理 ②

必 修

教师教学用书

人民教育出版社　课程教材研究所
物 理 课 程 教 材 研 究 开 发 中 心　编著

人民教育出版社

主　　编：杜　敏
副 主 编：梁　旭　张　颖
编写人员：谷雅慧　黄恕伯　梁　旭　沈启正　孙　新　王超良
　　王树民　叶全浩　张　颖　周誉蔼
责任编辑：谷雅慧　张　颖
绘　　图：张傲冰
版式设计：张万红

图书在版编目（CIP）数据

普通高中课程标准实验教科书物理2必修教师教学用书/人民教育出版社，课程教材研究所物理课程教材研究开发中心编著. —3 版. —北京：人民教育出版社，2010.4（2019. 7重印）
ISBN 978-7-107-17863-4

Ⅰ. ①普… Ⅱ. ①人… ②课… Ⅲ. ①中学物理课—高中—教学参考资料 Ⅳ. ①G633.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 034096 号

普通高中课程标准实验教科书　物理 2　必修　教师教学用书

出版发行　人民教育出版社
　　（北京市海淀区中关村南大街17号院1号楼　邮编：100081）
网　　址　http://www.pep.com.cn
经　　销　全国新华书店
印　　刷　北京天宇星印刷厂
版　　次　2010 年 4 月第 3 版
印　　次　2019 年 7 月第 31 次印刷
开　　本　890 毫米 × 1240 毫米　1/16
印　　张　10
字　　数　250 千字
定　　价　30.90元

版权所有・未经许可不得采用任何方式擅自复制或使用本产品任何部分・违者必究
如发现内容质量问题、印装质量问题，请与本社联系。电话：400-810-5788

说　明

本书是在《普通高中课程标准实验教科书物理必修 2 教师教学用书》的基础上，根据几年来实验地区的一些反映，修订而成的。旨在帮助教师更好地使用《普通高中课程标准实验教科书物理必修 2》，为教学提供一些参考。

本书介绍了教科书的特色，新的教学理念和一些新的教学方式、方法，与教科书采取“紧密配合”的方式，逐章逐节进行分析说明。本书的主要结构如下：

课程标准的要求　摘录了《普通高中课程标准物理（实验）》的相关内容，作为教学的依据。

本章教材概述　主要介绍本章教科书的编写意图，主要内容和教材结构的特点，以及在选择内容和讲述方法上的考虑。

教材分析与教学建议　根据课程标准及教科书，对每一节教学内容提出了具体的教学目标，并且对教材内容提出了比较详细的建议，包括教学过程中可能遇到的问题，供选择的教学方法，怎样发展学生的非智力因素，怎样使用教科书中的栏目、插图，怎样以课程理念处理教学问题，如何发展教师自身的教学能力，如何处理数字化教学，如何帮助学生进行探究等。

问题与练习　从“内容分析”和“解答与说明”两部分对教科书“问题与练习”中的问题给出了较为详细的解答。

教学设计案例　主要目的是给实验地区的教师提供一些教学设计方面的参考，包括一些重点难点的分析、把握、处理，整堂课的设计思想、具体安排等。

教学资源库　是与教学内容相关的教学资源，包括“概念、规律和背景资料”“联系生活、科技和社会资料”“实验参考资料”三个部分。课程新理念需要教师进一步提高职业素质，需要教师尽早进入终身学习的轨道，我们在这里围绕教学的需要选择了一些拓展性的内容，为教师的素质发展提供一些线索。

补充习题　教科书由于篇幅所限，不可能编写太多的习题。我们在这里补充了一些习题，供老师们在教学中选用。

本书原编写者还有：张维善、张京文、唐挈、王琦、汪维澄。

本书在编写过程中得到北京市、浙江省、江苏省、山东省、重庆市、天津市、安徽省、江西省、辽宁省等全国各地教研室的热情支持和帮助，在此一并表示衷心的感谢。

对于书中存在的缺点和错误，欢迎教师和物理教育工作者们及时批评、指正。来函请寄：100081　北京海淀区中关村南大街 17 号院 1 号楼　人民教育出版社物理室　收。

人民教育出版社　物理室

2010 年 4 月

目　录

第五章　曲线运动　1
一、本章教材概述　1
二、教材分析与教学建议　4
第 1 节　曲线运动　4
第 2 节　平抛运动　9
第 3 节　实验：研究平抛运动　12
第 4 节　圆周运动　14
第 5 节　向心加速度　17
第 6 节　向心力　19
第 7 节　生活中的圆周运动　22
三、教学设计案例　24
曲线运动　24
四、教学资源库　28
（一）概念、规律和背景资料　28
（二）联系生活、科技和社会资料　35
（三）实验参考资料　44
五、补充习题　46

第六章　万有引力与航天　51
一、本章教材概述　51
二、教材分析与教学建议　53
第 1 节　行星的运动　53
第 2 节　太阳与行星间的引力　56
第 3 节　万有引力定律　58
第 4 节　万有引力理论的成就　61
第 5 节　宇宙航行　63
第 6 节　经典力学的局限性　67
三、教学设计案例　68
行星的运动　68
四、教学资源库　73
（一）概念、规律和背景资料　73
（二）联系生活、科技和社会资料　85
五、补充习题　90

第七章　机械能守恒定律　97

一、本章教材概述　97

二、教材分析与教学建议　100

第 1 节　追寻守恒量——能量　100

第 2 节　功　102

第 3 节　功率　106

第 4 节　重力势能　108

第 5 节　探究弹性势能的表达式　111

第 6 节　实验：探究功与速度变化的关系　112

第 7 节　动能和动能定理　117

第 8 节　机械能守恒定律　121

第 9 节　实验：验证机械能守恒定律　125

第 10 节　能量守恒定律与能源　127

三、教学设计案例　129

机械能守恒定律　129

四、教学资源库　134

（一）概念、规律和背景资料　134

（二）联系生活、科技和社会资料　140

（三）实验参考资料　143

五、补充习题　147

第五章
曲线运动

课程标准的要求

1. 会用运动合成与分解的方法分析抛体运动。
2. 会描述匀速圆周运动。知道向心加速度。
3. 能用牛顿第二定律分析匀速圆周运动的向心力。分析生活和生产中的离心现象。
4. 关注抛体运动和圆周运动的规律与日常生活的联系。

一、本章教材概述

本章是共同必修模块的第五章。在第一、二章中，学生学习了运动的描述和匀变速直线运动的规律，对运动学的知识有了一定的了解；在第三、四章中，学生学习了关于力的基本知识和牛顿运动定律，对动力学的知识也有了一定了解。本章所学的曲线运动，不仅要讨论曲线运动的规律，同时要用牛顿运动定律对有关曲线运动进行分析。因此可以说，本章实际上是运动学和动力学知识在曲线运动上的具体应用，是学生所学运动学和动力学知识的进一步拓展和延伸，其拓展和延伸的具体内容可以用以下方框图来表示：

第一章：学习用时间、位移、速度、加速度等物理量以及参考系、坐标系来描述直线运动。	→ 第五章：进一步学习用两个维度的位移、速度来描述抛体运动；用角速度、线速度、向心加速度来描述匀速圆周运动。
第二章：学习匀变速直线运动速度—时间关系、位移—时间关系和速度—位移关系。	→ 第五章：分两个维度研究抛体运动的规律；学习匀速圆周运动周期、半径、角速度、线速度、向心加速度的相互关系。
第三章：按力的种类学习重力、弹力、摩擦力的基本知识；学习力的合成、分解的平行四边形定则。	→ 第五章：根据力的效果学习向心力的基本知识；学习用矢量运算的平行四边形定则分析运动的合成和分解问题。
第四章：学习牛顿运动定律的知识，理解合力和加速度的关系，用牛顿第二定律解决匀变速直线运动的问题。	→ 第五章：用牛顿第二定律分析向心力，认识向心力和向心加速度的关系，用牛顿运动定律解决匀速圆周运动问题。

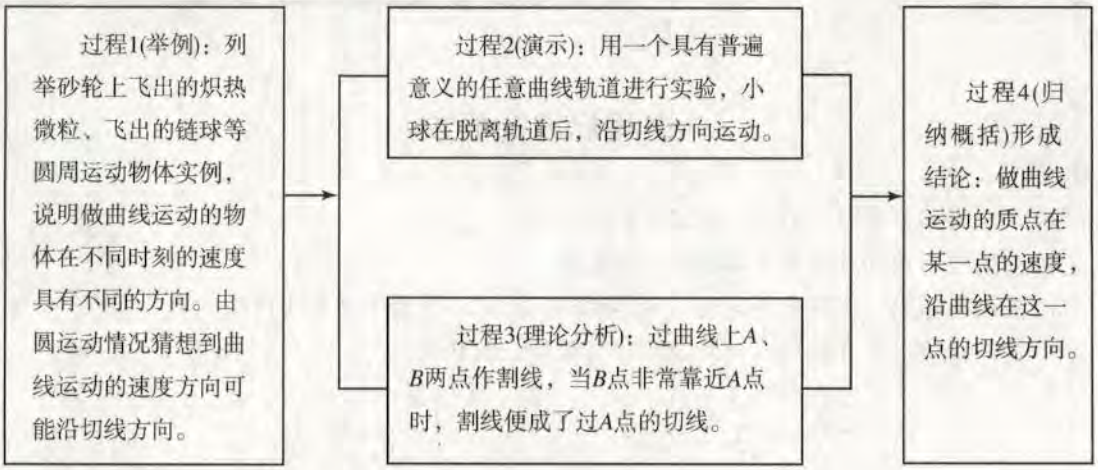
本章教材大体继承了传统教材“曲线运动→运动的合成和分解→抛体运动→匀速圆周运动”的整体结构，但编写时，更注重分析思路和方法的渗透，而且在行文线索上也作了一些调整，例如，根据运动学的知识先学习向心加速度，然后再根据牛顿第二定律学习向心力的知

识，这样做，有利于形成合理的知识结构，而且更符合认知规律。

具体来说，本章在编写时有如下思考：

1. 重视对物理结论形成的过程进行优化设计

为得到曲线运动速度方向是沿曲线某点的切线方向这一结论，教科书设计了以下过程：



教科书没有在过程 1 之后就匆匆形成结论，因为过程 1 列举的是圆周运动的情况，圆周运动仅仅是曲线运动的一种特例，通过一个特例来概括出普遍结论，这不利于形成学生的科学思维。只有把客观事实和理性分析结合起来形成结论，才是更科学的研究方法，过程 2 和过程 3 就是基于这种考虑而设计的。因此，对于这段教科书，过程 1 可以看成是根据部分事实得到的猜想，过程 2 和过程 3 可以看成是对该猜想所进行的实验和理论上的证明。

过程 2 除了其任意曲线的轨道具有普遍意义外，让学生体验严谨的实验过程也是编写意图之一。因为过程 2 要记录小球运动的轨迹，用直尺判断出小球脱离轨道后的运动轨迹是在脱离点的曲线切线上。这就存在着一个如何收集信息和分析、处理信息的问题，它使学生感觉到，一个实验结论的形成是应该尊重客观事实和严谨的。

过程 3 隐含着极限的思想。AB 割线的长度跟质点由 A 至 B 的运动时间之比，等于 AB 过程的平均速度大小，其平均速度的方向由 A 指向 B。当 B 非常非常接近 A 时，AB 割线变成了过 A 点的切线，同时 AB 间的平均速度近似等于 A 点的瞬时速度，因此质点在 A 点的瞬时速度方向就是过 A 点的切线方向。教科书用了一系列的几根虚线逐渐逼近切线的方法，来展现这种极限的思想。

2. 重视学生的体验

本章重视学生对物理现象的深入观察和对物理规律的亲身体验。学生经过了深入观察和亲身体验后，物理知识不仅容易领悟而且印象深刻。

学生学习了曲线运动速度的方向后，教科书让学生做一个“飞镖”，观察飞镖在空中做斜抛运动时指向不断改变的情景，观察飞镖落至地面插入泥土时的指向，联系飞镖在空中做曲线运动的轨迹，体会曲线运动的速度方向与轨迹曲线相切的关系。

在学习了向心力公式后，学生容易产生“半径比较大的时候向心力是比较大还是比较小”的问题。教科书设计了一个“做一做”的体验性实验，让学生在实验中体验“匀速圆周运动的物体在线速度大小不变时半径越大的向心力越小”的感觉，体会实践中的“半径大、线速度大小不变”是怎么一回事；体验“匀速圆周运动的物体在角速度不变时半径越大的向心力越大”的感觉，体会“半径大、角速度不变”的实践意义。一般来说，“半径大向心力是大还是小”

的问题，只要通过对向心力公式进行讨论就可以得到结论，但通过实验体验后，学生能把物理公式中的常量、变量和实验的具体条件联系起来，其认知的水平会比较深刻。

3. 解决问题时强调规范化的方法

在物理学中，不同的问题有不同的特点，解决起来要遵从不同的程序，也就是说有不同的规范。这也是科学方法的问题，编者在这方面做了一些努力。

例：抛体运动

原来的教学大纲对抛体运动的要求是“平抛运动（B）”，这只是一个干巴巴的知识点（括号中的B表示对它有较高要求）；课程标准的要求则是“会用运动合成与分解的方法分析抛体运动”，其中的“分析”、“用……方法”体现了对于过程与方法的要求。

按照课程标准的精神，新教科书在抛体运动的教学中，展示了质点在平面内运动时解决问题的规范化的方法，教学层次如下。

（1）以红蜡块的运动为例，按下面的步骤介绍普遍性的方法。

· 坐标与时间的关系：$x=v_x t$，$y=v_y t$

· 轨迹：消去 t，得到 $y=\frac{v_y}{v_x}x$

· 速度的大小和方向：$v=\sqrt{{v_x}^2+{v_y}^2}$，$\tan\theta=\frac{v_y}{v_x}$

红蜡块问题是由分速度求合速度及轨迹，接下来的是一个例题，要由速度求它在互相垂直的两个方向上的分量。

（2）例题：已知飞机起飞时的速度和仰角，求它在水平方向和竖直方向的分速度。

通过（1）和（2）要让学生悟出一个道理：物体在平面上的运动可以在相互垂直的方向上分别研究（或者相反）。

（3）把这个道理应用于平抛运动

水平方向：力 $F=0$，初速度 $v_0=v$，由此可以得到抛体在 x 方向的位移 $x=vt$。

竖直方向：力 $F=$重力，加速度 $=g$，初速度 $v_0=0$，所以抛体在 y 方向的位移是 $y=\frac{1}{2}gt^2$。

有了 x、y 两个方向的坐标与时间的关系之后，仿照红蜡块问题的程序，可以得出抛体轨迹的表达式及速度的大小、速度的方向。

（4）如果抛出时的速度不沿水平方向，那么……

学生按这个思路学习，不仅得到了平抛运动的几个结论，而且学会了解决这类问题的一般性方法：

两个方向上的受力

↓

两个方向上的运动方程

↓

两个方向上的位置与时间的关系

↓

平面中的运动轨迹（消去 t）

↓

平面中速度的大小和方向（勾股定理、三角函数）……

有的老师提出，新教科书不仅要求平抛，而且要求斜抛，比过去难了。其实这里不仅不要求学生背诵斜抛的结论，甚至连平抛的结论也做了淡化处理：平抛轨迹只是在一个例题中做了

讨论。从科学方法的角度看，平抛和斜抛没有区别。

还有的老师提出，红蜡块的实验是多余的，直接通过平抛运动学习科学方法，可以一举两得。其实不然。教学中的一个原则是分散难点，解决质点在平面中的二维运动的方法对学生来说是新东西，不很容易；抛体运动是新知识，也有一定的难度，两者合在一起，不如教科书这样分层次、搭台阶的处理为好。从知识的角度讲，红蜡块的问题没有难度，学生可以把注意力放到方法上，通过简单问题认识方法，然后运用这个方法解决抛体的问题。教科书看起来好像在红蜡块上多做了一些文章，用了一些时间，但是“磨刀不误砍柴工”，整个抛体运动的学习时间并不比过去多。

4. 练习题的设计重视“情感、态度与价值观”目标

各节后的练习题，除了体现课文中的主干知识之外，设计时还慎重地考虑了“情感、态度与价值观”目标的实现。首先，练习题难度的水平，既要有利于学生积极思考、又要使学生在独立思考的情况下体验到解决问题的愉悦。同时，练习题的内容尽量贴近学生的生活，对物理学产生亲近感。例如，在曲线运动的练习题中，编写了一个以跳水运动员“反身翻腾二周半”为实践背景的曲线运动方向分析问题；在学习角速度的概念之后，编写了一个跟电脑软磁盘知识有关的角速度计算题；自行车是学生熟悉的交通工具，教材中的练习题要求学生根据自行车的传动机构设计一个测量自行车前进速度的方案和计算式，它将引发学生对很多意想不到的问题进行探讨；又如，在学习了平抛运动的规律之后，练习题中设计了一个以汽车司机超速行驶而肇事为背景的平抛运动问题，尽管从物理学的角度看，这是一个已知平抛运动的抛出高度和水平位移求平抛初速度的常规问题，但是由于赋予了实践的背景，物理知识被活化了。可以想象，如果在教学中让一名学生扮演检察官，陈述汽车行驶时超速的物理学根据，另一名学生扮演肇事司机的律师，从物理学的角度对检察官的陈述提出质疑，让学生自告奋勇地选择角色上台辩论，场面将是热烈的，这时候，学生跟物理学的距离便一下子拉近了许多。

课时安排建议

第 1 节	曲线运动	1 课时
第 2 节	平抛运动	1 课时
第 3 节	实验：研究平抛运动	1 课时
第 4 节	圆周运动	1 课时
第 5 节	向心加速度	1 课时
第 6 节	向心力	1 课时
第 7 节	生活中的圆周运动	2 课时

二、教材分析与教学建议

第 1 节　曲线运动

1. 教学目标

(1) 知道曲线运动是一种变速运动，知道曲线运动的位移和瞬时速度的方向，能在曲线的轨迹图上画出各点的速度方向。

(2) 知道物体做曲线运动的条件。能运用牛顿第二定律分析曲线运动的条件，掌握速度与合外力方向与曲线弯曲情况之间的关系。

(3) 经历蜡块运动的探究过程，体会研究平面运动的方法。

(4) 通过实验归纳做曲线运动的条件，体验学习物理的兴趣。

2. 教材分析与教学建议

本节是整章教学的知识基础。学生已经学习过直线运动，学习曲线运动时要了解它与直线运动的显著区别：速度的方向在变化。要研究曲线运动，首先要明确由于位移矢量的方向不断变化，需要采用平面直角坐标系，用位移在坐标轴方向的分矢量来代表它。其次，必须解决曲线运动速度方向的确定问题，认识曲线运动的性质以及物体做曲线运动的条件。教科书的叙述顺序是通过观察和实验，知道什么是曲线运动；再知道确定速度方向的方法，得出曲线运动是变速运动的结论；理解物体做曲线运动的条件。最后，通过分析蜡块运动的实例，让学生体会描述物体在平面中的运动的方法。

(1) 曲线运动速度的方向

在学习变速直线运动时，学生主要关注的是速度大小的变化。在学习曲线运动中，关注速度方向的变化应成为一个必须重点研究的问题。本节的教学可按以下四个方面依次展开：①列举原来做圆周运动的铁屑和链球飞出后的运动情况，引出研究曲线运动速度方向的课题，并由圆周运动情况猜想出一般的曲线运动速度方向可能沿切线方向。②实验探究：用具有普遍意义的任意曲线轨道进行实验，探究速度方向的判断方法。③理论探究：明确切线的概念，从理论上说明曲线运动的速度方向。④用“做一做”中的飞镖，让学生体验做曲线运动物体的速度方向。⑤让学生运用确定曲线运动方向的方法解决问题。

在第 1 阶段的教学时，可利用教科书中图 5.1-2 所示的砂轮打磨金属的情景和图 5.1-3 所示的运动员掷链球的场面，展现做圆周运动物体在脱离圆周运动瞬间的运动情景，教师可在学生观察图中情景时提出“如何确定铁屑和链球飞出时的运动方向?”这个问题。

教学中，可请学生通过对现象的分析提出确定曲线运动速度方向的猜想。在学生对现象的观察和分析中，可以从现象获得物体脱离圆周运动瞬间速度的方向。

在第 2 阶段的教学时，在学生提出确定曲线运动速度方向的猜想后，需要做的工作是设计实验进行验证。让学生进行实验设计时，应该对所设计实验提出要求：不能是特殊的曲线，如圆周；实验条件应该可以控制，如不同位置都可以进行实验研究。这样要求下所设计的实验方案就与教科书中的装置基本相同了。

教科书是通过图 5.1-4 所示的演示实验来探讨曲线运动速度的方向的。这个实验之所以将轨道分割成多段，体现了对实验条件的控制思想。本实验能够演示曲线运动过程中的多个位置的速度方向都沿切线方向，而不仅仅是轨道出口处的速度方向。

本实验也可以作些改进：例如把钢球改用普通鼠标内的鼠标球（内有磁性），以增加吸墨水性；用冰箱门的磁封条做轨道，因有一定的磁性吸力，可使各段轨道的接触处接触良好。

我们也可以通过学生自己动手来研究曲线运动速度的方向问题。用学生从小都爱玩的电动车玩具，如图 5-1 所示：取一根细绳，系在电动车的中间位置，在车的一个轮子上涂上红色的印泥（稍稀一点），细绳的另一端用手拽住。在较大的白纸上开动小车，会发

图 5-1

现，车轮在白纸上留下一个红色的圆轨迹。在车运动的过程中，烧断细绳，让学生观察烧断细绳后电动车留下的车辙，分析这部分车辙与圆的位置关系。由于这一实验趣味性强，适合作补充实验或学生课外实验。这个实验的不足之处是该运动是圆周运动，有一定的局限性。

第3阶段的教学，是从理论上说明曲线运动的速度方向。由于学生已经具有了极限的思想，学生接受起来并不很难，但如果能够让学生想象从割线到切线的动态过程，对于理解曲线运动的速度方向是有益处的。如果教师准备了演示从割线到切线的动态过程的课件，建议仍应该先让学生想象，然后演示。

第4阶段的教学，教师可以用视频资料及图片列举大量与教科书中的曲线运动事例，让学生们去观察。如果要让学生进行教科书中的飞镖实验，教师必须提醒学生：飞镖不能在人群中或向有人的方向射出。除飞镖以外，让学生抬起自行车的后轮，旋转脚踏板使后轮转动，观察轮上的泥巴脱离车轮前的运动，提高车轮的转速，泥巴将脱离车轮，观察泥巴脱离车轮时的速度方向以及泥巴脱离车轮后的运动。利用上述图景，可以缩短物理知识与学生之间的距离，建立学生对物理、对科学的亲近感。还可以让学生去观察公园内的各种游艺项目（教师可以拍摄录像或视频在课内播放），说一说在哪些项目中参与者的运动是曲线运动，相信学生会得出“生活中曲线运动比直线运动更普遍”的结论。

在第5阶段的教学时，建议播放“歼十”飞机的高空表演视频，定格分析其做曲线运动时的速度方向。还可以让学生做设计自行车挡泥板的形状和安放位置的实践活动。

（2）分析蜡块运动的实例

教学中注意以下几个环节。

①做好演示实验

做好实验是上好本课的关键。做实验时一定要有交代，有层次（分步）。演示实验分几步进行：首先将玻璃管倒置并保持竖直不动，看到蜡块沿玻璃管匀速上升；然后让竖直、倒置的玻璃管水平匀速运动，以便学生分别观察两个方向的运动情景。最后再演示：玻璃管水平匀速运动的同时，蜡块沿玻璃管匀速上升。考虑到学生观察时注意力只能集中在某一处，而分析合运动与分运动的关系时需要不断变换观察的对象，观察的过程又是思考的过程，所以最后的演示教师应该多做几遍。

这个实验现象虽然可以用相对运动来解释，但建议教学中不要涉及相对速度与牵连速度，以免学生混淆。在观察实验时，教师要提醒学生，这里的研究对象是蜡块，学生观察到的蜡块运动是合运动。

实验演示要与思考紧密结合。做实验时要让学生明确观察什么，思考什么。例如要观察蜡块的运动方向，蜡块的运动轨迹，思考蜡块的运动性质，思考合运动与分运动之间的关系等。

若演示时效果不理想，教师也可以播放本教参所附光盘的相应录像。

建议教学中补充一些实验，以增加说服力，下面介绍一种自制装置：

用一块三角板，在锐角处钉一枚羊眼螺丝，取一根细绳子，一端系粉笔，细绳穿过螺丝眼。演示时，让一学生按住绳子的一端，另一学生轻按住粉笔，教师沿着黑板槽的底边匀速平移三角板。分别按图5-2所示三种情况演示，可在黑板上画出粉笔运动的轨迹，该轨迹就是粉笔合位移的情况。该实验留迹清楚，较直观，而且能够演示二个分运动的夹角是锐角及钝角的情形，较具普遍性。

②注重理论分析

要定量讨论平面内运动物体的位置和轨迹，必须要首先建立坐标系，这是一种解决问题的

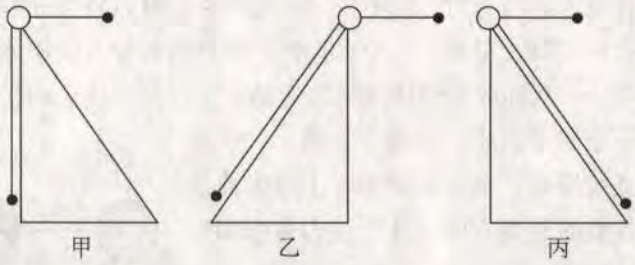


图 5-2

基本方法，在后面平抛、斜抛等问题的处理时都将采用相同的方法。

运动的合成与分解同力的合成与分解一样，都遵循矢量的平行四边形定则。教师在归纳方法时可以从力的合成与分解出发，用类比的方法引入，但讲授时要注意运动的合成与分解与力的合成与分解的区别，这里要研究的是运动中的矢量，包括位移、速度、加速度等。

建议教师在分析完蜡块的位置、运动轨迹、位移、速度这四个方面后，提出分运动、合运动及运动的合成与分解的概念。这样的安排有利于学生从位移、速度等角度全面认识运动的合成与分解方法在解决平面运动问题中的普遍意义。

例题的教学，教师先要让学生明白，该问题是合成问题还是分解问题。教科书只列了一个运动的分解例题，这是考虑到实验本身就是合成问题，理论分析轨迹、位移、速度时大多也是从合成的角度思考的。

例题教学时一定要强调运动的合成与分解对变速运动也是成立的。

③思考与拓展

教师可以提出以下问题让学生讨论："如果物体在一个方向上的分运动是匀速直线运动，在与它垂直方向的分运动是匀加速直线运动时，合运动的轨迹是什么样的?"

教师要根据学生的实际，把握好教学的难度。只求开个天窗，给部分学有余力的同学以启迪。

下面是一个分运动为匀速运动，另一分运动为匀加速运动情形下的轨迹方程的计算，供教师在教学中参考。

设物体在 x 方向上做匀速直线运动，速度为 v_{x0}；在 y 方向上做匀加速直线运动，初速度为 v_{y0}，加速度为 a。则

$$x=v_{x0}t$$

$$y=v_{y0}t+\frac{1}{2}at^2$$

整理得：

$$y=\frac{v_{y0}}{v_{x0}}x+\frac{a}{2v_{x0}^2}x^2$$

显然物体的轨迹是抛物线，即物体做曲线运动。

(3) 物体做曲线运动的条件

教科书通过实验演示来说明物体做曲线运动的条件。实验可分几步进行：让钢球从斜槽上滚下（用斜槽的目的是为了控制钢球运动的方向），它将在水平桌面上做直线运动；然后在斜槽的正前方放上条形磁铁，让钢球再次从斜槽上滚下，它仍然在水平桌面做直线运动，结合牛顿运动定律，分析物体做直线运动的条件。再做教科书中的实验，分析钢球的运动和受力情况，总结物体做曲线运动的条件。

建议教师教学时，在做好教科书提供的演示实验的基础上，还可以从理论层面来分析，以

加深学生的理解。当速度方向与受力方向不在同一直线时，可以将力分解为平行速度方向和与速度垂直的方向。根据牛顿第二定律，一个垂直于运动方向的分力使物体产生的加速度使物体在该方向上产生速度变化，从而改变物体原来的运动方向，做曲线运动。

教学中还可再做一个演示实验，如图 5-3 所示，一个小球在水平桌面上沿直线滚动，离开桌边后，小球做曲线运动。要求学生画出各点的速度方向，分析受力方向和加速度方向。

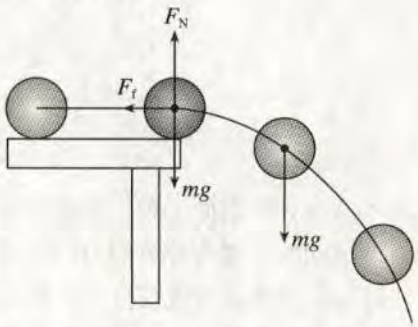


图 5-3

通过上述分析，可总结物体做曲线运动的条件是：物体所受合力的方向跟它的速度方向不在同一直线上。

建议教学时让学生分析前面提到的各种运动是否满足物体做曲线运动的条件。如电动车在细绳的作用下做曲线运动，链球在铁链的作用下做曲线运动，“歼十”飞机做曲线飞行，等等。

教科书设立“做一做”栏目，是让学生体会做曲线运动物体的速度方向与运动轨迹曲线的关系。体验往往是理解及记忆的基础。为达到充分体验的目的，可引导学生关注下列情况：节日里盛大的焰火表演时，观察一个火点的运动；观众看演出挥动荧光棒时，荧光点的运动；田径场上投出的标枪在空中划出优美的弧线；等等。

3. 问题与练习

内容分析

本节的 5 道习题覆盖了速度的方向（及其变化）、速度的合成与分解以及物体做曲线运动的条件等内容。其中 4 道习题需要作图，目的是训练学生把抽象问题形象化的能力。

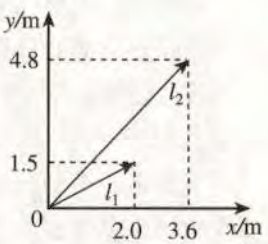


图 5-4

解答与说明

1. 质点两次位移的草图如图 5-4 所示。根据勾股定理和三角函数的定义可得：

$l_1=2.5$ m，$l_2=6.0$ m；$\theta_1=\arctan(3/4)$，$\theta_2=\arctan(4/3)$。

2. 根据题意，无风时跳伞员着地的速度为 v_2，风的作用使他获得向东的速度 v_1，落地速度 v 为 v_2、v_1 的合速度，如图 5-5 所示。

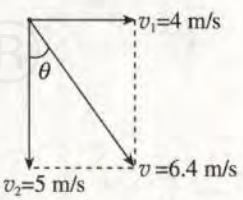


图 5-5

$$v=\sqrt{v_1^2+v_2^2}=\sqrt{4^2+5^2}\ \text{m/s}=6.4\ \text{m/s}$$

与竖直方向的夹角为 θ。

$$\tan\theta=0.8,\ \theta=38.7^\circ$$

说明：这个题的目的，是让学生体会在进行运动合成时，如何确定分运动。

3. 如图 5-6 所示，头部入水过程中速度方向如图中箭头所示。在 A、C 位置头部的速度与入水时速度 v 方向相同；在 B、D 位置头部的速度方向与入水时速度 v 方向相反。

说明：这个题的目的，是使学生了解生活中常见的曲线运动，及某点速度的方向。

4. 汽车行驶半周速度方向改变 180°；汽车每行驶 10 s，速度方向改变 30°，速度矢量示意图如图 5-7 所示。

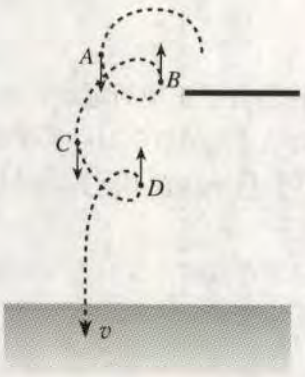


图 5-6

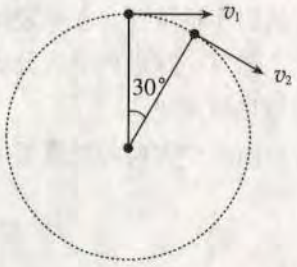


图 5-7

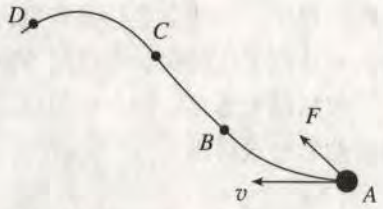


图 5-8

说明：这个题的目的，是让学生知道“物体在某点的速度方向即沿曲线在这一点的切线方向”，在此基础上，会求速度矢量的角度变化，为以后学习向心加速度作些铺垫。

5. 如图 5-8 所示，AB 段是曲线运动、BC 段是直线运动、CD 段是曲线运动。

说明：这个题的目的，是让学生学习运用物体的受力情况来判断物体的运动情况的方法。

第 2 节　平抛运动

1. 教学目标

(1) 知道什么是抛体运动，知道抛体运动是匀变速曲线运动，知道什么是平抛运动。

(2) 知道抛体运动的受力特点，会用运动的合成与分解的方法分析平抛运动。

(3) 理解平抛运动的规律，知道平抛运动的轨迹是一条抛物线。

(4) 知道分析一般抛体运动的方法——运动的合成与分解。

(5) 会确定平抛运动的速度。

2. 教材分析与教学建议

抛体运动是自然界常见的运动形式，本节先提出抛体运动以及平抛运动的概念，这两个概念并不是并列的，平抛运动是抛体运动的一个特例。教学时，建立了抛体运动概念后，平抛运动概念不需要从大量例子中归纳、抽象，只需说明平抛运动特定的条件即可。

在讨论抛体的位置、抛体的轨迹和抛体的速度等问题时，教科书以平抛运动作为一个典型案例，应用运动的合成与分解方法和牛顿第二定律确定抛体运动的位置和速度，并用数学方法得到轨迹方程，这是一种重视理论分析与演绎思维的方式，有利于培养学生用所学知识和方法解决实际问题的能力。

(1) 抛体运动概念的引入

无论是日常生活还是体育运动中，学生都有抛掷物体的经历，也有观察抛体运动的经历，也大概知道抛体运动的轨迹特点。因抛体运动在物理中是一个理想化的概念，在教学中需要教师引导学生把生活概念提升到物理概念。建议提出下面的问题：用手抛出的小钢球做什么运动？用手抛出的纸飞机又做什么运动？然后从受力与运动分析的角度比较两者的区别，在此基础上建立抛体运动的概念。在抛体运动概念建立之后，用分析抛体与平抛之间关系的方法建立

平抛概念。

（2）抛体的速度

问题的解决方法与解决问题的程序有很大的关联，好的操作程序隐含了正确的思维方式。教师的典型示范作用对于学生习得合理的程序很重要。在确定抛体运动速度的教学时必须明确操作的程序：①建立坐标系和坐标原点。②对小球进行受力分析。③分析小球在不同方向的加速度和速度变化情况。④得到不同方向的运动规律。

根据以上思路，用牛顿第二定律分析出两个方向的加速度情况，再在这两个方向上分别应用运动学公式得出

$$v_x = v_0$$

$$v_y = gt$$

与位移研究不同的是，速度的研究中讨论了合速度。合速度方向是个难点，学生容易与位移的方向混淆，因此教师在讲解教科书图 5.2-3 时，一定要在同一图中再画出位移的大小和夹角，以便学生区分两者的差异。

例题 1 是计算抛体速度的应用题，主要是注重规律的应用，教学时教师可以让学生讨论思路，列式求解，并一起总结解题步骤。

（3）抛体的位移

由于有抛体速度的研究为基础，教科书对抛体位移的研究遵循了同样的思路。这里可以让学生自己尝试进行分析。

教科书通过例题 2 推导轨迹方程，这一过程基本上是数学运算的过程，教学时不仅要体现数形结合，更要注重使学生从物理角度理解轨迹方程。为此，可提出如下问题：若初速度增大，轨迹形状将如何改变？若重力加速度减小，轨迹又将如何改变？

在讲完平抛运动的轨迹后，可通过实验或视频显示各种真实物体（水、排球等）做斜抛运动的轨迹，呈现图景，再抽象出模型，由物体的受力情况确定其运动情况。抛体运动发生在平面内，故需要在两个方向上分别做出受力分析，用运动的分解，求出这两个方向的初速度，再运用牛顿运动定律和运动学规律求出能描述斜抛物体的运动轨迹关系式。

“做一做”实验演示时，教科书提出了改变高度和打击力度的要求。这样做实验的目的是要学生认识抛体运动与相应高度自由落体运动的等时性规律。只有在任何高度抛出时，抛体运动与自由落体运动都“等时”，实验结果才具有此规律。实际上，改变小球距地面的高度的多次实验，其本质相当于自由落体与平抛运动对比实验的频闪照片。

若有条件，建议把“做一做”的实验用数码相机的连拍功能拍摄下来（一般的数码相机都有 1 s 连拍 15 或 25 张的功能），在屏幕上回放，学生是很信服的。

“说一说”栏目的两个问题，由于有一定的难度，建议不必在此处展开讨论，以免冲淡后面平抛运动速度的教学，这部分内容可作为学有余力学生的课后探究。

对于平抛运动规律应用的教学，应该通过提问、讨论等方式让学生理解下面两个问题。

· 飞行时间由竖直方向分运动即自由落体运动决定，因而飞行时间决定于高度，而与水平方向的分运动无关。也就是说无论以多大的水平速度抛出物体，只要高度相同，都将同时落地；水平飞行距离与水平初速度及飞行时间都有关系。

· 平抛物体在任一时刻的速度是它的两个分运动在这一时刻的速度的合成，它的大小和方向需要用平行四边形定则计算得出，它的方向是时刻变化的，平抛运动的速度不能直接套用匀变速直线运动的公式得出。

3. 问题与练习

内容分析

本节前 3 道习题均是应用类问题，有一定的计算要求，难度逐步递增。第 1 题是平抛运动的简单计算，目的是熟悉公式和基本解题思路。第 2 题则要求从较复杂的实际情形中建立平抛运动的模型，然后利用平抛运动规律予以解决。第 3 题是有一定探究味的设计性实验题，要求只用刻度尺测量平抛的初速度，让学生体会间接测量的思路和重要性。第 4 题有一定的开放性。

解答与说明

1. 由于水沿水平方向射出，故可根据管口距地面的高度算出水在空中运动的时间 t；再根据水落地的位置到管口的水平距离可以得到水离开管口时的速度 v，从而算出每秒从管口流出的水的体积 V。

水在竖直方向的位移 $h=\frac{1}{2}gt^2$，因此：

$$t=\sqrt{\frac{2h}{g}}=\sqrt{\frac{2\times1.8}{10}}\ \text{s}=0.6\ \text{s}$$

水流在水平方向的分速度即为水离开管口时的速度

$$v=\frac{0.9}{0.6}\ \text{m/s}=1.5\ \text{m/s}$$

每秒从管口流出的水的体积

$$V=Sv\times1\ \text{s}=2.0\times10^{-4}\times1.5\times1\ \text{m}^3=3\times10^{-4}\ \text{m}^3$$

2. 零件做平抛运动，在竖直方向位移为 $y=2.45\ \text{m}=\frac{1}{2}gt^2$

经历时间 $t=\sqrt{\frac{2y}{g}}=\sqrt{\frac{4.9}{9.8}}\ \text{s}=0.71\ \text{s}$

在水平方向位移 $x=vt=13.3\ \text{m}$

零件做平抛运动的初速度为

$$v=\frac{x}{t}=\frac{13.3}{0.71}\ \text{m/s}=18.7\ \text{m/s}=67.4\ \text{km/h}>60\ \text{km/h}$$

所以该车已经超速。

说明：本题的计算不难，难在较复杂的实际情景中，要看出是平抛运动的问题。

3. 让小球从斜面上某一位置 A 无初速释放；测量小球在地面上的落点 P 与桌子边沿的水平距离 x；测量小球在地面上的落点 P 与桌面的竖直距离 y。小球离开桌面的初速度为 $v=x\sqrt{\frac{g}{2y}}$。

4. (1) 物体在力 F 的作用下，在水平方向的加速度为 $a=\frac{F}{m}$，因此在时刻 t 的水平分速度为

$$v_x=at=\frac{Ft}{m}$$

在竖直方向受重力 mg 作用，在时刻 t 的竖直分速度为

$$v_y=gt$$

(2) 水平方向 $x=\frac{1}{2}at^2=\frac{1}{2}\frac{Ft^2}{m}$，竖直方向 $y=\frac{1}{2}gt^2$，由这两式可得

$$y=\frac{gm}{F}x$$

式中 gm/F 为一常数，因此物体运动轨迹为一直线。

第 3 节　实验：研究平抛运动

1. 教学目标

(1) 知道平抛运动的条件及相应控制方法。

(2) 知道用实验获得平抛运动轨迹的方法。

(3) 知道判断运动轨迹是否是抛物线的方法。

(4) 知道测量初速度时需要测量的物理量。

(5) 会推导平抛初速度的表达式，会计算平抛运动的初速度。

2. 教材分析与教学建议

教科书提供了三个参考方案来研究平抛运动。教学中各学校要根据自己的实际，选用其中一个参考方案进行实验。有条件的学校，可将参考方案 1 与 3 结合起来，参考方案 1 要求学生动手做，参考方案 3 教师可事先拍好照片或录像，在学生完成实验后展示，并让学生比较两者的联系与区别。

(1) 第一个参考案例利用了实践中比较成熟的描绘小球平抛运动的轨迹的实验装置。用铅笔试探描出小球经过的位置，可以使学生尝试到如何用简单的方法研究问题。用这种方法描绘小球位置误差可能要大一些，并需多次尝试才能较准确地确定小球运动的位置。

该实验中确定小球做平抛运动轨迹的方法，除了教科书中用铅笔尖确定小球的位置这一方法外，还可用下面几种方法。

①可以用较厚的纸片做成如图 5-9 所示的形状，卡片上的长方形孔的宽度 b 比小球的直径略大一些，孔中心的上方有一个小缺口 A。按图 5-10 所示的方法使用。

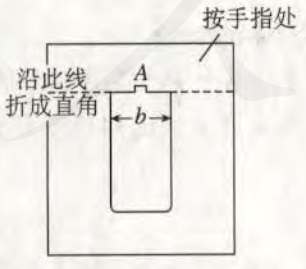


图 5-9　纸（或铁皮）卡片

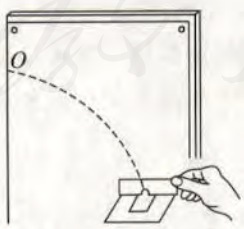


图 5-10

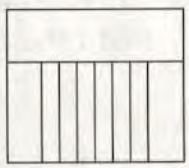


图 5-11

②按图 5-11 所示，将纸剪开，小球从剪开的窄纸片间通过时将窄纸片撞开，可确定小球位置。

③用图 5-12 所示装置，观察小球（目光平视）经过不同位置的坐标，然后用铅笔在该位

置画一个小圆圈记录这个位置。依次观察并记录小球经过的若干个纵坐标轴的位置。这种方法描点时比较方便、准确。

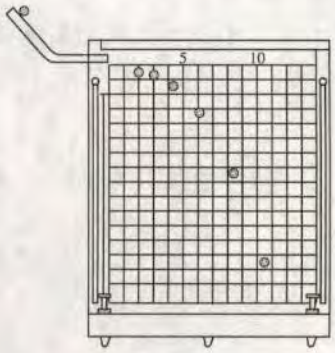


图 5-12

(2) 做第二个参考案例实验时要注意：

①用坐标纸做背景。坐标纸边长约为 30～35 cm，坐标格每边长取 2～3 cm，坐标格可以直接画在透明胶片上。

②水刚喷出时，水柱连续而且比较粗，逐渐变细又逐渐变成水珠，离喷出口越远水珠之间的距离越大。另外，由于空气阻力的作用，水柱的轨迹会逐渐偏离平抛曲线，在分析、处理轨迹时，要取离喷口较近的一段曲线。竖直位移在 6～7 cm 以内的三个相等时间间隔内，水平位移大致能保持相等。

③选用 2.5 L 的饮料瓶，出水管上接一段橡皮管，以增加水压提高水的喷出速度。喷口直径在 2～3 mm。如果喷口直径过小，水柱受空气影响大，而喷口直径过大，水压下降过快，使水的喷出速度减小得快，不能满足初速不变的条件。

④用碳素笔（或毛笔蘸墨）在胶片上点出 6 个以上的点。观察时目光要与喷出的水柱在同一水平面上。描点的速度要快些，以免水面下降过多，使水柱的轨迹发生变化。

(3) 做第三个参考案例的实验，一定要做好背景。可用数学教师专用的方格黑板做背景，数码相机可以用连拍功能也可以用摄像功能，根据照片上的小球位置，再在方格纸上画出小球的轨迹。

3. 问题与练习

内容分析

这三个问题实质上是探究平抛运动案例的补充或进一步思考，在习题反馈与教学中可提醒学生对比该方案与教科书正文方案的异同，以提高习题利用率，拓展学生的发散思维，收到一石双鸟之功效。

解答与说明

1. 还需要的器材是刻度尺。

实验步骤：

(1) 调节木板高度，使木板上表面与水平桌面的距离为某一确定值 y（图 5-13）；

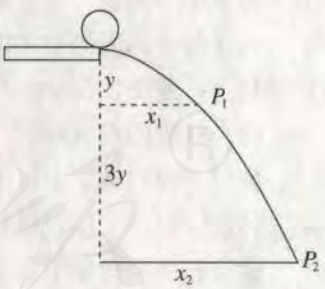


图 5-13

(2) 让小球从斜面上某一位置无初速释放；

(3) 测量小球在木板上的落点 P_1 与铅垂线之间的距离 x_1；

(4) 调节木板高度，使木板上表面与水平桌面的距离为某一确定值 $4y$；

(5) 让小球从斜面上同一位置无初速释放；

(6) 测量小球在木板上的落点 P_2 与铅垂线之间的距离 x_2；

(7) 比较 x_1、x_2，若 $2x_1=x_2$，则说明小球在水平方向做匀速直线运动。

2. 改变墙与铅垂线之间的距离 x，测量落点与抛出点之间的竖直距离 y，若 $2x_1=x_2$，有 $4y_1=y_2$，则说明小球在水平方向做匀速直线运动。

说明：上述二题实际上又提供了一个实验案例，教学中有必要对这些案例进行对比，找出思想方法上的异同，对提高实验能力大有好处。

3. 假设桌面离地高度 $h=0.8$ m，则根据 $h=\frac{1}{2}gt^2$ 可得，下落的时间

$$t=\sqrt{\frac{2h}{g}}=\sqrt{\frac{2\times 0.8}{10}}\ \text{s}=0.4\ \text{s}$$

每秒拍摄 15 帧照片，则 0.4 s 内可拍摄 6 帧。

第 4 节　圆周运动

1. 教学目标

(1) 知道什么是圆周运动，什么是匀速圆周运动。

(2) 知道线速度的物理意义、定义式、矢量性，知道匀速圆周运动线速度的特点。

(3) 知道角速度的物理意义、定义式及单位，了解转速和周期的意义。

(4) 掌握线速度和角速度的关系，掌握角速度与转速、周期的关系。

(5) 能在具体的情景中确定线速度和角速度与半径的关系。

2. 教材分析与教学建议

本节内容主要叙述了什么是匀速圆周运动，以及描述匀速圆周运动的线速度、角速度、周期等概念，研究了线速度与角速度的关系。对于匀速圆周运动的定义，教科书是在讲述了线速度概念后给出的，“如果物体沿着圆周运动，并且线速度的大小处处相等，这种运动叫做匀速圆周运动”这样表述比较严格。对于匀速圆周运动模型的理解，从教科书的叙述和给出的定义中，可以看出高中物理中的匀速圆周运动是质点运动模型，而不是物体（刚体）的转动模型。

本节内容概念多，需要说明的问题也比较多，教学时可以与描述直线运动的概念进行比较。教科书虽然只给出了线速度和角速度的定义式，建议教师可引导学生进一步推导匀速圆周运动情景下角速度、线速度与周期的关系。建议教师整理好教学目标，明确需要讲清的概念、关系和说明的问题，便于教学时有清晰的结构。

对于匀速圆周运动来说，用角速度、线速度与周期加以描述已经足够了，教师不要再引入其他概念，避免加深学生的负担。

(1) 认识圆周运动

教科书在列举了生活中的一些圆周运动情景后，通过观察自行车大齿轮、小齿轮、后轮的关联转动，提出了描述圆周运动的物体运动快慢的问题。

建议教师在教学中多展示一些物体的圆周运动情景，例如，唱片上某点的运动、电风扇叶片上某点的转动、竖直面内小球的圆周运动等等。以观察现象为基础，进一步引导学生认识物体运动的轨迹形状以及分析物体运动的特点。

教学时可引导学生讨论：你认为这些物体运动的快慢如何？你是怎么考虑的？

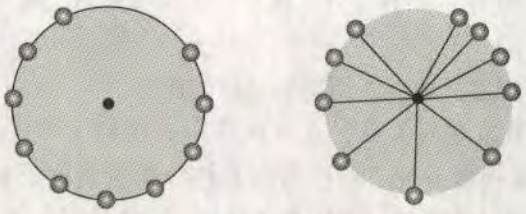
要回答这个问题，自然就引出了如何描述圆周运动物体运动的快慢的课题，可以接着让学生分组讨论，回答的结论大致应该是：

①通过确定物体单位时间通过的弧长，来描述质点运动的快慢；

②通过确定物体与圆心的连线在单位时间扫过的圆心角，来描述质点转动的快慢；

③通过确定物体运动一周所需的时间长短，来描述质点转动的快慢。

演示后可以展示这些运动的闪光照片（闪光的时间间隔相同）供学生比照，其示意图如图5-14所示。



唱片上某点的运动　　竖直面内小球的圆周运动

图 5-14

如果没有闪光照相设备，可以用数码照相机的摄像功能，甚至于可以用红色墨水等间隔滴在转盘上来演示。

（2）描述匀速圆周运动快慢的几个物理量

建议教学时可以设问：如何来比较物体做圆周运动的快慢。让学生经过讨论，形成以下四种猜想：

猜想1：比较物体在一段时间内通过的圆弧长短。

猜想2：比较物体在一段时间内半径转过的角度大小。

猜想3：比较物体转过一圈所用时间的多少。

猜想4：比较物体在一段时间内转过的圈数。

这四种猜想，自然就引出了描述圆周运动快慢的四个物理量。

通过确定物体单位时间通过的弧长，来描述质点运动的快慢，这种描述方式与直线运动定义速度的方式完全一样。教科书中也是采用与直线运动定义速度时一样的“手法”来定义线速度的。

这种定义方式，首先要考虑到如何测量弧长。同时，毕竟一个是直线运动速度的定义，一个是曲线运动速度的定义，教学中应该考虑到这个过渡。可以采用如图5-15所示的实验装置来分析圆周运动物体的线速度。该装置可以改变转盘的旋转快慢，通过打点计时器记录单位时间内质点通过的弧长。

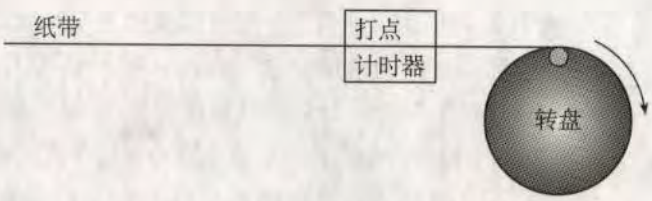


图 5-15

教学中可以先展示一条打好的纸带，让学生分析牵动纸带运动的物体的运动情况，这是学生在直线运动中学习过的知识和方法。然后告诉学生，这条纸带是通过如图5-15所示的实验装置打出来的，并现场操作，得到另一条纸带，让学生思考：

①纸带上相邻的点之间的距离反映了什么？

②纸带上相邻的点之间的距离不同说明了什么？

③随转盘转动的物体的运动方向能否通过纸带上的点反映出来？

这样就将直线运动定义速度的方式自然过渡到在圆周运动中定义线速度。

曲线运动的线速度跟直线运动的速度没有本质区别。只是在圆周运动这种特殊形式中，要描述物体的转动快慢，还可以通过半径转过角度的快慢（角速度）、周期等来描述，所以为了区别于角速度，将做圆周运动的物体的速度称为线速度。

在角速度概念引入前，要提醒学生，线速度就是描述质点做圆周运动快慢的物理量，但质点运动得快与转动得快不是一回事，所以要引入角速度的概念来描述质点转动的快慢。

角速度的教学可以参照线速度的教学方式进行，但须注意与位移对应的量是角度，单位需要用弧度表示。

根据猜想3和猜想4，很自然地引入周期和转速的概念。

教科书在“线速度与角速度的关系”这一内容中，指出了“线速度描述了做圆周运动的物体通过弧长的快慢，角速度描述了物体与圆心连线扫过角度的快慢。”这一表述对于学生理解线速度和角速度的意义很有用，是回答“自行车的大齿轮、小齿轮、后轮中质点都在做匀速圆周运动。哪些点运动得更快些?”这类问题的依据。

3. 问题与练习

内容分析

本节共5道习题，前3道题目的是使学生熟练掌握角速度与周期的关系以及角速度与线速度的关系；第4题则是综合题，涉及探究传动机构中的转动与直线运动的速度关系，需要学生有较强的建立模型的能力；第5题也是综合题，且要求建模能力更强。

解答与说明

1. 位于赤道和位于北京的两个物体随地球自转做匀速圆周运动的角速度相等，都是$\omega=\frac{2\pi}{T}=\frac{2\times3.14}{24\times3\,600}$ rad/s$=7.27\times10^{-5}$ rad/s。

位于赤道的物体随地球自转做匀速圆周运动的线速度 $v_1=\omega R=465.28$ m/s

位于北京的物体随地球自转做匀速圆周运动的线速度 $v_2=\omega R\cos 40^\circ=356.43$ m/s

说明：学生往往对做圆周运动的圆心位置的判断弄错，易与地球的球心位置混淆。

2. 分针的周期为 $T_1=1$ h，时针的周期为 $T_2=12$ h

(1) 分针与时针的角速度之比为 $\omega_1:\omega_2=T_2:T_1=12:1$

(2) 分针针尖与时针针尖的线速度之比为 $v_1:v_2=\omega_1 r_1:\omega_2 r_2=14.4:1$

说明：由于新学的公式较多，学生容易张冠李戴，要提醒学生一切从定义入手进行分析思考。

3. (1) A、B 两点线速度相等，角速度与半径成反比。

(2) A、C 两点角速度相等，线速度与半径成正比。

(3) B、C 两点半径相等，线速度与角速度成正比。

说明：该题的目的是让学生理解线速度、角速度、半径之间的关系式 $v=\omega r$；同时理解传动装置不打滑的物理意义是接触点之间线速度相等。

4. 如图5-16所示，需要测量 r_1、r_2、r_3。自行车前进的速度大小，$v=\frac{2\pi r_1}{Tr_2}r_3$

说明：本题的用意是让学生结合实际情况来理解匀速圆周运动以及传动装置之间线速度、角速度、半径之间的关系。但是，车轮上任意一点的运动都不是圆周运动，其轨迹都是滚轮线。所以在处理这个问题时，应该以轮轴为参照物，地面与轮接触而不打滑，所以地面向右运动的速度等于后轮上一点的线速度。

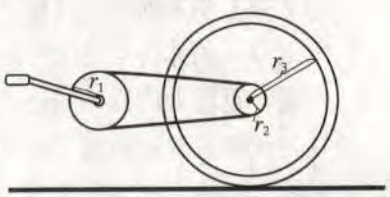


图5-16

5. 磁盘转动的周期为 $T=\frac{1}{120}$ s

扫描每个扇区的时间 $t=\frac{1}{8\ 192}T=1.0\times10^{-6}$ s

每个扇区的字节数为 512 个

1 s 内读取的字节数为 $\frac{512}{1.0\times10^{-6}}=5.12\times10^{8}$

说明：本题的用意是让学生结合实际情况来理解匀速圆周运动。

第 5 节　向心加速度

1. 教学目标

(1) 知道匀速圆周运动是变速运动，具有指向圆心的加速度——向心加速度。

(2) 知道向心加速度的表达式，能根据问题情景选择合适的向心加速度的表达式并会用来进行简单的计算。

(3) 会用矢量图表示速度变化量与速度之间的关系，理解加速度与速度、速度变化量的区别。

(4) 体会匀速圆周运动向心加速度方向的分析方法。

(5) 知道变速圆周运动的向心加速度的方向和加速度的公式。

2. 教材分析与教学建议

教科书对向心加速度的引入是从运动和力关系的讨论开始的。其基本思路是：如果物体不受力，它将做匀速直线运动⟶圆周运动不是直线运动，沿圆周运动的物体一定受力⟶匀速圆周运动的物体，受的力是什么方向⟶考虑实例：地球绕太阳，地球受到力的方向；细绳拉着小球在光滑水平面上做圆周运动，小球所受合力的方向⟶匀速圆周运动物体所受的合力指向圆心⟶物体的加速度也指向圆心⟶直接给出向心加速度的两种表达式。

教科书的叙述是运用牛顿第二定律，“从力推知加速度”的思路。这种叙述的好处是降低了教学的难度，用“迂回”的方法避开难点，使所有学生可以掌握向心加速的大小和方向。

对学有余力，并且对物理量之间的关系及推理的严谨特别关注的同学，“做一做”中的“探究向心加速度大小的表达式”为满足他们的需求开了“窗口”，这个“窗口”有利于学生了解在矢量状态下速度变化量与加速度之间的联系，有利于学生更透彻地理解圆周运动的加速度概念。

(1)“思考与讨论”

进行“思考与讨论”时，教学中可以增加一些生活中的实例。例如花样滑冰中的双人滑，在做如图 5-17 所示的动作时，女运动员在男运动员的拉力作用下，做匀速圆周运动；如图 5-1 所示的电动车在细绳的拉力作用下做匀速圆周运动；等等。

图 5-17

(2)“做一做”

教科书把理论分析向心加速度方向和推导向心加速度大小放在“做一做”栏目中，作为基础较好学生的发展要求。

如果要从运动学的角度来学习向心加速度，要注意化解难点。

首先要抓住要害，该要害就是“速度变化量”。因为加速度等于速度变化量 Δv 跟时间 Δt 的比值，运动时间 Δt 不会构成学生理解加速度的障碍，只要学生能对圆周运动的速度变化量 Δv 有所认识，向心加速度概念的建立也就完成了一大半。在分析匀速圆周运动的加速度方向时，可以先复习直线运动中的速度变化量的概念，再引伸到曲线运动中速度变化量的计算，要始终抓住速度变化量的方向在时间间隔很小时的变化趋势。建议分 4 步进行教学：第一步复习直线上的速度变化量方向；第二步复习不在同一直线上的速度变化量方向；第三步求质点作圆周运动时，在 Δt 时间间隔内的速度变化量方向。第四步 Δt 很小很小时，速度变化量与该点线速度垂直，指向圆心。

在直线运动中，物体具有的加速度为 $a=\frac{\Delta v}{\Delta t}$，那么在曲线运动中，物体的加速度定义依然如此，从速度的变化量入手，推导物体的加速度，具有一般性。

分析匀速圆周运动的加速度方向和大小，对不同的学生要求不同，这为学生提供了展现思维的舞台，因此，在教学中要注意教科书的这种开放性，不要“一刀切”。这部分内容也可以以小组讨论的方式进行，然后由学生代表阐述自己的推理过程。但一定要注意这仅是拓展，不是必须掌握的内容。

(3)“思考与讨论”栏目

本节结尾部分的“思考与讨论”栏目，旨在使同学正确认识向心加速度公式的两种表达式 $a_n=\frac{v^2}{r}$ 和 $a_n=\omega^2 r$ 的物理意义，在利用这两个公式比较两个做匀速圆周运动的物体的向心加速度的大小时，知道当线速度 v 相等时，向心加速度与轨迹半径成反比；当角速度 ω 相等时，向心加速度与轨迹半径成正比。

3. 问题与练习

内容分析

本节配置的 4 道习题是这样考虑的：第 1 题是帮助理解向心加速度公式，第 2、4 题是学会用公式简单计算；第 3 题是在实际情景中求解向心加速度。

解答与说明

1. A. 甲、乙线速度相等时，利用 $a_n=\frac{v^2}{r}$，半径小的向心加速度大。所以乙的向心加速度大。

B. 甲、乙周期相等时，利用 $a_n=\frac{4\pi^2}{T^2}r$，半径大的向心加速度大。所以甲的向心加速度大。

C. 甲、乙角速度相等时，利用 $a_n=v\omega$，线速度大的向心加速度大。所以乙的向心加速度小。

D. 甲、乙线速度相等时，利用 $a_n=v\omega$，角速度大的向心加速度大。由于在相等时间内甲与圆心的连线扫过的角度比乙大，所以甲的角速度大，甲的向心加速度大。

说明：本题的目的是让同学们理解做匀速圆周运动的物体的向心加速度的不同表达式的物理意义。

2. 月球公转周期为 $T=27.3\times24\times3\ 600\ \text{s}=2.36\times10^6\ \text{s}$

月球公转的向心加速度为

$$a_n=\omega^2 r=\frac{4\pi^2}{T^2}r$$

$$=\left(\frac{2\times 3.14}{2.36\times 10^6}\right)^2\times 3.84\times 10^5\ \mathrm{km/s^2}$$

$$=2.7\times 10^{-3}\ \mathrm{m/s^2}$$

3. (1) 由于皮带与两轮之间不发生滑动，所以两轮边缘上各点的线速度大小相等，设电动机皮带轮与机器皮带轮边缘上质点的线速度大小分别为 v_1、v_2，角速度大小分别 ω_1、ω_2，边缘上质点运动的半径分别为 r_1、r_2，则

$$v_1=v_2 \qquad v_1=\omega_1 r_1 \qquad v_2=\omega_2 r_2$$

又 $$\omega=2\pi n$$

所以 $$n_1:n_2=\omega_1:\omega_2=r_2:r_1=3:1$$

(2) A 点的向心加速度为

$$a_{nA}=\omega_2^2\times\frac{r_2}{2}=0.10\times\frac{1}{2}\ \mathrm{m/s^2}=0.05\ \mathrm{m/s^2}$$

(3) 电动机皮带轮边缘上质点的向心加速度为

$$a_n=\frac{v_1^2}{r_1}=\frac{v_2^2}{r_2}\cdot\frac{r_2}{r_1}$$

$$=0.10\times 3\ \mathrm{m/s^2}$$

$$=0.30\ \mathrm{m/s^2}$$

说明：皮带传动问题是个难点，学生往往对传动机构中哪个量相等模糊不清，本题就是为了解决这困难而设置的。

4. A、B 两艘快艇做匀速圆周运动，由于在相等时间内，它们通过的路程之比是4∶3，所以它们的线速度之比为 4∶3；由于在相等时间内，它们运动方向改变的角度之比是3∶2，所以它们的角速度之比为 3∶2。

由于向心加速度 $a_n=v\omega$，所以它们的向心加速度之比为 2∶1。

说明：本题的用意是让学生理解向心加速度与线速度和角速度的关系 $a_n=v\omega$。

第 6 节　向心力

1. 教学目标

(1) 了解向心力概念，知道向心力是根据力的效果命名的。

(2) 体验向心力的存在，会分析向心力的来源。

(3) 掌握向心力的表达式，计算简单情景中的向心力。

(4) 从牛顿第二定律角度理解向心力表达式。

(5) 初步了解“用圆锥摆粗略验证向心力的表达式”的原理。

(6) 会测量、分析实验数据，获得实验结论。

2. 教材分析与教学建议

本节首先根据牛顿第二定律和向心加速度表达式得到向心力的表达式，定义向心力概念，

讨论向心力性质和特点。对推出的向心力表达式用圆锥摆实验来验证，最后分析变速圆周运动和一般的曲线运动中的物体的受力情况和处理办法。

(1) 向心力

向心力的教学是循着先进行理论分析，再进行实验验证的顺序。从理论角度出发，根据牛顿第二运动定律，就可以得出做匀速圆周运动的物体受到的合外力的方向和大小，即向心力的方向和大小。建议教师在完成上述工作后，能够向学生指出，圆周运动中力与运动的关系，遵守的仍然是牛顿运动定律。

教科书为了让学生对向心力有一个感性认识，设计了“实验”栏目——“用圆锥摆验证向心力的表达式”。

本实验尽量使用通用器材而不是专用器材来做。如果能用生活中常见的物品来做就更好。这样做的好处是：一方面可以减少由于器材引起的困难，确保实验的开展。另一方面，用生活中常见的物品做实验会拉近科学与学生的距离，使学生感到科学就在我身边，对科学产生亲近感。

本书没有采用向心力演示器，因为条件的限制，向心力演示器不能做学生实验。用圆锥摆来验证向心力的表达式，很容易让学生分组实验。这个实验的优点除了器材易得外，摆球受力的分析方法也是以后常用的，熟练掌握有利于后面的学习。这个实验的难点在于不易保持摆球的圆周运动，但由于是估测，小球能转一两圈也就可以了。

学生通过圆锥摆的实验后，很容易理解向心力是按效果命名的，是由其他性质的力提供的；当然圆锥摆实验中的向心力方向时时不同，是由不同方向的绳子拉力和重力合成后提供的。由于拉力是不同方向的，作为初次分析向心力来说难度较大，会影响向心力与哪些因素有关的教学主线。教学中强调拉力沿绳方向，不过分强调拉力的不同方向，也能减小些学生理解的难度。就这一点来说，使用向心力演示器还是有优点的。

(2) 变速圆周运动和一般曲线运动

这部分内容的目的，是要学生在更一般、更广阔的背景下认识圆周运动和曲线运动。建议教师在这部分内容教学时，把握好难度。例如，分析一般情况下的变速圆周运动的问题时，尽管提到切向分力和法向分力，并不要求学生掌握这些概念；教科书提到一般曲线运动的研究方法，目的是让学生开阔视野，教学中不必进行定量研究。

(3)“做一做”

“做一做”栏目的内容，是要学生获得向心力大小跟物体做圆周运动半径大小关系的体验。做好教科书中的“抡绳子调节沙袋速度的大小”实验是引入讨论的关键。

用 1 m 左右的绳子拴一个沙袋，转动半径为 40 cm、80 cm，因直径大显得不方便。可以将转动半径改为 20～30 cm，沙袋质量适当取大一些。在同一半径转动时可以越转越快，从慢到快的过程中体会绳子对手的拉力变化。实验时要在空旷处进行，注意安全，不要碰到别人。

若上述实验时间安排上有困难，也可播放教参所附送的链球运动员投掷时的录像，在学生仔细观察后，再思考为什么绳子（链子）牵引沙袋（链球）的方向并不与沙袋（链球）运动的方向垂直？带着这个疑问，再引导学生分析教科书图 5.7-5 中物体的受力情况，依据牛顿第二定律，学生会对变速圆周运动有个透彻的理解。

本“做一做”栏目可以让学生在课外完成。这是个构思与设计都很好，便于学生操作的体验性的实验。通过体验，学生获得直接的感性认识，对正确的物理直观思维的形成大有裨益，教师要鼓励学生尝试；另外，也应该让学生体会该实验操作设计中富含的思想方法。

3. 问题与练习

内容分析

本节5道习题，几乎涵盖了向心力概念的各个层面，第1题的作用是引用公式直接计算；第2、3题是研究各种力充当向心力时，力与运动的关系；第4题是变速圆周运动中最低点的情形；第5题是定性研究变速圆周运动中的合力方向问题。

解答与说明

1. 由于地球在太阳的引力作用下做匀速圆周运动，设引力为 F；

地球运动周期为 $T=365\times24\times3\ 600\ \text{s}=3.15\times10^7\ \text{s}$。

根据牛顿第二定律得

$$F=m\frac{4\pi^2}{T^2}r$$

$$=6.0\times10^{24}\times\frac{4\times(3.14)^2}{(3.15\times10^7)^2}\times1.5\times10^{11}\ \text{N}$$

$$=3.58\times10^{22}\ \text{N}$$

说明：本题的目的是让学生理解向心力的产生，同时为下一章知识做准备。

2. 小球在漏斗壁上的受力如图5-18所示。

小球所受重力 G、漏斗壁对小球的支持力 F_N 的合力提供了小球做圆周运动的向心力。

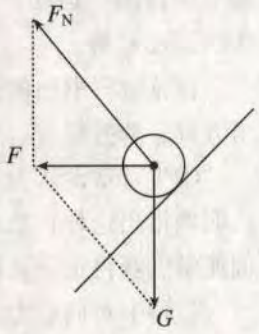


图5-18

3. (1) 根据牛顿第二定律得

$$F=m\omega^2r=0.1\times4^2\times0.1\ \text{N}=0.16\ \text{N}$$

(2) 甲的意见是正确的。

静摩擦力的方向与物体相对接触面运动的趋势方向相反。小物体在随转盘匀速转动的过程中，相对转盘有沿半径向外的运动趋势。

说明：本题的目的是让学生综合运用做匀速圆周运动的物体的受力和运动之间的关系。

4. 设小球的质量为 m，钉子A与小球的距离为 r。小球从一定高度下落的过程中，势能转化为动能，在此过程中机械能守恒，通过最低点的速度为定值，设为 v。小球通过最低点时做半径为 r 的圆周运动，绳子的拉力 F_T 和重力 G 的合力提供了向心力，即：

$$F_T-G=m\frac{v^2}{r}$$

得

$$F_T=G+m\frac{v^2}{r}$$

在 G，m，v 一定的情况下，r 越小，F_T 越大，即绳子承受的拉力越大，绳子越容易断。

5. 汽车在行驶中速度越来越小，所以汽车在轨迹的切线方向做减速运动，切线方向所受合外力方向如图 F_t 所示；同时汽车做曲线运动，必有向心加速度，向心力如图5-19中的 F_n 所示。汽车所受合外力 F 为 F_t、F_n 的合力，如图5-19中的 F 所示。丙图正确。

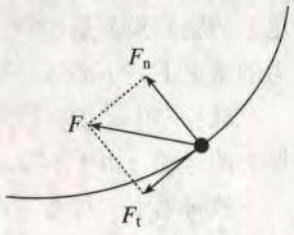


图5-19

说明：本题的意图是让学生理解做一般曲线运动的物体的受力情况。

第 7 节　生活中的圆周运动

1. 教学目标

(1) 能定性分析火车外轨比内轨高的原因。

(2) 能定量分析汽车过拱形桥最高点和凹形桥最低点的压力问题。

(3) 知道航天器中的失重现象的本质。

(4) 知道离心运动及其产生的条件，了解离心运动的应用和防止。

(5) 会用牛顿第二定律分析圆周运动。

(6) 进一步领会力与物体的惯性对物体运动状态变化所起的作用。

2. 教材分析与教学建议

本节是圆周运动的应用课，内容丰富。教材中的每个例子的选择都各有特点，很有代表性：铁路的弯道用来分析水平面上的匀速圆周运动；拱形桥和凹形桥用来分析竖直面上的非匀速圆周运动；航天器中的失重现象研究失重问题；离心运动则研究向心力不足时物体的运动趋势。

讨论教科书中的这几个实例时，要抓住这样的基本思想，即先分析物体所受的力，然后列出方程、解方程。

学生常常误认为向心力是一种特殊的力，是做匀速圆周运动的物体另外受到的力。教科书中明确指出这种看法是错误的，以及如何正确认识向心力的来源。教学中应注意通过多分析实例使学生获得正确认识。

教科书对向心力的来源分析比较仔细，希望教学中也充分注意这一点。还要让学生明确：这里的分析和计算所依据的仍是普遍的运动规律——牛顿第二定律，只是这里的加速度是向心加速度。

(1) 铁路的弯道

这是水平面上的圆周运动问题，难点有二个：一是哪些力提供向心力，二是圆心在何处。建议教学时先播放教科书所附的火车转弯视频，分析受力情况，再用牛顿第二定律建立方程。对基础好的学生，还可以从火车速度变大或变小方面予以拓展。

(2) 拱形桥

教科书分析汽车（代表物体）通过拱桥（凸形桥和凹形桥）顶点（最高点和最低点）时的力、速度、加速度的问题。汽车通过拱桥的运动过程是变速圆周运动，这里只分析车过顶点时的情况（这时汽车受的合外力在一条直线上，全部用来提供向心力）。这一问题虽然与“水流星”的物理模型是相同的，但对汽车这一实物，学生接受起来相对容易一些。在先分析物体受力的情况下，不必区分拱形桥和凹形桥。

教科书中“说一说”的扩展性内容，目的仍是使学生在更广阔、更一般的背景下认识拱形桥上的运动。由于不要求定量的分析，让学生想一想、说一说是有好处的。

教科书中“思考与讨论”目的是鼓励学生展开幻想的翅膀，把拱形桥的物理图景进一步推广，可让学生体会物理模型的奇妙——它只抓住最本质的内核问题。本“思考与讨论”也是为下面的学习做准备的。

(3) 航天器中的失重现象

超重和失重现象的讨论在教科书被分成了两部分，一部分放在牛顿定律的运用中（物理必修1），另一部分放在本书生活中的圆周运动这一节。必修1讲述的超重与失重，问题情景主要是地面及地面附近物体做直线运动，本书讲述的失重是做匀速圆周运动的航天器内。无论是哪种情况，解决问题的思路仍然是运动和力的分析，是牛顿第二定律的应用。研究航天器中的失重现象是个难点，建议播放航天员的生活与活动录像，首先了解现象，再对现象进行分析和讨论。

(4) 离心运动

离心运动是惯性的一种表现。由于学生生活中都经历过这种运动，所以认识这种运动并不困难，困难的是如何用科学的概念和术语解释离心运动现象。学生用生活语言分析离心现象时，经常将惯性也当成力，学生学习了圆周运动的条件后，通过受力分析方法和牛顿第二定律是完全有可能将这一问题分析清楚的。建议教师准备一些学生熟悉的离心运动情景，让某一个学生分析，其他同学纠正该同学不正确或不确切的说法，培养学生运用概念、规律解释现象和问题的能力，这种做法有利于提升学生的物理素养。

3. 问题与练习

内容分析

本节4个问题都是建立在生产、生活情景中的有关圆周运动的应用题，第1题是求向心力大小；第2题研究水平面上汽车所受的最大静摩擦力足够防止它侧滑否；第3、4题是研究竖直平面上做变速圆周运动的物体在最高点或最低点的受力问题。

解答与说明

1. 小螺丝钉做匀速圆周运动所需要的向心力 F 由转盘提供，根据牛顿第三定律，小螺丝钉将给转盘向外的作用力，转盘在这个力的作用下，将对转轴产生作用力，大小也是 F。

$$F=m\omega^2 r=m(2\pi n)^2 r=0.01\times(2\times3.14\times1\,000)^2\times0.2\ \text{N}$$
$$=78\,876.8\ \text{N}$$

说明：本题的意图在于让学生联系生活实际，理解匀速圆周运动。

2. 解这个题有两种思路。

第一种：假设汽车不发生侧滑，由于静摩擦力提供的向心力，向心力应有最大值，根据牛顿第二定律得 $F=ma=m\dfrac{v^2}{r}$，所以一定对应有最大拐弯速度，设为 v_m，则

$$v_m=\sqrt{\frac{F_{fm}r}{m}}=\sqrt{\frac{1.4\times10^4\times50}{2.0\times10^3}}\ \text{m/s}=18.71\ \text{m/s}=67.35\ \text{km/h}<72\ \text{km/h}$$

所以，如果汽车以72 km/h的速度拐弯时，将会发生侧滑。

第二种：假设汽车以72 km/h的速度拐弯时，不发生侧滑，所需向心力为 F，

$$F=m\frac{v^2}{r}=2.0\times10^3\times\frac{20^2}{50}\ \text{N}=1.6\times10^4\ \text{N}>1.4\times10^4\ \text{N}$$

所以，当静摩擦力不足以提供相应的向心力时，汽车以72 km/h的速度拐弯时，将会发生侧滑。

说明：这两种思路都是常见的研究临界问题的方法，要提醒学生解题时务必预先假设条件，再求解来说明。

3. (1) 汽车在桥顶部做圆周运动，重力 G 和支持力 F_N 的合力提供向心力，即

$$G-F_N=m\frac{v^2}{r}$$

汽车所受支持力 $F_N=G-m\frac{v^2}{r}=\left(800\times9.8-800\times\frac{5^2}{50}\right)$ N=7 440 N

根据牛顿第三定律得，汽车对桥顶的压力大小也是 7 440 N。

(2) 根据题意，当汽车对桥顶没有压力时，即 $F_N=0$，对应的速度为 v，

$$v=\sqrt{\frac{Gr}{m}}=\sqrt{\frac{800\times9.8\times50}{800}}\ \text{m/s}=22.1\ \text{m/s}=79.6\ \text{km/h}$$

(3) 汽车在桥顶部做圆周运动，重力 G 和支持力 F_N 的合力提供向心力，即

$$G-F_N=m\frac{v^2}{r}$$

汽车所受支持力 $F_N=G-m\frac{v^2}{r}$，对于相同的行驶速度，拱桥圆弧半径越大，桥面所受压力越大，汽车行驶越安全。

(4) 根据第二问的结论，对应的速度为 v_0，

$$v_0=\sqrt{\frac{GR}{m}}=\sqrt{\frac{800\times9.8\times6\ 400\times10^3}{800}}\ \text{m/s}=7.9\times10^3\ \text{m/s}=7.9\ \text{km/s}$$

说明："腾空"就是物理中的"压力为 0"。这是本题的难点，也是学生在学习中很困惑之处，教师一定要在教学中细致分析，逐步过渡，使学生能自如应用。

4. 小孩在重力 G 和秋千板的支持力 F_N 的作用下做圆周运动。在最低点有

$$F_N-G=m\frac{v^2}{r}$$

代入数据解得 $F_N=500$ N。小孩对秋千板的压力与秋千板对她的支持力大小相等，也是 500 N，方向竖直向下。

三、教学设计案例

曲线运动

【教学目标】

1. 知道什么是曲线运动。
2. 知道曲线运动的速度方向，理解曲线运动是一种变速运动。
3. 知道物体做曲线运动的条件。
4. 体验曲线运动速度方向的探究过程，领会过程中的分析方法。
5. 关注生活现象，领略曲线运动知识与日常生活的紧密联系。

【教具准备】

实物投影仪，白色铁板，小钢球（鼠标球），磁性橡胶条，自制锅盖，条形强磁铁，斜面轨道，自制课件等。

【教学过程】

·引入新课

我们已经学过物体的多种运动形式，如匀速直线运动、匀加速直线运动、匀减速直线运动、$v_0=0$ 的匀加速直线运动……这些运动的轨迹都是直线。

下面请大家仔细观察一片树叶下落的运动。

（演示：树叶沿曲线飘落而下）

教师指出，像这种运动轨迹是曲线的运动就是曲线运动。

你还能举出一些生活中和自然界中的物体做曲线运动的例子来吗？

（学生讨论、交流）

播放视频实例：绕地飞行的人造卫星，扔出去的铅球，踢出去的“香蕉球”等。

教师小结：曲线运动比直线运动更具有广泛性和普遍性，从这节课开始，我们就一起来研究曲线运动。

设计思考：本节课是在学生学习了直线运动的相关知识后，第一次正式接触曲线运动的概念。教学中注意联系学生的生活经验，列举大量的曲线运动实例，这将有助于激发学生的兴趣，并为本课题学习提供了必要的感性材料。

·进行新课

1. 曲线运动的速度方向

① 提出问题：

物体做如图 5-20 所示的曲线运动，依次经过 A、B、C 三点，在这三点速度的方向如何？

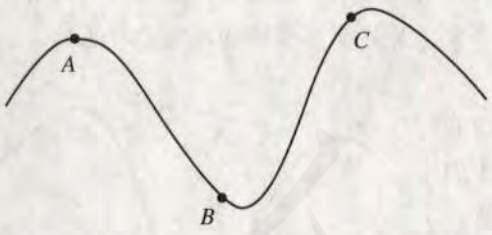


图 5-20

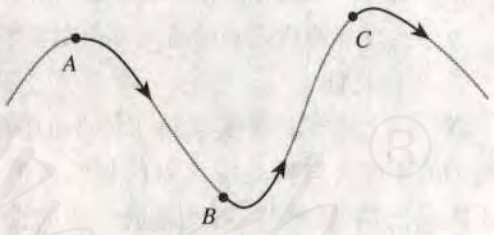


图 5-21

有位同学作了如图 5-21 所示的速度方向，对不对？为什么？（课件分步呈现问题）

设计思考：强调曲线运动之“曲”。曲是轨迹之曲，而非速度之曲。做曲线运动时，轨迹上的每一点都是物体实际经过的，运动的轨迹上每一点的速度都有方向，因此每一点的速度是确定的，唯一的，是不会变化的。

教师：那么图 5-20 中 A、B、C 点的速度方向又应该是怎样的呢？

学生：可能沿切线方向。

教师：你为什么会这么想？

学生：下雨天转动雨伞时，可以看到雨水好像是沿切线飞出的；砂轮打磨刀具时溅出的火

星也是沿切线飞出的。

教师：很好，善于观察生活中的现象。但这些现象稍纵即逝，不便于我们研究问题。我们可以用易于控制的现象来研究。

② 实验演示：

演示 1（投影放大）：

在光滑的铁板上，吸住几段由磁性橡胶接成的曲线轨道（图 5-22）。蘸有红墨水的鼠标球紧贴轨道运动，沿切线滚出，然后做直线运动；

拿掉一段轨道后，重复这一实验，小球又从另一点沿切线滚出；

再拿掉一段轨道 ……

图 5-22 所示的就是小球在轨道的不同出口滚出点滚出以及后续运动留下的轨迹。

教师：这个实验演示了小球从几个不同位置滚出去的情况，那么小球在其他各点情况又如何呢？

演示 2（自制锅盖）

锅盖周边镶上海绵，边缘有很多密集小孔，先让海绵吸上红墨水，让锅盖在白纸上快速转动，白纸上留下红墨水滴沿切线飞出的痕迹（图 5-23）。

图 5-22

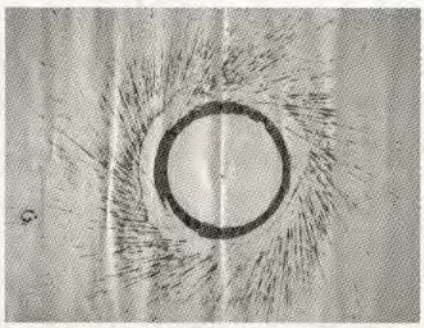


图 5-23

实验说明，做曲线运动的物体脱离曲线后沿切线方向飞出做直线运动。

设计思考：这两个演示实验教具制作简单，操作方便，效果十分明显。这些鲜明的实验现象，为学生理解曲线运动的速度方向积累了清晰的事实，为建立正确的物理图景打基础。

③ 推理论证

教师：上述实验事实支持了同学们的猜想，即曲线运动的速度方向就是沿该点的切线方向。那么我们能不能用已学的知识，对此做进一步的论证呢？请以图 5-24 中 A 点为例，说说你的想法。

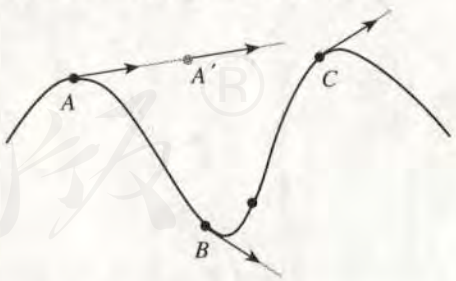


图 5-24

学生：如果忽略摩擦阻力，根据牛顿第一定律，小球从 A 点飞出后，将沿该点的切线做匀速直线运动，其速度的方向都在同一直线上。而 A 点就是这个匀速运动的起点，因此 A 点的速度就一定沿切线方向。

要求学生画出图 5-24 中 A、B、C 三点的速度方向。

设计思考：在这里，教师并不是从几个有限的实验事实出发，就急于给出关于曲线运动速度方向的定论，而是引导学生运用已学的知识，尝试更具一般性的推理论证。这样既可训练学生的逻辑思维能力，也有助于培养严谨求实的科学态度。

④ 思考练习

图 5-25 为一辆未安装好的自行车，请画出前、后轮上各点在正常行驶时，相对于骑车人的速度方向，并为该自行车设计安装挡泥板。

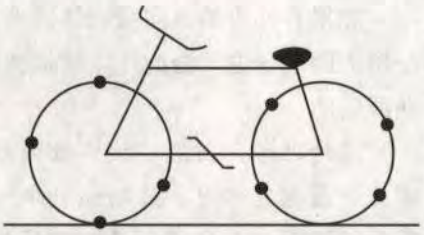


图 5-25

（展示自行车实物，由学生设计方案教师点评）

2. 曲线运动的性质

① 提出问题

如果一个物体保持速度大小不变，沿图 5-20 的轨迹所做的曲线运动，是匀速运动吗？

② 学生分析

不是，因为曲线运动的速度方向随时在变，而速度又是矢量，只要速度的方向改变就表示速度发生了变化。所以曲线运动一定是变速运动。

③ 播放视频

荡秋千的女孩，被扔出去的铅球，其速度方向随时在变化，因而都是曲线运动。

3. 物体做曲线运动的条件

① 提出问题

教师：物体在有的情况下做直线运动，有的情况下做曲线运动。你认为物体做曲线运动的条件是什么呢？

学生（猜想）：可能与物体受不受外力有关系。

教师（追问）：匀加速直线运动的物体不也是受力的吗？

学生：还可能与物体的速度方向有关。

教师：究竟与这些因素有没有关系？有什么关系？我们通过实验来探究。

② 实验探究

两人一组，提供的器材有：一块磁铁，一个小钢球和一个斜面轨道。让学生讨论方案、进行实验操作、观察分析，教师巡回点拨，指导探究。

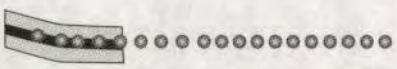


图 5-26

图 5-27

实验中观察到的现象如图 5-26 和图 5-27 所示。

③ 实验结论

（由学生交流、补充，教师归纳并板书）

当物体所受的合外力为零或合外力的方向跟它的速度方向同在一条直线上时，物体做直线运动。

当物体所受的合外力的方向跟它的速度方向不在一条直线上时，物体做曲线运动。

④ 理论分析

对于这个实验中得到的结论，能否从理论角度来进一步分析和理解呢？

引导学生回答：

如果合外力的方向跟物体速度方向在同一直线上，产生的加速度的方向也在这条直线上，

加速度只改变速度的大小而不改变速度方向，物体将做直线运动。

如果合外力的方向跟物体速度方向不在同一条直线上，而成一定角度时，可将力 F 正交分解为两个分力，由此产生的加速度既可以改变速度大小，还可以改变速度的方向，物体就做曲线运动。

设计思考：围绕“物体做曲线运动的条件”这个问题，教师不是一味讲授，而是组织学生开展探究学习，鼓励和引导他们主动参与猜想假设、方案设计、实验操作、观察分析等学习活动，最终得到了预期的结论。学生不仅加深了对知识的理解，也从中获得了成功的体验。

·巩固应用

让学生分析并解释前面视频中的实例，如扔出去的铅球、绕地飞行的人造卫星等，说明为什么这些物体做曲线运动。

4. 布置作业

① 阅读本节课文，明确曲线运动的速度方向和物体做曲线运动的条件。

② 动手做一做：完成教科书本节的“指向飞镖”制作和相关实验，体会曲线运动的速度方向与曲线轨迹的关系。

③ 把课本本节的“问题与练习”中的 1、2 和 3 题做在练习本上。

【板书设计】

曲线运动
- 速度方向：沿曲线，在该点的切线方向
- 运动性质：变速运动
- 产生条件：$F_{合}$ 与 v 方向不在同一直线上

曲线运动
- F 与 v_0 不在同一直线上（不共线）（参见图5-28）
- F_1 改变 v 的大小
- F_2 改变 v 的方向

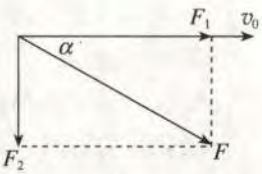


图 5-28

（浙江省义乌中学　陈军）

四、教学资源库

（一）概念、规律和背景资料

1. 关于运动独立性原理的辨析

（1）问题的提出

在平抛物体运动的教学中，通常要演示平抛物体和自由落体同时落地的现象，说明水平运动不影响竖直运动，进一步分析说明平抛物体运动可看成水平方向的匀速直线运动和竖直方向的自由落体运动的合运动，并指出平抛物体水平方向的匀速运动与竖直方向的匀加速运动互不影响。一般还指出，把一个复杂的曲线运动分解为几个简单的直线运动的叠加，这是研究曲线运动的基本方法。对斜抛物体运动，则分解为水平方向的匀速直线运动和竖直方向的匀变速直

线运动，然后把它们叠加起来研究。于是用这种运动分解、合成法进一步引导学生分析一系列较复杂的运动，在这过程中说明根据问题具体情况选取两个适当的方向，将物体的运动分解为两个分运动时，每个分运动遵循自身的规律。在这里特别强调两个分运动之间互不影响、具有独立性，在学生头脑中逐步形成了“任一运动过程的两个分运动之间均具有独立性”的深刻印象。有的教师还概括地提出“运动的独立性原理”，认为这是物理学的基本原理，是研究物体复杂运动的基础。在物理教学杂志、辅导书、高考复习书中，越来越多地使用“运动独立性原理”的提法。

在一些教师用的教学参考书或一些中级辞典中也看到，介绍力的独立作用原理之后，明确提出“运动独立性原理”，并将其列为一条与力的独立作用原理类似的普遍原则和普遍规律，这些叙述有：

“一个物体同时参加两个或更多的运动，这些运动都具有独立性，其中的任一运动并不因为有另一个运动的存在而有所改变，合运动就是这些互相独立的运动的叠加，这就是运动的独立性原理或运动的叠加原理。”

“任何一个复杂的运动都可以看作是几个独立进行的分运动的合运动，这叫做运动的独立性原理。”

“一个物理系统若参与多个运动或受到多个力的作用，那么任何一个运动或作用，都不会因为其他运动或作用的是否发生或存在而受到影响，即它们彼此是各自独立的，这就称为运动或力的独立作用原理，亦称为独立性原理。”

“独立作用原理是运动的合成和分解、力的合成和分解的基础。”

但是，在一些大学教材，例如赵凯华、罗蔚茵的《新概念物理教程·力学》中并没有“运动独立性原理”的提法。在《力学辞典》（中国大百科出版社）中，有力的独立作用原理，没有“运动独立性原理”。在中国大百科全书的《物理学》卷和《力学》卷中，我们也只看到有力的独立作用原理，没有“运动独立性原理”的提法。

这就使我们提出问题：是否存在“运动独立性原理”，用它可以作为研究物体复杂运动的基础？“运动独立性原理”是不是力的独立作用原理的一个必然的推论？它是否是研究物体复杂运动的基础？

（2）分运动是否普遍具有独立性

我们先举例作一些对比分析，再讨论一般情况。

①有空气阻力时的抛体运动

物体在地面附近的空间中做抛体运动时，所受重力可认为是一恒力。除重力外物体还受空气阻力和浮力作用，通常可忽略空气浮力，但空气阻力一般都不能忽略。空气阻力的特点是力的方向始终与物体的速度方向相反，其大小与物体的速度大小、形状、表面情况、空气密度等有关，一般可认为空气阻力 $\boldsymbol{F}_l$ 是物体速度的函数

$$\boldsymbol{F}_l=-kf(v)\frac{\boldsymbol{v}}{v} \tag{1}$$

高中物理教材中定量讨论抛体运动时，不计空气阻力，实际是研究抛体在真空中的运动。我们现在讨论有空气阻力时物体的斜下抛运动，选取的坐标系为：物体的抛出点为坐标原点，水平轴为 x 轴，x 轴与物体初速 v_0 在竖直面内，x 轴正向与 v_0 方向的夹角小于 $\frac{\pi}{2}$，竖直轴为 y 轴，y 轴正向竖直向下。我们把物体的斜下抛运动分解为 x 方向和 y 方向的两个分运动来研究。

先考虑物体运动速度较小（如小于0.2 m/s）可认为$f(v)$是v的一次函数的情况，即空气阻力的大小与速度成正比。这时

$$\boldsymbol{F}_f=-k\boldsymbol{v}=-k(\boldsymbol{v}_x+\boldsymbol{v}_y) \tag{2}$$

根据牛顿第二定律得到物体沿x和y方向运动的微分方程为

$$\begin{cases}-kv_x=m\dfrac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t} & (3)\\ mg-kv_y=m\dfrac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t} & (4)\end{cases}$$

（3）式和（4）式表明，每个方向的方程都不包含另一方向上的运动分量，可以分别独立地解微分方程（3）式和（4）式得

$$\begin{cases}v_x=v_{ox}\mathrm{e}^{-\frac{k}{m}t} & (5)\\ v_y=v_{oy}\mathrm{e}^{-\frac{k}{m}t}+\dfrac{mg}{k}(1-\mathrm{e}^{-\frac{k}{m}t}) & (6)\end{cases}$$

对（5）和（6）式再积分一次可求得相应的运动方程$x=x(t)$和$y=y(t)$。

可见，物体沿x方向运动的速度、位置与y方向的运动无关，物体沿y方向运动的速度、位置与x方向的运动无关。换句话说，物体的这两个分运动是互相独立的、彼此无关的。

再考虑物体运动速度较大（如在0.2～240 m/s）可认为$f(v)$是v的二次函数的情况，这是我们见得最多的情况。这时

$$\boldsymbol{F}_f=-kv^2\frac{\boldsymbol{v}}{v}=-k\sqrt{v_x^2+v_y^2}(\boldsymbol{v}_x+\boldsymbol{v}_y) \tag{7}$$

物体在x和y两个方向运动的微分方程为

$$\begin{cases}-k\sqrt{v_x^2+v_y^2}v_x=m\dfrac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t} & (8)\\ mg-k\sqrt{v_x^2+v_y^2}v_y=m\dfrac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t} & (9)\end{cases}$$

可以看到（8）式中包含有v_y，（9）式中包含有v_x，即每个方向的微分方程中都包含另一方向上的速度分量，明显反映出这两个方向的分运动之间彼此关联，并不是独立的。因此不能分别独立地解（8）式和（9）式，而要联立解微分方程组。

解（8）式、（9）式的联立方程是困难的，这是由于我们选择直角坐标系得到的两个标量方程造成的。实际上我们是选择自然坐标系，将由牛顿定律得到的矢量方程$m\boldsymbol{g}-kv^2\dfrac{\boldsymbol{v}}{v}=m\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}$沿质点轨迹的切线方向和法线方向投影导出两个标量方程（微分方程）求解。再求出质点的运动方程$x=x(t)$和$y=y(t)$，它们不能用初等函数表示，结果是复杂的，但明确反映出两个分运动是相关的而不是独立的。

②有洛伦兹力参与时带电粒子的偏转运动

带电粒子在磁场中运动时受到洛伦兹力，其特点是大小与速度成正比，而方向总与速度方向（以及磁场方向）垂直，即

$$\boldsymbol{F}=q\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B} \tag{10}$$

洛伦兹力是一种横向力，它的大小和方向都与速度的大小、方向有关，受速度制约。因此，当带电粒子在磁场中运动并发生偏转时，若将它在任一选定的直角坐标系中分解为几个分运动，经过分析就可以知道，由于洛伦兹力具有横向力的特点，这些分运动之间也是彼此相关，而不

是独立的。

我们先考虑带电粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动的简单情况，忽略粒子所受的重力，并认为粒子在真空中运动。

如图 5-29 所示，设磁场方向沿 z 轴正方向，$t=0$ 时有一电荷量为 $+q$、质量为 m 的粒子以初速度 v_0 沿 y 轴正方向通过坐标原点。粒子进入磁场后任一时刻的速度

$$\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}_x+\boldsymbol{v}_y+\boldsymbol{v}_z$$

则它受到的洛伦兹力 $\boldsymbol{F}=q\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B}$，即

$$\boldsymbol{F}=q(\boldsymbol{v}_x+\boldsymbol{v}_y+\boldsymbol{v}_z)\times\boldsymbol{B} \tag{11}$$

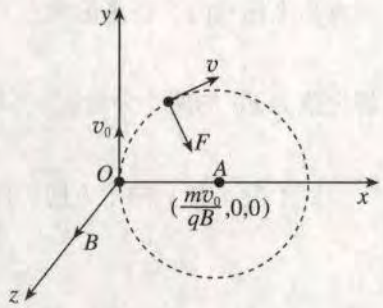


图 5-29

洛伦兹力的 3 个分量在坐标轴上的投影分别为：$f_x=qv_yB$，$f_y=-qv_xB$，$f_z=0$。此时粒子在 3 个坐标轴方向上的微分方程为

$$qv_yB=m\frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t} \tag{12}$$

$$-qv_xB=m\frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t} \tag{13}$$

$$0=m\frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t} \tag{14}$$

由（14）式及初始条件可导出 $v_z=0$，即粒子只能在垂直于 $\boldsymbol{B}$ 的 xy 平面内运动。联立（12）、(13) 解得

$$\begin{cases} v_x=v_0\sin\dfrac{qB}{m}t \\ v_y=v_0\cos\dfrac{qB}{m}t \end{cases} \tag{15}$$

由此可见，任一时刻的速度 $v=\sqrt{v_x^2+v_y^2}=v_0$ 为常量。通过 $v_x=\dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}$，$v_y=\dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}$ 的积分，我们还可进一步确定粒子运动的轨迹为圆，圆心位置在 A（$\dfrac{mv_0}{qB}$，0，0），圆半径 $r=\dfrac{mv_0}{qB}$。

由（12）式和（13）式可知，每个方向的微分方程中都包含另一方向上的速度分量，这显示了洛伦兹力是与速度相关的横向力的特点，也反映出这两个方向上的分运动是彼此关联而不是独立的。

我们再考虑带电粒子在正交的匀强电场和匀强磁场中的偏转运动。

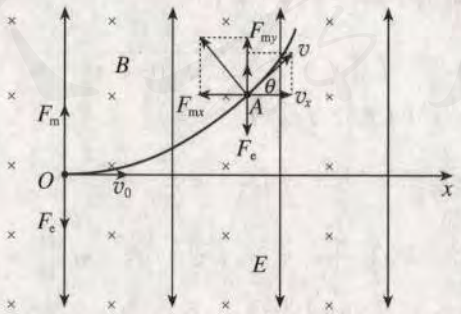


图 5-30

如图 5-30 所示，当粒子自左向右以垂直于 $\boldsymbol{B}$ 和 $\boldsymbol{E}$ 的方向射入磁场和电场区域时，若 $v_0>\dfrac{E}{B}$，则粒子进入磁场和电场区域时所受洛伦兹力大于电场力，粒子朝背离电场力的方向偏转。

当粒子运动到A点时，粒子速度为v，v与初速v_0的方向相比较偏转了θ角。在图5-30中标明的直角坐标系内，将洛伦兹力$\boldsymbol{F}_m$和速度v都沿x轴和y轴的方向分解，则得

$$\boldsymbol{F}_m=q(\boldsymbol{v}_x+\boldsymbol{v}_y)\times\boldsymbol{B} \tag{16}$$

洛伦兹力$\boldsymbol{F}_m$的两个分量在x和y方向上的投影分别为：

$$F_{mx}=-qv_yB，\ F_{my}=qv_xB。$$

粒子沿x和y两个方向的微分方程分别为

$$-qv_yB=m\frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t} \tag{17}$$

$$qv_xB-qE=m\frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t} \tag{18}$$

（17）式和（18）式表明，每个方向的微分方程中都包含另一个方向上的速度分量，这同样是由于洛伦兹力的横向性特点所致，说明图5-30所示的x和y两个方向的分运动也是彼此关联而不是独立的。

对带电粒子的偏转运动也可作如下的定性分析：将电场力$\boldsymbol{F}_e=q\boldsymbol{E}$分解为切向分量和法向分量，它们在$A$处的大小分别为$F_{et}=qE\sin\theta$和$F_{en}=qE\cos\theta$。粒子在由$O\to A$的运动过程中，$F_{et}$由0逐渐增加为$qE\sin\theta$，使粒子的速率由$v_0$逐渐减小为$v$；与此同时，法向上的洛伦兹力$F_{mn}$按比例随速率的减小而减小，方向也相应地改变$\theta$角。由洛伦兹力与电场力的法向分量共同决定的法向加速度随之由$\frac{qv_0B-qE}{m}$变为$\frac{qvB-qE\cos\theta}{m}$，从而制约着粒子运动的偏转方向。由此可见，这种有洛伦兹力参与的偏转运动中，在法向和切向上的一些相应物理量也是相互影响并彼此制约的。

③关于运动分解的一般情况

上面所举的几个例子主要是在直角坐标系中讨论两分运动的关系是彼此独立还是相互关联。如对抛体运动的分析，当空气阻力是速度的非线性函数时，按x、y轴方向分解的两分运动是彼此相关的。我们知道，同一个运动可以有多种分解方法。对一个质点的运动，我们能否选取一个适当的坐标系，找到某一种运动分解的方法，使两个分运动是彼此独立的。为弄清这个问题，我们可将质点的运动沿任意两个方向分解，并分别建立方程进行讨论。我们仍以抛体运动和抛体所受空气阻力与速率的二次方成正比为例，将其分解为这样两个分运动：一个在竖直方向上、分速度矢量为v_1；在另一方向上的分运动，分速度矢量为v_2，v_2与v_1间的夹角为θ，θ可为任一值。由于空气阻力$\boldsymbol{F}_f=-kv^2\frac{\boldsymbol{v}}{v}$，即

$$\boldsymbol{F}_f=-k\sqrt{v_1^2+v_2^2+2v_1v_2\cos\theta}(\boldsymbol{v}_1+\boldsymbol{v}_2) \tag{19}$$

物体在选取的两个方向上的运动的微分方程为

$$mg-k\sqrt{v_1^2+v_2^2+2v_1v_2\cos\theta}v_1=m\frac{\mathrm{d}v_1}{\mathrm{d}t} \tag{20}$$

$$-k\sqrt{v_1^2+v_2^2+2v_1v_2\cos\theta}v_2=m\frac{\mathrm{d}v_2}{\mathrm{d}t} \tag{21}$$

（20）式和（21）式表明，每个方向的微分方程中都包含另一方向上的运动分量，这两个方向的分运动是相关联的。v_1、v_2这两个方向是任意选取的，这就说明，当空气阻力与速率的二次方成正比时，找不到一种分解方法能使抛体运动的两个分运动是彼此独立的。

一个实例就可以使我们认为“运动独立性原理”不是一个普遍规律，还可由这实例联想到

凡是物体所受外力是速度的非线性函数时，则无论将这种运动怎样分解，它的两个分运动是相互关联的、彼此不具有独立性。研究质点的复杂运动时，“运动独立性原理”不成立。

总之，把一个运动分解为几个分运动时，分运动的独立性是有条件的，不能把它看成一个普遍的原则。

(3) 分运动的独立性与力的独立作用原理没有因果关系

有的教学参考书认为运动的独立性与力的独立作用是紧密联系在一起的，有的参考书和文章甚至认为运动的独立性是由力的独立作用原理导出的。有的教师认为，根据力的独立作用原理得到：$\boldsymbol{F}_1=m\boldsymbol{a}_1$，$\boldsymbol{F}_2=m\boldsymbol{a}_2$，…，$\boldsymbol{F}_1+\boldsymbol{F}_2+\cdots=m\boldsymbol{a}_1+m\boldsymbol{a}_2+\cdots$，它们是独立的。对 x 方向和 y 方向我们得到：$F_x=ma_x$，$F_y=ma_y$。这说明质点在 $x(y)$ 方向上的运动只由 $x(y)$ 方向上的力决定，与 $y(x)$ 方向的运动或力无关。即从力的独立作用原理导出了运动独立性原理。

下面的分析表明，认为运动独立性原理与力的独立作用原理有因果联系的看法是没有充分根据的。

力的独立作用原理是牛顿作为他的运动定律的推理首先提出的。力的独立作用原理是说：几个力同时作用在一个质点上，则此质点的加速度等于这些力分别作用于此质点所产生各加速度的矢量和，即一个力产生的加速度与其他力的作用无关，力的总作用是每个力分别作用的叠加。我们可以说各个力各自产生自己的加速度而不互相影响，即 $\boldsymbol{F}_1=m\boldsymbol{a}_1$，$\boldsymbol{F}_2=m\boldsymbol{a}_2$，…，$\boldsymbol{F}_1+\boldsymbol{F}_2+\cdots=m\boldsymbol{a}_1+m\boldsymbol{a}_2+\cdots=m(\boldsymbol{a}_1+\boldsymbol{a}_2+\cdots)$，所以 $\boldsymbol{F}=m\boldsymbol{a}$。合力 $\boldsymbol{F}$ 是分力 $\boldsymbol{F}_1$，$\boldsymbol{F}_2$…的矢量和，即从动力学来说，合力与它的全部分力是等效的。

问题在于，力的独立作用原理的确切含义是说：一个力产生的加速度与其他力的作用无关，$\boldsymbol{F}_1\rightarrow\boldsymbol{a}_1$ 与 $\boldsymbol{F}_2$、$\boldsymbol{F}_3$、…无关。不是说：力 $\boldsymbol{F}_1$、$\boldsymbol{F}_2$、…彼此无关，或一个方向的运动不影响另一个方向的运动。换句话说，力的独立作用原理是说一个力产生加速度的作用与其他力无关，不是说作用在质点上的各个力是独立的，或各个方向的运动是独立的。即 $\boldsymbol{F}_1\rightarrow\boldsymbol{a}_1$、$\boldsymbol{F}_2\rightarrow\boldsymbol{a}_2$…这些作用是独立的，互不影响，但 $\boldsymbol{F}_1$、$\boldsymbol{F}_2$、…之间不一定是独立的，例如滑动摩擦力公式 $F_f=\mu_k F_N$，F_f 沿切向，F_N 是压力、沿法向，F_f 与 F_N 有一定关系，这不违反力的独立作用原理。我们熟悉的洛伦兹力是一种横向力，质点的切向运动速度影响法向上的洛伦兹力，从而影响质点的法向运动，这又是一个实例。质点的运动按 x、y 方向分解后由牛顿第二定律得到 $F_x=ma_x$、$F_y=ma_y$，这说明 $F_x\rightarrow a_x$、$F_y\rightarrow a_y$，但并不说明 F_x、F_y 一定是独立的，也不说明 x、y 方向的分运动一定是独立的。

需要强调指出，分运动的独立性和力的独立作用原理是说的两个不同方面的事情，它们涉及两个不同的范畴。分运动的独立性讨论的是某一运动过程所分解的各分运动之间是否相互影响、彼此制约的问题；力的独立作用原理是说力的作用是独立的、彼此无关的，而不论作用在同一物体上的各力之间是否相互影响、彼此制约。

总之，力的独立作用原理是以力的矢量性为基础得到的，因此，在经典力学中不论对于哪种力，不论各个力之间是否相关，也不论在哪种运动中，这一原理在任一惯性参考系中都成立，具有普遍意义。由力的独立作用原理不能导出运动独立性原理。

求解质点运动的基本方程是牛顿第二定律，牛顿第二定律 $m\dfrac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t^2}=\boldsymbol{F}$ 是一个矢量微分方程。具体求解时应选取适当的坐标系，把矢量方程变为相应的几个分量形式的微分方程再求解，这实质上是一个矢量分解的过程。从数学上我们知道，一个矢量可以用它在一个坐标系内

的分量来表示。例如在笛卡儿坐标系中 $\boldsymbol{A}=A_x\boldsymbol{i}+A_y\boldsymbol{j}+A_z\boldsymbol{k}$，$A_x$，$A_y$，$A_z$ 分别是矢量 $\boldsymbol{A}$ 在坐标轴 x、y、z 上的投影。因此一个矢量方程在该坐标系中必定可以化为相应的三个分量方程。可见，将矢量方程化为相应的分量方程的依据是矢量的分量表示。选择不同的坐标系，矢量可以有不同的分量表示，从而矢量方程可以化为不同的分量方程。为了简化方程的求解，常常选择坐标系使分量方程尽可能简单，并尽可能使分量方程彼此独立、不相关。当然在一些问题中分量方程彼此相关联不独立，照样可联立这些分量方程求得答案，也就是说运动的分解即将矢量方程化为分量方程的依据是矢量的分量表示，而不在于分运动的独立性。

因此，我们可以明确地说，分运动并不普遍具有独立性，即不存在一条运动独立性原理；分运动的独立性与力的独立作用原理没有因果关系；运动的分解不依赖于分运动的独立性，运动的分解合成的依据是矢量的分量表示。

2. 运动合成与相对运动

（1）相对运动

高中物理教学中，在说明运动的合成分解时常举船渡河的例子，认为船的速度 v 是船相对于水的运动速度 v_1 与水流速度 v_2 的合速度，即

$$v=v_1+v_2 \tag{1}$$

在一些初等物理书中，明确指出这是相对运动问题，进一步提出相对运动的速度公式是

$$v_{AC}=v_{AB}+v_{BC} \tag{2}$$

或

$$v_{AB}=v_{AC}-v_{BC} \tag{3}$$

其中，v_{AC} 是物体 A 相对物体 C 的速度，v_{AB} 是物体 A 相对物体 B 的速度，v_{BC} 是物体 B 相对物体 C 的速度。这里涉及到三个物体，与船渡河的（1）式比较可知，船就是 A，河水是 B，河岸是 C。这样把研究的问题明朗了、明确了，有利于用来解类似的问题。

在大学物理书中，对相对运动问题有专门的论述，更进一步地明确说明这是分别在静止参考系 K 和运动参考系 K' 中研究物体运动的问题，如物体在静止参考系 K 中的速度叫绝对速度 $v_{绝对}$，物体在运动参考系 K' 中的速度叫相对速度 $v_{相对}$，运动参考系 K' 相对静止参考系 K 的速度叫牵连速度 $v_{牵连}$，则有

$$v_{绝对}=v_{相对}+v_{牵连} \tag{4}$$

或

$$v_{相对}=v_{绝对}-v_{牵连} \tag{5}$$

附带说明一下，加速度的关系是

$$a_{绝对}=a_{相对}+a_{牵连}+a_{科氏} \tag{6}$$

其中 $a_{科氏}$ 叫科里奥利加速度，$a_{科氏}=2\omega v_{相对}$，角速度 ω 是 K' 系相对于 K 系的转动角速度。只有当 $a_{科氏}=0$ 时才有 $a_{绝对}=a_{相对}+a_{牵连}$。

我们在不同的参考系中研究物体的运动，得到的速度关系式（4）实质是由不同参考系间的时空坐标变换关系导出的，称为速度变换关系。我们从狭义相对论知道，不同惯性参考系之间的时空变换遵从洛伦兹变换，由洛伦兹变换可导出相对论的速度变换公式。设质点在惯性参考系 K 中的速度为 v，在另一惯性参考系 K' 中的速度为 v'，K' 系相对于 K 系的速度为 u。若 v、v'、u 都沿同一直线同方向运动，由洛伦兹变换导出的速度变换公式是

$$v=\frac{v'+u}{1+\frac{v'u}{c^2}} \tag{7}$$

或

$$v'=\frac{v+u}{1-\frac{vu}{c^2}} \tag{8}$$

当运动速度 v 远小于光速 c 时，洛伦兹变换变为伽利略变换，(7) 式和 (8) 式就变为

$$v=v'+u \tag{9}$$

或

$$v'=v-u \tag{10}$$

(9)、(10) 式就是 (4)、(5) 式的特殊情况（速度在同一直线上）。

(2) 相对运动与运动分解合成的区别

从大学物体的相对运动、不同参考系间的变换关系，使我们对船渡河等类问题有深一步的认识，同时也使我们注意到相对运动问题与运动分解合成问题不同。

我们研究抛体运动，把它看成 x 方向和 y 方向两个分运动的合运动，从速度看就是

$$v=v_x+v_y \tag{11}$$

(11) 式与 (4) 式形式上相似，都是速度合成公式，但实质上它们之间有很大区别。(4) 式是不同参考系间的速度变换关系，而 (11) 式是同一参考系（地面上物体）中的速度合成关系。它们的含义不同，适用范围也不同。(11) 式是在同一个参考系中，由矢量分解合成的平行四边形定则得到的，在速度很小到速度 $v\to c$ 的广大范围内仍然成立。(4) 式由伽利略变换导出，因而只在 $v\ll c$ 时才成立。参考系问题是物理学中的基本问题，应该特别重视。我们在某些力学问题的教学中，在热学、电学、光学等的教学中，很少提到参考系，这绝不意味着参考系问题不重要，而是问题较难，作为教师应该心里有数。

由于初学者接受相对运动问题有一定困难，现行高中物理教材和一些初等物理书都不区分相对运动的速度合成与运动分解合成的速度合成，简单地把它们都叫做速度的合成，但教师应该理解它们的区别，在处理一些问题时应该注意。例如：在加速度的教学中，有的教师觉得速度增量 Δv 的矢量性较难理解，就用举例子来说明，说乘客开始随列车以速度 v_1 向东运动，后来乘客相对列车以速度 v_2 向北运动，乘客的初速为 v_1、末速为 v_1+v_2，要注意速度增量 $\Delta v=(v_1+v_2)-v_1=v_2$。这个例子看起来好象很形象，但引入了第三者、涉及到不同的参考系。要注意速度增量 Δv 的含义是对同一个参考系说的，而这个例子与加速度中的 Δv 的确切意义不同，教师应该注意到这一点。

（选自《力学》第 2 版，杨维纮编著，中国科学技术大学出版社）

（二）联系生活、科技和社会资料

1. 流体介质阻力对物体运动的影响

大家知道，物体在空气、水等流体介质中运动时，将会受到这些介质的阻力作用，而这种作用对物体运动的影响究竟会达到什么程度，可能了解的人就不是很多了。

学过中学物理的都知道，抛射体在真空中的飞行轨迹是一条抛物线。假定弹丸的初速度为 850 m/s，发射角为 43°，则弹丸在真空中的飞行轨迹为图 5-31 中的虚线，此时射程 OA 约等于 73 km，而当考虑空气阻力时，弹丸的飞行曲线为图 5-31 中的实线，射程 OB 只有约 8 km，仅为理想射程的 1/9！

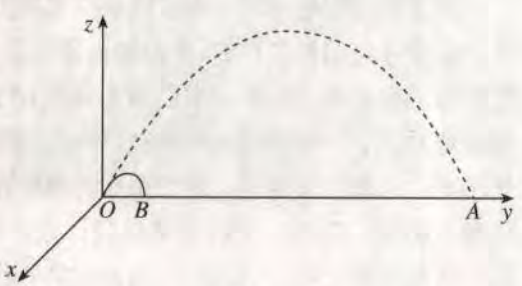


图 5-31

自由飞行物体在流体介质中遇到阻力的大小，

与物体的形状、飞行速度、表面光滑程度及介质状况等因素有关。

大量实验表明，当物体在空气中的飞行速度 $v<0.2$ m/s 时，阻力 $F=rv$；当 0.2 m/s$<v<$240 m/s 时，$F=rv^2$；当 240 m/s$<v<$450 m/s 时，$F=rv^3$。其中比例系数 r 称为阻力系数，它反映了上述除物体速度以外的其他诸因素对介质阻力的影响。

考虑空气阻力时弹丸的飞行如图 5-32 所示。容易看出，当考虑空气阻力时，弹丸的落地角 β 大于发射角 α（在真空中落地角 β 等于发射角 α），而且落地角接近于 90°。理论计算和实际观察都已证明，物体在空气中的运动经过一段时间后，将几乎垂直向下匀速降落，并趋近于它的极限速度。所谓极限速度是，在介质阻力的上述影响因素已经确定的情况下，物体在介质中运动需经无限长的时间才能达到的速度。实际上，在物体开始运动后极短的时间内，它已基本接近了这一速度。

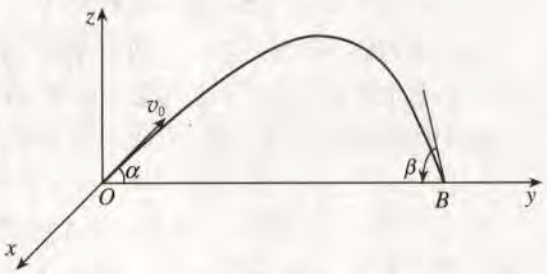


图 5-32

在许多工程实际问题中，如选矿、选种和清洁谷粒等常利用物体极限速度的不同，来把大小不同、比重相异的颗粒分离开来。

鸡蛋与跳伞

你看过跳伞表演吗？跳伞运动员自飞行器中跳出后，如果不张开伞，则阻力系数较小，极限速度一般可达到 50～60 m/s。这个速度相当大，以这个速度落地，任何人也承受不了。但如果张开伞，则阻力系数变大，极限速度一般不超过 4～5 m/s。这个速度仅相当于我们从 1 m 多高的矮墙上跳下时按自由落体的速度公式计算所得到的落地速度。这对于普通健康的人来说，是没有危险的。

战争中对伞兵的要求不仅是能安全落地，而且在空中停留时间越短越好。为此伞兵在刚跳离飞行器后，可先不张伞，等降至一定高度后再把伞张开。

你相信鸡蛋从四层楼上抛下来还能完好无损吗？广州市第七中学在 1996 年科技节中表演了一个项目，叫“鸡蛋碰地球”，同学们从教学楼四楼将鸡蛋随手一抛，使鸡蛋与地面来了一个轻盈的“接吻”，结果鸡蛋丝毫无损。他们除了用海绵、泡沫塑料等把鸡蛋包裹起来，以减轻接地时与地面的撞击，主要的还是在鸡蛋上系了一个大塑料袋权充降落伞，从而巧妙地利用了极限速度的概念，减小了鸡蛋落地时的速度。

远程大炮的奥秘

在发射远程炮弹时，为了减小空气阻力的影响，适当增大发射角是提高炮弹射程的有效办法。这个办法据说是在 20 世纪初由德国炮兵在一次炮击中意外地发现的，德国炮兵以很大的发射角发射大口径炮弹，本以为炮弹只能落在 20 km 远的地方，但谁知炮弹竟然落到 40 km 远的地方去了。这是因为炮弹被以较大的发射角高速度发射后，可以飞到数十千米外的高空大气层里。那里空气稀薄，阻力很小，炮弹在这样的介质里飞行了较长的时间，可以飞过较长的路程。德国人从这个观察结果出发，设计制造了从 115 km 外轰击法国首都巴黎的超远程大炮。这是世界上最早的远程大炮。在第一次世界大战时的 1918 年夏天，德国军队用这种火炮向巴黎发射了 300 多发炮弹。炮弹发射的初速度为 2 000 m/s，发射角为 52°，弹道距地面的最

大高度为40 km，飞行时间为 3.5 min，其中有 2 min 是在空气稀薄的平流层（距地面高 5 至 10 km 的空间称为对流层；对流层以上 55 km 以下的空间称为平流层）中飞行的。

地球自转的影响

在上面介绍的问题中都认为地球是静止不动的。实际上，即使不考虑地心每年绕太阳一周的公转运动，地球也还有每昼夜绕地轴转一周的自转运动（自转角速度为 7.29×10^{-5} rad/s）。当考虑地球自转的影响时，抛射体还将受到一种力（称为**科氏惯性力**）的作用，其飞行轨迹则不再是一条平面曲线，而是一条空间曲线了。所谓科氏惯性力，它是在考虑地球自转这样的非惯性坐标系中，应用牛顿第二定律时，必须附加在物体上的一项作用力，否则，物体的质量 m，加速度 a 与作用力 F 之间的关系式 $ma=F$ 不成立，它是法国工程师科里奥利（G. G. de Coriolis）在 1832 年研究水轮机时发现的。假如在北半球纬度为 45°处，向正东方向以发射角 43°，初速度850 m/s发射炮弹，当不考虑地球自转的影响时，炮弹在真空中的飞行轨迹如图 5-33 中的虚线所示，落地点为 A；当考虑地球自转的影响时，炮弹在真空中飞行的轨迹如图 5-33 中的实线所示，落地点为 C。与不考虑地球自转时相比，炮弹在真空中飞行的落地点向东偏移的距离 Δy 为337.5 m，向南偏移的距离 Δx 为 453.8 m。然而普通炮弹的爆炸威力范围只有几十米，因此地球自转对抛射体的影响是不能不引起足够重视的。

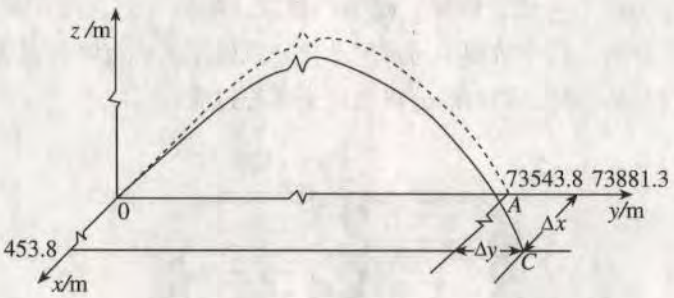


图 5-33

如果同时考虑空气的阻力时，不妨假设炮弹受到空气阻力的大小与炮弹速度的平方成比例，取阻力系数为 0.004 6 kg/m，可以得出在不考虑地球的自转时，炮弹的飞行轨迹如图 5-34 中的虚线所示，落地点为 B，射程 OB 等于 8 352.1 m；而当考虑地球的自转时，炮弹的飞行轨迹如图 5-34 中的实线所示，落地点为 D。则由于地球自转的影响，炮弹将向东偏离(Δy)2.0 m，向南偏离(Δx)15.7 m。

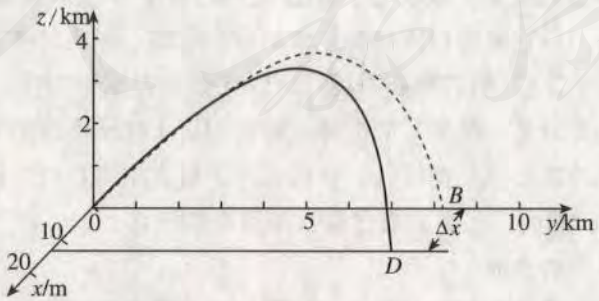


图 5-34

（选自《身边的力学》，徐秉业主编，北京大学出版社，有改动）

2. 游“离心国”

一池污水，若听其自然靠重力沉降，往往需要几个月才能清浊分明。微粒的沉降，由于存在着分子热运动的干扰作用，靠重力作为推动力不仅极其缓慢有时甚至是不可能的。例如，在蔗糖水溶液中，蔗糖分子要沉降 1 mm 就需要 100 年。此外还有，如何从牛奶中提取奶油？啤酒、果汁何以清澈透亮？如何将油田中喷出的油水混合液进行油水分离？如何将血液中的血细胞和血浆分开？究竟依靠的是何种推动力呢？要正确回答这一切，还是让我们先到“离心国”去漫游一番吧。

(1)“离心国”里泾渭分明

在一个盛有清水的圆筒形容器（转鼓）中，倒入一组同样大小的钢球和木球，然后启动马达使其绕轴高速旋转。此时，由于离心力的大小正比于物体的质量（在体积相同的正比于它的密度），所以钢球很快被甩到最外层，而木球则被推向转轴，清水则占据了“中间地带”（图 5-35）。可见，一旦转鼓高速转动起来，在这个小小的“离心国”里，等级是何等森严！凡是进入其中的“游客”，无论是固体还是液体，都无一例外地要严格遵守其“法规”——按密度分层排列。密度小者（轻相）聚集在“中央”即转轴附近。密度大者（重相）则分散在“边区”即转鼓壁附近。科学家把这种现象称为离心沉降。如果在转鼓上开满小孔，则其中的液体就会在离心力作用下通过小孔被“驱逐出境”，而固体颗粒则停留在转鼓壁面上从而达到脱水的目的，这种现象称为离心过滤。例如，奶油的提取，啤酒、酒、果汁和清漆的澄清，植物油、抗菌素和酵母的分离，三废治理中污水的净化，就属于离心沉降；而煤、矿石和海盐的脱水，糖膏、磺胺药以及某些化学肥料的分离则属于离心过滤。

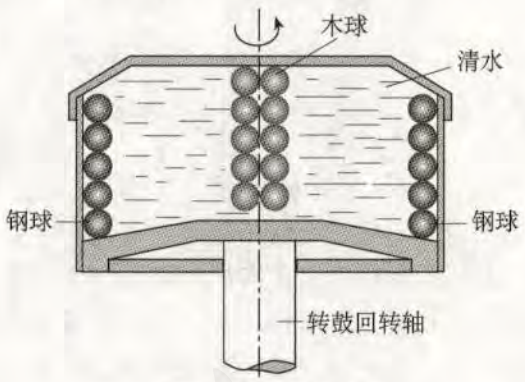


图 5-35　有趣的分层现象

上面这个有趣实验告诉我们，要将存在密度差的两种物体（液体或固体）高效地分离开来，可以依靠惯性离心力，它是由物体做高速转动所产生的。瑞典科学家斯维伯格和比姆斯相继获得了比重力大 5 万至 10 万倍的离心力场，可以高效地完成像细菌、病毒等超细微粒（直径只有万分之几乃至十万分之几毫米）的沉降，将它们从水状悬浮液中分离出来。提供这种强大离心力的机械装置称为离心机。据统计，目前世界上最大型离心机的转鼓容量约为 2 000 L，最小的则只有 1 mL 多。然而，人类的衣食住行却很难离开它。

(2) 来自“离心国”的产品

先说啤酒吧。啤酒何以清澈透亮？原来，这也与离心分离密切相关。因为，在麦汁中含有一种极不稳定的冷凝固物，应尽量减少其含量才能保证成品啤酒不致出现冷混浊现象。然而这种冷凝固物的粒子极为微小，直径仅有 0.1～0.5 μm，很难除净。但若采用高速离心机进行处理，就比较容易实现净化。因为，这种粒子虽然极微小，但由于它与液相之间存在密度差，所

以一旦进入强大的离心力场后，二者立即“分道扬镳”，从而可以很容易把冷凝固粒子剔除。同样，从蔗糖水溶液中分离蔗糖，也必须依靠先进的离心沉降方法。

在血蛋白的开发中，分离术也大有用武之地。例如猪血，它由血细胞和血浆组成，前者密度为 1.09 g/cm³，后者密度为 1.024 g/cm³，相差甚微。不过，若将猪血倒入专用的离心机转鼓内，当转速提高到 6 000 r/min（此时所产生的惯性离心力相当于重力的数万倍）时，猪血浆就集中于转轴附近，可用导管引出，用以加工色香味俱佳的血肠、肉制品和“血浆饺”。

一种名叫“离心浇铸”的先进技术，也得益于这种现代分离术。当模具绕一固定轴旋转，达到 500 r/min 时，将熔化了的液态金属倒入其中，它将以巨大的惯性离心力向模具壁紧压；同时夹杂在液态金属里的气体和熔渣，由于其密度远小于液态的金属，因此它们必将从金属里被分离出来跑向模具的空处。按此法浇铸出的金属零件密实、均匀，而且不含气泡、夹渣和裂痕，从而大大提高了使用寿命。

从葵花籽中提取植物油，首先必须剥壳，这也不能不求助于“离心国”。因为壳与仁的密度不相同，因此它们来到“离心国”后就必然要“闹分家”。20 世纪 80 年代初问世的国产“多层离心式葵花籽剥壳机”，其甩盘直径虽只有 0.5 m，但 1 天足可脱壳 100 t，相当于 100 000 个“巧嘴阿姨”。

当然，来自“离心国”的产品还远不止这些。可以毫不夸大地说，当前我国各个工业部门都离不开离心分离技术（科学家将这类工艺过程和技术称为“分离工程”）。人们借助于各种离心机，可以相当精确而又迅速地分离极不相同的非均相液态物系，如原油和聚氯乙烯树脂悬浮液、润滑油和铵盐、煤泥和淀粉悬浮液、变压器油和酵母悬浮液等等。甚至在 TNT 炸药的生产中，各级硝化物与混酸的分离也需以离心分离来取代静置分离。

(3) 会跳“迪斯科”的离心机

自 1925 年第一台超速离心机（它的离心力场是重力场的 5 万倍）问世以来，在 60 多年的时间里出现了形形色色的工业用离心机，真可谓“群雄竞起”、“百家争鸣”。其中代表性的离心机有：篮式离心机，转鼓为圆筒状；碟片式离心机；锥篮式离心机，转鼓为圆锥状（图 5-36）。

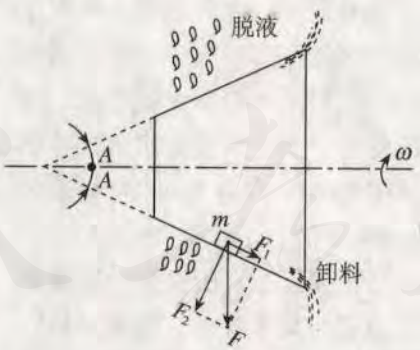


图 5-36　锥篮式离心机

篮式离心机虽然结构简单，但是由于其转鼓为圆筒状，因此不可能实现连续自动卸料，而需依靠人工进行间歇操作：在转鼓上铺滤布并压紧；启动转鼓，达到全速后开始加料过滤；滤渣的洗涤和干燥；制动停车，人工卸出滤渣；清洗滤布。操作人员的劳动强度很大。

锥篮式离心机，由于具有锥形转鼓，因此只要其半锥角 A 大于物料的安息角 α（物料堆积成自然状态时所形成的最大倾斜角，如图 5-37），物料就能在惯性离心力 F 的分力 F_1（图

5-36）的推动下实现自动连续卸料，而无需附设任何卸料装置。但它也有一个很大的缺点，由于锥角不易变动，故常因为锥角大小不合适（例如半锥角小于物料安息角或比安息角大得多）而出现不出料或“拉稀”现象。

图 5-37　安息角的概念

那么，如何克服锥篮离心机的这种缺点呢？有谁能想到，曾经被誉为“稳定与纠偏能手”的陀螺，却又在“离心王国”里建立了新的功勋。

1964 年，在联邦德国化工机器展览会上出现一种转鼓会跳“迪斯科”的离心机，引起了人们极大兴趣。该机转鼓装有两根转轴：支配自转的实心轴和支配公转的空心轴，通过万向节套联在一起（图 5-38）。

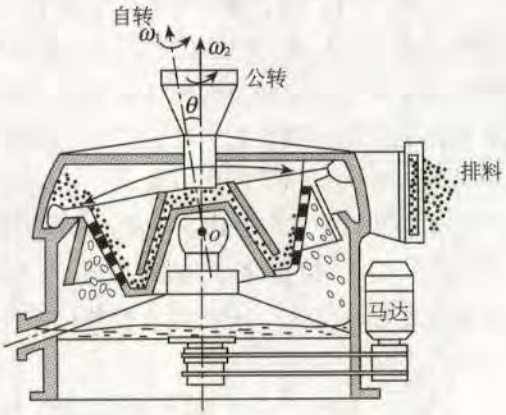


图 5-38　立式进动离心机

如果只启动自转电机，转鼓就像普通锥篮离心机那样只绕一根轴做定轴转动。但若同时又启动公转电机，情况就大不相同了。开始，转鼓像一个庞大的陀螺，不停地摇头晃脑，似乎在欢快地跳着“迪斯科”摇摆舞；继而，随着转速飞快提高，你就能看到转鼓边缘闪烁着美丽的双影，犹如跳动的光环，煞是好看。故而称它为摆动式离心机，后来又称进动离心机或颠动离心机。

强迫转鼓摆动，究竟有什么好处呢？原来，当转鼓既自转又公转之后，这种复合转动就会在原有的对称离心力场上又给物料强加上三股奇妙的力量：环向振荡、径向颠簸、轴向脉冲。前两股力量对物料起着疏松作用，使物料不致在篮壁上结成坚硬的滤饼，从而有利于脱水。而且，周期性的径向颠簸还会大大降低物料与筛网间的滑动摩擦，不仅可防止物料晶粒的破损，而且延长了筛网的使用寿命。据统计，目前国内分离海盐的锥篮离心机，每隔半个月即需换网一次；如若采用进动离心机，则筛网寿命至少可延长 10 倍以上，仅此一项每年每台即可节约资金近万元。

第三股力量产生反对称的周期性脉冲。在转鼓的一侧由于篮面倾角（等于筛篮半锥角 A 加上摆动角 θ）大于物料平衡的安息角 α，物料将受到“正脉冲”作用由小端向大端移动，故称卸料区（图 5-39）；而在转鼓的另一侧，因篮面倾角（等于筛篮半锥角 A 减去摆动角 θ）小于物料的安息角 α，物料受到“负脉冲”作用被阻止移动，故称滞留区。

图 5-39　轴向脉冲效应

自转和公转一般都在 1 000 r/min 以上，所以这种轴向脉冲必将使篮面上的卸料区和滞留区进行周期性的“高频换位”，强迫物料按“走一停一走”的节拍甩出去，因而可以听到节奏感很强的“唰一唰一唰”的排料声，显然这将大大延长物料在篮面的停留时间，以利充分脱水。

根据上述原理，北京化工大学研制成功的 WJ－540 新型卧式进动离心机，对平均粒径仅有 0.02 mm 的高温盐浆进行脱卤获得成功，这在国内外均属首创。其生产能力高达 5 t/h 以上，产品的湿含量只有百分之几，而处理每吨物料的耗电量却只有 0.2～0.3 kW·h，比一般离心

机要小得多，按初步估算，每年每台即可创值百万元以上。此外，该机型还可在氮肥、钾肥、磷肥、矿砂和精洗煤的开发中获得较大应用，故享有“节能模范”和“分离骄子”的美誉。

不过，由于进动离心机的转鼓也是一种陀螺，因此当它高速旋转和摆动的时候，必然容易引起基座的振动和发出有害的噪声，这在设计中是应当尽量避免的。可以肯定，为了解决这一难题，利用电子计算机进行辅助设计（简称 CAD），对于高明的“离心国缔造者”来说，将是必不可少的一项先进措施。

（选自《趣味力学新编》，黄钟，范德顺编著，中国石化出版社）

3. 外轨超高

当机车车辆在水平面内拐弯时，所需的向心力靠外侧钢轨（外轨）对车轮的侧压力提供。按照牛顿第三定律，外轨就要受到侧压力，其大小与车速的平方成正比，与弯道的曲率半径 R 成反比。当车辆高速转弯时，这不仅会使外轨磨耗很大，而且行车稳定和安全也得不到保证。因此，在铁路转弯处，常把路基的外侧垫起，使外侧钢轨抬高，以避免外轨受到侧压力，称之为外轨超高。下面，用惯性离心力的概念分析这一问题。

选取随车体绕弯道的曲率中心转动的参考系。从这个非惯性系来看，车体是静止的，它在惯性离心力、重力以及钢轨的作用力下达到“平衡”。下面用静力学的平衡条件来分析。

如图 5-40 所示，如果外轨与内轨高度相等，则沿水平方向，惯性离心力 $\boldsymbol{F}_n$（其值为 $m\frac{v^2}{R}$，方向指向外侧，即图中左方）将与外轨对外侧车轮的侧压力（指向曲率中心）平衡，因而外轨所受的侧压力大小为 $m\frac{v^2}{R}$。设两个车轮间的距离为 s，车体质心 C 离轨道平面的高度为 h_C，则车体将在惯性离心力 $\boldsymbol{F}_n=-m\boldsymbol{a}_n$，重力 $\boldsymbol{G}=m\boldsymbol{g}$，外轨的侧压力 $\boldsymbol{F}_1$，支承力 $\boldsymbol{F}_{N1}$ 及内轨的侧压力 $\boldsymbol{F}_2$，支承力 $\boldsymbol{F}_{N2}$ 的作用下平衡（图 5-40 中未画出 $\boldsymbol{F}_1$ 与 $\boldsymbol{F}_2$）。这里 $F_1=m\frac{v^2}{R}$，$F_2=0$。由竖直方向的平衡条件，有

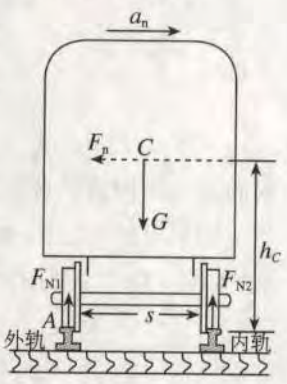


图 5-40

$$F_{N1}+F_{N2}=mg$$

又按照力矩平衡条件，取车轮与外轨的接触点 A 为参考点，有

$$F_{N2}s+m\frac{v^2}{R}h_C=mg\frac{s}{2}$$

由以上两式解得

$$F_{N1}=\frac{1}{2}mg+\frac{h_C}{s}\frac{mv^2}{R},\quad F_{N2}=\frac{1}{2}mg-\frac{h_C}{s}\frac{mv^2}{R}$$

可见，外轨的支承力比 $\frac{1}{2}mg$ 增大 $\Delta F_N=\frac{h_C}{s}\frac{mv^2}{R}$，而内轨的支承力比 $\frac{1}{2}mg$ 减小 ΔF_N，ΔF_N 常称为增减载量。车速越大，重心越高，或轨距越小，ΔF_N 就越大，这样不仅外轨磨损大，而且也是影响安全行驶的因素。

如果把外轨适当抬高（参看图 5-41），就可以使外轨和内轨不受侧压力，而支承力均等于车重的 $\frac{1}{2}$（这里需假定车速 v 是给定的），外轨比内轨抬高的量 h 称为轨道曲线的外轨超高度（简称外轨超高度）。h 值可计算如下。由力的平衡条件有

$$mg\sin\theta - m\frac{v^2}{R}\cos\theta = 0$$

即

$$\tan\theta = \frac{v^2}{gR} \tag{1}$$

通常 θ 值很小，$\tan\theta \approx \sin\theta = \frac{h}{s}$，这里 s 是内侧与外侧两个车轮之间的距离，它比轨距（我国一般用 1 435 mm）略大些，按我国铁路现状，一般可用 s≈1 500 mm，因此可得外轨超高度 h 的计算公式为

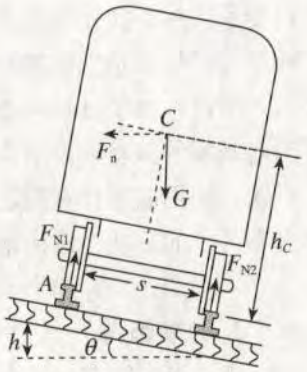


图 5-41

$$h = \frac{sv^2}{gR} \tag{2}$$

外轨与内轨的支承力 F_{N1}、F_{N2} 之值可由以下条件求得：（1）垂直于轨面的合力为 0；（2）绕重心的力矩代数和为 0。于是，有

$$F_{N1} + F_{N2} = mg\cos\theta + m\frac{v^2}{R}\sin\theta$$

$$F_{N1} \cdot \frac{s}{2} = F_{N2} \cdot \frac{s}{2}$$

于是

$$F_{N1} = F_{N2} \approx \frac{1}{2}mg$$

因而外轨与内轨的载重是相等的。

如果 v 的单位为 km·h^{-1}，R 的单位为 m，而 h 的单位为 mm，并且取 s=1 500 mm，g=9.8 m·s^{-2}，则由式（2）可得

$$h = 11.8\frac{v^2}{R} \tag{3}$$

这就是我国铁路技术管理规程中用以计算外轨超高度的公式。上式中 v 为列车通过弯道时的平均速度，即各种列车通过时速度的统计平均值。例如，当弯道的曲率半径 R=800 m，平均速度为 60 km·h^{-1}时，由上式可算得外轨超高度为 53 mm。

通常把车体重量 G 沿轨道平面方向的分力称为超高力，用 F_H 表示，即

$$F_H = mg\sin\theta = mg\frac{h}{s} \tag{4}$$

当车速低于规定速度时，$mg\sin\theta - \frac{mv^2}{R}\cos\theta > 0$，即超高力 F_H 大于惯性离心力 F_n（实为 $F_n\cos\theta \approx F_n$），内轨将受到侧压力；当车速高于规定速度时，$F_n > F_H$，外轨将受到侧压力，其值为

$$F_T = F_n - F_H = m\frac{v^2}{R} - mg\sin\theta = mg\left(\frac{v^2}{gR} - \frac{h}{s}\right) \tag{5}$$

由力矩平衡条件可求得内轨、外轨所受垂直压力的增减载量为

$$\Delta F_N = \frac{h_C}{s} \cdot F_T = \frac{h_C}{s}(F_n - F_H) \tag{6}$$

在机车车辆技术中，通常把 $F_T = F_n - F_H$ 称为“未平衡的离心力”。把 $a_0 = \frac{F_T}{m}$ 称为“未平衡的离心加速度”（$F_T < 0$ 时则取绝对值）。根据我国大量试验结果：当 a_0=0.4 m·s^{-2}时旅客稍

感不适，因此，规定$\frac{F_T}{mg}<0.04$（相当于$a_0<0.4\ m\cdot s^{-2}$）。此外，一般规定外轨超高度h的最大容许值相当于1∶10的轨道面横向斜度，即$\frac{h}{s}=0.10$。这样，就可以求出在弯道上列车行驶的最大容许速度v_m的公式。由条件

$$\frac{F_T}{mg}=\frac{v^2}{gR}-\frac{h}{s}\leqslant 0.04$$

及$\frac{h}{s}=0.10$可得，当v以$km\cdot h^{-1}$为单位，R以m为单位时（取$g=9.8\ m\cdot s^{-2}$）

$$v^2\leqslant 3.6^2\times(0.10+0.04)gR=17.8R$$

因而

$$v_m=\sqrt{17.8R}\approx 4.2\sqrt{R} \tag{7}$$

例如，当曲率半径$R=400$ m时，可算得$v_m\approx 84\ km\cdot h^{-1}$。式（7）与铁路所用技术标准是一致的。

（选自《物理学原理在工程技术中的应用（第三版）》
马文蔚，苏惠惠，解希顺主编，高等教育出版社）

4. 高速转动物体的极限转速

转动物体内各媒质元都做圆周运动，因而都需要向心力。这些向心力由它与周围媒质元的相互作用提供。因此，在转动物体内形成一种因转动而产生的应力。当转速过高时，物体会因应力过大而断裂。那么，高速转动的物体断裂前的极限转速是多大呢？

设一个半径为R、厚度为a、密度为ρ的匀质圆盘，以角速度ω绕过盘心的固定轴转动。在圆盘上任取一半径为$r(r<R)$，宽度为dr的细圆环（见图5-42），由对称性知，环上各处应力相同。在环上再任取一小段dl，其质量为dm，dl所对应的张角为$d\theta$。可以看出，$dl=rd\theta$。而且

$$dm=\rho a dl dr=\rho a r dr d\theta$$

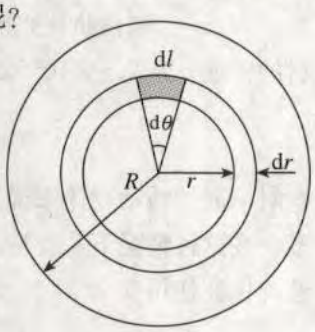


图5-42

它所受到的向心力为

$$F=\omega^2 r dm=\rho a r^2\omega^2 dr d\theta \tag{1}$$

而其他媒质元对它的作用应力F_T可看作是沿切线且方向相反的一对力（见图5-43）。从几何关系可以看出，这对力产生的合力F指向圆心，大小为

$$F=2F_T\sin\left(\frac{d\theta}{2}\right)=\rho a r^2\omega^2 dr d\theta \tag{2}$$

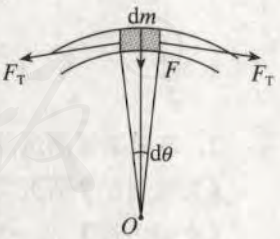


图5-43

当$d\theta$足够小时，$\sin\left(\frac{d\theta}{2}\right)\approx\frac{d\theta}{2}$。联立求解式（1）与式（2）得切应力为

$$F_T=\rho a r^2\omega^2 dr$$

又因为$\omega=2\pi n$（n为转速），则

$$F_T=4\pi^2 n^2\rho a r^2 dr$$

可见F_T与r^2成正比，应力最大处应在圆盘边缘，即最大切应力为

$$F_{Tm}=4\pi^2 n^2\rho a R^2 dr$$

对于一根棒（或杆）来说，若对其施以拉力 F_T，则 F_T 与棒的截面积 A 之比称为抗张强度。当拉力与截面积之比超过某一临界值时，棒就会断裂。这个临界值 S 称为极限抗张强度，所以转动物体的极限抗张强度 S 为

$$S=\frac{F_{Tm}}{a\,dr}=\frac{4\pi^2n^2\rho aR^2\,dr}{a\,dr}=4\pi^2n^2\rho R^2 \tag{3}$$

由式（3）解得极限转速 n_m 为

$$n_m=\frac{1}{2\pi R}\sqrt{\frac{S}{\rho}} \tag{4}$$

下面讨论极限转速的实际应用。

例 1　计算外径 D 为 400 mm、安全工作线速度 v 为 50 m·s^{-1}的砂轮极限转速。根据线速度与转速的关系，可以求出安全工作转速 n 为

$$n=\frac{60v}{2\pi R}=\frac{60v}{\pi D}=2\ 389\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$$

这种砂轮的极限抗张强度 S 约为 1.50×10^7 N·m^{-2}，密度 ρ 约为 2.5×10^3 kg·m^{-3}。由式（4）知它的极限转速 n_m 为

$$n_m=\frac{1}{\pi D}\sqrt{\frac{S}{\rho}}=61.7\ \text{r}\cdot\text{s}^{-1}=3\ 700\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$$

为了保证砂轮在高速磨削过程中有足够的强度不破裂，出厂前按安全工作转速的 1.5 倍进行检测。上述砂轮的安全工作转速为 2 389 r·min^{-1}。

例 2　以极限抗张强度 S 为 10^9 N·m^{-2}的钢制圆盘为例，来计算它的极限转速。这种钢材的密度 ρ 为 7.6×10^3 kg·m^{-3}。设钢盘的直径 D 为 500 mm，由式（4）知它的极限转速为

$$n_m=\frac{1}{\pi D}\sqrt{\frac{S}{\rho}}=231\ \text{r}\cdot\text{s}^{-1}=13\ 863\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$$

这对一般的转动物体来说是很高的转速。但是对于超高速离心机来说，它的转速可以比这高得多。在这种情况下，要精心选择合适的材料，严格计算极限转速，使安全工作转速低于极限转速，保证使用安全。

（选自《物理学原理在工程技术中的应用（第三版）》
马文蔚，苏惠惠，解希顺主编，高等教育出版社）

（三）实验参考资料

1. 匀速率圆周运动的向心力、频率和半径

【实验目的】研究匀速率圆周运动的频率与向心力和半径的关系。

【实验内容】选一根圆珠笔杆，取一根 2.5 m 长的尼龙钓鱼丝，一端系一个橡胶塞（或小沙袋）；另一端穿过圆珠笔杆，然后吊上 6 个 1 cm 外径的铁垫圈或两个 M10 的螺母，最后再在尾端打一死结。用一枚曲别针穿过死结，作为防止垫圈滑脱的阻挡物，见图 5-44。调节尼龙丝，使橡胶塞距圆珠笔杆的顶口（笔尖部）的线长为 1 m。握住圆珠笔杆，并在头的上方尽量使橡胶塞在一个水平面内做匀速圆周运动。此时垫圈或螺母的重力成为橡胶塞圆周运动的向心力。为了检查转动是否平稳，可用一个鳄鱼夹夹

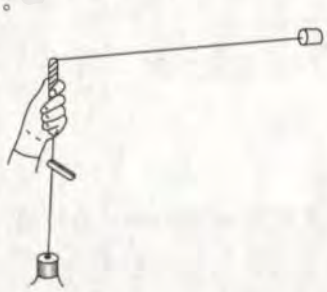


图 5-44

在圆珠笔杆下口的线上，如图示。记录垫圈的个数和使橡胶塞保持匀速转动的频率。调节水平部分线的长度，使旋转半径先增加$\frac{1}{2}$倍，然后再减小$\frac{1}{2}$，分别数出使橡胶塞仍能做匀速转动的频率。看频率的增减与旋转半径的变化相同还是相反？是否成正比？取下曲别针，先后增加垫圈的数量至最初的1.5倍和2倍（这相当于增大了向心力），保持初态的半径1 m，分别数出橡胶塞匀速转动的频率，看向心力如何影响转动的频率。

垫圈可以改用弹簧秤读数。

（摘自《国外中学实验　物理》，续佩君，郑鹃，王士平译）

2. 用圆锥摆验证向心力的表达式

课文第6节“用圆锥摆粗略验证向心力的表达式”，这一实验方法简单易行，很有启发性，但是有几个因素可能会影响实验的成功。

① 用手带动钢球做圆周运动，手与球分离后小球的运动很难做到是圆运动；

② 测量小球转动若干圈时间的过程中，小球由于受空气阻力的影响转动半径不断减小。

可以用电动机做一个电动的圆锥摆，可以改变摆长、转速以及小球的质量，可以做到转速稳定、半径不变、摆角θ不变。

选用220 V交直流电动机（有电刷），如图5-45所示，加长转轴，加长轴的端部有螺杆和螺母，用薄铁片做一个圆片中间打一个圆孔套在轴杆的螺杆上，两侧各打一个小孔做悬挂小球的支架。用直径1 mm左右的铁丝穿过小球做成如图所示的形状，选择不同的长度和小球质量可以完成不同半径、不同质量的实验。电动机选择不同的低压直流电压，并且用滑动变阻器调速，可获得不同的转速改变小球的线速度与角速度。在转动的小球下方靠近轴的位置水平放置一根米尺，可以确定摆角，或采用教科书的方法确定运动半径和摆角。

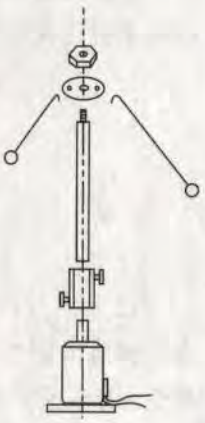


图5-45

课文“用手带动钢球，设法使它沿纸上的某个圆周运动（图5.6-1），随即手与钢球分离”。这一实验方法可以改为用手捏住细线靠近悬点的位置使细线转动，当钢球比较稳定地做圆运动后松开手，效果要好一些。

注意实验中的圆锥摆的摆长是从钢球的球心开始，并将摆线延长与转轴中心线的交点之间的长度，不是铁丝钩至钢球球心的长度。

3. 拱形桥、凹形桥的压力实验

用3 mm的粗铁丝做成如图5-46所示的凹形桥和拱形桥，两个桥的宽度由所用的钢球直径而定，约为2～3 cm，小于钢球直径。钢球直径选择在3～4 cm、质量在200 g左右。

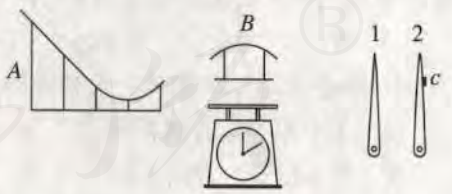


图5-46

将弹簧台秤（测力计）的玻璃卸下，再卸下指针。把薄铁片剪成指针的形状，侧面留出一小块铁皮c如图5-46中2所示，向上弯折与指针垂直，作为记忆指针，记忆指针的轴孔略大于原指针1。将记忆指针安装在原指针的下面。

实验时先将拱形桥B用夹子固定在台秤上，记下示数，再将钢球放在台秤上，记下示数，将记忆指针推回指针1的位置。将凹形桥A安装在铁架台上，并使出口弧线与拱形桥B的入口弧线相切，留2～3 mm的间隙，钢球从A的某处释放，并能从拱形桥B上通过。当钢球从拱形桥B通过后，可以看到记忆指针的位置小于钢球静止放在台秤上的示数。改变钢球在凹

形桥上的高度，台秤失重的示数也会改变。

将凹形桥固定在台秤上，让钢球从某处开始滚下，可以看出记忆指针的位置所指示的示数大于钢球静止时的示数。改变钢球的高度，超重的数值也会改变。

4. 实验尝试：用力传感器与计算机研究圆锥摆的运动

如图 5-47 所示，将力传感器 A 用铁架台固定；玻璃管或圆珠笔杆 D 固定；用尼龙线做拉线；米尺 E 放在圆的正下方，且过圆心，测量圆的直径；将力传感器与数据采集器、计算机连接。观察向心力的大小。同时测出小球的质量、做圆周运动的周期、圆锥摆摆线的长度。计算小球的线速度、角速度、半径。改变这些参数，观察力变化的情况，可以验证向心力公式。

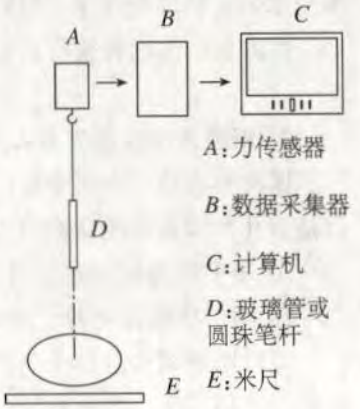


图 5-47

因为力传感器测量力时几乎没有形变，而且只能沿轴线方向受力，不能将小球的摆线直接悬挂在力传感器的钩子上做圆周运动，所以玻璃管或圆珠笔杆要固定。使力传感器受到的拉力沿着力传感器的轴线方向。

没有力传感器，可以用弹簧秤代替，玻璃管或圆珠笔杆可以用手握住使小球做圆周运动。观察拉力的变化情况。

五、补充习题

A 组

1. 某质点在恒力 F 作用下从 A 点沿图 5-48 中曲线运动到 B 点，到达 B 点后，质点受到的力大小仍为 F，但方向相反，则它从 B 点开始的运动轨迹可能是图中的（　　）

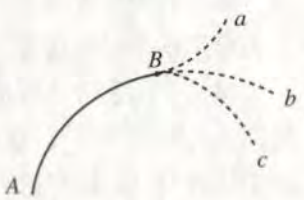


图 5-48

A. 曲线 a　　B. 曲线 b

C. 曲线 c　　D. 以上三条曲线都不可能

2. 某人以不变的速度垂直于对岸游去，游到中间，水流速度加大，则此人渡河所用时间比预定时间（　　）

A. 增加　　B. 减少　　C. 不变　　D. 无法确定

3. 做平抛运动的物体，每秒钟的速度增量是（　　）

A. 大小相等，方向相同　　B. 大小不等，方向不同

C. 大小相等，方向不同　　D. 大小不等，方向相同

4. 一个物体以速度 v_0 水平抛出，落地速度为 v，则运动时间为（　　）

A. $\frac{v-v_0}{g}$　　B. $\frac{v+v_0}{g}$　　C. $\frac{\sqrt{v^2-v_0^2}}{g}$　　D. $\frac{\sqrt{v^2+v_0^2}}{g}$

5. 下列说法正确的是（　　）

A. 匀速圆周运动是一种匀速运动　　B. 匀速圆周运动是一种匀变速运动

C. 匀速圆周运动是一种变加速运动　　D. 物体做圆周运动时，其合力垂直于速度方向

6. 如图 5-49 所示为一皮带传动装置，右轮半径为 r，A 为它边缘上一点；左侧是一轮轴，大轮半径为 $4r$，小轮半径为 $2r$。B 点在小轮上，到小轮中心的距离为 r。C 点和 D 点分别位于

小轮和大轮的边缘上。若传动过程中皮带不打滑，则以下说法正确的是（　　）

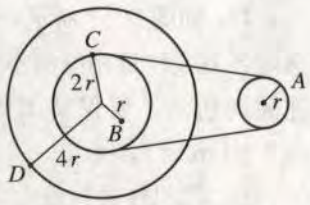


图 5-49

①A 点和 B 点的线速度大小相等

②A 点和 B 点的角速度大小相等

③A 点和 C 点的线速度大小相等

④A 点和 D 点的向心加速度大小相等

A. ①③　　B. ②③　　C. ③④　　D. ②④

7. 下列关于做匀速圆周运动的物体所受的向心力的说法中，正确的是（　　）

A. 物体除其他的力外还受到向心力的作用

B. 物体所受的合力提供向心力

C. 向心力是一个恒力

D. 向心力的大小一直在变化

8. “神舟”六号飞船在太空中飞行时，中央电视台曾播放了聂海胜和费俊龙在飞船上吃早餐的镜头。从镜头中可看到整包食物“悬”在空中的情景，其原因是（　　）

A. 食物质量太小，所受地球引力可以忽略

B. 食物离地球太远，所受地球引力可以忽略

C. 食物受到空气浮力的作用

D. 食物处于完全失重状态

9. 物体受几个力作用而做匀速直线运动，若突然撤去其中一个力，它可能做（　　）

A. 匀速直线运动　　B. 匀加速直线运动

C. 匀减速直线运动　　D. 曲线运动

10. 对于分别位于地球北纬 30°和赤道上的两个物体 A 和 B，下列说法中正确的是（　　）

A. A、B 两点的角速度相等　　B. A、B 两点线速度相等

C. A、B 两点的转动半径相同　　D. A、B 两点的转动周期相同

11. A、B、C 三个物体放在旋转圆台上，都没有滑动，如图 5-50 所示。静摩擦因数均为 μ，A 的质量为 $2m$，B、C 的质量均为 m，A、B 离轴为 R，C 离轴为 $2R$。当圆台旋转时，下列判断中正确的是（　　）

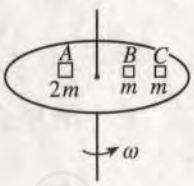


图 5-50

A. C 物的向心加速度最大

B. B 物的静摩擦力最小

C. 当圆台转速增加时，C 比 A 先滑动

D. 当圆台转速增加时，B 比 A 先滑动

12. 某船在河中向东匀速直线航行，船上的人正相对于船以 0.4 m/s 的速度匀速竖直向上升起一面旗帜。当他用 20 s 升旗完毕时，船行驶了 9 m，那么旗相对于岸的速度大小是_____ m/s。

13. 两相同高度的斜面，倾角分别为 α、β，小球 1、2 分别由斜面顶端以相同水平速度 v_0 抛出（如图 5-51 所示），假设两球能落在斜面上，则两球的

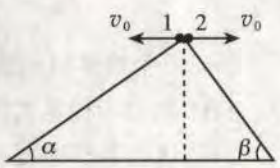


图 5-51

（1）飞行时间之比为_____；

（2）水平位移之比为_____；

（3）竖直下落高度之比为_____。

14. 如图 5-52 所示，光滑圆盘中心有一小孔，用细绳穿过小孔，两端各系一质量相等的小球 A、B。盘上的球 A 做半径 $r=20$ cm 的匀速圆周运动，要保持 B 球平衡，A 球的角速度应为_____ rad/s（$g=10$ m/s^2）。

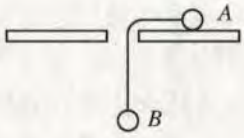


图 5-52

15. 飞机在进行航空测量，它的航线要严格地从西到东。如果飞机的速度是 80 km/h，风从南面吹来，风的速度是 40 km/h，那么，

（1）飞机应朝什么方向飞行？

（2）如果所测地区长度为 $80\sqrt{3}$ km，所需时间是多少？

16. 如图 5-53 所示，半径为 R 的光滑圆环上套有一质量为 m 的小环，当圆环以角速度 ω 绕着过环心的竖直轴旋转时，求小环偏离圆环最低点的高度。

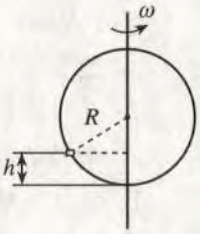


图 5-53

B 组

1. 下列说法中，正确的是（　　）

A. 物体保持速率不变沿曲线运动，其加速度为 0

B. 曲线运动一定是变速运动

C. 变速运动一定是曲线运动

D. 物体沿曲线运动一定有加速度，且一定是匀加速曲线运动

2. 质点做曲线运动的轨迹如图 5-54 所示，它由 A 向 C 运动。图中标出了质点经过 B 点时速度 v 的方向和加速度 a 的方向，其中正确的是（　　）

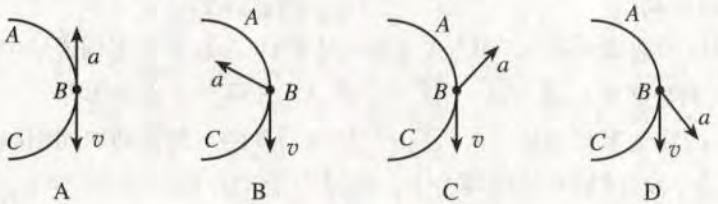


图 5-54

3. 一汽船载客渡河，若其在静水中的速度一定，河水的流速也不变，且 $v_{船}>v_{水}$，则（　　）

A. 船沿垂直于河岸的路线到达对岸，渡河最省时

B. 使船身方向垂直于河岸，渡河最省时

C. 使船身方向垂直于河岸，渡河路程最短

D. 不管船向什么方向行驶，船都无法垂直到达正对岸

4. 一个物体以初速 v_0 水平抛出，经时间 t，竖直方向速度大小为 v_0，则 t 为（　　）

A. $\frac{v_0}{g}$　　B. $\frac{2v_0}{g}$　　C. $\frac{v_0}{2g}$　　D. $\frac{\sqrt{2}v_0}{g}$

5. 一个物体以角速度 ω 做匀速圆周运动时，下列说法中正确的是（　　）

A. 轨道半径越大线速度越小　　B. 轨道半径越大线速度越大

C. 轨道半径越大周期越大　　D. 轨道半径越大周期越小

6. 下列关于匀速圆周运动的说法中，正确的是（　　）

A. 向心加速度的方向保持不变　　B. 向心加速度是恒定的

C. 向心加速度的方向始终与速度的方向垂直　D. 向心加速度的大小不断变化

7. 如图 5-55 所示，固定的锥形漏斗内壁是光滑的，内壁上有两个质量相等的小球 A 和 B，在各自不同的水平面做匀速圆周运动，以下说法正确的是（　　）

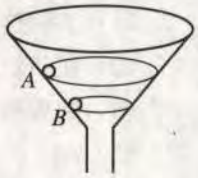


图 5-55

A. $v_A > v_B$　　B. $\omega_A > \omega_B$

C. $a_A > a_B$　　D. 压力 $F_{NA} > F_{NB}$

8. 衣服在洗衣机中脱水时附着在筒壁上，此时（　　）

A. 衣服受重力、筒壁的弹力和摩擦力、离心力的作用

B. 衣服随筒壁做圆周运动的向心力由筒壁的弹力提供

C. 筒壁对衣服的摩擦力随着转速的增大而增大

D. 筒壁对衣服的弹力随着衣服含水量的减少而减小

9. 某人站在自动扶梯上，经时间 t_1 从一楼升至二楼。如果扶梯不动，此人沿着扶梯从一楼走至二楼所用时间为 t_2。现使扶梯正常运动，人也保持原来的速度向上走，则人从一楼到二楼的时间是（　　）

A. $t_2 - t_1$　　B. $\dfrac{t_1 t_2}{t_1 + t_2}$　　C. $\dfrac{t_1 t_2}{t_1 - t_2}$　　D. $\sqrt{\dfrac{t_1^2 + t_2^2}{2}}$

10. 如图 5-56 所示，小物体位于半径为 R 的半球顶端，若给小物体以水平初速度 v_0 时，小物体对球顶恰无压力，则（　　）

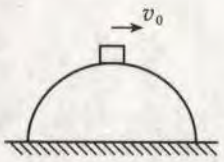


图 5-56

A. 物体立即离开球面做平抛运动

B. 物体落地时水平位移为 $\sqrt{2}R$

C. 物体的初速度 $v_0 = \sqrt{gR}$

D. 物体着地时速度方向与地面成 45°角

11. 如图 5-57 所示，小球 m 在竖直放置的光滑圆形管道内做圆周运动，下列说法中正确的有（　　）

图 5-57

A. 小球通过最高点的最小速度为 $v = \sqrt{Rg}$

B. 小球通过最高点的最小速度为 0

C. 小球在水平线 ab 以下管道中运动时，外侧管壁对小球一定有作用力

D. 小球在水平线 ab 以上管道中运动时，内侧管壁对小球一定有作用力

12. 一圆环的圆心为 O，若以它的直径 AB 为轴做匀速转动，如图 5-58所示，圆环上 P、Q 两点的线速度大小之比是_____；若圆环的半径是 20 cm，绕 AB 轴转动的周期是 0.1 s，环上 Q 点的向心加速度大小是_____ $\mathrm{m/s^2}$。

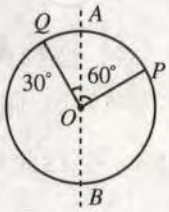


图 5-58

13. 飞机在 2 km 的空中以 100 m/s 的速度水平匀速飞行，相隔 1 s，先后从飞机上掉下 A、B 两物体。不计空气阻力，求两物体在空中的最大距离（$g = 10\ \mathrm{m/s^2}$）。

14. 如图 5-59 所示，一个质量为 $m = 2$ kg 的小球在细绳牵引下在光滑水平的平板上以速率 $v = 1.0$ m/s 做匀速圆周运动，其半径 $r = 30$ cm。现将牵引的绳子迅速放长 20 cm，使小球在更大半径的新轨道上做匀速圆

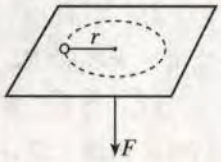


图 5-59

周运动。求：

（1）实际这一过渡所经历的时间；

（2）在新轨道上做匀速圆周运动时，小球旋转的角速度；

（3）圆周的半径增大后外界对绳子的拉力。

15. 如图 5-60 所示，AB 为竖直转轴，细绳 AC 和 BC 的结点 C 系一质量为 m 的小球，两绳能承担的最大拉力均为 $2mg$。当 AC 和 BC 均拉直时 $\angle ABC=90°$，$\angle ACB=53°$，$BC=1$ m。ABC 能绕竖直轴 AB 匀速转动，因而 C 球在水平面内做匀速圆周运动。求：

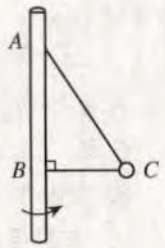


图 5-60

（1）当 m 的线速度增大时，AC 和 BC 哪条绳先断？

（2）一条绳被拉断后，m 的速率继续增大，整个运动状态会发生什么变化？

参考答案

A 组

1. A　2. C　3. A　4. C　5. C　6. C　7. B　8. D　9. BCD　10. AD　11. ABC

12. 0.6 m/s　13.（1）$\tan\alpha:\tan\beta$　（2）$\tan\alpha:\tan\beta$　（3）$\tan^2\alpha:\tan^2\beta$

14. $\sqrt{50}$　15.（1）东偏南 30°，（2）2 小时

16. $R-\frac{g}{\omega^2}$　提示：分析圆环转动时受力情况，可知合力由支持力与重力构成，合力方向水平指向转轴，则 $mg\tan\theta=m\omega^2R\sin\theta$，推得 $\cos\theta=\frac{g}{\omega^2R}$。故高度 $h=R-R\cos\theta$。

B 组

1. B　2. B　3. B　4. A　5. B　6. C　7. A　8. BD　9. B　10. ABC　11. BC

12. $\sqrt{3}:1$；$40\pi^2$　13. 195 m

14.（1）0.4 s　（2）1.2 rad/s　（3）1.44 N

提示：（1）根据题意，迅速放长绳子，意味着小球某一时刻从某切线位置做离心运动（如图 5-61），即以匀速直线运动过渡到大半径上，则

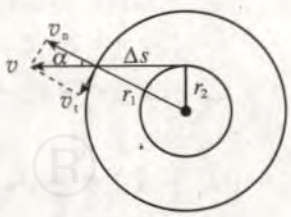


图 5-61

$$t=\frac{\Delta s}{v}=\frac{\sqrt{r_1^2-r_2^2}}{v}=0.4\text{ s}$$

（2）当小球到达新轨道时，由于绳子作用使小球速度 v 的径向分量 v_n 减为 0，而只保留切线分量 v_t，则新的线速度 $v'=v_t=v\sin\alpha=0.6$ m/s，因此 $\omega=\frac{v'}{r_1}=\frac{0.6}{0.5}$ rad/s$=1.2$ rad/s。

（3）拉力提供向心力，即 $F=\frac{v'^2}{r_1}=2\times\frac{0.6^2}{0.5}$ N$=1.44$ N。

15.（1）BC 先断。当小球线速度增大到 BC 被拉直时，AC 线拉力 $F_{TA}=1.25mg$；当球速再增大些时 F_{TA} 不变，BC 线拉力 F_{TB} 随球速增大而增大；当 $v\geqslant5.19$ m/s 时，BC 线先断。

（2）当 BC 线断后，AC 线与竖直方向夹角 α 因离心运动而增大，同时球速因重力而减小；当球速再增大时，$\angle BAC$ 随球速增大而增大；当 $\alpha=60°$ 时，$F_{TA}=2mg$，AC 也断，此时球速 $v'=4.95$ m/s。

第六章
万有引力与航天

课程标准的要求

1. 通过有关史实了解万有引力定律的发现过程。知道万有引力定律。认识发现万有引力定律的重要意义，体会科学定律对人类探索未知世界的作用。

2. 会计算人造卫星的环绕速度。知道第二宇宙速度和第三宇宙速度。

3. 初步了解经典时空观和相对论时空观，知道相对论对人类认识世界的影响。

4. 初步了解微观世界中的量子化现象，知道宏观物体和微观粒子的能量变化特点，体会量子论的建立深化了人类对于物质世界的认识。

5. 通过实例，了解经典力学的发展历程和伟大成就，体会经典力学创立的价值与意义，认识经典力学的实用范围和局限性。

6. 体会科学研究方法对人们认识自然的重要作用。举例说明物理学的进展对于自然科学的促进作用。

一、本章教材概述

从知识结构上看，本章教材是应用牛顿运动定律对曲线运动的研究。牛顿运用其运动定律研究天体运动并结合开普勒定律建立了伟大的万有引力定律。牛顿运动定律和万有引力定律构成了牛顿力学的核心内容。

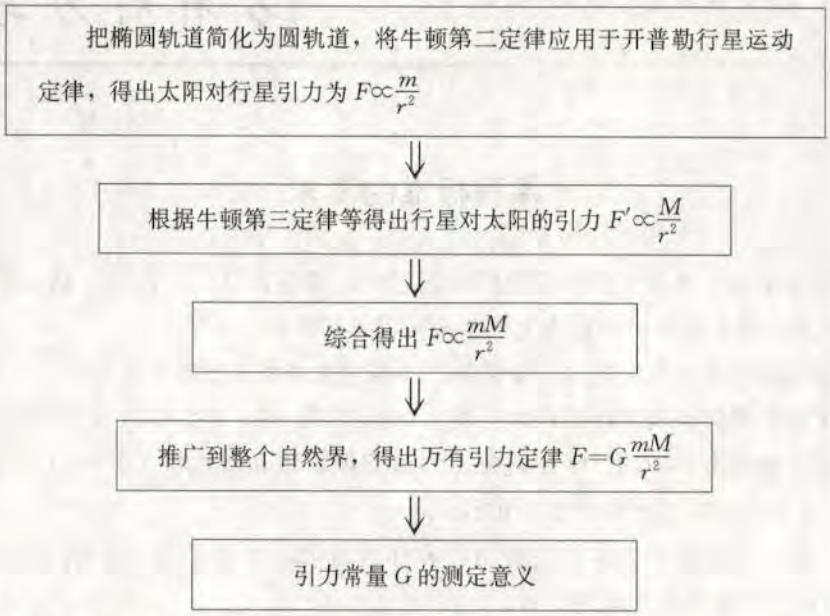
人类对行星运动规律的认识过程和牛顿建立万有引力定律的过程是对学生进行“过程与方法”“情感、态度与价值观”教育的难得的好材料。本章教材首先详细地介绍了托勒密的地心说、哥白尼的日心说、第谷的观测和开普勒行星运动定律，形象、生动地体现了坚持真理、勇于创新和实事求是的科学态度、科学精神和科学思维方法。第 2 节把行星运动轨道简化为圆，应用牛顿运动定律和开普勒行星运动定律导出太阳与行星间的引力 $F=G\frac{Mm}{r^2}$。第 3 节阐述牛顿进一步放眼宇宙建立了适用于自然界中任何两个物体间的万有引力定律，分析说明万有引力定律和引力常量的意义。教材接着阐述万有引力定律对天体运动的研究和在宇宙航行上的应用。最后，概括阐述了经典力学（牛顿力学）的局限性，指出只适用于低速、宏观、弱引力的情况。

在编写本章时还有以下思考：

1. 充分展现万有引力定律发现的科学过程，发展学生的科学思维能力

万有引力定律的发现过程犹如一部壮丽的科学史诗，它歌颂了前辈科学家的科学精神，也展现了科学发展过程中科学家们富有创造而又严谨的科学思维，是发展学生思维能力难得的好

材料，本章充分利用这些材料发展学生的科学思维能力。教科书在尊重历史事实的前提下，通过一些逻辑思维的铺垫，让学生以自己现有的知识基础处身于历史的背景下，经历一次自己“发现”万有引力定律的过程。教科书关于发现万有引力定律的线索和思路如下：



2. 注重科学文化教育

科学意识、科学精神、科学价值观等都是在科学发展过程中形成的。牛顿时代的科学家们围绕着万有引力的研究，经历了大量曲折顽强而又闪烁智慧的科学实践。这些科学发展过程中的事例都是实现“情感、态度与价值观”目标的好材料，教科书在组织内容时，重视科学文化对学生的熏陶作用。

例如，第一节课文中“人类对行星运动规律的认识”一文，通过对托勒密、哥白尼、第谷、开普勒等科学家关于行星运动规律研究的介绍，以使学生领略前辈科学家们对自然奥秘不屈不挠探索的精神和对待科学研究一丝不苟的态度，进而感悟科学的结论总是在顽强曲折的科学实践 中悄悄地来临。

又如，教科书通过从牛顿时空观到爱因斯坦时空观之间的“漫步”，展示两个世纪以来科学家们对“黑洞”的探究，开阔学生的视野，激发学生的求知欲，激励学生对未来的探索。

3. 增进科学与生活、社会的联系

人们常常认为万有引力似乎跟现实生活、人类社会难有联系。认为航天活动是一项高精尖的事业，与自己的距离较远。其实，只要我们去认真关注，科学跟生活、跟社会的联系是紧密的，航天正在改变着我们的日常生活和社会。教科书“STS”栏目“航天事业改变着人类生活”列举了诸多航天跟人类生活相关的事例，从气象卫星到天气预报、卫星定位系统到自动导航的汽车、地球资源卫星到我国西部开发整体规划，军事卫星到现代防务，失重现象到微重力实验室，太空辐射到太空育种，等等。它引导学生进行科学跟生活、跟社会联系的思考，当学生收看到电视台天气预报的卫星云图时，让学生体会到物理学就在我们的身边。

4. 正确评价经典力学

“经典力学的局限性”实际上是对经典力学的总结。教科书首先肯定了经典力学的巨大成就，然后从低速到高速、宏观到微观、弱引力到强引力三个方面介绍了经典力学的局限性，这些介绍的具体内容并不要求学生掌握，而是让学生知道科学成就总是在不断发展的，并且给学

生一个这样的观念：一个新的科学理论的建立并不意味着原有科学理论的推翻，而是原有科学理论在一定条件下成为新理论的一部分。从这个角度看，科学结论的普适性总是相对的，科学就是在不断探索更广泛适用的理论中得到发展。

本书引用了马克·吐温的话："根据零星的事实，增添一点猜想，竟能赢得那么多收获!"本书还引用了剧作家萧伯纳诙谐名句"科学总是从正确走向错误。"这些出自科学界以外的名人之语，使学生从另一个视角领悟科学发现的哲理。

课时安排建议

第 1 节	行星的运动	1 课时
第 2 节	太阳与行星间的引力	1 课时
第 3 节	万有引力定律	1 课时
第 4 节	万有引力理论的成就	1 课时
第 5 节	宇宙航行	1 课时
第 6 节	经典力学的局限性	1 课时

二、教材分析与教学建议

第 1 节　行星的运动

1. 教学目标

(1) 了解人类对行星运动规律的认识历程。

(2) 了解观察的方法在认识行星运动规律中的作用。

(3) 知道开普勒行星运动定律，知道开普勒行星运动定律的科学价值，了解开普勒第三定律中 k 值的大小只与中心天体有关。

(4) 体会科学家们实事求是、尊重客观事实、不迷信权威、敢于坚持真理和勇于探索的科学态度和科学精神，体会对描述自然追求简单和谐是科学研究的动力之一。

2. 教材分析与教学建议

本节内容对全章的教学起着引领性的作用，同时又为本章的重点内容万有引力定律的学习起一个铺垫性的作用。本节内容的突出特点是：知识容量较少，但包含的科学史料十分丰富。因此，本节的教学设计应立足于对学生进行科学精神、科学思想方法的教育。让学生在科学家关于天体运动问题的研究历史中，感悟科学家求真、求简的科学思想方法和科学精神。从学生已经具有的知识基础来讲，学生对有关科学家的事例可能略知一二，但对科学家的发现、发明、创造内容的了解还不够系统和准确。因此，对于行星是怎样运动的教学可以有两种处理方法：一种是教师讲述的方法，另一种是学生先看（查），后教师总结的方法。对于程度较好的学生可采用后一种方法，在上本节课之前，先布置给学生一些学习任务，如：①阅读教科书"人类对行星运动规律的认识"。②查找有关描述天体运动的历史资料，并要求在课堂上进行交流。在课堂教学中，让学生交流各自获得的资料后，提出自己的问题并择要进行分析讨论，然后教师归纳出人类认识天体运动大致的历史发展过程，使学生对全章有一个概括性的认识。这

样做，一方面可以培养学生获取资料、分析资料、合作交流的能力；另一方面，在整体的背景下实施教学，有利于提高学生的认知水平。

本节内容是从运动学的角度描述天体的运动，知识的逻辑结构是从介绍托勒密的地心宇宙学说到哥白尼的太阳中心学说，再提出开普勒的行星运动定律。按照人类认识天体运动的发展历史学习本节内容，这一顺序也符合学生认知发展的规律。

本节内容是以陈述的方式编写的，课堂教学如果按这种方式进行，难以起到应有的教育效果。所以，在教学设计时教师要根据人类认识行星运动的历史事实与学生认知的实际情况确定探究点，适当进行猜想与探究，以问题探究与故事讲解相结合的方式组织课堂教学，这种教学处理方式比较符合本节内容的特点。为此，建议确定以下几个探究点。

（1）探究地心说与日心说争论的焦点

教师可设置以下问题：

①地心说的基本观点是什么？②日心说的基本观点是什么？③日心说与地心说争论的焦点是什么？④为什么日心说最终战胜地心说？

在学生思考回答的基础上教师再作如下适当介绍。地心说认为地球是静止不动的，太阳、月亮及其他行星围绕地球运动。日心说认为太阳是静止不动的，地球和其他行星围绕太阳运动。在哥白尼之前，欧洲流行的是以地球为中心的“地心说”：地球位于宇宙的中心，月亮、水星、金星、太阳、火星、木星、土星等都在各自的轨道上围绕地球旋转，外层则是恒星天和原动天。尽管这样的说法与看到的火星的逆行有矛盾，但由于宗教的支持，还是以本轮与均轮的说法来解释。尽管哥白尼根据实验的观察，提出的日心体系与实际情况更加符合，但遭到教廷的坚决反对，布鲁诺由于坚持日心说，而被教廷活活烧死在鲜花广场上。开普勒用了 20 年的时间研究了丹麦天文学家第谷的行星观察资料，发现了行星运动规律，最终改变了人们对天体运行的认识。

（2）探究开普勒行星运动定律建立的过程

开普勒行星运动定律建立的过程是本节学习的重点，行星运动模型的建立、修正与发展的历史，是培养学生科学思想方法与物理建模的极好材料，教师在教学中应予以重视。人类对行星运动规律的认识过程充满着曲折与艰辛，人们的宇宙观代表着与这个时期社会大背景相适应的主流观念和意识，从地心说的直接经验开始，到日心说的转变，不是简单的参考系的变化，要让学生理解这是人类思想的一次重大解放，从此人类的视角超越了地球。然而，地心说和日心说都保留了人们心目中所钟爱的完美图形——圆，这在一定程度上代表了古代人的审美观。教师可向学生点明开普勒能够最终放弃这一世世代代为人们所信仰的完美图形，而坚信第谷的精确观察数据，不仅需要严谨的科学态度与科学精神，也需要科学智慧与勇气。

教材的“科学足迹”部分，从科学与历史、科学与艺术、物理与社会、科学发展与思想解放等，从不同视角介绍人类对行星运动定律的认识。寓意很深，可读性强，这里包含许多教育因素，建议教师指导学生进行认真阅读，可以对材料给出的科学家群体的主要代表人物哥白尼、第谷、开普勒的活动过程和思维方法加以分析，使学生得到一些感悟。

哥白尼：“哥白尼的眼光超越了地球……使人类来到了牛顿物理学的门前。”在这里，哥白尼的开放观点并不是孤立的历史事件，教材把它放到当时社会经济、文化环境中来加以分析与说明。文艺复兴带来的思想与艺术的繁荣对哥白尼有深刻影响，一方面艺术的繁荣使哥白尼坚信宇宙中的行星运动是美的，而美的东西一定是简单与和谐的；另一方面，思想的繁荣解脱了束缚人们头脑的枷锁，才使“哥白尼的眼光超越了地球”。

第谷："在他以前，人们观测天体位置的误差大约是 10′，第谷把这个不确定性减小到 2′。他的观测结果为哥白尼的学说提供了关键性的支持。"这里通过对第谷精于"观察自然"的描述，强调了实验观察手段在科学研究中的重要作用。

开普勒：开普勒从相信"行星绕太阳做匀速圆周运动的观点"开始思考问题，到对火星轨道"70 余次尝试所得的结果都与第谷的观测数据有至少 8′的角度偏差"；直至最后他"对第谷数据的精确性深信不疑……这不容忽视的 8′也许正是因为行星的运动并非匀速圆周运动"。第一次大胆地对"人们长期以来视为真理的观念——天体在做'完美的'匀速圆周运动"表示怀疑。开普勒相信真理而不迷信权威的实事求是的科学态度，是科学精神与科学态度的极好的教育素材。同时，也应该看到第谷与开普勒的美妙合作，第谷和开普勒是两个风格截然不同的科学家，一个擅长观察，另一个是数学天才，但是谁的作用也不可忽视，第谷从实验观测入手，开普勒再对实验结果进行数学归纳，"把几千个数据归纳成如此简洁的几句话"，说明科学探究需要有合作精神，科学探索的乐趣与科学方法的魅力可见一斑。在第 6 节的"科学足迹：牛顿的科学生涯"中则更进一步强调了这种科学方法，并且指出实验归纳和数学演绎相结合的方法，是经过几代科学家的不懈努力所形成的。

为了使教学效果更好，建议用声像资料配合这节的教学，也可以让学生到网上查询有关的资料，有条件的学校还可以制作或采用一些动态的课件辅助学生理解行星的运动。

(3) 探究椭圆轨道特征

由于学生在数学课上还未学习椭圆，为此在"做一做"栏目中让学生动手画椭圆，自己归纳出椭圆的特征，从而对椭圆先有一个感性的认识。然后教师适当介绍椭圆的轨道方程、焦点、半长轴和半短轴等相关知识，为理解开普勒行星运动定律做好准备。

(4) 探究开普勒行星运动定律的内容及其物理意义

开普勒第一定律：所有的行星围绕太阳运动的轨道都是椭圆，太阳处在所有椭圆的一个焦点上。说明行星运动的轨道特征。

开普勒第二定律：对任意一个行星来说，它与太阳的连线在相等的时间内扫过相等的面积。说明行星运动速度变化的规律，靠近太阳的时候行星运动得快，远离太阳的时候行星运动得慢。开普勒第二定律还蕴含着行星与太阳之间的相互作用力在行星与太阳的连线上这一结论。

开普勒第三定律：所有行星的轨道的半长轴的三次方跟公转周期的二次方的比值都相等。这个定律的得出比前两个要晚一些，他要通过对所有行星围绕太阳运动的轨道半长轴与公转周期的比较，才能得出。$\frac{a^3}{T^2}=k$ 中，蕴含着行星运动的动力学关系，是牛顿得出万有引力定律的基础。

开普勒三个行星运动定律是一个整体，它对行星运动规律的描述有一个从定性到定量的过程，开普勒第一定律是其余两个定律的基础。但三个定律描述的内容又是各自独立的，并不重复。附带可以给学生提一下，开普勒三个行星运动定律不但适用于行星绕太阳的运动，也适用于卫星绕行星的运动。

教材还明确给出了行星轨道看成"圆"时开普勒定律的表述，为万有引力定律的探究作了铺垫。

在本节课的教学中，还可以适当给学生提示一下，行星运动的研究只能用观察测量的方法，不能用实验研究的方法。科学家对行星研究成果是天文历法基础，所以，行星的研究与地

理学科相关性很大。

3. 问题与练习

内容分析

本节是为巩固和理解开普勒行星运动定律服务的，通过计算与分析让学生感悟开普勒行星运动定律的物理意义。第 1 小题的目的，一是让学生了解天体之间距离之大；二是让学生了解天文学上的计量单位，比较“天文单位”与“光年”的区别；三是让学生了解利用地球的有关已知量可以计算其他行星的有关物理量。第 4 小题让学生经历一次哈雷彗星下次出现时间预测，教师要利用这个机会激发学生研究的兴趣。

解答与说明

1. 行星绕太阳的运动按圆轨道处理，根据开普勒第三定律有 $\frac{r_{地日}^3}{T_{地球公转}^2}=\frac{r_{火日}^3}{T_{火星公转}^2}$，即 $T_{火星公转}^2=\frac{r_{火日}^3}{r_{地日}^3}T_{地球公转}^2=\frac{1.5^3}{1^3}\times 365^2$。所以

$$T_{火星公转}=\sqrt{1.5^3}\times 365\text{ 天}\approx 671\text{ 天}$$

2. 根据开普勒第二定律，卫星在近地点速度较大、在远地点速度较小。

3. 设通信卫星离地心的距离为 r_1、运行周期为 T_1，月心离地心的距离为 r_2，月球绕地球运行的周期为 T_2，根据开普勒第三定律

$$\frac{r_1^3}{T_1^2}=\frac{r_2^3}{T_2^2}$$

$$\frac{r_1}{r_2}=\sqrt[3]{\frac{T_1^2}{T_2^2}}=\sqrt[3]{\frac{1^2}{27^2}}=\frac{1}{9}$$

4. 根据开普勒第三定律

$$\frac{r_{地日}^3}{T_{地球绕日}^2}=\frac{r_{彗星}^3}{T_{彗星绕日}^2}$$

得到

$$T_{彗星绕日}^2=\frac{r_{彗星}^3}{r_{地日}^3}\times T_{地球绕日}^2$$

$$T_{彗星绕日}=\sqrt{18^3}\text{ 年}\approx 76.4\text{ 年}$$

则哈雷彗星下次出现的时间是 2062 年。

第 2 节　太阳与行星间的引力

1. 教学目标

(1) 知道行星绕太阳运动的原因，知道太阳与行星间存在着引力作用。

(2) 知道行星绕太阳做匀速圆周运动的向心力来源。

(3) 知道太阳与行星间引力的方向和表达式，知道牛顿定律在推导太阳与行星间引力时的作用。

(4) 领会将不易测量的物理量转化为易测量物理量的方法。

2. 教材分析与教学建议

从行星运动规律到万有引力定律的建立过程，是本章的重要内容，是极好的科学探究过程教育素材。在行星运动规律与万有引力定律两节内容之间安排本节内容，是为了更突出发现万有引力定律的这个科学过程。如果说上一节内容是从运动学角度来描述行星运动的话，那么，本节内容是从动力学角度来研究行星运动的，研究过程是依据已有规律进行的演绎推理的过程。这节内容与下一节内容合起来应该说是一个比较完整的探究过程，从问题的提出、猜想与假设、演绎与推理、结论的得出、检验论证等，是一次很好的探究性学习的过程。所以建议将本节与下一节内容合起来连上两节课，这样更有利于学生形成完整的探究过程。教学过程可以按以下方式展开。

(1) 问题的提出：开普勒发现行星运动规律后，人们开始更深入地思考：为什么行星围绕太阳运动?

(2) 猜想与假设：伽利略、开普勒以及法国数学家笛卡儿都提出过太阳对行星的引力 F 应该与行星到太阳的距离 r 有关。而且，牛顿时代的科学家胡克、哈雷等甚至推导出了如果行星的轨道是圆形的，它所受的引力大小跟行星到太阳距离的二次方成反比。

(3) 简化模型：行星轨道按照“圆”来处理。

(4) 演绎与推理：

①根据牛顿第二定律和开普勒定律进行推理，得到太阳对行星的引力与行星质量成正比，与行星和太阳间距离的平方成反比，即 $F\propto\frac{m}{r^2}$。

②根据牛顿第三定律，得到行星对太阳的引力大小也存在与上述关系对称的结果，即

$$F'\propto\frac{M}{r^2}$$

③根据(3)与(4) 及行星与太阳地位的“平等性”，得到太阳与行星间的引力大小

$$F\propto\frac{Mm}{r^2}$$

写成等式，即

$$F=G\frac{Mm}{r^2}$$

从学生已有的知识结构来看，学生在学习万有引力之前，应该对力、质量、速度、加速度、向心力、向心加速度等概念有较好的理解，并且掌握自由落体、抛体和匀速圆周运动的运动学规律，能熟练运用牛顿运动定律解决动力学问题。所以，在推导太阳与行星运动规律时，教师应要求学生自主地运用原来已经习得的知识进行推导，并要求学生说明每一步推理的依据是什么，教师仅在难点问题上作适当点拨。

虽然推得了 $F=G\frac{Mm}{r^2}$，教师可提出问题：这个规律就是万有引力定律吗？通过问题促使学生思考规律得出的条件。牛顿一直是在已有的观测结果和理论引导下进行推测和分析，观测结果仅对“行星绕太阳运动”成立，还不是万有引力定律。本节内容只讨论到行星与太阳之间的引力为止，关于万有引力定律的得出放到下一节完成，这样编写教材的目的，一方面尊重牛顿发现万有引力定律的历史阶段性，另一方面也是为了体现科学精神。教学过程应使学生明确，通过演绎推理得出的结果，推广到一般意义上的规律，在科学上是十分严肃的一件事情，它需要经过实践或实验的检验。

本节内容用一课时来完成，教学时间显得比较宽松。教学中可以适当补充伽利略、笛卡

儿、胡克、哈雷等科学家研究太阳对行星引力问题所做的一些工作。

3. 问题与练习

内容分析

本节所设置的3道习题，是要求学生论证物理问题的时候，要强调基本观点，要重视科学思维方法，要符合科学逻辑关系。第2小题可以要求学生独立地根据左边的三个等式，推出右边的等式。

解答与说明

1. 这节的讨论属于根据物体的运动探究它受的力。前一章平抛运动的研究属于根据物体的受力探究它的运动，而圆周运动的研究属于根据物体的运动探究它的受力。

2. 这个无法在实验室验证的规律就是开普勒第三定律$\frac{r^3}{T^2}=k$，是开普勒根据研究天文学家第谷的行星观测记录发现的。

3. 假设月地距离为r，月球公转周期为T，则月球公转的向心加速度为

$$a=\frac{v^2}{r}=\left(\frac{2\pi r}{T}\right)^2\cdot\frac{1}{r}$$

可查得$r=3.8\times10^8$ m，$T=27.3$天，代入上式可得$a=2.7\times10^{-3}$ m/s^2。

这一数据约为$g/3\ 600$，即月球公转的向心加速度约为地面附近自由落体加速度的1/3 600。

第3节　万有引力定律

1. 教学目标

(1) 了解万有引力定律发现的思路和过程，知道地球上的重物下落与天体运动的统一性。

(2) 知道万有引力是一种存在于所有物体之间的吸引力，知道万有引力定律的适用范围。

(3) 会用万有引力定律解决简单的引力计算问题，知道万有引力定律公式中r的物理意义，了解引力常量G的测定在科学历史上的重大意义。

(4) 了解万有引力定律发现的意义，体会在科学规律发现过程中猜想与求证的重要性。

2. 教材分析与教学建议

从内容性质与地位来看，本节内容是对上一节教学内容的进一步外推，是下一节内容学习的基础；是猜想、假设与验证相结合的教学内容；是一种演绎思维与归纳思维相结合的推理知识建构结构，教科书的立意还在于物理理论必须接受实践的检验。讲课的时候可以向学生交代一下，万有引力定律是本章的重点知识，万有引力定律的得出体现了牛顿的科学智慧；牛顿是一位对概念、规律的普遍意义极其敏感的大科学家，从研究太阳与行星之间的引力，想到普遍意义上的万有引力定律在牛顿的科学思想上是比较顺理成章的事情。用这个历史事实组织课堂教育活动，还必须使学生在哲学层面上明确两点：①事物的偶然性与必然性的辩证关系。②真理具有相对性，科学理论必须受实践的检验，科学理论也是发展的。这样做是为了后面几节内容的学习，如爱因斯坦对万有引力定律的修正，在教学思路上做些铺垫性的工作。在万有引力

定律的教学中，除了说明牛顿的伟大功绩之外，还应注意说明牛顿的工作是建立在前人工作基础之上的。由于学生的知识基础不够，在中学阶段只能将椭圆轨道近似为圆形轨道才能导出万有引力定律，但是教学中需要告诉学生，牛顿是在椭圆轨道情形中导出了万有引力定律。

（1）万有引力的猜想

猜想："天上"的力与"人间"的力可能出于同一本源。

通过上节的分析，对于行星的运动规律可以解释了。但是，牛顿接着设想：太阳与行星间的引力使得行星不能飞离太阳；而地面上的物体，如苹果，被抛出后总要落回地面，是什么力使得苹果不离开地球呢？是否也是由于地球对苹果的引力造成的？地球对苹果的引力和太阳对行星的引力是否根本就是同一种力呢？若真是这样，物体离地面越远，其受到地球的引力就应该越小，可是，地面上的物体距地面很远时，如在高山上，似乎引力没有明显的减弱！难道在高山上还不够远吗？原来，这样的高度比起天体之间的距离来，真的不算远！再往远处设想，如果物体延伸到月球那么远，物体是否也会像月球那样围绕地球运动？地球对月球的力、地球对地面上物体的力、太阳对行星的力，也许真是同一种力？

说明牛顿是如何想到和论证地面上物体所受的引力与天体间的引力是同一性质的力时，教学中还可参考如下的材料。牛顿在思考使月球做轨道运动的向心力与地面物体所受的重力是否是同一性质的力时，曾提出过这样一个理想实验：设想有一个小月球非常接近地球，以至于几乎触及地球上最高的山顶，那么使这个小月球保持轨道运动的向心力当然就应该等于它在山顶处所受的重力。如果小月球突然停止做轨道运动，它就应该同山顶处的物体一样以相同的速度下落。如果它所受的向心力不是重力，那么它就将在这两种力的共同作用下以更大的速度下落，这是与我们的经验不符的。可见，重力和月球所受的向心力是同一性质的力。建议在教学中，通过启发式的设问，使牛顿的想法能够激发学生的兴趣与想像力，引发学生提出更多的问题。

（2）万有引力的检验

月—地检验：重力和月球所受的向心力是同一性质的力，这个大胆的想法要由事实检验。实施课堂教学前可向学生提出问题与任务："月—地检验"基本思路是怎样的？请独立查找有关数据，也做一次检验。

假定设想成立，则月球与苹果的地位相当，假设苹果的质量与月球质量相等，则地球与月球（或苹果）之间的引力大小应该同样遵从"平方反比"律，月球受到地球的引力就应该比苹果受到的引力小得多，已知月球轨道半径约为地球半径的 60 倍，即：月球受到地球的引力应是苹果受到引力的$\frac{1}{60^2}$，根据牛顿第二定律，月球轨道处的向心加速度就应该是地面附近自由落体加速度的$\frac{1}{60^2}$，重力加速度 g、月—地距离、月球公转周期都已能较精确地测定，可以让学生做以下计算：已知：月球与地球之间的距离 $r=3.8\times10^8\,\mathrm{m}$，月球公转周期 $T=27.3$ 天，重力加速度 $g=9.8\,\mathrm{m/s^2}$，求$\frac{a_{月}}{g}$。

解：$a_{月}=\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 r=\frac{4\times3.14^2}{(27.3\times24\times3\,600)^2}\times3.8\times10^8\,\mathrm{m/s^2}\approx2.69\times10^{-3}\,\mathrm{m/s^2}$

$$\frac{a_{月}}{g}=2.7\times10^{-4}\approx\frac{1}{60^2}$$

用数据说明上述设想的正确性，牛顿的大胆设想经受了事实的检验。至此，平方反比律已

经扩展到太阳与行星间、地球与月球间、地球与地面物体间。

(3) 万有引力定律的得出

牛顿作了更大胆的设想，任意两个物体之间都存在这样的力吗？很可能因为一般物体的质量比天体的质量小得多，我们没有觉察到。于是上述结论被推广到宇宙中的一切物体之间。万有引力定律的发现把地面上物体的运动与天体运动统一起来，对之后一大批科学家追寻大统一理论有引导性的作用，对人类科学文化的发展具有重要意义。今天，我们谈及万有引力定律，似乎早已是老生常谈，但是牛顿当时的魄力、胆识和惊人的想像力、对事物普遍意义的敏感性实在让我们佩服！这最后一步假设，虽然无法得到直接验证，但是我们没有反驳它的理由，而且以后的无数事实都支持了这一点。我们在教学中很重视演绎推理，而往往忽视这种大胆的猜想、直觉、洞察力，这也是我们在实现情感、态度、价值观的教学目标时，应该很好挖掘和利用的地方。科学的发现过程常常是“大胆假设与严格求证”的结合，物理学的许多重大理论的发现，不是简单的实验结果的总结，它需要直觉和想像力、大胆的猜想和假设，再引入合理的模型，深刻的洞察力、严谨的数学处理和逻辑思维，常常是一个充满曲折和艰辛的过程。

(4) 万有引力定律的检验

万有引力定律的检验需要大量的事实，卡文迪许测定引力常量的实验是其他检验无法替代的，它为万有引力定律的普遍意义奠定了强有力的实验基础。物理学史上每一个物理常量的发现都代表着一段重要的科学历史，所以应该向学生说明引力常量 G 测出的重要意义，即如果没有 G 的测出，则万有引力定律在许多问题的应用受到限制。正是由于卡文迪许测出了引力常量 G，才使得万有引力定律在天文学的发展上起了重要的作用，如下一节要讲的天体质量的计算。卡文迪许实验是历史上非常著名和重要的实验，教学中应注意引导学生了解和体会前人是如何巧妙地将物体间非常微小的力显现和测量出来的，同时注意向学生说明灵活运用所学知识的重要意义。卡文迪许一生献身于科学的精神是对学生进行科学价值观教育的好材料。

关于引力常量的测量，课本没有详细的介绍，教师可参阅“教学资源库”。卡文迪许实验装置教科书中没有，教师应该用课件向学生展示和介绍。建议这部分内容教学时要灵活安排。对程度好一些的学生，可以作业的方式布置一个思考题：“卡文迪许实验有什么重要意义？这个实验设计的思路有什么巧妙之处?”让学生自己查阅相关资料，写出引力常量测定的方法原理；或者，组织学生进行讨论和分析。通过这一过程也使学生学习和体会其中精巧的实验方法，如采用“光杠杆”原理使微小物理量放大的方法。另外，还应该向学生强调掌握物理常量数量级的重要性。

3. 问题与练习

内容分析

这里的 3 道练习题中，第 1 小题，让学生通过计算体会到周围一般物体之间的万有引力很小，可以让学生比较一下两个人体之间万有引力与他们受到的重力，说明作受力分析时可以忽略两个人体之间的万有引力。第 2 小题，让学生通过计算体会到天体之间尽管距离很大，但由于它们的质量也很大，所以万有引力还是很大，是万有引力主宰着天体之间的关系。第 3 小题，让学生通过计算体会到微观粒子之间万有引力更加小。对这三个小题，要求学生进行精确计算。

解答与说明

1. 假设两个人的质量都为 60 kg，相距 1 m，则它们之间的万有引力为

$$F=G\frac{m^2}{r^2}$$

$$=6.67\times10^{-11}\times\frac{60^2}{1^2}\text{N}$$

$$\approx2.4\times10^{-7}\text{N}$$

这样小的力我们是无法察觉的，所以我们通常分析物体受力时不需要考虑物体间的万有引力。

说明：两个人相距 1 m 时不能把人看成质点，即不能简单套用万有引力公式，因此上面的计算是一种估算。

2. 根据万有引力定律

$$F=G\frac{m_1m_2}{r^2}$$

$$=6.67\times10^{-11}\times\frac{2.0\times10^{40}\times2.0\times10^{39}}{(5\times10^4\times3.0\times10^8\times365\times24\times3\ 600)^2}\text{N}$$

$$=1.19\times10^{28}\text{N}$$

可见天体之间的万有引力是很大的。

3. 两个夸克之间的万有引力为

$$F=G\frac{m_1m_2}{r^2}$$

$$=6.67\times10^{-11}\times\frac{(7.1\times10^{-30})^2}{(1.0\times10^{-16})^2}\text{N}$$

$$=3.4\times10^{-37}\text{N}$$

第 4 节　万有引力理论的成就

1. 教学目标

(1) 了解万有引力定律在天文学上的重要应用。

(2) 会用万有引力定律计算天体质量，了解“称量地球质量”“计算太阳质量”的基本思路。

(3) 认识万有引力定律的科学成就，体会科学思想方法。

2. 教材分析与教学建议

本节教学要求学生体会万有引力定律经受实践的检验，取得了很大的成功；理解万有引力理论的巨大作用和价值，对它在科学史上所产生的重大影响是无论怎样估计也是不过分的。本节是“应用+检验”性的内容，着重讲清应用思路。通过本节的学习，重点要使学生深刻体会科学定律对人类探索未知世界的作用，激起学生对科学探究的兴趣，培养热爱科学的情感。

(1) 实验室称量地球的质量

开篇的标题是“科学真是迷人”，这种提法的目的是为了吸引学生，其要解决的问题是怎样称量地球的质量？不可能用天平称量，通过万有引力定律是可以“称量”的！那么，用万有引力定律是怎样称量地球质量的？

自从卡文迪许实验测出引力常数 G 并且知道重力加速度之后，我们就能间接知道地球的

质量有多大。卡文迪许宣布他的实验是在“称量地球”。教科书从地面上物体的重力等于地球对物体的引力，即 $mg=G\frac{Mm}{R^2}$ [记为(1)式]，得到地球质量 $M=\frac{gR^2}{G}$，其中 g、R 在卡文迪许实验之前已经知道，而卡文迪许测出 G，就意味着也“测出了地球的质量”。

用（1）式“称量地球”是有条件的，教科书上写了“如果不考虑地球自转的影响”，就是说明了（1）式的条件。对于学生，可以从“地面上物体的重力如何测量?”“测力计所显示的读数对应的力与地球对物体的引力是什么关系?”“我们跳出地球看，由于地球在自转，这时物体做什么运动?”等问题，通过讨论，认识万有引力与重力的关系。而测出 G 后，直接用万有引力定律“称量地球”则不受这个条件的制约。通过万有引力定律称量地球的质量，这不能不说是个奇迹，其中的思想基础与牛顿的月—地检验是一致的，即相信天上人间服从共同的规律。文中引用了著名文学家马克·吐温的话：“科学真是迷人。根据零星的事实，增添一点猜想，竟能赢得那么多收获!”教师要引导学生仔细体会这句名言，感悟科学发现的精髓。

值得注意的是，这里所指的“质量”，是引力质量，有关引力质量与惯性质量的关系问题，见“教学资源库”。教师不必向学生作详细介绍。

（2）计算天体的质量

有了 G 的数值，我们可以用同样的方法去“称量太阳的质量”，基本思路是：行星绕太阳做匀速圆周运动的向心力由它们之间的万有引力提供，我们可以利用或测量的数据是某个行星的轨道半径 r（如地球）和周期 T，根据 $G\frac{Mm}{r^2}=m\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 r$，得到 $M=\frac{4\pi^2 r^3}{GT^2}$。许多天体的质量就是这样求得的，目前由观测人造卫星的运动来测量地球的质量是一种重要的方法。

（3）发现未知天体

预见并发现未知行星，是万有引力理论威力和价值的最生动例证。1781 年赫歇耳（F. W. Herschel）偶然发现天王星，并且经过测量算出其轨道半径和周期，证明它是太阳系成员之一。此后天王星的运动就成为不断研究的主题。积累的数据表明，天王星的运动有某些极小的不规则性，这使得人们怀疑，在天王星之外还有另一颗未知行星。英国的亚当斯（J. C. Adams）和法国的勒维耶（U. Le，Verrier）独立地对此进行研究，计算出这颗新行星即将出现的时间和地点，德国天文学家伽勒（J. C. Galle）在天文观测中认出这颗新行星，与预计的轨道只差 1 度。海王星就这样在笔尖下被发现了。1930 年汤姆波夫（C. W. Tambaugh）根据海王星自身运动不规则的记载又发现了冥王星。

海王星、冥王星的发现表明了万有引力理论在太阳系内的正确性，但能否推广到更远的地方，恒星也像行星一样相互吸引吗？科学家在研究双星系统中看到它们互相吸引的确凿证据，按万有引力定律来分析相互环绕运动的双星，与观察结果相符。对观察到的更远些的球状星团的计算表明，万有引力定律在更大的距离上也是正确的。正像本章书中所引用物理学家冯·劳厄的话所说的：“没有任何东西像牛顿引力理论对行星轨道的计算那样，如此有力地树立起人们对年轻的物理学的尊敬。从此以后，这门自然科学成了巨大的精神王国……”利用这些素材，教师可激发学生学习物理的情感。

3. 问题与练习

内容分析

本节的 4 道习题编排的目的要求学生进一步体会万有引力定律的应用性成就，开发想象

力，掌握运用万有引力定律解决天体运动问题的基本思路。第 2 小题通过计算以后，教师要给学生分析一下重力加速度 g 的变化规律。第 4 小题的解答过程，教师要指导学生学会假设物理量，运用物理规律来分析问题。

解答与说明

1. 在月球表面有

$$G\frac{M_{月}m}{R_{月}^2}=mg_{月}$$

得到

$$\begin{aligned}g_{月}&=G\frac{M_{月}}{R_{月}^2}\\&=6.67\times10^{-11}\times\frac{7.3\times10^{22}}{(1.7\times10^3\times10^3)^2}\ \mathrm{m/s^2}\\&=1.68\ \mathrm{m/s^2}\end{aligned}$$

$g_{月}$ 约为地球表面重力加速度的$\frac{1}{6}$。在月球上人感觉很轻。习惯在地球表面行走的人，在月球表面行走时是跳跃前进的。

2. 根据万有引力定律，在地球表面，对于质量为 m 的物体有：$G\frac{M_{地}m}{R_{地}^2}=mg$，得

$$g=\frac{GM_{地}}{R_{地}^2}$$

对于质量不同的物体，得到结果是相同的。

在高山上，$G\frac{M_{地}m}{r^2}=mg$，高山的 r 较大，所以在高山上的自由落体加速度 g 值就较小。

3. 卫星绕地球做圆周运动的向心力由地球对卫星的万有引力提供，有

$$G\frac{Mm}{r^2}=m\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2r$$

得地球质量

$$M=\frac{4\pi^2r^3}{GT^2}=\frac{4\pi^2\times(6.8\times10^6)^3}{6.67\times10^{-11}\times(5.6\times10^3)^2}\ \mathrm{kg}=5.9\times10^{24}\mathrm{kg}$$

4. 对于绕木星运行的卫星 m，有

$$G\frac{M_{木}m}{r^2}=m\frac{4\pi^2}{T^2}r$$

得

$$M_{木}=\frac{4\pi^2r^3}{GT^2}$$

需要测量的量为：木星卫星的公转周期 T、木星卫星的公转轨道半径 r。

第 5 节　宇宙航行

1. 教学目标

(1) 了解人造地球卫星的最初构想。

(2) 会解决涉及人造地球卫星运动的较简单的问题。

(3) 知道三个宇宙速度的含义和数值，会推导第一宇宙速度。

(4) 感受人类对客观世界不断探究的精神和情感。

2. 教材分析与教学建议

本节属于航天部分的重要知识，介绍万有引力的实践性成就，要求学生知道是万有引力理论使人类实现“飞天”梦想；重点理解第一宇宙速度，激发学生科学献身精神。本节知识内容的核心是牛顿运动定律与万有引力定律在圆周运动条件下的综合应用。

(1) 宇宙速度

教科书首先对宇宙航行进行理论上的分析，尊重历史上牛顿的设想，从已知的平抛运动开始。当平抛物体的初速度很大时，运动区域就不能简单地视为平面，而是球面的一部分，如教科书图 6.5-1 所示。如果速度足够大，物体就不再落回地面，成为一颗人造地球卫星，可以引导学生计算一下这个速度有多大。若地球质量未知，而知道地球表面处的重力加速度，能否求得第一宇宙速度？可让学生具体算算看。

学生常常对环绕速度与发射速度不加区分，因此在教学中需要说明，第一宇宙速度是发射卫星的最小速度，发射速度低于它，卫星将不能环绕地球做圆周运动而落回地面。在环绕地球做匀速圆周运动的所有可能的速度中，第一宇宙速度是最大的环绕速度，因为 $v=\sqrt{\frac{GM}{r}}$，r 越大，v 越小，轨道半径的最小值为地球半径，对应的环绕速度为最大值，即第一宇宙速度。

另外，结合匀速圆周运动的知识，还可以适当补充对于人造地球卫星运行周期 T 的知识，根据 $T=\frac{2\pi r}{v}=\frac{2\pi r}{\sqrt{\frac{GM}{r}}}=\frac{2\pi}{\sqrt{GM}}r^{\frac{3}{2}}$ 可知，轨道半径越大、周期越长。近地环绕速度（第一宇宙速度）环绕的卫星的周期应该是最小周期，若已知地球半径为 6 400 km，地球表面处的重力加速度为 $g=9.8\ \mathrm{m/s^2}$，求出这个最小周期。

$$T_{\min}=\frac{2\pi}{\sqrt{R^2 g}}R^{\frac{3}{2}}=2\pi\sqrt{\frac{R}{g}}=2\pi\sqrt{\frac{6.4\times10^6}{9.8}}=5\ 077.5\ \mathrm{s}\approx84.6\ \mathrm{min}$$

关于第二宇宙速度和第三宇宙速度，学生需要了解它们的物理含义，不作定量的计算。以此拓展学生想象和思考的空间，问题留给学生，对此有兴趣的同学可以在课余时间研究。

(2) 梦想成真

教科书简述了人类航天事业的发展史，特别例举了成功发射的人造地球卫星的几个实例。建议教师结合前面的理论分析，引导学生对于实例中的卫星进行一些定量的计算，比如：“1957 年 10 月 4 日，世界上第一颗人造地球卫星在苏联发射成功。卫星重 83.6 kg，每 96 min 绕地球飞行一圈。”可以问学生：这颗卫星的轨道半径是多少？卫星距地面的高度是多少？卫星运行的角速度多大？这样，既巩固了匀速圆周运动知识在人造卫星问题方面的实际运用，还增加学生对于这类问题的兴趣。在“问题与练习”中，就 2003 年我国成功发射的“神舟五号”宇宙飞船有类似的计算。补充 2005 年 10 月 12 日发射的“神舟六号”载人飞船的有关计算，以提升民族自豪感。这节内容，既介绍了航天成就，又谈到人类为此付出的代价。全文最后以“一个人最完美和最强烈的情感来自面对不解之谜”激励学生科学探究的志趣。教科书中图 6.5-4 与图 6.5-5 两幅图片的教育价值在于激发学生科学献身精神。

(3) 科学漫步：黑洞

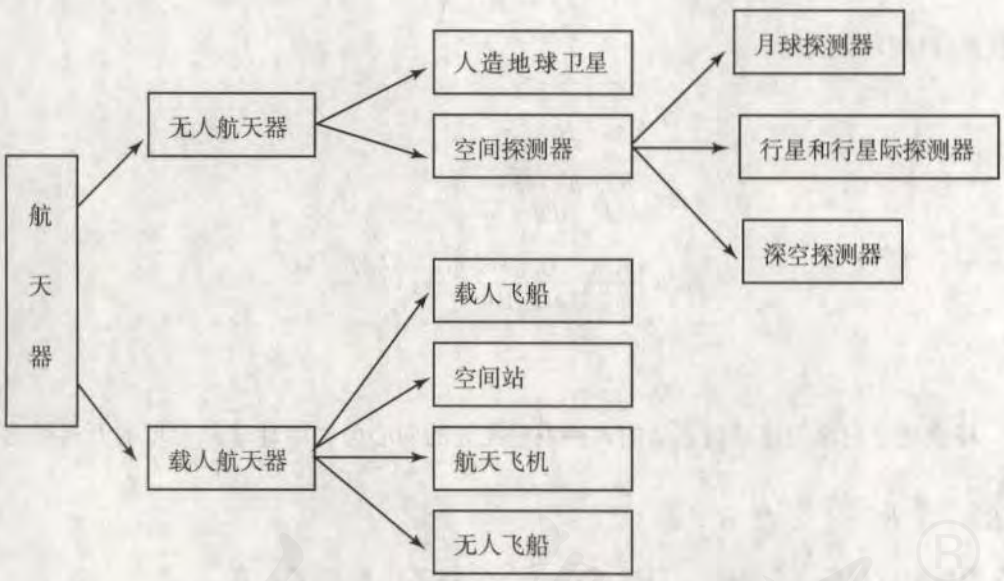
在“科学漫步”栏目里，介绍了黑洞概念的起源、人们对它的种种推测、几代科学家对于

黑洞的理论研究以及黑洞的最新研究和观测结果，并明确指出在黑洞问题上经典力学不适用。目的是给学生打开一扇窗口，引导学生向窗外的世界望一望，开阔眼界，启迪思维，加深对本章知识的理解。在“黑洞”一文中，当代著名宇宙学家霍金自问道：“为什么人们要研究黑洞呢？因为它就在那里。”这些都是科学大师对科学不懈追求的动力的解释，是他们朴实的科学价值观的体现，对学生科学价值观的形成起到一定的作用。

另外需要说明的是，过去的一些参考书中，有的把第二宇宙速度又称为脱离速度，第三宇宙速度称为逃逸速度；也有的把第二宇宙速度称为逃逸速度，第三宇宙速度称为脱离速度。教科书此处根据《中国大百科全书·物理卷》，采用了后一种说法。

（4）航天器介绍

人们常常认为航天事业是一项高精尖的事业，与自己相去甚远，其实，它正在改变着我们的日常生活。在“STS”栏目里，就是着重给学生展示航天事业与人类生活的关系；在介绍各种卫星时，可以适当补充有关“地球同步卫星”的定量计算和分析。补充有关航天器和空间应用系统，航天器是在地球大气层以外的宇宙空间，执行探索、开发或利用太空及天体等特定任务的飞行器。它基本上是受天体引力的作用，按照天体力学的规律运行。航天器种类繁多，分为无人航天器（人造地球卫星、空间探测器）和载人航天器（载人飞船、空间站、航天飞机、无人飞船）两类。如下图所示。



自 20 世纪 50 年代以来，人类已先后发射了约 5 000 多个人造航天器，其中绝大部分是人造地球卫星。

航天知识的简单介绍，使学生感受科学正改变着我们的生活，要学科学、用科学，以提高学生的科学素养。

3. 问题与练习

内容分析

本节题目指出求解人造卫星问题一般有两条基本思路，一是万有引力提供向心力，二是在地球表面附近时万有引力看做与重力相等。本节习题配置的重点在要求学生掌握第一宇宙速度的计算，理解第一宇宙速度的物理意义。在分析第 1 小题时，教师可补充“神舟六号”的有关

计算，以及“同步卫星”“极地卫星”的有关计算，使学生对卫星的认识比较完整。

解答与说明

1.“神舟五号”绕地球运动的向心力由其受到的地球万有引力提供

$$G\frac{Mm}{r^2}=m\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 r,\ r=\sqrt[3]{\frac{GMT^2}{4\pi^2}}$$

其中周期 $T=\dfrac{24\times60-(2\times60+37)}{14}\text{min}=91.64\text{ min}$，则

$$r=\sqrt[3]{\frac{6.67\times10^{-11}\times6.0\times10^{24}\times(91.64\times60)^2}{4\pi^2}}\text{ m}=6.7\times10^6\text{m}$$

其距地面的高度为 $h=r-R=6.7\times10^6\text{ m}-6.4\times10^6\text{m}=3\times10^5\text{m}=300\text{ km}$。

说明：前面“神舟五号”周期的计算是一种近似的计算，教师还可以根据“神舟五号”绕地球运行时离地面的高度的准确数据，让学生计算并验证一下其周期的准确值。

已知：“神舟五号”绕地球运行时离地面的高度为 343 km，则根据

$$G\frac{Mm}{r^2}=m\frac{4\pi^2}{T^2}r \tag{1}$$

在地面附近有

$$G\frac{Mm}{R^2}=mg \tag{2}$$

$$r=R+h \tag{3}$$

根据(1)(2)(3)式得

$$\begin{aligned}T&=2\pi\sqrt{\frac{(R+h)^3}{gR^2}}\\&=2\pi\left(\frac{R+h}{R}\right)\sqrt{\frac{R+h}{g}}\\&=2\pi\frac{(6.4+0.3)\times10^6}{6.4\times10^6}\sqrt{\frac{6.7\times10^6}{9.8}}\text{s}\\&=5436\text{ s}\\&=90.6\text{ min}\end{aligned}$$

2. 环绕地球表面匀速圆周运动的人造卫星需要的向心力，由地球对卫星的万有引力提供，即 $G\dfrac{Mm}{R^2}=m\dfrac{v^2}{R}$，得 $v=\sqrt{\dfrac{GM}{R}}$。 (1)

在地面附近有 $G\dfrac{Mm}{R^2}=mg$，可得 $GM=R^2g$，将其代入(1)式，有

$$v=\sqrt{\frac{R^2g}{R}}=\sqrt{Rg}$$

3.

(1) 设金星质量为 M_1、半径为 R_1、金星表面自由落体加速度为 g_1。

在金星表面

$$G\frac{M_1m}{R_1^2}=mg_1 \tag{1}$$

设地球质量为 M_2、半径为 R_2、地球表面自由落体加速度为 g_2，在地球表面有

$$G\frac{M_2m}{R_2^2}=mg_2 \tag{2}$$

(1) 式除以(2)式，得 $\dfrac{M_1R_2^2}{M_2R_1^2}=\dfrac{g_1}{g_2}$，即

$$g_1=\frac{M_1R_2^2}{M_2R_1^2}g_2$$

$$=\frac{0.82}{1}\times\frac{1^2}{0.95^2}\times 9.8\ \text{m/s}^2$$

$$=8.9\ \text{m/s}^2$$

(2) $G\frac{M_1m}{R_1^2}=m\frac{v^2}{R_1}$

$$v=\sqrt{\frac{GM_1}{R_1}}$$

$$=\sqrt{R_1g_1}$$

$$=\sqrt{0.95R_2\times\frac{0.82}{0.95^2}\times g_2}$$

$$=7.3\ \text{km/s}$$

第6节　经典力学的局限性

1. 教学目标

(1) 了解经典力学的发展历程和伟大成就。

(2) 认识经典力学的局限性和适用范围。

(3) 初步了解微观和高速世界中的奇妙现象。

(4) 了解相对论、量子论的建立对人类深入认识客观世界的作用，知道物理学改变人们世界观的作用。

2. 教材分析与教学建议

本节是全章的终结性内容，也属于介绍性质的内容。全章内容结构以万有引力定律的发现为核心，向宇宙学发展历史的两头延伸。托勒密想象地球处在宇宙中心，哥白尼则设想太阳处在中心，开普勒总结了行星运动定律，牛顿第一个用牛顿定律和万有引力定律解释所有星体运动，爱因斯坦则用几何学的时空体系解释星体的运动。如果说牛顿将天上的力与地上的力统一起来，那么爱因斯坦将时间与空间、引力与光联系在一起，而霍金则将引力、量子力学和统计力学联系在一起。所以，教学过程的设计思路按照物理学理论在三个领域的发展过程进行。

从前面几节内容来看，牛顿发现万有引力定律，到海王星、冥王星的发现，再到宇宙航行、全球卫星定位系统（GPS）、太空育种等万有引力理论成就的介绍，使学生对牛顿力学产生敬仰之时，来一个经典力学的局限性的介绍，其目的在于使学生拓展知识、开阔视野的同时，正确认识物理学理论的发展与适用范围。教科书从低速到高速、宏观到微观、弱引力到强引力三个方面介绍了经典力学的局限性。这三个方面的具体内容都不要求学生掌握，但是学过本节之后，要学生知道，尽管前面已经体会到了万有引力的辉煌成就，但是真理具有相对性，在新的领域还有新的规律等待我们去发现。课文中的语言如：经典力学是一部“未知的交响曲”；“科学总是从正确走向错误”；“相对论和量子力学是哪一种广泛的理论的特殊情形呢？我们现在还不知道……”安排这些内容的着眼点都在展示科学探究的无限可能，使教科书在情

感、态度与价值观方面发挥它的教育功能。

从低速到高速的讨论中，使学生知道在物理学的知识体系中还有爱因斯坦的狭义相对论知识。教科书提到经典力学的相对运动问题，建议在此之前做一定的补充讲解，使学生知道在爱因斯坦的狭义相对论中“时间与空间”、物体的质量都与运动速度是有关系的，知道有这么一件事就可以了，不作详细介绍，不要求用相对论中质量随速度变化的公式进行计算。

“科学漫步：时间和空间是什么?”并没有讲清时间与空间的具体联系，只是提出问题，它的目的在于激励学生对未知科学的探索，了解新的时空观中时间、空间都与运动状态有关。在“科学足迹”栏目里，引导学生自学，其重点是领悟牛顿的科学精神、科学思想、科学思维方法。

在“从宏观到微观”的介绍中，使学生知道在物理学的知识体系中还有量子力学的知识，它能够正确地描述微观粒子运动的规律性。

在“从弱引力到强引力”的内容中，引导学生了解 1915 年爱因斯坦创立了广义相对论，这是一种新的时空与引力理论，是对牛顿引力理论的修正，但它并不否定牛顿引力理论，牛顿引力理论被包括在新的时空与引力理论之中。

3. 问题与练习

内容分析

本节题目鼓励学生通过查阅课外读物扩展视野。

解答与说明

1. 例如研究微观粒子的加速、碰撞及结构等问题时，经典力学就不适用了。

2. v 在达到 $0.14c$ 时，m 相对 m_0 会有 1%的误差。

三、教学设计案例

行星的运动

【教学设计说明】

● 学生学习情况分析与教材分析：由于学生对天体运动的研究缺乏观察的条件，对天体运动的真实认识，不太会超过托勒密的水平，从学生已有知识特点来讲，学生对有关科学家的事例略知一二，对科学家的发现、发明、创造内容的了解还不够系统和准确。

在高中物理教学的体系中，本节内容的突出特点是：知识内容较少，但包含着的科学史料十分丰富。因此，本课的教学设计应立足于学生的科学精神的培养。让学生在科学家关于天体运动问题的研究历史中，感悟科学家求真、求简的研究思想和献身于科学的精神。由于教科书给出的史料较为简单，因此让学生在课前自行阅读教科书并查找相关材料是十分必要的，同时也对提高学生获取资料、分析资料的能力起到较好的效果；在交流各自获得资料后，让学生提出自己的问题并择要进行分析讨论，则对学生质疑能力的培养会起到较好的效果。因此本课的教学过程中应该让学生初步了解科学探究的过程，并获得探究的乐趣。

整节课应该以归纳获得的材料、探究地心说与日心说争论的焦点、探究开普勒行星运动定

律建立的过程、探究椭圆轨道特征、探究开普勒行星运动定律的物理意义、运用开普勒行星运动定律解决问题等六个环节展开教学。让学生自行归纳教科书内容、介绍课外获得的材料，并提出相应的问题。教师的主要作用在于引导，并对学生获得的材料及提出的问题进行合理的筛选和补充，就其中的重要内容进行分析讨论，在尊重学生的主体地位的基础上发挥教师的主导作用。

● 教学目标：

1. 了解人类对行星运动规律的认识历程。

2. 了解观察在认识行星运动规律中的作用。

3. 知道开普勒行星运动定律，知道开普勒行星运动定律的科学价值，了解开普勒第三定律中 k 值的大小只与中心天体有关。

4. 体会科学家们实事求是、尊重客观事实、不迷信权威、敢于坚持真理和勇于探索的科学态度和科学精神，体会对描述自然追求简单和谐是科学研究的动力之一。

5. 能查找天体运动的相关资料；会阅读教科书并归纳要点。从查找资料、提出问题及交流观点的过程中体验科学探究的乐趣。

● 重点与难点：本节课的重点是理解开普勒行星运动定律。难点在于认识椭圆轨道的特征。

【教学过程】

1. 教材内容的归纳

引入新课：课前同学们已做好了预习、并查阅天体运动的有关资料，下面我们先整理一下有关的内容。

通过多次提问，在学生回答的基础上，教师进行补充讲解，形成一些要点，就是以下的一些探究点。

2. 探究地心说与日心说争论的焦点

通过不同学生的回答和教师的讲解、补充，形成以下主要内容：

(1) 托勒密的研究

托勒密曾坚持几十年进行天文观测，提出了地心说系统理论，认为：

①地球是宇宙的中心，太阳、月亮、水星等在各自的轨道上绕地球旋转，自下而上形成所谓的月亮天、水星天、金星天、太阳天、火星天、木星天和土星天，最高最远处是恒星天，之外就是最高天也叫原动天。

②所有天层都在绕地球转动。

③用数学方法系统地计算“本轮”、“均轮”，解释了当时的天文现象。

托勒密的观点能对当时的观测结果做出精确的说明，能准确预测行星的方位。在长达1 000多年的时间里在航海、生产和生活实践中所采用，成为天文立法的依据。

现在我们知道：托勒密的地心说是错误的，日心说是正确的。但是在科学史上地心说是占有重要地位的。那么，后来为什么认为地心说是错误的呢?

(2) 哥白尼的研究

①问题的提出

哥白尼曾在后来被称为“哥白尼塔”的教堂城墙上，自制器材从事天文观测30多年。他主张：宇宙规律应是简明和谐的。认为：地心说理论尽管与观测资料相符，但天空图象太乱，

毫无统一性和规律性。

他说："他们就像这样的一种艺术家：要画一张人像，从不同的模特儿身上临摹了手、脚、头和其他部位，然后不成比例地凑合在一起，尽管每个部位都画得极好，结果却很不协调，画出来的不是一个人，而是个怪物。"

如：既然日月星辰都绕地球运行，为什么只有太阳和月亮运动的方向、速度、位置变化有规律，而别的行星看起来却忽快忽慢、忽东忽西、离地球忽近忽远呢？

再如：当时地心说体系中，叠罗汉似的本轮加均轮的圆圈数目已达到80多个，且还有增加的趋势。大自然可能创造那么多的圆圈吗？

托勒密也持有简明和谐的信念，主张把行星的复杂运动简化为圆周运动，但由于采用地心体系，不得不用本轮和均轮来解释和计算天体运动。

②新的发现

哥白尼查阅了古希腊和古罗马的许多文献，发现在前人的著作中描述过地球的运动。他从一位诗人的名句"我们离港向前航行，陆地和城市后退了"中悟出了运动相对性的道理。哥白尼通过分析行星运行资料，发现每个行星都有三种共同的周期运动，即：周日、周年和相当于"岁差"的周期运动。如果将这三种运动归为地球的运动，即：自转、公转和地轴回旋运动，就可以一下子去掉许多圆。

③结论

哥白尼在1510年写成的《浅说》初稿中指出：太阳是宇宙的中心，地球和行星都围绕太阳运动，只有月亮才真正围绕地球旋转。1530年哥白尼圆满完成日心说的建立工作，他在1543年发表的《天体运行论》中，描述了他的宇宙图景：

· 太阳位于宇宙的中心，有五颗当时已知的行星和地球围绕太阳旋转；

· 地球也是行星，它与其他行星毫无区别。行星的排列次序如下：水星、金星、地球、火星、木星、土星；

· 月亮是地球的卫星，它绕着地球旋转；

· 恒星则在远离太阳的一个大球面上静止不动。

④评价

日心说认为：太阳是静止不动的，地球和其他行星围绕太阳运动；地心说认为：地球是静止不动的，太阳、月亮及其他行星围绕地球转动。

古人认为天体的运动是匀速圆周运动。由于地心说符合人们的日常经验，也符合宗教神学的观点，很长时间内处于统治地位。

● 地心说与日心说的争论是参考系的选取问题吗？（同学讨论、教师引导）

对于两个物体之间的相对运动（如太阳和地球），取其中任一物体为参考系，则另一物体必相对于其做圆周运动，即中心是相对的。如图6-1所示，A端固定，转动时另一端B的轨迹为圆；若以B端为参考系，A端相对其的运动轨迹也是圆。

对于三个物体之间的相对运动，如图6-2所示，D点固定，E、F以相同的周期绕D点做圆周运动。若以D为参考系，E、F相对D的运动轨迹为同心圆；若以E为参

图6-1

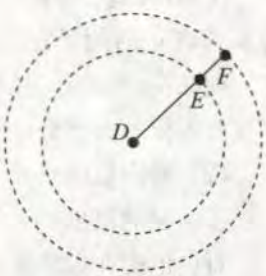


图6-2

考系，由于D、F相对E点的距离始终不变，因此D、F的运动轨迹也是同心圆（半径不同）。在图6-2中，若D点固定，E、F以不同的周期绕D点做圆周运动。则以D为参考系，E、F均做圆周运动；以E为参考系，D做圆周运动，F相对E的距离发生变化，不再是圆周运动。

在太阳系中，各大行星绕太阳的周期不同，因此选用不同的参考系获得的结论不同。从地心说的角度看，就会出现太阳、月亮绕地球做单向的圆周运动，而其他的行星在绕地运动时会出现“时进时退”的现象，为此托勒密只好用“本轮”加“均轮”的办法进行解释。

随着对天体运动研究的深入，地心说变得越来越复杂，且面临较多的困难。日心说逐步得以确立。

3. 探究开普勒行星运动定律建立的过程

简要介绍各个科学家的研究过程，使学生对开普勒行星运动定律内容的认识逐渐明朗起来。

● 哥白尼

“哥白尼的眼光超越了地球……使人类来到了牛顿物理学的门前。”在这里，哥白尼的开放观点并不是孤立的历史事件，是当时社会经济、文化环境中，文艺复兴带来的思想与艺术的繁荣对哥白尼的深刻影响，一方面艺术的繁荣使哥白尼坚信宇宙和自然是美的，而美的东西一定是简单与和谐的；另一方面，思想的繁荣解脱了束缚人们头脑的枷锁，使“哥白尼的眼光超越了地球”。

● 布鲁诺

布鲁诺在修道院学习时就阅读了关于日心说的许多书籍，并开始写文章批判地心说。因此他被教会革除教籍。后来在欧洲各国流浪，宣传日心说，并写了多篇著作。他认为：宇宙无论是在空间和时间上都是无限的。地球不是宇宙的中心，太阳也不是宇宙的中心，太阳只是太阳系的中心。整个宇宙根本就没有中心，也没有界限。宇宙统一于不生不灭的物质，自然界有内在的创造本身的能力。他具有神即自然、自然即神的泛神论思想。宇宙无限的思想是人类宇宙观的一次革命，成了300多年后现代宇宙论的思想先驱。布鲁诺因宣传日心说而被教会囚禁长达8年，并于1600年2月17日被宗教裁判所处以火刑，烧死在罗马的鲜花广场上。但布鲁诺曾说：“一个人的事业使他自己变得伟大时，他就能临死不惧。”“为真理而斗争是人生最大的乐趣。”1889年罗马教皇为布鲁诺平反。

● 第谷

在第谷以前，人们观测天体位置的误差大约是$10'$，第谷把这个不确定性减小到$2'$。他的观测结果为哥白尼的学说提供了关键性支持。这里通过对第谷精于“观察自然”的描述，则强调了实验观察手段在科学研究中的重要作用。

● 开普勒

开普勒从相信“行星绕太阳做匀速圆周运动的观点”思考问题开始，到对火星轨道“70余次尝试所得的结果都与第谷的观测数据有至少$8'$的角度偏差”；直至最后他“对第谷数据的精确性深信不疑……这不容忽视的$8'$也许正是因为行星的运动并非匀速圆周运动”。第一次大胆地对“人们长期以来视为真理的观念——天体在做‘完美的’匀速圆周运动”表示怀疑。开普勒相信真理而不迷信权威。同时，也应该看到第谷与开普勒的美妙合作。第谷和开普勒是两个风格截然不同的科学家，一个擅长观察，另一个是数学天才，但是谁的作用也不可忽略。第谷从实验观测入手，开普勒再对实验结果进行数学归纳，“把几千个数据归纳成如此简洁的几句话”，说明科学探究需要有合作精神，科学探索的乐趣与科学方法的魅力可见一斑。对开普

勒的研究过程作如下归纳：

①首先研究的是火星，离地球最近、数据最丰富、与哥白尼的理论出入也最大。

开始认为行星是匀速圆周运动，采用偏心轨道来计算，无论是日心说还是地心说还是第谷的半日半地体系，都与观察结果不符。经过约 70 余次试探，找到的最佳方案还差 8′。他相信第谷的观测误差不超过 2′。

②开普勒开始怀疑天体运行轨道为圆的传统观念。经多年计算，发现了开普勒第二定律、开普勒第三定律。

③1619 年开普勒出版《宇宙和谐论》公布了这一发现。

开普勒三定律被发现后，行星的复杂运动便失去了神秘性，为数十年后牛顿发现万有引力定律铺平了道路。人们称赞开普勒是“天空立法者”。

1623 年后，开普勒因出版《哥白尼太阳中心说概念》受到教会迫害，工资被停发。1630 年因病去世，终年 59 岁。黑格尔曾痛心疾首地说：“开普勒是被德国饿死的。”

● 开普勒根据观测数据归纳出开普勒第三定律

当时已知各大行星的公转周期，但各行星与太阳之间的实际距离并不知道，只知道各行星距离的比例，以及距太阳远的行星有较长的周期。开普勒第二定律也说明运动速度与距离有一种数的和谐性。要从复杂的天体运行数据中，找出关系式$\frac{R^3}{T^2}=k$是极不容易的，但开普勒坚信宇宙是和谐的、是可以用数学语言来表达的。经过 9 年的努力，他终于得出了开普勒第三定律。要从具体的数据中，找出正比例函数或线性函数间的变量关系是较为容易的，但要找出二次函数间变量关系就较为困难了，若要找出类似 $y=kx^{\frac{3}{2}}$ 的关系式就极为困难了。从开普勒第三定律的表达式可知，开普勒的贡献就在于他坚信宇宙是和谐的，并为之做出了不懈的努力。从中我们可充分体验到科学家孜孜不倦、献身科学的精神。

● 伽利略的成就

伽利略曾自制望远镜观察天象，并发现木星的卫星和月球表面有山和谷等重要事实，这是他对天文学的一大贡献。他还出版了多本书籍，如 1632 年出版了《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》，为哥白尼的日心说辩护。他也因此在 1632 年 2 月被宗教法庭判决为终身监禁。1636 年写成力学著作《两种新科学的对话》。

4. 探究椭圆轨道特征

由于同学们在数学课上还未学习过椭圆，为此我们先自己动手画一画椭圆。

发给学生一根细线，两枚图钉，在白纸上画椭圆。自己归纳出椭圆的特征，从而对椭圆先有一个感性的认识。然后教师适当介绍椭圆的轨道方程、焦点、半长轴和半短轴等相关知识，为理解开普勒定律做好准备。

5. 探究开普勒行星运动定律的物理意义

开普勒第一定律：所有行星围绕太阳运动的轨道都是椭圆，太阳处在椭圆的一个焦点上。说明行星运动的轨道特征。

开普勒第二定律：对任意一个行星来说，它与太阳的连线在相等的时间内扫过相等的面积。说明行星运动速度变化的规律，靠近太阳近的时候行星运动得快，离开太阳远的时候行星运动得慢。从中蕴含着行星与太阳之间的相互作用力沿着它们的连线上。

开普勒第三定律：所有行星的轨道的半长轴的三次方跟它的公转周期的二次方的比值都相等。这个定律的得出比前两个要晚一些。开普勒比较了所有行星围绕太阳运动的轨道半长轴与

公转周期的各种关系。$\frac{a^3}{T^2}=k$ 这个式子中，蕴含着行星运动的动力学关系，对牛顿得出万有引力定律起着基础性的作用。

开普勒三个定律像牛顿三个定律一样是一个整体，它对行星运动规律的描述有一个从定性到定量的过程。开普勒第一定律是其余二个定律的基础，但三个定律描述的内容又各自独立，并不重复。附带可以给学生提一下，开普勒三个定律不但适用于行星绕太阳的运动，也适用于卫星绕行星的运动。

假设行星轨道可以看成圆形，开普勒定律的表述将会怎么样？

通过学生回答与看书，得出假设行星轨道看成圆形时开普勒定律的表述，这样为后续的学习进行铺垫。

本节课的教学中，还可以适当给学生提一下，行星运动的研究只能用观察测量的方法，不能用实验研究的方法。科学家研究行星运动的成果是天文历法的基础，所以对行星运动的研究与地理学科的相关性很大。

6. 运用开普勒行星运动定律解决问题

本节课后的练习是为巩固和理解开普勒定律服务的，通过计算与分析让学生感悟开普勒定律的物理意义。第 1 小题的目的，是让学生懂得天体之间距离之大；二是让学生懂得天文学上的计量单位，比较“天文单位”与“光年”的区别；三是让学生懂得利用地球的有关已知量可以计算其他行星的有关物理量。第 4 小题让学生预测哈雷彗星下次出现的时间，教师要利用这个机会激发学生研究的兴趣。

【教学反思】

本课的教学如果只采用讲授式教学就会变得十分乏味，学生则被教师的教学设计牵着鼻子走，失去应有的主体地位。教师的讲授往往也脱离了学生思考的问题，使教学效果大打折扣。让学生自己查找资料、分析资料，则可激发学生的兴趣、体验探究的乐趣，而学生自己提出的问题往往也会使教师有所启发，如：“地心说与日心说的争论是一个参考系选取的问题吗?”但教师可能忽视这一问题的存在，而使得学生听课后仍不清楚这一问题的实质。本课的教学则抓住了这一要点，从而也使学生理解了地心说“本轮”“均轮”存在的必要。学生的椭圆知识也是十分缺乏的，教师必须在课堂进行讲解。对学生科学精神的培养，必须通过对科学史料的掌握来实现，本课较好地解决了这一问题。开普勒定律的得出是一个复杂的过程，教师没有必要在数学处理上搞得过多，更多应该强化物理分析，突出开普勒处理问题的科学思想方法。

（浙江省慈溪中学　叶全浩）

四、教学资源库

（一）概念、规律和背景资料

1. 引力的特性

物理学主要研究物质运动的普遍规律和物质的基本构成，核心的问题是物质间的相互作

用。宇宙万物种类繁多、形状各异，它们的相互作用极其复杂。但现代科学已经证明，自然界中一切物质间的相互作用都可以归结为四种基本的作用，即引力相互作用、电磁相互作用、强相互作用和弱相互作用。作为四种最基本的自然力之一的引力，与另外三种力相比较，又有其独特之处。

(1) 引力是普遍存在的

任何两个质量不等于 0 的物体之间，都无一例外地存在着这种引力相互作用。由于引力作用无处不在，无时不在，无所不在，因此称之为“万有”引力。而电磁相互作用只存在于带电的粒子或带电的宏观物体之间，在使两个物体产生电力作用以前，至少要使其中的一个物体带电；在使两个物体产生磁力作用之前，我们至少要使其中的一个物体磁化。强相互作用和弱相互作用则只存在于微观粒子，如质子、中子、介子等粒子之间。唯有万有引力是普遍存在的。

(2) 引力作用的范围大

引力和电磁力都是长程力，而强相互作用和弱相互作用都是短程力，作用范围都很小。强相互作用所及的范围小于 10^{-15}m，当两个相邻的强子①间的距离超过 10^{-15}m 时，强相互作用就小到可以忽略不计的程度。弱相互作用的范围更小，大约小于 10^{-17}m，而且作用力比强相互作用要小得多。因此，在大尺度的情况下，特别是在宇宙天体之间，由于天体的质量非常大，所以万有引力起着主要作用。在我们周围，地球上的任何物体，包括我们自身，都受到地球的引力作用。人类最早注意到的力就是地球的引力，而可见引力与我们的日常生活息息相关。

(3) 引力无法屏蔽

不论我们在一个物体与地球之间设置什么样的屏障，都不能将地球对物体的引力屏蔽起来，而且在地球上某一固定位置，一个物体所受到的地球的引力是不变的，不会由于物体与地球之间的屏障而有所减弱，这已为长期以来的实验所证实。而电力和磁力都可以屏蔽，并且可以通过增减物体的带电量，或改变电荷的运动状态等方法来改变电磁相互作用的强弱。

(4) 引力的相对强度小

在四种基本相互作用中，万有引力最弱。在天体运动和宏观现象中，引力起重要作用，但在原子核和粒子间的作用中，引力是十分微小的，甚至可以忽略不计。其他三种相互作用中，以强相互作用最强，比电磁相互作用大 100 多倍。四种基本相互作用的相对强度、作用范围等特征的比较见表 6-1。

表 6-1 四种基本相互作用的比较

作用名称	产生作用的物体	相对强度	媒介	作用范围
强相互作用	强子（核子、介子等）	1	胶子	$<10^{-15}$m
电磁相互作用	电荷	10^{-2}	γ光子	无限远
弱相互作用	大多数微观粒子	10^{-12}	$W^{\pm}$、Z^0	$<10^{-17}$m
引力相互作用	一切有质量的物体	10^{-37}	引力子	无限远

(5) 引力的线性叠加性

如果空间分布着质量分别为 m_1、m_2、…、m_n 的若干个质点，当其中每一个质点单独存在

① 强子是能直接参与强相互作用的粒子的统称。现已发现的 788 种粒子中，绝大多数是强子，占 772 种。除强子外，还有 12 种轻子和 4 种规范粒子。最常见的强子是质子和中子。到现在为止，实验上已发现并已确认的强子有 363 种。已发现但未确认的还有 409 种。

时，作用在另一个固定在某一位置的质量为 m 的质点的引力分别为 $\boldsymbol{F}_1$、$\boldsymbol{F}_2$、…、$\boldsymbol{F}_n$，则当所有这 n 个质点同时对 m 施加引力作用时，质点 m 所受到的总的万有引力为

$$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{F}_1+\boldsymbol{F}_2+\cdots+\boldsymbol{F}_n=\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{F}_i$$

上式表明，两个质点间的引力作用只与这两个质点有关，而与其他质点是否存在毫无关系，这就是我们通常所说的引力的独立作用原理，这一物理规律表明引力具有线性叠加性。有人以为这种线性叠加是所有力的普遍规律，这是没有根据的。并不是所有的力都具有这种性质，例如，强相互作用就没有这种性质。

(6) 这种相互作用只有引力而没有斥力

我们知道，两个静止的点电荷之间存在着相互吸引或者相互排斥这两种作用，运动的电荷相互间除了电力作用外，还有磁力相互作用。磁力实际上是电力的一种表现，或者说，磁力和电力具有同一本源。磁力也有相互吸引和相互排斥两种作用。强相互作用也有吸引和排斥两种作用。自然界的四种最基本的相互作用都随距离的增大而减弱，但它们随距离变化的关系却不大相同。强相互作用在粒子间的距离小于 10^{-15} m 时，彼此间的作用力很强，在四种相互作用力中占主要的支配地位。正是由于这种作用力足以克服原子核内质子间的电磁斥力，把原子核内的质子和中子紧紧地束缚在一起，保持了原子核的稳定。这时强相互作用表现为引力。但当核子间的距离减小到大约 0.4×10^{-15} m 时，强相互作用就表现为斥力。但引力相互作用却只有吸引，没有排斥。

(7) 既是保守力，又是有心力

万有引力是保守力，因此可以引入引力势能的概念，并用引力势来描述引力场。当系统仅在万有引力作用下运动时，系统的机械能守恒。同时，万有引力又是有心力，当系统仅在万有引力作用下运动时，其角动量守恒。

综上所述，我们可以看出，物质间相互作用的普遍规律是物理学所要研究的最基本的问题之一。而万有引力是自然界四种基本的相互作用中，最早被我们所关注的，而且这种作用具有最大的普适性、作用范围大、能够线性叠加、不能屏蔽、相对强度最小、只有吸引而无排斥等一系列特殊的性质，并与我们的生活密切相关，在宏观和宇观领域起着重大的、甚至是决定性的作用，所以有关万有引力问题的研究在物理学中占有十分重要的地位。

2. 引力问题在物理学中所占的地位

物理学形成一门独立的学科，并且成为整个自然科学的基础，是从经典力学开始的。在此之前，人类的文明史中虽有不少有关物理的、有价值的创造和发现，但没有形成完整的理论体系，也就是说，还没有构成独立的物理学。16 世纪以后，由于航海、战争和工业生产的需要，力学的研究得到了迅速的发展。航海事业促进了天文观测，天体运行的大量精确的数据资料为揭示行星运动的规律奠定了基础。17 世纪，牛顿总结了以开普勒、伽利略为代表的许多物理学家的研究成果，建立了牛顿运动定律和万有引力定律，标志着经典力学的诞生。牛顿建立的力学体系经过伯努利、拉格朗日、达朗贝尔等人的推广和完善，形成了系统的理论，得到了广泛的应用并进一步发展出了流体力学、弹性力学和分析力学等分支，使经典力学成为自然科学中的主导和领先学科。由此我们可以看出，有关引力问题的研究是物理学发展的一块重要的基石。

在牛顿力学创建以后，万有引力定律经受了实践的检验，取得了很大的成功。到 19 世纪，经典力学已经相当成熟，特别是海王星的发现，证明了牛顿引力理论的巨大威力，使人们坚信

牛顿力学是不可动摇的。在物理学蓬勃发展的过程中，有关引力问题的研究从来也没有停止过。20世纪初，爱因斯坦建立狭义相对论以后，深入探讨了引力问题，建立了广义相对论。广义相对论既是狭义相对论的发展，又是牛顿引力理论的发展。爱因斯坦证明了牛顿引力理论是广义相对论的一级近似，而广义相对论是更具有普遍意义的更完善的引力理论。

广义相对论作为新的引力理论得到了实践的支持。爱因斯坦本人首先用它解释了用牛顿引力理论不能完全解释的水星轨道近日点进动问题。接着，他计算了太阳引力场对星光的弯曲，所得结果比牛顿引力理论的相应结果大一倍，但与后来天文观测的结果很接近。爱因斯坦在创建了现代引力理论后，又据此提出了新的宇宙模型，这标志着相对论宇宙学的诞生，也是现代宇宙学研究的开始。20世纪60年代，随着中子星的发现、3 K宇宙背景辐射的确认等一系列科学上的重大进展，现代引力理论及在此基础上建立起来的大爆炸宇宙模型得到了普遍的接受。近20年来，现代天文学在广义相对论的基础上得到蓬勃发展。中子星的形成和结构，黑洞物理和黑洞探测，引力辐射理论和引力波探测，大爆炸宇宙学等诸多领域都是现代引力理论的主要应用方面。在基础理论方面，量子引力，大尺度时空的拓扑结构等都正在深入研究中。在这种背景下，广义相对论也自然地成了现代物理学中一门重要的基础学科。

纵观物理学发展的历史，可以看出，从牛顿万有引力定律，到爱因斯坦广义相对论，有关引力的理论，形成了物理学中理论发展的一条鲜明的主线。它既是一个古老的课题，又是最现代前沿的领域；既是物理理论最早建立的基础，又是当今理论研究方兴未艾的焦点之一。除了在理论上的重要地位以外，在实践中，万有引力也有广泛的应用。可以说，一切发生在地球上的自然现象和人类所进行的各种生产活动，无一不与万有引力有关。特别是人造卫星的发射和利用，涉及现代工农业生产、科学研究、交通运输、军事侦察、无线电通讯，甚至深入到文化传播、政治宣传等上层建筑和人类生活的方方面面。从天文授时到大地测量，从重力探矿、资源普查到气象和潮汐预报，从宇宙探索、航天技术到电视转播、全球移动电话，其应用之广，不胜枚举。万有引力在物理学中所占的重要地位，由此可见一斑。

3. 重力加速度的变化

地球上某一地区的重力加速度与海拔高度、地理纬度、周围的地形地貌及地质结构等许多因素都有关系。根据万有引力定律可以推断出在地球表面附近重力加速度的大致变化规律，还可进一步根据重力加速度的异常探测矿藏、分析地质结构等。

(1) 重力加速度与高度的关系

假定地球是一个质量均匀分布的球体，设质量为 m 的物体在距海平面高度为 h 处($h\geqslant 0$)，由于受到地球的万有引力而做自由落体运动，重力加速度为 g，由于惯性质量与引力质量相等，故有

$$mg=G\frac{mM}{(R+h)^2} \tag{1}$$

式中 M 为地球质量，R 为地球半径，G 为万有引力常量。因而

$$g=\frac{GM}{(R+h)^2}=\frac{GM}{R^2}\left(1+\frac{h}{R}\right)^{-2} \tag{2}$$

由二项式定理，有

$$\left(1+\frac{h}{R}\right)^{-2}=1-\frac{2h}{R}+\frac{3h^2}{R^2}-\cdots$$

在地面附近，$h\ll R$，所以 $\frac{h}{R}$ 的高次项可以忽略不计，于是得到

$$g=\frac{GM}{R^2}\left(1-\frac{2h}{R}\right)=g_0\left(1-\frac{2h}{R}\right) \tag{3}$$

式中 $g_0=\frac{GM}{R^2}$ 为海平面处的重力加速度。上式表明，重力加速度随物体所在的位置距海平面的高度 h 的增大而减小。这种变化是非常缓慢的。例如，在世界最高的珠穆朗玛峰之巅，重力加速度比海平面处减小还不到千分之三。

在低于海平面的高度为 h 处，式（1）不再成立。这是由于质量均匀分布的球壳，对壳内质点的万有引力的合力为 0。设质量为 m 的物体在低于海平面的竖直距离为 h 处，由于受地球的万有引力而做自由落体运动，重力加速度为 g，则有

$$mg=G\frac{MM'}{(R-h)^2} \tag{4}$$

式中 M' 为半径为（$R-h$）的球体质量，如将地球看做质量均匀分布的球体，则

$$M'=\frac{4}{3}\pi(R-h)^3\frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3}=\frac{(R-h)^3}{R^3}M \tag{5}$$

将式（5）代入式（4），得到

$$g=\frac{GM}{R^2}\left(\frac{R-h}{R}\right)=\frac{GM}{R^2}\left(1-\frac{h}{R}\right)=g_0\left(1-\frac{h}{R}\right) \tag{6}$$

式（6）表明在低于海平面处，重力加速度随距海平面的高度 h 的增大而减小。即离地心越近，重力加速度越小。在地心处，$h=R$，则 $g=0$。设想如果将一个物体放在地心处，由于受到地球各方向的引力作用，其合力必为 0，因此物体没有重力，重力加速度自然为 0 了。

（2）*重力加速度与纬度的关系*

在前面的讨论中，我们没有把物体受到地球的万有引力与物体的重力加以区分。但是严格说来，二者是有差别的。在实际测量中，测出物体自由落体的加速度 g，就可以根据牛顿第二定律得知物体所受的力为 $G=mg$，并把 G 称为物体所受的重力。如果把物体悬挂在弹簧秤上，物体静止不动，根据牛顿第二定律就可得出，弹簧对物体的拉力 F_N 与重力平衡，二者大小相等，方向相反，因此物体的重力为 $\boldsymbol{G}=-\boldsymbol{F}_N$；如果把物体放在地面或其他支持物上，那么地面的支持力 F_N 就和重力的大小相等。这样测量出来的重力并不是地球对物体的万有引力，故有时称为“表观重力”或“视重”。这是由于牛顿第二定律只适用于惯性参考系，而我们的测量是在固定于地面的参考系（有时称为“实验室参考系”）中进行的。由于地球在自转，固定于地面的参考系不是惯性参考系，而在非惯性系中要应用牛顿第二定律就必须考虑惯性力。真实力与惯性力的合力常称为表观力。

物体的重力 $\boldsymbol{G}$ 与物体所在处的纬度有关，它是物体所受地球的万有引力 $\boldsymbol{F}$ 和惯性离心力 $\boldsymbol{f}$ 的矢量和。设在纬度为 λ 处，有一质量为 m 的物体静止在地面上。由于物体随地球一起以角速度 ω 绕地轴转动，所以物体受到的惯性离心力 $\boldsymbol{f}$ 的方向如图 6-3 所示，大小为

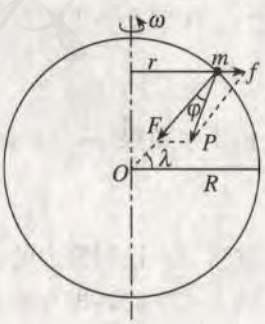


图 6-3

$$f=m\omega^2R\cos\lambda \tag{7}$$

式中 R 为地球半径，$R\cos\lambda$ 为物体绕地轴做圆周运动的半径，即图 6-3中的 r。物体受到地球的万有引力为 $\boldsymbol{F}$，方向指向地心。$\boldsymbol{F}$ 和 $\boldsymbol{f}$ 的合力就是物体的重力 $\boldsymbol{G}$。因此有

$$\boldsymbol{G}=\boldsymbol{F}+\boldsymbol{f} \tag{8}$$

实际上，惯性离心力 f 比万有引力要小得多，它们的大小的比值为

$$\frac{f}{F}=\frac{m\omega^2 R\cos\lambda}{G\dfrac{mM}{R^2}}=\frac{\omega^2 R}{g_0}\cos\lambda$$

式中 $\omega=\dfrac{2\pi}{24\times 3\ 600}\mathrm{s}^{-1}=7.3\times10^{-5}\mathrm{s}^{-1}$ 为地球自转的角速度，g_0 为不受地球自转影响时的重力加速度。代入数值，得

$$\frac{f}{F}=\frac{(7.3\times10^{-5})^2\times6.4\times10^6}{9.8}\cos\lambda\approx3.5\times10^{-3}\cos\lambda \tag{9}$$

可见 $f\ll F$。$\boldsymbol{G}$ 的方向与 $\boldsymbol{F}$ 的方向之间的夹角 φ 实际上也很小。

根据余弦定理，可得到

$$G=(F^2+f^2-2Ff\cos\lambda)^{\frac{1}{2}}=F\left[1+\left(\frac{f}{F}\right)^2-2\frac{f}{F}\cos\lambda\right]^{\frac{1}{2}}$$

因为 $f\ll F$，所以 $(\dfrac{f}{F})^2$ 可忽略不计，于是有

$$G=F\left(1-\frac{2f}{F}\cos\lambda\right)^{\frac{1}{2}}$$

利用二项式定理将上式展开，并略去 $\dfrac{2f}{F}\cos\lambda$ 的高次项，得

$$G=F\left(1-\frac{f}{F}\cos\lambda\right)=F(1-0.0035\ \cos^2\lambda) \tag{10}$$

因而

$$g=\frac{G}{m}=\frac{F}{M}(1-0.0035\ \cos^2\lambda)=\frac{GM}{R^2}(1-0.0035\ \cos^2\lambda) \tag{11}$$

式（11）反映了重力加速度 g 随地理纬度 λ 而变化的规律，如果我们把地球看做质量均匀分布的球体，R 与 λ 无关，则 g 随 λ 增大而增大，变化的原因就是由于地球自转造成在不同的纬度处，地面参考系的加速度不同。实际上，地球并不是圆球，而是更接近于椭球。如果将地球看做质量分布均匀的椭球，则式（11）中的 R 也与 λ 有关。由于 R 随 λ 增大而减小，同时考虑式中 λ 与 R 的变化，结论仍然是 g 随 λ 增大而增大。在赤道上，$\lambda=0$，且 R 最大，故 g 最小；在两极处，$\lambda=90°$，且 R 最小，故 g 最大；在其他地区，重力加速度介于上述二极值之间，g 随 λ 增大而增大的变化是单调的。严格地说，地球也不是真正的椭球，且质量分布也不是均匀的，因此，实际上，g 随 λ 的变化规律还要复杂得多。

由图 6-3 可知，根据正弦定理，应有

$$\frac{f}{\sin\varphi}=\frac{G}{\sin\lambda}$$

由于 φ 角很小，$\sin\varphi\approx\varphi$，得到重力 $\boldsymbol{G}$ 与万有引力 $\boldsymbol{F}$ 之间的夹角 φ 可表示为

$$\varphi=\frac{f\sin\lambda}{P}=\frac{m\omega^2 R\cos\lambda\sin\lambda}{mg}=\frac{\omega^2 R\sin 2\lambda}{2g} \tag{12}$$

式（12）说明重力的方向与万有引力的方向之间的偏差也与物体所在处的纬度 λ 有关。在 $\lambda=0$ 或 $\lambda=90°$ 时，即在赤道和两极，$\varphi=0$，重力与万有引力的方向相同；而在 $\lambda=45°$ 处，φ 最大，其值为

$$\varphi_{\max}=\frac{\omega^2 R}{2g}=\frac{(7.3\times10^{-5})^2\times6.4\times10^6}{2\times9.8}\ \mathrm{rad}\approx1.7\times10^{-3}\ \mathrm{rad}\approx6'$$

(3) 精密测量重力加速度的变化

重力加速度除了随高度和纬度有规律地变化之外，还受到地形地貌和地壳物质结构等因素的影响。例如，在地下埋藏有某种矿藏时，该地区的重力加速度就会明显异常。因此，利用现代化的精密仪器，准确地测量出重力加速度的微小变化，就可以探测地下的矿藏或地质结构的特点，这已成为现代地球物理勘探中非常有价值的手段，称为重力勘探。能够精密测量重力加速度变化的仪器是重差计。

图 6-4 是一种用熔凝石英制成的灵敏重差计的基本结构示意图，主要用来感受重力变化的是悬挂在支架 AB 和弹簧 S_1 之间的臂 W。指针 P 和支架 AB 固连在一起，随 W 的平衡位置的微小变化而同步偏转，由刻度盘上即可直接显示重力加速度的变化。弹簧 S_1 的灵敏度极高，当 W 所受重力有微小变化时，S_1 伸长的长度就会有改变，使 W 的平衡位置发生相应的改变。S_2 是经校准过的用来调整读数零点的另一个弹簧。当重差计由某处移动到另一地点时，由于重力加速度的变化导致 W 的重力和平衡位置发生微小变化，这一变化还可以用更灵敏的光学方法或电学方法来测量。例如，把 W 做成某一调谐电路的一部分，当 W 的位置变化时就会引起调谐回路的电容发生变化，因而固有频率发生变化，我们可以精确地测量回路的频率，从而得知重力加速度变化的数值。用这种方法测量的精度可达 10^{-8}，即只要重力加速度变化 $10^{-7}\,\mathrm{m/s^2}$，仪器就能显示出来，这相当于在地球表面上高度变化约 3 cm 时所引起的重力加速度的变化。

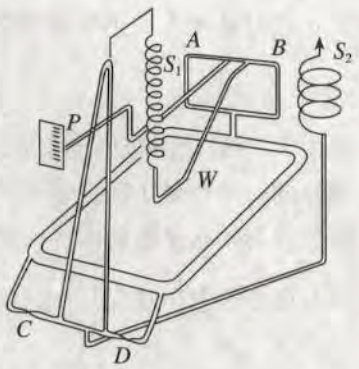


图 6-4

目前实际应用的重差计几乎都是静态的。如果把重差计与计算机联接，连续改变重差计的位置，就可以由计算机直接绘制出类似于等高线那样的等重力线，为进一步分析地下的矿藏或地质结构提供数据和图象。

4. 引力常量的实验测定

(1) 卡文迪许实验（扭秤平衡法）

引力常量是第一个用物理实验的方法在实验中测得的基本物理常量。由于缺乏灵敏度足够高的测量工具，牛顿当时只验证了引力常量的普适性，但没有能够测量出它的数值。在万有引力定律发表大约一百年后，英国的米切尔首先设计了一种专门用来进行引力实验的仪器，称为扭秤。这个装置的特点是通过测量微小的扭转角度，以显示微弱的引力，从而使在实验室中测定引力常量成为可能。这是米切尔的贡献，但他并没有亲自做过测定引力常量的实验，因为在扭秤还没有制造完时，他就去世了。

1798 年，卓越的英国物理学家卡文迪许在米切尔的基础上完成了扭秤的制作，而且作了重要的改进。由于扭秤悬丝的扭转角度非常微小，一般不易直接观察出来，更难以比较准确地量度，卡文迪许在悬丝上附加一平面镜，镜面随悬丝的扭动而偏转，偏转角可用光学方法加以显示，就能测得比较准确。卡文迪许用改进后的扭秤完成了历史上第一个测定引力常量的实验。他的实验装置如图 6-5 所示。将两个直径约 2 英寸、质量均为 m 的小铅球，固定在一根长 l 约为 6 英尺的木杆两端，用一根长约 3 英尺的镀银铜丝通过杆的中心将木杆

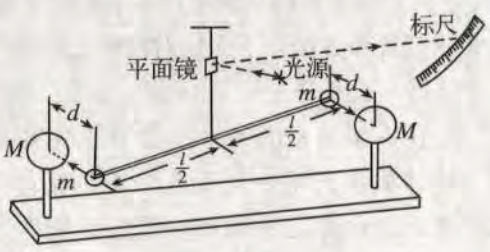


图 6-5

水平悬挂起来，在悬丝上固定一小平面镜。将另外两个直径约为12英寸、质量均为M的大铅球，分别放在两个小铅球附近，使每一对大、小铅球中心间的距离均为d、中心连线与木杆垂直、球心均在同一水平面内。用细光束照射悬丝上的小平面镜并反射到带有刻度的标尺上，当悬丝扭转时，其偏转角α可由反射光照在标尺上位置的变化求得。

由于大、小铅球间的引力作用，木杆将受到引力产生的力矩，使杆以悬丝为轴转动。杆的转动使悬丝发生扭转形变，因而产生阻碍杆转动的弹性恢复力矩，当两个力矩相等时达到平衡，这时悬丝上的小平面镜相对于没有放大铅球时的位置偏转了α角。根据万有引力定律

$$l \cdot G\frac{mM}{d^2} = K\alpha \tag{1}$$

式中K为悬丝扭转单位角度时所产生的力矩，称为扭转系数，其数值可由杆（包括两个小铅球）的转动惯量I和振动周期T求出。方法是先将大铅球移开，使其不影响杆的自由振动。以悬丝为轴水平扭转木杆，设角位移为θ，这时悬丝对木杆施加力矩$-K\theta$（负号表示力矩的方向与形变的方向相反），木杆产生角加速度$\frac{d^2\theta}{dt^2}$，由刚体动力学规律可知

$$I\frac{d^2\theta}{dt^2} = -K\theta \qquad 或 \qquad \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{K}{I}\theta = 0 \tag{2}$$

(2) 式表明，在悬丝的弹性力矩作用下，木杆的运动为简谐振动，其振动的角频率为$\omega = \sqrt{\frac{K}{I}}$，因而周期为

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{K}} \tag{3}$$

得到

$$K = \frac{4\pi^2 I}{T^2} \tag{4}$$

将（4）式代入（1）式，得到

$$G = \frac{4\pi^2 d^2 I\alpha}{mMT^2 l}$$

式中右端均为可以直接测量或计算得到的量，从而可以准确地推算出G的数值。卡文迪许的实验开始于1797年夏，于1798年完成。他当时测得的结果，经过单位换算后所得的数值为

$$G = (6.754 \pm 0.041) \times 10^{-11}\ \mathrm{N \cdot m^2/kg^2}$$

在当时的技术条件下能测得这样精确的结果，是十分难能可贵的。

卡文迪许实验开启了测量引力常量的历史行程，奠定了实验基础。二百多年来，人们采用各种不同的方法来更加精确地测定引力常量，在公开发表的文献中对引力常量的测定已超过200次。其中有的从测量技术上对卡文迪许所用的扭秤偏转法作了改进；有的又设计出了新的实验装置和方法。下面仅对其中比较成功的方法作一些简要的介绍。

(2) 天平法

在一架精密的天平两盘中各放质量为m的物体，达到平衡。如果将质量为M的一个大物体放在天平一侧质量为m的物体下面，由于m与M间的引力作用将破坏原来的平衡状态，必须在另一侧盘中增加质量为Δm的小砝码才能使天平恢复平衡。根据Δm及其他天平的有关参数就可以计算出引力常量G的数值。这一方法最早于1891年被英国的坡印

亭所采用，但20世纪以来已很少为人们所用了。

(3) 扭秤周期法

这种方法的原理是根据扭秤的摆动周期在引力的作用下会发生变化。在图6-5中，若将两个质量为M的大铅球放在木杆的延长线上，使m与M中心连线沿杆的方向，则扭秤的摆动周期将会缩短；若将M放在垂直于杆的位置上，使m与M中心连线与杆垂直，则扭秤的摆动周期将会增大。由两次摆动周期的差值及其他有关参量可以计算出引力常量G的数值。这种方法在历史上曾多次被人们采用过。

(4) 扭秤共振法

把图6-5中两个质量为M的大铅球也用一杆连接作为一扭秤悬挂起来，形成两个扭摆系统，其中一个扭摆的质量大，另一个扭摆的质量小。当M摆动时，由于引力的作用也将引起m摆动。当调节两个扭摆的参量，使二者的周期相等时，可以证明m摆与M摆的振幅之比是正比于G的。因而，由摆的振幅即可求出引力常量G。

除以上几种方法外，还有许多其他方法，如加速度法等，不再一一列举。到目前为止，在我们已知道的自然界的基本常量中，引力常量仍然是测得最不精确、了解最少的一个。原因是实验很难做，一方面引力是四种基本相互作用中最弱的一种，另一方面引力是万有的，不能屏蔽，这就意味着干扰很多，不容易排除。表6-2中列出了用各种不同方法测出的引力常量的值。据1986年公布的引力常量的推荐值为

$$G = (6.672\ 59 \pm 0.000\ 85) \times 10^{-11}\ \mathrm{N \cdot m^2/kg^2}$$

2014年，国际科技数据委员会（CODATA）推荐的引力常量平差值[①]为

$$G = 6.67\ 408(31) \times 10^{-11}\ \mathrm{N \cdot m^2/kg^2}$$

表6-2 用不同方法测定的引力常量数值（$\mathrm{N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}}$）

主要测定者或公布者	年份	方　法	引力常量G值
Cavendish	1798	扭秤偏转法	6.754×10^{-11}
Poynting	1891	天平法	6.698×10^{-11}
Boys	1895	扭秤偏转法	6.658×10^{-11}
Braun	1895	扭秤偏转和周期法	6.658×10^{-11}
Heyl	1930	扭秤周期法	6.678×10^{-11}
Zahradnicek	1933	扭秤共振法	6.659×10^{-11}
Heyl and Chrzanowski	1942	扭秤周期法	6.668×10^{-11}
Rose	1969	加速度法	6.674×10^{-11}

5. 惯性质量与引力质量是两个不同的概念

(1) 惯性质量及其测量

我们先来分析一下惯性质量概念建立的逻辑过程。

牛顿第一运动定律指出，一切物体都有惯性，力是改变物体运动状态，即产生加速度的原

① 平差值是指，由CODATA特别成立的一个基本物理常量任务组（Task Group on Fundamental Physical Constants）收集的，世界各国近年来在物理常量测量方面的新进展及积累的数据，根据一系列物理方程式，用最小二乘法得到的一组物理常量的“最佳值”。

因。这里已经给出了力的定义，但只是定性的。为了确定力和加速度之间的定量关系，必须先规定力的量度方法，制作出测力的仪器，然后用实验测量出力和加速度的数值，找出它们之间的关系。为此，先任意选定一个物体作为标准物体，并规定，标准物体所受作用力的方向与所产生的加速度的方向相同，标准物体所受作用力 F 的大小与所产生的加速度 a 的大小成正比。于是，对于标准物体，有

$$F \propto a \quad \text{（标准物体）} \tag{1}$$

然后再规定，当标准物体的加速度大小为 a_0 时，所受力的大小为一个单位，可称为“单位力”。根据这样的规定，我们就可以用标准物体的加速度来定量地确定作用在标准物体上的任何作用力了。例如，当标准物体产生的加速度为 a_1 时，它所受的作用力为 $F_1=a_1/a_0$ 单位力。

上述规定虽然能量度作用在标准物体上的力，但还不能量度作用在非标准物体上的力。为了测量作用在任何物体上的力，我们可以借助物体其他的特性来制作一个测力计。例如，利用弹簧受力会发生弹性形变的特性，用弹簧的伸长或缩短来测力。先把弹簧与标准物体连接，然后拉弹簧使其伸长 Δl_1，这时便有弹性力 F_1 作用在标准物体上，使之产生加速度 a_1，由 a_1 的大小和 $F_1=a_1/a_0$ 单位力可得出 F_1 的大小，F_1 就是弹簧伸长为 Δl_1 时所产生的弹性作用力。用这种方法可以得出一系列 Δl_i 与弹力 F_i 之间的对应关系（$i=1, 2, 3, \cdots$），以 F_i 作为刻度就成为一个经过标定的弹簧测力计，用它可以测出任何物体所受作用力的大小。

解决了力的量度问题以后，就可以通过实验来确定加速度与力的关系。大量实验结果表明，对任何物体，它所受的作用力 F 都与由此力引起的加速度 a 成正比，因此可将(1)式推广到任何物体，即

$$F \propto a \quad \text{（任何物体）} \tag{2}$$

(1)式只适用于标准物体，并且这种正比例关系是人为规定的；而（2）式则适用于任何物体，而且这一正比例关系是实验结果，不是从（1）式导出来的。

通过对实验数据的分析发现，以相同的力作用在不同的物体上，它们所产生的加速度不同。这表明物体的加速度不仅与外加的作用力有关，而且与物体本身的性质——惯性有关。加速度较大的物体，反映出它的运动状态比较容易改变，也就是说惯性较小；加速度较小的物体，反映出它的运动状态相对来说不容易改变，也就意味着其惯性较大。为了定量地描述物体惯性的大小，我们引入惯性质量的概念，并规定每个物体的惯性质量的大小与它们在相等外力作用下所获得的加速度的大小成反比。如果用 $m_{惯}$ 表示惯性质量，则有

$$m_{惯} \propto \frac{1}{a} \tag{3}$$

为了对惯性质量赋予定量的数值，同样需要先选定一个标准物体，规定它的惯性质量为一个单位，可称为“惯性质量单位”。这样，就可以用相等的力分别作用在标准物体和另一个待测物体上，测出二者的加速度之比，从而确定待测物体的惯性质量。实验证明，当外力的大小改变时，尽管标准物体和待测物体的加速度的大小都随之改变，但二者的比值却是恒量。这一方面说明，惯性质量是由物体本身的性质所决定的，与外力无关；另一方面也说明加速度与惯性质量成反比的关系是具有普遍性的客观规律。

在物理教学中，引入一个新的物理概念时，往往直接给出概念的定义，很少涉及建立这一概念的前因后果。造成这种现象既有客观上的原因，如教材篇幅的限制、课堂教学时间少与教学内容多的矛盾等；又有主观上的原因，如有的教师把教学目的限定在使学生掌握概念的定义上。从提高教师自身的科学素质的角度考虑，教师应首先理解概念提出的逻辑系统，然后根据

学生的接受能力，用通俗的语言作适当的介绍，做到既不失科学、严密，又能深入浅出。在教学中注意培养学生的科学思维能力，其意义并不亚于掌握概念本身的定义。从前面的分析可以看出，在惯性质量这一概念的背后，竟有如此严密的逻辑体系，这里，既体现了逻辑思维和科学推理的过程，又展示了严密的科学体系和研究方法。

前面介绍的测定物体惯性质量的方法，在操作上有一定的困难，因为在实验中直接测量物体运动的加速度，不容易测得很准确。下面介绍一种专为测量物体的惯性质量而设计的仪器，叫做惯性秤。其构造如图 6-6 所示。图中 1 是两个完全相同的弹簧片，两端分别固定在两个托盘上，其中一个托盘 5 固定在桌面上，另一个托盘 2 沿水平方向伸出桌面外，成为秤的自由端。将被测物体用螺栓固定在自由端托盘 2 上。将此自由端沿水平方向拨动一小段距离然后放开，由于弹簧片的弹性恢复力的作用，自由端托盘与被测物体一起做周期性振动。被测物体同时受到重力和弹性恢复力的作用，但由于重力始终垂直于物体的运动方向，而且又与托盘施加的支持力相互平衡，所以重力对物体的振动没有影响，相当于物体仅受弹性恢复力的作用。由牛顿第二定律可知，物体的惯性质量越大，在受到同样大小的弹性恢复力作用时，其加速度就越小。由实验得知，在弹簧片的长度和自由端托盘拨离平衡位置的距离一定时，其振动的周期 T 的平方与加速度 a 成反比，即

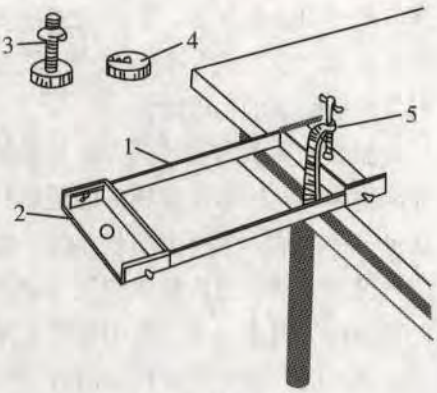


图 6-6　惯性秤装置示意图
1-弹簧片；2-自由端托盘；
3-固定被测物体用的固定螺栓；
4-被测物体；5-惯性秤固定支架

$$T^2 \propto \frac{1}{a} \tag{4}$$

由（3）式和（4）式可知

$$m_{惯} \propto T^2 \tag{5}$$

这样，就可以根据被测物体在惯性秤上的振动周期与被选为惯性质量单位的物体的振动周期之比来确定被测物体的惯性质量。

（2）引力质量及其测量

下面我们再来分析引力质量的概念是怎样建立的。

从万有引力定律可知，任何一个物体都会对其他物体产生引力作用，因此，任何物体都是一个引力源；同时，任何物体也都会受到其他物体对它产生的引力作用，因此，任何物体也都是一个引力接受者。如果把两个质点间的引力作用规律与两个静止的点电荷间的电力作用规律进行类比，就会发现二者有许多相似之处。在电学中，我们把产生静电力的源称为“电荷”，把一个带电体所具有的“电荷”的多少称为它所带的“电荷量”。1785 年，法国物理学家库仑（Charles Augustin de Coulomb，1736—1806）通过对实验结果的分析，总结出如下的规律，称为库仑定律：真空中两个静止的点电荷之间的相互作用力 F 的大小与它们所带电荷量 q_1、q_2 的乘积成正比，与它们之间的距离 r 的二次方成反比。用数学公式可表示为

$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2} \tag{6}$$

式中 k 为比例系数，称为静电力常量。

为了概念上清晰起见，仿照产生静电力的源称为“电荷”，我们不妨将产生引力的源称为

“引力荷”。这样，我们就可以认为，两个带电体之间存在静电力作用，是因为它们各自都具有一定数量的“电荷”；同样，两个物体之间存在引力，也是因为它们各自都具有一定数量的“引力荷”。为了定量地反映物体间产生引力的能力的强弱，应当对“引力荷”赋予数值的意义，把一个物体具有“引力荷”的多少称为“引力质量”。一个物体的引力质量大，就表示它具有的“引力荷”多，它产生或接受引力作用的能力就强；反之，物体的引力质量小，就表示它具有的“引力荷”少，它产生或接受引力作用的能力就弱。所以，引力质量是反映一个物体引力性质强弱的物理量。

测量物体引力质量的方法是直接比较待测物体和标准物体所受地球的引力。在待测物体和标准物体都与地球保持相等的距离时，如果二者受到地球的引力相等，那么待测物体的引力质量也与标准物体的引力质量相等。为此，先要选定一个标准物体，规定它的引力质量为一个单位，可称为“引力质量单位”。测量引力质量大小的量具是天平，天平是根据杠杆原理制成的。天平的种类很多，实验室中常用的是等臂天平。将待测物体放在天平的左盘中，在天平的右盘中放适当的、引力质量已知的若干个砝码，当地球对待测物体的引力与地球对右盘中全部砝码的引力之和相等时，天平达到平衡。此时，待测物体的引力质量就等于右盘中全部砝码的引力质量的总和，日常生活和生产中所用的台秤、磅秤、杆秤等都相当于不等臂天平。杆秤利用引力质量固定的秤砣在秤杆上移动，调节力臂的大小，使杆秤达到平衡。

综上所述，我们可以看出，引力质量与惯性质量是两个各自独立的物理概念。它们都反映物体的某种性质，前者反映的是产生和接受引力作用强弱的本领；后者反映的是惯性的大小。而这两种性质又是各自独立的，从经典物理学的观点看是互不相干的、没有联系的。

(3) 惯性质量与引力质量的关系

在前面介绍万有引力定律建立的历史过程时，我们曾经认为太阳对行星的引力是行星绕太阳运动、产生向心加速度的原因，这时只考虑了太阳对行星的引力；在分析月球绕地球的运动时，认为地球对它的引力是使月球绕地球运动、产生向心加速度的原因，这时只考虑了地球对月球的引力。实际上，这样的分析是不严格的，因为月球不仅受地球的引力作用，而且同时也要受太阳的引力作用。有人以为，太阳与月球的距离远大于地球与月球的距离，因此太阳对月球的引力远小于地球对月球的引力，二者相比，可以忽略太阳对月球的引力。果真如此吗？我们只要通过粗略的计算就可以得出结论。根据现在已知的数据，太阳的质量约为 $m_{日}=1.99\times10^{30}$ kg，地球的质量约为 $m_{地}=5.98\times10^{24}$ kg，月球的质量约为 $m_{月}=7.35\times10^{22}$ kg，太阳与月球的平均距离约为 $r_{月日}=1.50\times10^{11}$ m，地球与月球的距离约为 $r_{月地}=3.84\times10^{8}$ m，取引力常量 $G=6.67\times10^{-11}\ \mathrm{N\cdot m^2\cdot kg^{-2}}$。得到太阳对月球的引力 $F_{月日}$ 约为

$$F_{月日}=G\frac{m_{月}m_{日}}{r_{月日}^2}=6.67\times10^{-11}\times\frac{7.35\times10^{22}\times1.99\times10^{30}}{(1.50\times10^{11})^2}\ \mathrm{N}$$
$$=4.3\times10^{20}\ \mathrm{N}$$

地球对月球的引力 $F_{月地}$ 约为

$$F_{月地}=G\frac{m_{月}m_{地}}{r_{月地}^2}=6.67\times10^{-11}\times\frac{7.35\times10^{22}\times5.98\times10^{24}}{(3.84\times10^{8})^2}\ \mathrm{N}$$
$$=1.99\times10^{20}\ \mathrm{N}$$

二者相比，不但数量级相等，而且太阳对月球的引力还大于地球对月球的引力。可见太阳对月球的引力不能作为小量加以忽略，上述说法明显是错误的。

为什么只考虑地球对月球的引力，而没有考虑太阳对月球的引力作用，仍能得出正确的结

果呢？原因在于太阳对月球的作用效果与太阳对地球的作用效果是完全一样的。这就是说，假如地球和月球之间没有引力作用，那么，在太阳引力作用下，地球和月球的轨道完全一样，在地球上来看，月球和地球的相对位置始终保持不变，好像根本不存在太阳的作用一样。因此，当我们研究地球和月球的相互关系时，可以不考虑太阳的作用，而只要考虑地球和月球之间的相互作用就可以了。

上面所说的“作用效果完全一样”，用数学的语言来表述，就是地球绕太阳运动的线速度 $v_{地}$ 与月球绕太阳运动的线速度 $v_{月}$ 相等，即 $v_{地}=v_{月}$。由牛顿运动定律可知，

$$G\frac{(m_{月})_{引}(m_{日})_{引}}{r^2}=(m_{月})_{惯}\frac{v_{月}^2}{r} \tag{7}$$

$$G\frac{(m_{地})_{引}(m_{日})_{引}}{r^2}=(m_{地})_{惯}\frac{v_{地}^2}{r} \tag{8}$$

在上面两式中，r 为太阳与月球的平均距离，也等于太阳与地球的平均距离；两式等号左端的质量都是引力质量，等号右端的质量则是惯性质量，我们在括号外以下标“引”表示引力质量，下标“惯”表示惯性质量。

由（7）式和(8)式可知，要求 $v_{地}=v_{月}$，则必然存在着下列关系，即

$$\frac{(m_{月})_{惯}}{(m_{月})_{引}}=\frac{(m_{地})_{惯}}{(m_{地})_{引}} \tag{9}$$

(9) 式就是我们在研究地球与月球关系时可以不考虑太阳作用的根据，把上述论证加以推广，对任何物体 A 和 B，都有

$$\frac{(m_A)_{惯}}{(m_A)_{引}}=\frac{(m_B)_{惯}}{(m_B)_{引}} \tag{10}$$

因此，对任一物体，它的惯性质量与引力质量之比都应等于一个常量，这一常量与物体本身的性质无关，为普适常量。这样，我们可以去掉下标 A、B，写成

$$\frac{m_{惯}}{m_{引}}=\text{普适常量} \tag{11}$$

只要选择适当的单位，总可以使这个普适常量为 1。例如，规定惯性质量和引力质量的单位都是千克，则有

$$m_{惯}=m_{引} \tag{12}$$

（二）联系生活、科技和社会资料

1. 地球同步卫星的发射与椭圆转移轨道

发射人造地球卫星的运载火箭一般为三级，其发射后的飞行过程大致包括垂直起飞、转弯飞行和进入轨道这样三个阶段，如图 6-7 所示。

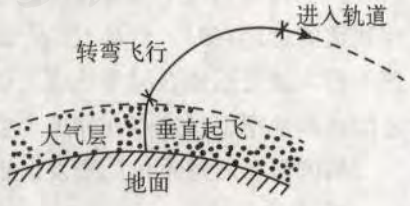


图 6-7

由于在地球表面附近大气稠密，对火箭的阻力很大，为了尽快离开大气层，通常采用垂直向上发射（垂直发射的另一个优点是容易保持飞行的稳定性）。到第一级火箭脱离时，火箭已穿出稠密的大气层。此后第二级火箭点火继续加速。当第二级火箭脱离后，火箭已具有足够大的速度，这时第三级火箭并不立即点火，而是靠已获得的巨大速度继续升高，并

在地面控制站的操纵下，使火箭逐渐转弯而偏离原来的竖直方向，直至变为与地面平行的水平方向。当火箭到达与预定轨道相切的位置时，第三级火箭点火，火箭继续加速达到卫星在其轨道上运行所需的速度而进入轨道。至此，火箭已完成了其运载任务，随即与卫星脱离。刚脱离时，卫星与第三级火箭具有相同的速度并沿同一轨道运动。由于在卫星轨道处仍有稀薄气体存在，而卫星与火箭的外形不同，致使两者所受阻力不同，因而两者的距离逐渐拉开。此后，一般卫星将按预定计划沿椭圆轨道运行，火箭则在落回地球时与稠密的大气层摩擦而烧毁。

地球同步卫星的轨道平面与地球赤道平面重合，绕地球一周所需的时间与地球自转周期严格相等，为 $T=23$ 小时 56 分 4 秒。这样，每隔 24 小时，地球与同步卫星一起转过一圈再加上在地球公转轨道上（绕太阳）转过 360°的 1/365。所以从地面上看，卫星好像是静止在赤道上空某点的正上方固定不动，因此称为地球轨道静止同步卫星，简称地球同步卫星或同步卫星。

同步卫星轨道离地面的高度 h 和运行速度 v 可由匀速圆周运动的规律求出。设地球质量为 M、半径为 R、自转周期为 T，卫星的质量为 m，则有

$$G\frac{Mm}{(R+h)^2}=m\frac{v^2}{R+h} \quad 和 \quad T=\frac{2\pi(R+h)}{v}$$

由以上两式解出 v 和 h，并代入已知数据 M、T、R 和 G，得

$$h=\left(\frac{GMT^2}{4\pi^2}\right)^{1/3}-R=3.578\,6\times10^7\ \mathrm{m}$$

$$v=\left(\frac{GM}{R+h}\right)^{1/2}=3.075\times10^3\mathrm{m/s}$$

这表明同步卫星的轨道半径和运行速度都是严格确定的，因此，发射同步卫星时的精度要比一般卫星高得多。

发射同步卫星通常采用一个椭圆形的中间转移轨道作为过渡。卫星可在地面上任何地点发射。首先由运载火箭的第一级和第二级依次启动，使火箭垂直向上加速。到第二级火箭脱离后，转弯进入一个高度较低的圆形轨道作短暂停泊，这一轨道称为初始轨道或停泊轨道。在此轨道上运行少许时间后，第三级火箭点火，使装有远地点发动机的卫星进入一个椭圆形的轨道，称为转移轨道又叫霍曼（Hohman）轨道。该轨道所在平面与赤道平面的夹角因发射地点不同而异，但椭圆的远地点和近地点都在赤道平面内，远地点与同步轨道相交，如图 6-8 所示。进入转移轨道后，卫星与第三级火箭脱离，同时启动卫星两侧的切向喷嘴，使卫星开始自旋。在转移轨道上绕行几圈的过程中，地面控制站要对卫星的姿态进行调整。当卫星到达转移轨道的远地点时，启动卫星上的远地点发动机，使它改变航向，进入地球赤道平面；同时加速卫星，使之达到在同步轨道上运行所需的速度。然后还需对卫星的姿态作进一步调整，这样才能准确地把卫星定点在赤道上空的同步轨道上。

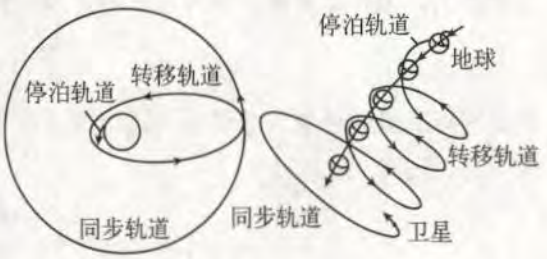


图 6-8

椭圆转移轨道不仅用于发射地球同步卫星，而且可用于各种航天器的轨道转移。

2. 潮汐作用

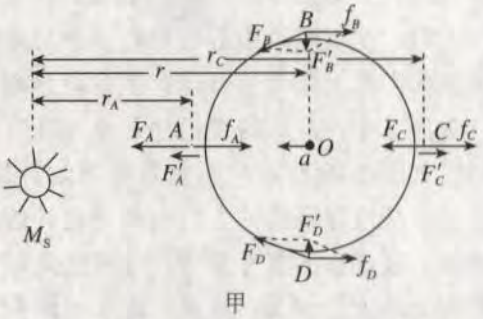
（1）对潮汐现象的解释

在万有引力定律发现之前，虽经伽利略等人的探索，潮汐现象始终是个不解之谜。牛顿首先应用万有引力定律对白昼的潮和半月一次的大潮作了解释，他认识到月球和较小范围内的其

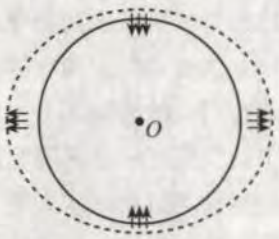
他天体会对海洋中的最近部分有吸引力，这是引起涨潮的原因。

我们以太阳所引起的潮汐作用为例，来说明万有引力对潮汐现象的解释。我们以地球中心 O 为原点，以指向太空的任一固定方向为坐标轴的参考系来考察地球表面上覆盖的海水的受力情况。地球是一个做加速运动的非惯性参考系，其加速度就是地球中心绕太阳公转的向心加速度，方向指向太阳，大小为 $a=\frac{GM_S}{r^2}$，M_S 为太阳的质量，r 为地球中心与太阳中心的距离。

假设在地球的固态物质的表面上覆盖着一层海水，在海洋中的 A、B、C、D 四点处各取质量相等的海水，我们来考察位于这四点处的质量为 m 的海水的受力情况，如图 6-9 甲所示。忽略地球自转对海水的粘滞力，在 A 点处，质量为 m 的海水受太阳的引力 $F_A=G\frac{mM_S}{r_A^2}$ 和惯性力 $f_A=-ma=-G\frac{mm_S}{r^2}$，两者方向相反。由于 A 点到太阳中心的距离 $r_A=r-R<r$（R 为地球半径），所以 $|F_A|>|f_A|$，合力 F_A' 的方向与 F_A 相同，使 A 点处的海水受到向左的合力。



甲



乙

图 6-9

C 点处的情况与 A 点相反，$|F_C|<|f_C|$，使 C 点处的海水受到向右的合力 F_C'。

在 B 点处，由于 $r_B\approx r$，海水所受引力 F_B 与惯性力 f_B 的大小几乎相等（严格说来，r_B 略大于 r，F_B 略小于 f_B），但 F_B 与 f_B 的方向略有差异，不在同一条直线上，故二者的合力 F_B' 方向向下，但合力的大小比 A、C 两点处合力的大小要小。

D 点的情况与 B 点处相似，合力 F_D' 的方向向上。

从以上四个特殊点的情况不难看出，地球表面各点的海水所受的合力的大致分布如图6-9 乙所示。在地球对海水的重力和太阳引力与惯性力的合力的共同作用下，最后使海水表面呈现图中虚线所示的形状，使 A、C 两处附近的海水“上涨”，海面隆起，周围的海水向这一区域流动，形成潮流。

在上面的讨论中我们没有涉及月球的引力作用。实际上，由于月球离地球远比太阳离地球要近得多，因此由于地球半径这一距离的差所造成的月球对海水的引力与惯性力之和形成的引起潮汐的作用力（通常称为引潮力或潮汐力），要比太阳引起的潮汐作用力更大，效应更明显。由于地球自转的缘故，涨潮的位置并不是在月球或太阳的正下方，而是在看到月亮或太阳越过头顶之后的某个时刻才会遇到海水中某处的潮。当地球自转一周时，地球上除两极以外的任一点都会两度遇到海面的涨落变化。另一次潮大约发生在 12 小时之后，即潮汐现象同时发生在地球的两对面，或者说，一昼夜内每个地方都有两次涨潮和落潮。

由于太阳、月球和地球的中心每月有两次几乎在同一条直线上（分别在新月和满月时），所以太阳和月球的引潮力也在同一直线上，这两个力合在一起产生了最强的潮汐作用，称为大潮。大潮每半个月发生一次，在两次大潮之间，太阳和月球的潮汐作用可以部分抵消，形成小潮。

潮汐现象的确切形态在很大程度上取决于海岸线和海洋底部的地形。因此，在海边实际观

察到的大小潮并不一定准确地在朔日（农历初一）和望日（农历十五），而会出现滞后现象。例如，在我国沿海的大潮多发生于农历初三和农历十八。在喇叭形海湾或河口湾中，潮流可以激起怒潮。我国的钱塘江口、亚洲的波斯湾、南美的麦哲伦海峡和北美的芬地湾都以潮高著名。钱塘江口和波斯湾潮高可达 10 m，麦哲伦海峡和芬地湾潮高超过 20 m。

潮汐现象对一些河流和港口的航运具有重要意义。大型船舶可利用涨潮进出河流和港口。此外，潮流还可用以发电，包括我国在内的不少国家都已建成潮汐电站。

地球的固体部分也同海水一样受到月球或太阳产生的引潮力，所以也有类似于海水的潮汐现象，不过十分微弱，称为固体潮。在精密的天文观测及精确的实验中必须考虑这种现象。

（2）潮汐摩擦对地球自转的影响

前面提到，由于地球的自转，涨潮的位置并不是在月球或太阳的正下方，并指出月球的潮汐作用比太阳大得多。现在我们以月球的潮汐作用为例，来讨论潮汐作用对地球自转的影响。

我们在以地球中心为原点，并与地球一起自转的参考系上来考察月球产生的潮汐现象。在这一参照系中，月球的视运动是绕地球自东向西旋转，如图 6-10 所示（图中月球顺时针旋转）。由于月球绕地球旋转的方向与地球自转的方向基本相同，在现在的参考系中，月球绕地球运行一周的时间略大于一天。月球对海水的潮汐力使海水在向着月球和背着月球的两处隆起，使水面成图中虚线所示的形状。这两处隆起的部分跟随月球一起旋转，这就是每天两次的潮汐现象形成的原因，两次潮汐之间相隔约 12 小时。但是由于水的粘滞作用，使隆起部分的旋转运动比原来预期的要落后一段时间，结果就使海面的实际形状如图中的实线所示。两隆起部分 A、B 的连线与地、月中心连线不相一致，隆起部分跟随月球的旋转运动与其余海水跟随地球自转的运动不相一致，这必然会引起海水内部的摩擦损耗。这种摩擦损耗最终将使地球自转的能量减少，从而使地球自转速率减慢。

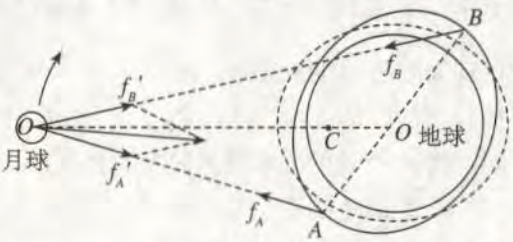


图 6-10

从角动量的观点来看，由于隆起部分 A 比 B 离月球更近，使月球对这两部分的引力大小不同，而有 $f_A > f_B$。又因为隆起部分在运动上的时间滞后，使 A、B 连线与地、月中心连线不相重合，于是 f_A 与 f_B 对地球中心产生的力矩大小不等，最终有一个顺时针方向的净力矩作用在地球（包括海水）体系上，这一力矩使地球的自转角动量减少，自转速率减慢。与此同时，f_A 和 f_B 的反作用力 f_A' 和 f_B' 均作用在月球上，它们的合力对月球施加一逆时针方向的净力矩，此力矩使月球相对于地—月体系质心 C 的角动量增大，以保持地—月体系的总角动量守恒。这一效应的实际效果是地球上每一天的时间间隔持续增大，即日长增长；同时月球与地球间的距离将因此缓慢增加。

日长的持续增长虽然是十分微小的（其数量级为每 100 年增加几毫秒），但这种变化的积累已被精确的测量（与铯钟比较）所证实，而且与古代的日食记录及珊瑚化石的生长环数目相一致。天文学家发现，两千年前古人记录的日食发生的时间，要比根据日长不变所推算的早大约 3 小时。由此推算地球自转速率从古代到现在正逐渐变慢，使日长平均每 100 年增长 1.6 毫秒。如果按这一减慢效应速率推算到更长的时间跨度上，则距今 3.5 亿年以前的泥盆纪，一年的天数约达 400 天，这与泥盆纪珊瑚化石的生长环的数目相符（珊瑚的生长环每一天长一环）。

3. 冥王星为何出局

以前太阳系九大行星的说法一直作为权威的学说通行世界，各国的教科书也是这么写的。

2006 年 8 月在布拉格举行的国际天文联合会第 26 届会议的决议改变了这一说法，教科书也要更改。怎样理解这件事呢，怎样向学生作解释呢？这将是相关学科教师需要思考的一个问题。

按以前的认识，九大行星的地位因为它们都比最大的小行星大而确立，一般来说人们对大行星的定义是：在轨道上绕太阳运动，质量不超过木星质量的 50 倍从而不能自身发光而只能反射太阳光的天体。这个定义并未对大行星的质量、大小规定下限，所以存在寻找第十颗乃至更多大行星的可能。

冥王星的直径只有 2 300 km，是月球的 2/3，质量是地球的 3‰。如果将接近这一大小和质量的行星都称作大行星的话，2004 年发现的塞德娜直径为 1 700 km，接近冥王星。2005 年美国天文学家布朗发现的 2003UB313，直径约 2 400 km，难怪布朗称他发现了太阳系第十大行星。另外，直径在 1 000 km 左右的还有不少。照此下去，新发现的大行星会不断增加，还存在着原来归入小行星的大个子升格为大行星的可能。这就是我们遇到的新问题。

面对以上的问题有两个解决方案。一是扩大大行星的队伍，给出一个大家可以接受的下限。二是重新定义行星，根据人们对太阳系的新认识，对太阳系天体给予重新分类。这个任务交给了 2006 年 8 月在布拉格举行的国际天文联合会第 26 届大会予以解决。8 月 24 日与会代表投票决定采用第二个方案。在新的定义下，不再称大行星。入选的行星为 8 个，分别是水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星和海王星。冥王星则划入矮行星行列，今后那些新发现的类冥王星天体也将归入矮行星行列。其他太阳系天体通称小天体。

如何理解关于行星的新定义？天体质量在太阳系天体的新分类中起着关键作用。在天文学上这一区分始见于恒星。一个天体的质量如果大于木星质量的 50 倍，将会成为本身能发光的恒星，质量决定着恒星的分类、恒星的演化和最终归宿。太阳系天体如果其质量足够大，由于自身引力大而演化为一个球形天体，并维持自身绕太阳的独立轨道，不是挤走就是吸收了在它轨道上的其他天体，这个清扫过程使它们形成了独立的轨道，这样的天体之所以被称作行星取决于它们的质量。冥王星由于质量太小，它的轨道与海王星轨道交叉，没有形成自己独立的绕日运行轨道，故归类于矮行星，这和恒星分巨星、矮星出于一辙。矮行星并未改变它围绕太阳旋转，受太阳引力制约的性质，只是表明其影响力不能与其他行星相比。打一个不完全合适的比方，我们将成绩最好的 8 名百米选手定为种子选手，是因为他们分别是 4 组参赛选手的前两名，进入决赛的 8 名选手与一般选手的差别就是成绩，也就是“能力”的差别。类比于行星的质量，虽然都是百米短跑选手，进入决赛的其影响力就大得多。所以行星的新定义按质量形成的影响力而单划作一类是科学的，比过去的模糊概念进了一大步，是天文史上的一件大事。这表明广大天文学家有智慧和能力应对人们对宇宙的新发现。

冥王星落选行星队伍丝毫没有减低研究它的意义。从太阳系形成的历史看，重的元素留在了离核心天体太阳的附近，轻的元素分布在距离太阳较远的行星上，从而造成行星不同的特色。这是因为越是靠近太阳，受到的引力越大，越是靠近太阳，其环境的温度也越高。在距离太阳 35～1 000 个天文单位处，与行星处于同一平面的地方，存在着一个包含多达 10 亿颗天体的柯伊伯带，这里是远离太阳的地方，太阳温度在这里几乎没有影响。这些天体残留有太阳系形成的早期信息。冥王星很可能原来就是柯伊伯带的天体。对它们的深入研究，有助于揭示太阳系的早期状态。

（摘自《中国教育报》2006 年 9 月 1 日第 4 版，略有修改）

五、补充习题

A组

1. 宇航员在月球上做自由落体实验，将某物体由距月球表面高 h 处释放，经时间 t 后落到月球表面。设月球半径为 R，据上述信息推断，飞船在月球表面附近绕月球做匀速圆周运动所必须具有的速率为（　　）

A. $\frac{2\sqrt{Rh}}{t}$　　B. $\frac{\sqrt{2Rh}}{t}$　　C. $\frac{\sqrt{Rh}}{t}$　　D. $\frac{\sqrt{Rh}}{2t}$

2. 宇宙飞船在半径为 R_1 的轨道上运行，变轨后的半径为 R_2，$R_1>R_2$。宇宙飞船绕地球做匀速圆周运动，则变轨后宇宙飞船的（　　）

A. 线速度变小　　B. 角速度变小　　C. 周期变大　　D. 向心加速度变大

3. 两个质量均为 m 的星体，其连线的垂直平分线为 AB。O 为两星体连线的中点，如图 6-11。一个质量为 m_1 的物体从 O 沿 OA 方向运动下去，则它受到的万有引力的合力变化情况是（　　）

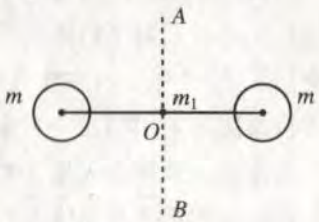


图 6-11

A. 一直增大　　B. 一直减小

C. 先减小，后增大　　D. 先增大，后减小

4. 据媒体报道，嫦娥一号卫星环月工作轨道为圆轨道，轨道高度 200 km，运行周期 127 min。若还知道引力常量和月球平均半径，仅利用以上条件不能求出的是（　　）

A. 月球表面的重力加速度　　B. 月球对卫星的吸引力

C. 卫星绕月球运行的速度　　D. 卫星绕月运行的加速度

5. 已知太阳到地球与地球到月球的距离的比值约为 390，月球绕地球旋转的周期约为 27 天。利用上述数据以及日常的天文知识，可估算出太阳对月球与地球对月球的万有引力的比值约为（　　）

A. 0.2　　B. 2　　C. 20　　D. 200

6. 火星的质量和半径分别约为地球的 1/10 和 1/2，地球表面的重力加速度为 g，则火星表面的重力加速度约为（　　）

A. $0.2g$　　B. $0.4g$　　C. $2.5g$　　D. $5g$

7. 1990 年 4 月 25 日，科学家将哈勃天文望远镜送上距地球表面约 600 km 的高空，使得人类对宇宙中星体的观测与研究有了极大的进展。假设哈勃望远镜沿圆轨道绕地球运行，已知地球半径为 6.4×10^6 m，利用地球同步卫星与地球表面的距离为 3.6×10^7 m 这一事实可得到哈勃望远镜绕地球运行的周期。以下数据中最接近其运行周期的是（　　）

A. 0.6 小时　　B. 1.6 小时　　C. 4.0 小时　　D. 24 小时

8. 将月球、地球同步卫星及静止在赤道上的物体三者进行比较，下列说法正确的是（　　）

A. 三者都只受万有引力的作用，万有引力提供向心力

B. 月球的向心加速度小于地球同步卫星的向心加速度

C. 地球同步卫星与静止在赤道上物体的角速度相同

D. 地球同步卫星相对地心的线速度与静止在赤道上物体相对地心的线速度大小相等

9. 据报道，我国数据中继卫星“天链一号01星”于2008年4月25日在西昌卫星发射中心发射升空，经过4次变轨控制后，于5月1日成功定点在东经77°赤道上空的同步轨道。关于成功定点后的“天链一号01星”，下列说法正确的是（　　）

A. 运行速度大于7.9 km/s

B. 离地面高度一定，相对地面静止

C. 绕地球运行的角速度比月球绕地球运行的角速度大

D. 向心加速度与静止在赤道上物体的向心加速度大小相等

10. 假设太阳系中天体的密度不变，天体直径和天体之间距离都缩小到原来的一半，地球绕太阳公转近似为匀速圆周运动，则下列说法正确的是（　　）

A. 地球的向心力变为缩小前的一半

B. 地球的向心力变为缩小前的1/16

C. 地球绕太阳公转周期与缩小前的相同

D. 地球绕太阳公转周期变为缩小前的一半

11. 2007年4月24日，欧洲科学家宣布在太阳系之外发现了一颗可能适合人类居住的类地行星Gliese581c。这颗围绕红矮星Gliese581运行的星球有类似地球的温度，表面可能有液态水存在，距离地球约为20光年，直径约为地球的1.5倍，质量约为地球的5倍，绕红矮星Gliese581运行的周期约为13天。假设有一艘宇宙飞船飞临该星球表面附近轨道，下列说法正确的是（　　）

A. 飞船在Gliese581c表面附近运行的周期约为13天

B. 飞船在Gliese581c表面附近运行时的速度大于7.9 km/s

C. 人在Gliese581c上所受重力比在地球上所受重力大

D. Gliese581c的平均密度比地球平均密度小

12. 土卫十和土卫十一是土星的两颗卫星，都沿近似为圆周的轨道绕土星运动。其参数如下表所示，则两卫星相比，土卫十（　　）

	卫星半径/m	卫星质量/kg	轨道半径/m
土卫十	8.90×10^{4}	2.01×10^{18}	1.51×10^{8}
土卫十一	5.70×10^{4}	5.60×10^{17}	1.51×10^{8}

A. 受土星的万有引力较大

B. 卫星表面附近的重力加速度较大

C. 绕土星做圆周运动的向心加速度较大

D. 动能较大

13. 宇宙中存在一些离其他恒星较远的、由质量相等的三颗星组成的三星系统，通常可忽略其他星体对它们的引力作用。已观测到稳定的三星系统存在两种基本的构成形式：一种是三颗星位于同一直线上，两颗星围绕中央星在同一半径为R的圆轨道上运行；另一种形式是三颗星位于等边三角形的三个项点上，并沿外接于等边三角形的圆形轨道运行。设每个星体的质量均为m。

(1) 试求第一种形式下，星体运动的线速度和周期；

(2) 假设两种形式星体的运动周期相同，第二种形式下星体之间的距离应为多少？

14. 天文学家将相距较近、仅在彼此的引力作用下运行的两颗恒星称为双星。双星系统在银河系中很普遍。利用双星系统中两颗恒星的运动特征可推算出它们的总质量。已知某双星系统中两颗恒星围绕它们连线上的某一固定点分别做匀速圆周运动，周期均为 T，两颗恒星之间的距离为 r，试推算这个双星系统的总质量。(引力常量为 G)

15. 神奇的黑洞是近代引力理论所预言的一种特殊天体，探寻黑洞的方案之一是观测双星系统的运动规律。天文学家观测河外星系大麦哲伦云时，发现了 LMCX-3 双星系统，它由可见星 A 和不可见的暗星 B 构成。两星视为质点，不考虑其他天体的影响，A、B 围绕两者连线上的 O 点做匀速圆周运动，它们之间的距离保持不变，如图 6-12 所示。引力常量为 G，由观测能够得到可见星 A 的速率 v 和运行周期 T。

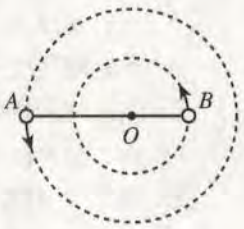


图 6-12

(1) 可见星 A 所受暗星 B 的引力 F_A 可等效为位于 O 点处质量为 m' 的星体（视为质点）对它的引力，设 A 和 B 的质量分别为 m_1、m_2，试求 m'（用 m_1、m_2 表示）；

(2) 求暗星 B 的质量 m_2 与可见星 A 的速率 v、运行周期 T 和质量 m_1 之间的关系式；

(3) 恒星演化到末期，如果其质量大于太阳质量 m_S 的 2 倍，它将有可能成为黑洞。若可见星 A 的速率 $v=2.7\times10^5$ m/s，运行周期 $T=4.7\pi\times10^4$ s，质量 $m_1=6\ m_S$，试通过估算来判断暗星 B 有可能是黑洞吗？($G=6.67\times10^{-11}$ N·m^2/kg^2，$m_S=2.0\times10^{30}$ kg)

B 组

1. 天文学家发现了某恒星有一颗行星在圆形轨道上绕其运动，并测出了行星的轨道半径和运行周期。由此可推算出（　　）

A. 行星的质量　　B. 行星的半径　　C. 恒星的质量　　D. 恒星的半径

2. 发射人造卫星是将卫星以一定的速度送入预定轨道，发射场一般选择在尽可能靠近赤道的地方，这样选址的优点是，在赤道附近（　　）

A. 地球的引力较大　　B. 地球自转线速度较大

C. 重力加速度较大　　D. 地球自转角速度较大

3. 一飞船在某行星表面附近沿圆轨道绕该行星飞行。认为行星是密度均匀的球体，要确定该行星的密度，只需要测量（　　）

A. 飞船的轨道半径　　B. 飞船的运行速度

C. 飞船的运行周期　　D. 行星的质量

4. “嫦娥一号”月球探测器在环绕月球运行过程中，设探测器运行的轨道半径为 r，运行速率为 v，当探测器在飞越月球上一些环形山中的质量密集区上空时（　　）

A. r、v 都将略为减小　　B. r、v 都将保持不变

C. r 将略为减小，v 将略为增大　　D. r 将略为增大，v 将略为减小

5. 设“嫦娥一号”卫星的轨道是圆形的，且贴近月球表面。已知月球的质量约为地球质量的 1/81，月球的半径约为地球半径的 1/4，地球上的第一宇宙速度约为 7.9 km/s，则该探月卫星绕月运行的速率约为（　　）

A. 0.4 km/s　　B. 1.8 km/s　　C. 11 km/s　　D. 36 km/s

6. 据报道，最近在太阳系外发现了首颗“宜居”行星，其质量约为地球质量的 6.4 倍，一个在地球表面重量为 600 N 的人在这个行星表面的重量将变为 960 N，由此可推知该行星的

半径与地球半径之比约为（　　）

A. 0.5　　B. 2　　C. 3.2　　D. 4

7. 若某黑洞的半径 R 约 45 km，质量 m 和半径 R 的关系满足 $\frac{m}{R}=\frac{c^2}{2G}$（其中 c 为光速，G 为引力常量），则该黑洞表面重力加速度的数量级为（　　）

A. 10^8 m/s^2　　B. 10^{10} m/s^2　　C. 10^{12} m/s^2　　D. 10^{14} m/s^2

8. 在讨论地球潮汐成因时，地球绕太阳运行轨道与月球绕地球运行轨道可视为圆轨道。已知太阳质量约为月球质量的 2.7×10^7 倍，地球绕太阳运行的轨道半径约为月球绕地球运行的轨道半径的 400 倍。关于太阳和月球对地球上相同质量海水的引力，以下说法正确的是（　　）

A. 太阳引力远大于月球引力

B. 太阳引力与月球引力相差不大

C. 月球对不同区域海水的吸引力大小相等

D. 月球对不同区域海水的吸引力大小有差异

9. 科学研究表明地球的自转在变慢。四亿年前，地球每年是 400 天，那时，地球每自转一周的时间为 21.5 h。据科学家们分析，地球自转变慢的原因主要有两个：一个是潮汐时海水与海岸碰撞、与海底摩擦而使能量变成内能；另一个是由于潮汐的作用，地球把部分自转能量传给了月球，使月球的机械能增加了（不考虑对月球自转的影响）。由此可以判断，与四亿年前相比，月球绕地球公转的（　　）

A. 半径增大　　B. 线速度增大　　C. 周期增大　　D. 角速度增大

10. 已知引力常量，下列说法正确的是（　　）

A. 根据地球半径和地球自转周期，可估算出地球质量

B. 根据地球半径和地球表面的重力加速度，可估算出地球质量

C. 根据太阳半径和地球绕太阳公转的周期，可估算出太阳质量

D. 根据地球与太阳之间的距离和地球绕太阳公转的周期，可估算出太阳质量

11. 同步卫星离地心距离为 r，运行速率为 v_1，加速度为 a_1，地球赤道上的物体随地球自转的向心加速度为 a_2，第一宇宙速度为 v_2，地球半径为 R，下列关系中正确的有（　　）

A. $a_1/a_2=r/R$　　B. $a_1/a_2=R^2/r^2$

C. $v_1/v_2=R^2/r^2$　　D. $v_1/v_2=(R/r)^{\frac{1}{2}}$

12. 发射地球同步卫星时，先将卫星发射至近地圆轨道上，然后经点火，使其沿椭圆轨道 2 运行，最后再次点火，将卫星送入同步轨道 3。轨道 1、2 相切于 Q 点，轨道 2、3 相切于 P 点（如图 6-13），则当卫星分别在 1、2、3 轨道上正常运行时，以下说法正确的是（　　）

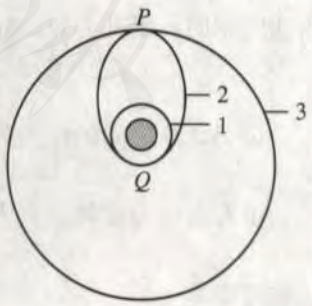


图 6-13

A. 卫星在轨道 3 上的速率大于在轨道 1 上的速率

B. 卫星在轨道 3 上的角速度小于在轨道 1 上的角速度

C. 卫星在轨道 1 上经过 Q 点时的加速度大于它在轨道 2 上经过 Q 点时的加速度

D. 卫星在轨道 2 上经过 P 点的加速度等于它在轨道 3 上经过 P 点时的加速度

13. 宇航员在地球表面以一定的初速度竖直上抛一个小球，经过时间 t 小球落回原处；若

他在某星球表面以相同的初速度竖直上抛同一小球，需经过时间 $5t$ 小球落回原处。(取地球表面重力加速度 $g=10\ \mathrm{m/s^2}$，空气阻力不计。)

(1) 求该星球表面附近的重力加速度 g'；

(2) 已知该星球的半径与地球半径之比为 $R_{星}:R_{地}=1:4$，求该星球的质量与地球质量之比 $m_{星}:m_{地}$。

14. 土星周围有许多大小不等的岩石颗粒，其绕土星的运动可视为圆周运动。其中有两个岩石颗粒 A 和 B 与土星中心距离分别为 $r_A=8.0\times10^4\ \mathrm{km}$ 和 $r_B=1.2\times10^5\ \mathrm{km}$。忽略所有岩石颗粒间的相互作用。(结果可用根式表示)

(1) 求岩石颗粒 A 和 B 的线速度之比；

(2) 求岩石颗粒 A 和 B 的周期之比；

(3) 土星探测器上有一物体，在地球上重为 10 N，推算出它在距土星中心 $3.2\times10^5\ \mathrm{km}$ 处受到土星的引力为 0.38 N。已知地球半径为 $6.4\times10^3\ \mathrm{km}$，请估算土星质量是地球质量的多少倍。

15. 我国发射的“嫦娥一号”探月卫星沿近似于圆形的轨道绕月飞行。为了获得月球表面全貌的信息，让卫星轨道平面缓慢变化。卫星将获得的信息持续用微波信号发回地球。设地球和月球的质量分别为 M 和 m，地球和月球的半径分别为 R 和 R_1，月球绕地球的轨道半径和卫星绕月球的轨道半径分别为 r 和 r_1，月球绕地球转动的周期为 T。假定在卫星绕月运行的一个周期内卫星轨道平面与地月连心线共面，求在该周期内卫星发射的微波信号因月球遮挡而不能到达地球的时间(用 M、m、R、R_1、r、r_1 和 T 表示，忽略月球绕地球转动对遮挡时间的影响)。

参考答案

A 组

1. B　2. D　3. D　4. B　5. B　6. B　7. B　8. BC　9. BC　10. BC　11. BC

12. ABD　13. (1) $v=\sqrt{\dfrac{5Gm}{4R}}$，$T=\dfrac{2\pi R}{v}=4\pi R\sqrt{\dfrac{R}{5Gm}}$　(2) 第二种形式下星体之间的距离应为 $l=\dfrac{2R}{\sqrt[3]{5}}$　14. $\dfrac{4\pi^2}{T^2G}r^3$

15. 解：(1) 设 A、B 的圆轨道半径分别为 r_1、r_2，由题意知，A、B 做匀速圆周运动的角速度相同，设其为 ω。由牛顿运动定律，有

$$F_A=m_1\omega^2r_1\qquad F_B=m_2\omega^2r_2\qquad F_A=F_B$$

设 A、B 之间的距离为 r，又 $r=r_1+r_2$，由上述各式得 $r=\dfrac{m_1+m_2}{m_2}r_1$。　①

由万有引力定律，有 $F_A=G\dfrac{m_1m_2}{r_2}$。将①代入得 $F_A=G\dfrac{m_1{m_2}^3}{(m_1+m_2)^2{r_1}^2}$。令 $F_A=G\dfrac{m_1m'}{{r_1}^2}$，比较可得

$$m'=\frac{{m_2}^3}{(m_1+m_2)^2}\qquad②$$

(2) 由牛顿第二定律，有

$$G\frac{m_1m'}{{r_1}^2}=m_1\frac{v^2}{r_1}\qquad③$$

又可见星 A 的轨道半径

$$r_1=\frac{vT}{2\pi}\qquad④$$

由②③④式解得 $$\frac{{m_2}^3}{(m_1+m_2)^2}=\frac{v^3T}{2\pi G} \quad ⑤$$

(3) 将 $m_1=6m_S$ 代入⑤式，得 $\frac{{m_2}^3}{(6m_S+m_2)^2}=\frac{v^3T}{2\pi G}$，代入数据得

$$\frac{{m_2}^3}{(6m_S+m_2)^2}=3.5m_S \quad ⑥$$

$m_2=nm_s$（$n>0$），将其代入⑥式得

$$\frac{{m_2}^3}{(6m_S+m_2)^2}=\frac{n}{\left(\frac{6}{n}+1\right)^2}m_S=3.5m_S \quad ⑦$$

可见，$\frac{{m_2}^3}{(6m_S+m_2)^2}$的值随 n 的增大而增大，试令 $n=2$，得

$$\frac{n}{\left(\frac{6}{n}+1\right)^2}m_S=0.125m_S<3.5m_S \quad ⑧$$

若使⑦式成立，则 n 必大于 2，即暗星 B 的质量 m_2 必大于 $2m_S$，由此得出结论：暗星 B 有可能是黑洞。

B 组

1. C　2. B　3. C　4. C　5. B　6. B　7. C　8. AD　9. AC　10. BD　11. AD　12. BD

13. (1) 2 m/s²　(2) 1∶80　14. (1) $\sqrt{6}$∶2　(2) $2\sqrt{6}$∶9　(3) 95 倍

15. 解：如图 6-14，O 和 O' 分别表示地球和月球的中心。在卫星轨道平面上，A 是地月连心线 OO' 与地月球面的公切线 ACD 的交点，D、C 和 B 分别是该公切线与地球表面、月球表面和卫星圆轨道的交点。根据对称性，过 A 点在另一侧作地月球面的公切线，交卫星轨道于 E 点。卫星在弧 BE 运动时发出的信号被遮挡。

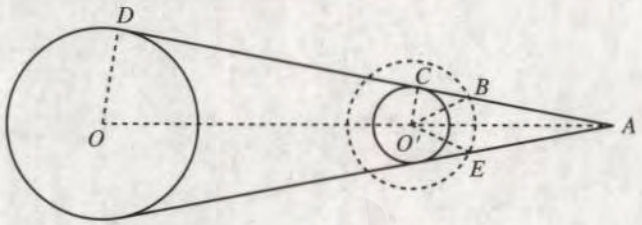


图 6-14

设探月卫星的质量为 m_0，引力常量为 G，根据万有引力定律有

$$G\frac{Mm}{r^2}=m\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2r \quad ①$$

$$G\frac{mm_0}{r_1^2}=m_0\left(\frac{2\pi}{T_1}\right)^2r_1 \quad ②$$

式中，T_1 是探月卫星绕月球转动的周期。由①②式得

$$\left(\frac{T_1}{T}\right)^2=\frac{M}{m}\left(\frac{r_1}{r}\right)^3 \quad ③$$

设卫星的微波信号被遮挡的时间为 t，则由于卫星绕月做匀速圆周运动，应有

$$\frac{t}{T_1}=\frac{\alpha-\beta}{\pi} \quad ④$$

式中，$\alpha=\angle CO'A$，$\beta=\angle CO'B$。由几何关系得

$$r\cos\alpha = R - R_1 \qquad ⑤$$

$$r_1\cos\beta = R_1 \qquad ⑥$$

由③④⑤⑥式得

$$t = \frac{T}{\pi}\sqrt{\frac{Mr_1^3}{mr^3}}\left(\arccos\frac{R-R_1}{r} - \arccos\frac{R_1}{r_1}\right) \qquad ⑦$$

第七章
机械能守恒定律

课程标准的要求

1. 举例说明功是能量变化的量度，理解功和功率。关心生活和生产中常见机械功率的大小及其意义。

2. 通过实验，探究恒力做功与物体动能变化的关系。理解动能和动能定理。用动能定理解释生活和生产中的现象。

3. 理解重力势能。知道重力势能的变化与重力做功的关系。

4. 通过实验，验证机械能守恒定律。理解机械能守恒定律。用机械能守恒定律分析生活和生产中的有关问题。

5. 了解自然界中存在多种形式的能量。知道能量守恒是最基本、最普遍的自然规律之一。

6. 通过能量守恒以及能量转化和转移的方向性，认识提高效率的重要性。了解能源与人类生存和社会发展的关系，知道可持续发展的重大意义。

一、本章教材概述

本章通过对功能关系的讨论，完成对能量概念的更深入的认识。本章是高中阶段物理学习的基础内容之一，它既是力学问题的基础和综合，也是学习其他物理学知识的重要基础。

本章共有 10 节，在结构上的设计如下。

第 1 节“追寻守恒量——能量”以引入能量概念为目的；第 2 节“功”和第 3 节“功率”是为功能关系的讨论打基础；从第 4 节到第 7 节的“重力势能”“探究弹性势能的表达式”“实验：探究功与速度变化的关系”“动能和动能定理”是关于功和能关系的具体讨论；第 8 节“机械能守恒定律”和第 9 节“实验：验证机械能守恒定律”是前面各节内容的综合，同时又成为下一节的基础；第 10 节“能量守恒定律与能源”是在机械能这一特例性守恒量讨论的基础上，阐述能量守恒定律建立的历史过程。

在编写本章时有以下一些思考：

1. 能量概念的引入

能量的概念十分抽象，而功的概念比较具体，也容易量度，在物理学中人们总是通过做功了解能量的变化，从而认识能量。新教科书反复突出了这个思想。但是，在以往的教科书中，一般是先定义功的概念及其表达式，然后说“一个物体能对外做功，就说它具有能”。接着举例说明，做功伴随着能量的变化，进而得出“功是能量变化的量度”。这样处理，很容易使人感到，定义“功”是为了定义“能”，先有功的概念，才会有能的概念。但是，在物理学中能量并不是由功定义的。

能量概念是在人类追寻“守恒量是什么”的过程中发展起来的。能量概念之所以重要，就是因为它是一个“守恒量”。而守恒关系一直是自然界中客观存在着的一种十分重要的关系。近代物理学的发展更是伴随着对守恒量的追求。本教科书力求渗透这种思想，希望加强学生对守恒关系的认识。

基于这种思考，本教科书将“追寻守恒量”放到了具体的概念如重力势能、弹性势能、动能之前，即从追寻守恒量出发，引出能量概念。同时，把守恒思想的渗透贯穿于能量学习的全过程。

2. 功能关系的讨论

功的概念起源于早期工业革命的需要。当时人们需要寻找一种能够比较蒸汽机效益的办法。在实际中，人们逐渐认同用机器举起物体的重量与高度之积来量度它，并把它称为“功”。19 世纪初，法国科学家科里奥利明确地把作用力和受力点沿力的方向的位移的乘积叫做“运动的功”。当功和能量这两个概念在具体的物理过程中“汇合”时，人们才进一步认识到，功的重要意义在于它可以决定能量的变化。因而，它为研究能量的转化过程奠定了定量分析的基础。这就是今天的物理学总把“功”和“能”捆绑在一起的原因。本教科书对力学中功能关系的讨论给予了极大的重视。

（1）重力势能的表达式

本章是从重力做功和重力势能的变化过程开始讨论功和能的关系的。

在发现规律、提出物理量的表达式的过程中，我们不仅告诉学生结论，而且告诉学生结论是怎样得出来的，这就是重视科学过程的做法。这既是一种教学思路，也是一种科学思维之路，因而对培养学生的逻辑思维能力和研究方法是有益的。

本教科书在重力做功与重力势能关系的讨论中还认真分析了 W_G 与路径无关的问题。如果物体从 A 至 B，不同路径下 W_G 不同，E_p 还有意义吗？提出这个问题的目的是希望有助于学生形成严肃认真的科学态度。物理教学应培养“追根问底”的思维习惯，“自圆其说”应是最起码的逻辑思维要求。

（2）探究弹性势能的表达式

关于弹性势能的表达式，在课程标准中没有明确提出要求，本教科书中设置这个内容的原因是，希望学生通过自主的探索行为，经历变未知为已知的过程。科学探究是否会有实验，不是其本质特征。本书设计的弹性势能表达式的探究活动，不含实验。设置这个内容意在以下两点：

第一，知道重力势能的表达式是通过重力做功的分析得出的，那么，弹性势能的表达式能否通过弹力做功的分析而得出。

第二，从前面利用极限思想的思路中受到启发，能否自主解决变力做功的问题。

这里讨论的仍然是功和能的关系问题，所需的知识、方法（含科学思想）以及对科学探究的认识，都是高中物理的基本内容；而本探究的结论，即 $E_p=\frac{1}{2}kx^2$ 并不重要。所以，这个表达式在课文中没有出现，课后也没有用它来解的题目。

（3）探究动能的表达式

探究功与速度变化的关系，是企图通过实验，利用已经从个案中有所领悟的功能关系，探究另一种能量——动能的表达式。因为动能与速度相关是动能的基本特征之一，而这一点已在第 1 节中就明确了。但是，这一实验探究最多只能得到 E_k 与物体的 v^2 成正比，并不能得出

E_k 的表达式。因此，功与速度变化关系的测量只是达到目的的一个桥梁，实验并不可能解决一切问题。这样有必要将实验思路转换成理论性研究，即质量为 m 的物体，在恒力 F 的作用下发生了一段位移 l，并且速度由 v_1 变为 v_2，试研究在这一过程中，力对物体做的功与物体速度变化的关系。

从研究结果 $W=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2$ 中可以看出：

第一，式中的 $\frac{1}{2}mv^2$ 与 v 相关，因而与动能 E_k 相关，且与 v^2 成正比也与上面的探究相一致。

第二，$\frac{1}{2}mv^2$ 的始末两态之差与力做的功 W 相等，因而与前面重力势能表达式的研究相一致，即功是动能变化的量度。至此，我们可以定义 $E_k=\frac{1}{2}mv^2$，并且得到 $W=E_{k2}-E_{k1}$。

新课程重视科学过程，这有两重意义。一是要适当展示前辈科学家建立科学概念、发现科学规律的过程；二是要在学生自己的学习中有根据、合乎逻辑地进行学习，了解知识是怎样得来的。

3. 机械能守恒定律

本章的第 1 节就是“追寻守恒量”，在学习势能、动能之前就通过伽利略的工作介绍了“守恒”的思想，能量守恒是物理学家追求的目标。本教科书在得到机械能守恒关系时，没有涉及 E_p 和 E_k 的具体表达式，因而更具普遍意义。

“验证机械能守恒定律”的实验，采用了不给具体步骤给思路、进行难点提示的写法。这样做的目的是，即使是验证性的实验，也应该体现科学探究的思想，保护学生的主体地位。

在前面的实验中，测速度时都是用两点间的平均速度代表其中某点的瞬时速度，在第九节证明了“做匀变速直线运动的纸带上某点的瞬时速度，等于与它相邻的两点间的平均速度”。前面没有使用这种方法，目的是使学生更多地通过实验认识瞬时速度，同时也是为了避免盲目追求精确度的倾向。在过去的教学中，这个结论是以一个习题的形式出现的，这里做了正式的证明。这也是为了给学生加深这样的印象：无论做什么事情，采用一种新的方法，必须有可靠的根据，不能草率从事。

4. 能量守恒定律与能源

本章第 10 节简述了发现能量守恒定律的历史，基本思想是：能量守恒定律的发现不是偶然的，它是人类对自然认识发展到一定阶段的产物。除了物理学外，其他学科对能量守恒定律的发现也有重要贡献。

本节还谈到了能量转化和能量转移的方向性。过去的中学物理课程不涉及这个问题，新课程更多地与社会实际相联系，因此对能源问题作了初步的讨论。而研究能源，从物理学的角度看自然要谈宏观过程的方向性。在必修模块中这只是简单地提一提，如果学生继续学习物理，在选修 1-2 和选修 3-3 中还有深入一些的讨论。

课时安排建议

第 1 节　追寻守恒量——能量	1 课时
第 2 节　功	1 课时
第 3 节　功率	1 课时
第 4 节　重力势能	1 课时

第 5 节	探究弹性势能的表达式	1 课时
第 6 节	实验：探究功与速度变化的关系	2 课时
第 7 节	动能和动能定理	1 课时
第 8 节	机械能守恒定律	1 课时
第 9 节	实验：验证机械能守恒定律	2 课时
第 10 节	能量守恒定律与能源	1 课时

二、教材分析与教学建议

第 1 节　追寻守恒量——能量

1. 教学目标

(1) 初步领会能量转化、变中有恒的思想。

(2) 了解势能、动能的概念。

(3) 领会寻找守恒量是科学研究的重要思想方法。

(4) 会分析生活中有关机械能转化的问题。

2. 教材分析与教学建议

“追寻守恒量”主要是观念性教育的内容，目的是对学生进行方法和观念的教育，使学生了解守恒思想的重要性。它从一个较高的角度入手，给学生一种观点，并希望学生在今后的学习中用这种观点去认识问题。

能量守恒定律是自然界普遍遵循的重要基本规律，“能量”是牛顿没有留给我们的少数力学概念之一，究其原因是能量及其守恒的思想与牛顿的力学研究思路有所不同，能量及其守恒的思想从更抽象层次上反映了物质运动和相互作用的本质。

“人的认识发展往往与科学发展的历程有着惊人的相似”。“力和运动”及“能量转化和守恒”观点虽然是高中学生应该掌握的两种基本和重要的观点，但“力和运动”观点对于学生来说比较直观和具体，“能量转化和守恒”观点则更加抽象。学生通过前面几章的学习后往往会产生这样的想法，物体的运动用“力和运动”的观点和规律都可以得到解释和解决，为什么还要引入能量概念，从能量角度进行研究呢？

为了激发学生对本章知识的学习的兴趣，使学生领会引入能量概念的目的和意义，教科书首先引用了诺贝尔物理学奖获得者费恩曼有关能量的一番论述，来说明物理学中能量概念和能量守恒的思想的重要性。

能量的转化与守恒是自然科学的核心规律之一。在物理学的发展过程中，能量概念的形成和发展，始终是和能量守恒定律的探究过程紧密相连的。能量的概念是伴随人类对能量守恒的认识同步发展起来的。能量概念是物理学中一个极为普遍、极为重要的概念，能量这一概念之所以有这样重要的地位，在于它转换与转化时的守恒性。

能量的转化与守恒是普遍适用的规律，其正确性经受了“历史的考验”，物理学发展史上不止一次地发生过这样的情况，在某类新现象里似乎有一部分能量消失了或凭空产生出来，后

来物理学家们总能确认出一种新的能量形式，使能量的守恒定律得以保持。在其基础上建立起来的理论，又进一步推动了物理学的发展。能量守恒规律的发现，使科学家更加坚信了守恒关系是自然界中十分重要的一类关系，寻找守恒量成为科学研究中的重要思想方法。

能量转化与守恒规律虽然是适合各个领域的普遍关系，规律本身与规律的发现过程具有丰富的内涵，但考虑到学生的基础，本节课的教学内容宜限定在学生比较容易理解和接受的机械能范围，对规律本身与规律发现过程丰富的内涵的发掘与阐述也应充分考虑学生能够理解与体会的程度。

通过初中的学习，学生已经知道能量有各种形式，也初步学习了动能、势能和机械能的概念，这为本节相关问题的探究时直接引用动能、势能概念奠定了基础。通过初中的学习，学生了解了各种能量间可以互相转化以及机械能守恒的观点，这可能使学生在进行本节相关问题的探究时，对猜想有了定向。教师在教学中既要利用好这种定向，又要避免由于这一定向可能带来的对思维的束缚。

本节的教学目的，主要是让学生感受和体会对于守恒量的认识和探究过程，应该避免单纯的科学探究史的讲述，宜采用问题、实验和教科书内容的有机结合进行本节内容的教学。

基于以上分析，建议教师在本节教学时，时间和内容上可灵活安排，总体上可围绕以下几个方面展开：

(1) 举例说明生活中的一些守恒关系。

(2) 分析伽利略理想斜面实验，了解动能、势能及其转化。

(3) 寻找守恒量的思想是物理学研究的重要方法，对物理学发展起重要作用。

(4) 用守恒的观点解释有关现象。

教师在教学中可以通过日常生活中的守恒关系，提出寻找守恒量的思想，进而说明寻找守恒量也是物理及其他学科中很重要的思想方法。

教学片段

教师：我们在生活中始终有一种守恒的观点，举个例子，正常的水表连在自来水管道中，总表的读数应该等于各分表读数的总和，这就是守恒关系，若发现读数不相等了，你会怎么想？是否守恒关系不成立了呢？

学生：应该还守恒，可能是水管破裂漏水了。

教师：守恒的思想可以指导我们的生活实践，你还可以举出生活中类似的例子吗？

学生：(举例、分析)

教师：守恒的思想在物理学的发展中也起着很重要的作用，你知道物理学中有关守恒的规律吗？

由此引出机械能守恒的猜想及对伽利略理想斜面的探究。

教科书中的伽利略理想斜面实验，是进行机械能守恒定律探究的典型案例。在对典型案例的分析与讨论时，要充分展开学生的思维过程，应着重讨论“势能”与“动能”的概念和相互之间的转化，势能和动能如何定量地量度，势能和动能的转化是怎样进行的，势能和动能的转化遵循怎样的规律等问题。

学生对于伽利略理想斜面实验的结论虽然能够接受，但总觉得缺少“眼见为实”的感觉，

建议教师可以将“机械能守恒定律”中“演示”栏目中的摆球实验在本节中演示，由于摆球受到的空气阻力可以忽略，对摆球“行为”的观察有利于帮助学生更好地理解伽利略理想斜面实验。

通过对如图 7-1 摆球实验的演示和分析，老师可引导学生对伽利略理想斜面实验和摆球实验进行对比：(1) 两者器材有差异，一个是斜面，一个是摆球；(2) 从运动和力的角度上有差异，一个是匀变速直线运动，另一个是圆周运动；(3) 在做功和能量转化的角度上很相似，轨道的弹力和细绳拉力都不做功，都不参与能量的转化；(4) 小球的表现也十分相似，斜面上的小球好像“记得”自己起始的高度，摆线上的小球也好像“记得”自己起始的高度。

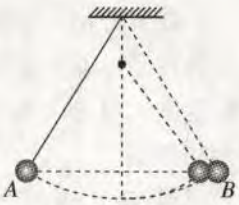


图 7-1

在完成对伽利略理想斜面实验这一典型案例的研究之后，教师还可以通过展示钟摆、过山车、滚摆实验等，既丰富学生的感性认识，又可以让学生得到用守恒的观点分析实例的体验。学生根据生活感受，会提出一些自己的看法，其中就有守恒的观念，从中体会守恒的思想对观察和探究生活现象和物理研究中的指导作用。

3. 问题与练习

内容分析

本节内容主要是让学生在初中学习的基础上，通过实例，理解动能、势能及机械能转化和守恒思想。本节设有一道多答案题，目的是让学生联系生活实际，提出各种相关情景进行分析，以获得较丰富的感性材料，提高对动能、势能的概念及其转化的认识。

解答和说明

做自由落体运动的物体在下落过程中，势能不断减少，动能不断增加，在转化过程中，动能和势能总和不变。

说明：本题也可作为课堂讨论题，由于学生对能的概念的了解较浅，本题只要求机械能中动能和势能的相互转化，不要拓展到讨论机械能以外的能量转化问题。

第 2 节　功

1. 教学目标

(1) 初步认识做功与能量变化的关系。

(2) 理解功的概念，知道做功的两个要素。

(3) 明确功是标量，知道 $W=Fl\cos\alpha$ 的适用范围，会用功的公式进行计算。

(4) 理解正功、负功的概念，会根据公式计算多个力的总功。

(5) 初步理解化变力为恒力、处理变力做功的思想方法。

2. 教材分析与教学建议

(1) 功的概念的建立

“功”是本章知识链中非常重要的一环。课程标准中要求学生“能举例说明功是能量变化的量度”，教科书在处理这一课程目标时，不是简单地提出这一结论，而是让学生在全章的学

习中，经过对功和能量变化关系的多次探究体验，逐步加深理解。就本章的知识结构来说，功是为进一步提出“能”这个更为广泛、更为重要的概念服务的。做功过程反映了能量的变化过程。因此，只有准确认识“功”这节内容在教科书中的地位，才能很好地把握教学要求和深广度。

本节内容是初中学习的继续和提高，沿着初中物理的思路，仍然强调功与能量变化的联系，因此在第一次出现“功”时，教科书就提出“如果物体在力的作用下能量发生了变化，那么这个力一定对物体做了功”。

本节中介绍了做功两个不可缺少的因素和功的计算公式，功的概念和功的计算公式是本节的重点。教科书采用由特殊到一般的探究思路，先分析力与位移同方向，逐步深入到力与位移成一角度时做功的探究，通过力的平行四边形定则推导功的表达式。然后进行辨析讨论，通过对实例的分析应用达到巩固和深化。

基于以上分析，建议教师在教学中可以让学生回忆和复习初中已学过的功的概念，让学生举例说明什么是做功过程，做功的过程需要满足什么条件。例如，学生会提出起重机在吊起货物向上运动时对物体做功了；汽车在平直公路上前进，发动机的牵引力对汽车做功了等等。举例过程中教师应强调做功是指哪个力做功，可利用书中的三个插图进行探讨：在第一个例子中，如果起重机提着货物静止不动，拉力对货物是否做功了？如果提着货物水平运动，拉力是否做功了？第二个例子中，列车的重力是否做功了？地面对列车的支持力是否做功了等等。通过讨论，使学生明确做功的两个不可缺少的因素，即力和物体在力的方向上的位移。归纳得到结论：力和位移在同一方向时功的公式为 $W=Fl$；如果力与位移的夹角是 90°，则该力对物体不做功。

在研究特殊情况的基础上，进入对一般情况的研究。这时教师可提出如果力 F 与位移 l 的夹角不是 0°也不是 90°，而是任意角度时（如图7-2所示），力对物体是否做功？让学生展开讨论，提出解决的思路和方法。教科书中给出的方法是根据力的分解知识，将 F 用垂直位移方向的分力 $F_1=F\sin\alpha$和沿位移方向分力 $F_2=F\cos\alpha$ 来等效替代，由于分力 $F\sin\alpha$ 与位移 l 是垂直的，故不做功，而 $F\cos\alpha$ 与 l 的夹角为 0°，故做功为 $W=Fl\cos\alpha$，进而得出功的公式。对于基础较好的学生，在教学中应活跃和开阔他们的思路，可以介绍另一种方法，因为位移是矢量，也可以分解，即把位移 l 分解成平行于力 F 和垂直于力 F 的两个分位移 $l\cos\alpha$ 和 $l\sin\alpha$，同样可以得出 $W=Fl\cos\alpha$。若学生一开始就提出用分解位移的方法，教师可顺着学生提出的思路进行讨论和分析，得出功的公式，同时介绍教科书中的另一种思路和方法。

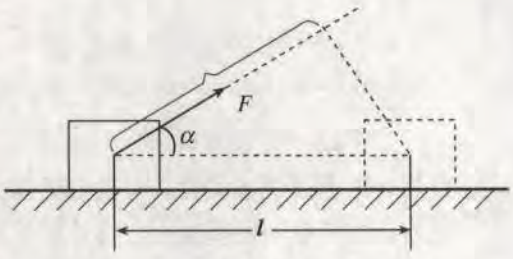


图 7-2

得出公式 $W=Fl\cos\alpha$ 后，仍应引导学生进行讨论，使学生理解什么情况下力 F 做的功最大，什么情况下力 F 不做功，既与前面所说的功的两个不可缺少的因素相呼应，又将特殊情况下的结论纳入一般情况下的结论，使学生构建一个良好的知识结构。

公式的适用条件：公式 $W=Fl\cos\alpha$ 并不是普遍适用的，它只适用于大小和方向均不变的恒力做功。这一点教科书上没有提及，在本节中也可暂不讨论，留待后面的学习中逐步加深。对学有余力的学生，我们可以举一个实例来说明这一点，例如，被压缩的弹簧将物体弹出的过程中，$W=Fl\cos\alpha$ 就不适用了，因为弹力 F 的大小在弹出的过程中大小不断变化，弹力所做

的功，就是变力做功。如何研究变力做功？可作为一个问题提出，既作为激发学生思维的问题，也为后续内容的学习埋下伏笔。

（2）正功和负功

①公式中各字母的正负取值：F 和 l 分别指“力的大小”和“位移的大小”，即公式中 F 和 l 恒取正值。公式应写作 $W=|F|\cdot|l|\cos\alpha$，对于不同的情况，$\cos\alpha$ 可正可负，使得 W 可正可负。对于正功、负功的理解，可从公式和动力学关系两个方面来说明：从公式容易看出，W 的正负取决于 $\cos\alpha$，也就是由角度 α 的大小决定。W 的正负并不表示功有方向。$\alpha<90°$ 时，$\cos\alpha>0$ 意味着力 F 为动力，有促使物体运动的作用。$\alpha>90°$ 时，$\cos\alpha<0$，从力和运动角度看 F 为阻力，有阻碍物体运动的作用，所做的是负功，这时物体要继续产生位移，必须克服力 F 的阻碍，可以说力 F 对物体做负功，也可以表述为物体克服力 F 做功，“力 F 对物体做负功”和“物体克服力 F 做功”两种说法是等效的。

②功是标量，没有方向：因为力和位移都是矢量，学生容易受到干扰而难以理解，因此对于功不是矢量、没有方向的认识是本节的难点。我们可以从以下几个方面帮助学生理解，例如，可通过演示实验，原来静止的物体分别受相反方向的拉力作用，运动一段位移，这两次拉力都做正功；也可通过功和能的联系进一步说明功和能都是标量；还可从矢量与标量的运算方法不同角度帮助学生理解。

在光滑水平面上，物体受两个沿水平方向、互相垂直的大小分别为 3 N 和 4 N 的恒力，从静止开始运动 10 m，求每个力做的功和合力做的总功。

解：合力 $F_{合}=\sqrt{3^2+4^2}$ N=5 N，*合力方向即合位移方向，与 3 N 的力夹角为 53°，与 4 N 的力夹角为 37°，*

所以： $W_1=F_1 l\cos\alpha_1=3\times10\times\cos 53°$ J=18 J

$W_2=F_2 l\cos\alpha_2=4\times10\times\cos 37°$ J=32 J

$W_{合}=F_{合}\, l\cos\alpha=5\times10\times\cos 0°=50$ J$=W_1+W_2\neq\sqrt{W_1^2+W_2^2}$

可见，由上述例子说明，总功的计算是标量运算，不符合平行四边形定则。

在前面分析说明的基础上，可让学生辨析“正功与负功方向相反”是否正确，加深对“正功和负功仅表示不同做功的效果”的理解。

对教科书中提到“几个力对物体做的总功，等于各个力分别对物体所做功的代数和”这一结论的教学，建议教师结合上述问题的求解过程，提出引导性问题：前面物体受到两个力的作用，如何求总功？再通过“做一做”中求合力的功的实例进行探究，让学生自己得到这一结论，以增进学生对功的概念的理解。

本节内容中有一道例题，建议教师在引导学生进行受力分析的基础上，用不同的方法求总功，可通过以下两种思路来求解：

①先求合力再求合力的总功

②先求各力做的功再求总功

（3）对功的公式的理解

①关于 α 角的含义和取值范围：α 角是“力的方向和位移方向的夹角”，而不是题目中的某一个以 α 命名的角。这个问题可以结合教科书中的问题与练习的第 1 题，来提醒学生注意。

②功与物体的运动状态及运动形式无关：力对物体做功，只跟力的大小、位移的大小以及两者的夹角有关，而与物体受力后通过这段位移做什么运动无关。同时应注意 F 与 l 必须具备

同时性，即 l 必须是力 F 作用过程中物体的位移。如果力消失后物体继续运动，力所做的功，就只跟力作用的那段位移有关，跟其余的位移无关。

③关于公式中 l 的确切含义：功的公式中 l 的含义常常有不同的理解，有物体位移与作用点位移之争。本教科书中指出 l 是“物体位移的大小”。因为高中阶段研究的是质点，所以物体的位移与“力作用点”的位移是一致的，所以不必作这方面的深入讨论。值得注意的是相对于不同的参考系，位移 l 是不同的，因此对不同的参考系，同一过程中算出的功也会不同。为了避免这种“不确定性”，一般在中学物理中我们计算功都以地面为参考系。

3. 问题与练习

内容分析

练习题第 1 题通过具体的情景，让学生区别实际问题中标注的某个角与力与位移的夹角的不同，明确公式中 α 角的含义，知道 α 角大小与正功、负功的关系，第 2 题要求明确拉力的功、重力的功、克服重力做功和合力做功的含义，第 3、4 题让学生结合受力分析，知道做功的两个要素，运用分析不同的模型，对功的计算进行应用巩固，同时通过求合力的功，为动能定理奠定基础。

解答和说明

1. 图甲：$W=Fl\cos(180^\circ-150^\circ)=10\times2\times\frac{\sqrt{3}}{2}\ \mathrm{J}=17.32\ \mathrm{J}$

图乙：$W=Fl\cos(180^\circ-30^\circ)=-10\times2\times\frac{\sqrt{3}}{2}\ \mathrm{J}=-17.32\ \mathrm{J}$

图丙：$W=Fl\cos 30^\circ=10\times2\times\frac{\sqrt{3}}{2}\ \mathrm{J}=17.32\ \mathrm{J}$

2. 重物被匀速提升时，合力为 0，钢绳对重物的拉力的大小等于重物所受的重力，即

$$F=G=2\times10^4\ \mathrm{N}$$

钢绳拉力所做的功 $W_1=Fl\cos 0^\circ=2\times10^4\times5\ \mathrm{J}=1\times10^5\ \mathrm{J}$

重力做的功 $W_2=Gl\cos 180^\circ=-2\times10^4\times5\ \mathrm{J}=-1\times10^5\ \mathrm{J}$

3. 如图 7-3 所示，滑雪运动员受到重力、支持力和阻力的作用，运动员的位移 $l=\frac{h}{\sin 30^\circ}=20\ \mathrm{m}$，方向沿斜坡向下。

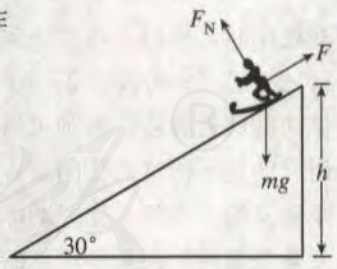


图 7-3

所以，重力做功

$W_G=mgl\cos 60^\circ=60\times10\times20\times\frac{1}{2}\ \mathrm{J}=6.0\times10^3\ \mathrm{J}$

支持力所做的功 $W_N=F_Nl\cos 90^\circ=0$

阻力所做的功 $W_f=Fl\cos 180^\circ=-50\times20\ \mathrm{J}=-1.0\times10^3\ \mathrm{J}$

这些力所做的总功 $W_{总}=W_G+W_N+W_f=5.0\times10^3\ \mathrm{J}$

4. 在这两种情况下，物体所受拉力相同，移动的距离也相同，所以拉力所做的功也相同，为 7.5 J。拉力做的功与是否有其他力作用在物体上没有关系，与物体的运动状态也没有关系。光滑水平面上，各个力对物体做的总功为 7.5 J。粗糙水平面上，各个力对物体做的总功为 6.5 J。

第3节 功率

1. 教学目标

(1) 理解功率的概念，能运用功率的定义式 $P=\frac{W}{t}$ 进行有关的计算。

(2) 理解额定功率和实际功率的概念。

(3) 了解平均功率和瞬时功率的含义。

(4) 根据功率的定义式推导 $P=Fv$，并能用于分析、计算和解释现象。

(5) 能分析汽车发动机功率一定时，牵引力与速度之间的关系。

(6) 通过对各种机械的功率的探究和有关功率的测量，认识功率概念在生活中的应用。

2. 教材分析与教学建议

功率是反映力做功快慢的物理量。功率的概念广泛应用于人们的日常生活和科技之中。学生在初中已经学过功率的概念，引入这一概念并不困难。教科书在本节中首先通过两台起重机做功相同，时间不同，引出功率的概念和定义式，并通过对动力机械的分析，讨论了额定功率和实际功率，最后，根据对物体做功的公式和运动学公式导出功率与速度的关系。

理解功率的概念及其比值定义的方法，理解公式 $P=\frac{W}{t}$ 和 $P=Fv$ 的物理意义，并能用公式进行有关功率问题的分析计算是本节的重点。对于“平均功率”和“瞬时功率”的概念，教科书通过“说一说”和“做一做”栏目，作为扩展性的选学内容，便于教师根据学生的实际情况，灵活掌握教学内容的深广度，因材施教。

(1) 功率概念的建立

教科书为了与前面所学的内容相统一，采用“从开始计时到时刻 t”的处理方法，使时间间隔为 $(t-0)$，得到公式 $P=\frac{W}{t}$。比值法定义物理量是物理概念建立的重要方法。建议教师在教学时，通过一些实际问题让学生讨论，例如甲和乙两台不同的起重机，甲 4 s 内做功 2×10^4 J，乙 2 s 内做功 2×10^4 J，做功相同但做功的快慢程度不同，请学生比较分析两个起重机做功的快慢程度。教师可启发采用类比的方法，与速度、加速度的定义方式相比较，虽然它们研究的是不同性质的问题，但是研究方法是相同的，物理学中有很多物理量都是用比值的方法来定义的。例如：描述物体运动快慢的物理量是位移与发生这段位移所用时间的比，描述速度变化快慢的物理量是速度的变化量与完成这一变化量所用的时间之比，让学生体会到凡描述快慢的物理量，一定跟时间有关。功率是描述力对物体做功快慢的物理量，因此可类推出是“力对物体所做的功与完成这些功所用的时间之比”。

在日常生活中，我们经常说某台机械的功率，或某物体做功的功率，实际上功率是指某一个力对物体做功的功率。例如：汽车的功率就是汽车牵引力的功率，起重机吊起货物的功率就是钢绳拉力的功率。

(2) 额定功率和实际功率

额定功率这一概念日常生活中经常用到，如很多机械的铭牌上都标有额定功率的值，这是指机器正常工作时的最大输出功率。但是机器在实际工作时不一定是在额定功率下工作，实际

功率一般总小于或等于额定功率。如果机器长时间在大于额定功率下工作，机械会被损坏。学生一般对灯泡的电功率比较熟悉，可用于类比分析机械功率，但要注意用电器的电功率与机械功率的不同点：用电器的额定电功率是指用电器正常工作时的功率，而机械功率，如汽车发动机的额定功率指正常工作时的最大功率。

本节在“做一做”栏目中要求学生调查自己周围的各种机械，看看这些机械的功率与它们的体积和耗电量（或耗油量）有没有关系，或者收集各种说明书，了解一些机械的功率，并能了解到功率的大小与它们的效能之间的某种关系。虽然在教学中对这一栏目没有做硬性要求，但这是让学生观察自己身边事物和参加社会实践活动的好机会，所以教师应抓住机会，激发学生的参与兴趣，另外，还可以通过指导研究性课题，如测定人上楼梯、爬竿、跳绳等活动时的平均功率，让学生亲身体验功率概念在实际生活中的应用。

（3）平均功率与瞬时功率

即使是同一个力对物体做功，做功的功率也可能是有变化的，在一段时间内力对物体做功的功率，实际上就是这段时间内力对物体做功的平均功率。得出 $P=Fv$ 后，可指出当 v 为平均速度，P 就为平均功率，学生对这个问题的理解是比较容易的。教科书在“说一说”栏目中，在提出平均功率的概念后进一步提出，如果我们要表示瞬时功率与功和时间的关系，公式 $P=\frac{W}{t}$ 应怎样改写？在“做一做”栏目中对这个问题进行了分析，当 Δt 很短时，$P=\frac{\Delta W}{\Delta t}=\frac{F\Delta l}{\Delta t}$ 就表示瞬时功率，从而得到 $P=Fv$。由于公式推导所涉及的极限思想在讲瞬时速度时已有所渗透，教师可启发学生回忆瞬时速度的定义方法，让学生自行将瞬时速度的定义方法迁移到瞬时功率的定义中来，增进对概念的理解。

（4）汽车发动机的额定功率与汽车的最大速度的关系

汽车发动机的额定功率、牵引力与速度之间关系的动态分析是本节的重点也是难点，在很多教学参考书中，都讨论汽车发动机在额定功率下启动的问题，并且有大量的习题。本教科书回避了这个问题，原因是汽车的这一启动方式不符合实际情况，具体各种发动机采取什么方式启动，对此感兴趣的学生可以当做一个课题进行调查或社会实践，也可参考本章后的教学资源库。对于 $P=Fv$ 的理解，建议教师可通过让学生讨论与交流，正确理解公式中三个物理量之间的关系，并进一步用于分析汽车上坡时为什么要换挡减速行驶。对于本节中的例题，教师还可引导学生进一步探究，如讨论汽车加速与匀速行驶时牵引力有什么不同。两种情景下比较，速度相同时牵引力功率是否相同，匀加速过程中牵引力功率如何变化，等等，在问题情景中培养学生分析问题和解决问题的能力。

为了控制教学的难度，减轻学生的学习负担，建议教师不要进一步讨论力与速度不在一条直线上时的瞬时功率问题。

3. 问题与练习

内容分析

本节要求学生理解功率的概念、能运用功率的定义式 $P=\frac{W}{t}$ 和 $P=Fv$ 进行有关的计算，能用 $P=Fv$ 分析汽车发动机功率 P、牵引力 F 与速度 v 之间的对应关系，并能用于计算和分析实际问题。练习题第 1 题让学生运用公式 $P=Fv$ 进行简单计算。第 2 题运用 $P=\frac{W}{t}$ 和

$W=Pt$进行计算，以巩固对功率有关公式的理解。第3题让学生明确推导公式中物理量间关系的前提，知道物理问题与数学问题的区别，不分条件地乱套公式就会得到自相矛盾的结果。第4题是定性分析生活实例，将 P、F、v 之间的对应关系，应用于分析动态过程，重在使学生养成分析物理过程的习惯。

解答和说明

1. 在货物匀速上升时，电动机对货物的作用力大小为：$F=G=2.7\times10^5$ N

由 $P=Fv$ 可得：$v=\dfrac{P}{F}=\dfrac{10\times10^3}{2.7\times10^5}$ m/s$=3.7\times10^{-2}$ m/s

2. 这台抽水机的输出功率 $P=\dfrac{W}{t}=\dfrac{mgh}{t}=\dfrac{30\times10\times10}{1}$ W$=3\times10^3$ W

它半小时能做功 $W=Pt=3\times10^3\times1800$ J$=5.4\times10^6$ J

3. 此人推导的前提不明确。当 F 增大，根据 $P=Fv$ 推出，P 增大的前提应是 v 不变；从 $v=\dfrac{P}{F}$ 推出，P 增大则 v 增大的前提是 F 不变；从 $F=\dfrac{P}{v}$ 推出，v 增大 F 减小的前提是 P 不变。

说明：对这类物理问题，应注意联系实际，有时机械是以一定功率运行的，这时 P 一定，则 F 与 v 成反比。有时机械是以恒定牵引力工作的，这时 P 与 v 成正比。

4.（1）汽车的加速度减小，速度增大。因为，此时开始发动机在额定功率下运动，即 $P=F_{牵}v$。v 增大则 $F_{牵}$ 减小，而 $a=\dfrac{F_{牵}-F}{m}$，所以加速度减小。

（2）当加速度减小到0时，汽车做匀速直线运动，$F_{牵}=F$，所以 $v=\dfrac{P}{F}$，此为汽车在功率 P 下行驶的最大速度。

说明：教师在本题的基础上可进一步讨论在不同情景下运动情况及各量的动态变化。在分析过程中应注意方法的引导，若汽车做匀加速直线运动，则牵引力 F 一定，实际功率 P 随 v 增大而增大；再进一步分析在功率一定的条件下，根据 $P=Fv$ 讨论牵引力 F 与速度 v 的关系，在速度 v 不断变化时，加速度又是怎么变化的；等等。

第4节　重力势能

1. 教学目标

（1）认识重力做功与路径无关的特点。

（2）理解重力势能的概念，会用重力势能的定义式进行计算。

（3）理解重力做功与重力势能的变化的关系。

（4）知道重力势能具有相对性。

（5）知道重力势能是物体和地球系统所共有的。

2. 教材分析与教学建议

本节首先提出，物体由于被举高而具有重力势能，在被举高过程中重力要做功，重力做功的过程也就是重力势能变化的过程，然后通过分析重力做功与路径无关的特点，推导得出重力势能的表达式。进一步讨论重力势能具有相对性及重力势能是物体与地球系统所共有的。与以

往教科书不同的是，本教科书没有生硬地给出“功是能量变化的量度”，而是在探究重力做功、探究弹簧的拉力做功和探究功与物体速度变化关系的过程中，不断渗透这一思想的。在“追寻守恒量”一节中，给出了势能的涵义，“物体势能是物体凭借其位置而具有的能量”。重力势能的概念及重力做功与重力势能变化的关系是本节的重点。建议教师提供相关情景，如蒸汽锤锤桩、打夯等视频，展示雪崩、陨石坑、大瀑布等景象，并激发学生根据生活中的经验提出更多的相关实例。

(1) 重力势能概念的建立

猜想重力势能应该与哪些物理量有关的教学时，如果仅仅提出目标性问题：重力势能与哪些物理量有关？学生可能只是在看了教科书中的公式后回答：与质量有关，与高度有关等。这样猜想就失去了意义，其效果与直接给出重力势能的定义式相同。建议教师在提出目标性问题之前先提出如下的情景体验性问题：*若天花板上分别挂一钢球和乒乓球，你在下面有什么不同感受？同一钢球从不同高度处落下效果有什么不同？*经过讨论得出判断，地球上物体的重力势能可能跟物体的高度和物体的重力大小有关，然后进一步提出问题，怎样来探究重力势能的表达式？

功和能的变化是有紧密联系的，教师可让学生举例说明做功的过程也就是能量转化的过程，例如通过对物体下落过程的分析，发现物体的高度发生变化时，重力要做功，重力势能随高度的变化而变化，两者有紧密联系，让学生感觉到研究重力势能可以从重力做功的角度入手，通过研究重力做功来探究重力势能的概念。教科书从学生认知的角度，由浅入深逐步深入地设置情景，先研究竖直下落，再研究沿倾斜直线向下运动，最后到沿任意曲面下滑过程，通过计算物体从 A 点到 B 点的不同路径所做的功，得出重力对物体所做的功只跟起点和终点的位置有关，而跟物体运动的路径无关的结论。学生对教科书图 7.4-1 和图 7.4-2 不同路径计算重力的功并不困难，但是要使学生真正认识到重力做功的特点，仍需要学生亲自动手算一算这两种情况下重力对物体做了多少功。对于物体沿任意曲线运动的情况，又一次用到了极限的思想。在有了以前求变速运动的位移的学习经历之后，学生对极限的方法已不再陌生，可以由学生讨论提出解决的方法和思路，最后得出重力做功与路径无关的特点，从而引出重力势能的表达式，然后让学生体会教科书中所写的“看起来，物体所受的重力 mg 与它所处位置的高度的乘积‘mgh’，是一个具有特殊意义的物理量”。它的特殊意义在于它一方面与重力所做的功密切相关，另一方面它随着高度的变化而变化，与前面的猜想吻合，说明它正是我们要寻找的重力势能的表达式。

从概念建立的逻辑上讲，是因为认识了重力做功与路径无关后，才能引入重力势能的概念，对这一点学生会感觉比较困难，在这里要求不宜过高。对学习基础较好的学生，可让他们思考“说一说”栏目中的问题。教学时也可以拿重力做功与摩擦力做功相比较，从而使学生理解，正是因为重力做功与路径无关，才引入了重力势能的概念，而对于摩擦力则不能引入相应的摩擦力势能概念。

(2) 重力势能的变化与重力做功的关系

教科书中给出了图 7.4-4 和图 7.4-5，可以根据这一问题情景，设计具体的问题，让学生算一算，重力做功与重力势能变化的关系。例如：起重机吊起的重物匀速上升、加速上升、减速上升时重力做的功与重力势能的变化的关系；起重机吊起的重物匀速下降、加速下降和减速下降时重力做的功与重力势能变化之间的关系。这样可以使学生体会到，物体向上运动，重力做负功，重力势能增加；重力做了多少功，重力势能就增加多少。物体向下运动，重力做正

功，重力势能减少；重力做了多少功，重力势能就减少多少。通过探究，还应让学生得出以下的结论：重力势能的变化只与重力做功有关，和其他力做功无关，即重力势能的变化只是重力做功引起的。

重力势能是状态量、是标量。由重力势能的定义可知，重力势能与物体与地球的相对位置有关。物体的位置发生变化了，物体的重力势能就变化，所以势能是状态量。它的变化量与重力所做的功相对应，是标量，单位与功的单位相同，都是焦耳。

（3）重力势能具有相对性

重力势能的相对性和对势能为负值的理解是本节的难点。教师在分析重力势能具有相对性时，可用学生感兴趣的问题引导学生思考，例如：

人从五楼窗台上跳下来，为何平安无事？

答案：向里跳到五楼的地板上。

也可以让学生先讨论某首歌曲的歌词：

“山上有棵小树，山下有棵大树，我不知道，不知道哪棵更高……”

来认识高度的相对性。高度的相对性决定了重力势能具有相对性。在计算放在桌子上的物体具有多大的重力势能时，可能有不同的结果。这是因为，选择了不同的水平面做参考平面，在这个参考平面上的物体的重力势能就为0；物体在这个参考平面以上，重力势能就为某一正值；物体在这个参考面以下，重力势能就为某一负值。重力势能的大小与参考平面的位置有关，而这个参考平面可以任意规定，所以重力势能具有相对性。一般以解决问题时简便为原则来选择参考平面。教学中需要向学生说明，重力势能的变化和重力做功与零势能参考平面是无关的。

（4）重力势能属于物体和地球组成的系统

重力是地球与物体相互吸引而引起的，如果没有地球对物体的吸引，就不会有重力做功，也就不存在重力势能，所以重力势能是这个系统的。平常所说的“物体”的重力势能，只是一种简化的说法。

3. 问题与练习

内容分析

本节要求学生通过学习，知道重力做功与路径无关，明确重力做功与重力势能的变化的关系，理解重力势能的概念，知道重力势能具有相对性和系统性，能用重力势能的定义式进行计算。第1题让学生通过计算证明的过程，复习功的概念，同时体会重力做功与路径无关的特点；第2题让学生体会重力势能的变化是与重力做功相联系的，重力势能的变化等于重力做功的负值；第3题让学生通过计算，体会重力势能的相对性，重力势能的大小与零势能面选取有关，而重力做功和重力势能的变化与零势能面选取无关；第4题让学生辨析不同情景下拉力的功，摩擦力的功和重力的功，强调重力势能的变化只与重力做功相对应。

解答和说明

1. 设斜面高度为h，对应于倾角为θ_1、θ_2、θ_3的斜面长分别为l_1、l_2、l_3。由功的公式可知，在倾角为θ_1的斜面，重力与位移的夹角为$\left(\frac{\pi}{2}-\theta_1\right)$，重力所做的功为：$W_G=mgl_1\cos\left(\frac{\pi}{2}-\theta_1\right)=mgl_1\sin\theta_1=mgh$。同理可证，在倾角为$\theta_2$、$\theta_3$的斜面上，重力所做的功都等于$mgh$，与斜面倾角无关。

2.（1）足球由位置1运动到位置2时，重力所做的功为$-mgh$，足球克服重力所做的功

为 mgh，足球的重力势能增加了 mgh。

(2) 足球由位置 2 运动到位置 3 时，重力做的功为 mgh，足球的重力势能减少了 mgh。

(3) 足球由位置 1 运动到位置 3 时，重力做功为 0，重力势能变化为 0。

说明：本题的意图是使学生体会，重力势能的变化是与重力做功相对应的。重力做了多少功，重力势能就变化多少。重力做正功重力势能减少，重力做负功重力势能增加。

3. (1) 如下表。

所选择的参考平面	小球在 A 点的重力势能	小球在 B 点的重力势能	整个下落过程中小球重力做的功	整个下落过程中小球重力势能的变化
桌面	5.88 J	−3.92 J	9.8 J	9.8 J
地面	9.8 J	0 J	9.8 J	9.8 J

(2) 如果下落过程中有空气阻力，表格中的数据不变。

说明：本题的意图是使学生认识，重力势能跟零势能面的选取有关，而重力势能的变化跟重力做的功相对应，与零势能面的选取无关。重力做的功只跟物体位置的变化有关，与是否存在其他力无关。

4. 答：A 正确。例如：物体在向上的拉力作用下，如果做匀加速直线运动，这时拉力的功大于重力势能的增加量。如果物体做匀减速直线运动，这时拉力的功小于重力势能的减少量。

B 错误。物体匀速上升时，拉力与重力大小相等，方向相反，拉力的功一定等于重力势能的增加量。

C 错误。根据 $W_G=E_{p1}-E_{p2}$ 可知，重力做 −1 J 的功，物体势能的增加量为 1 J。

D 错误。重力做功只与起点和终点的位置有关，与路径无关，A、B 两点的位置不变，从 A 点到 B 点的过程中，无论经过什么路径，重力的功都是相同的。

第 5 节　探究弹性势能的表达式

1. 教学目标

(1) 知道探究弹性势能表达式的思路。

(2) 理解弹性势能的概念，会分析决定弹簧弹性势能大小的相关因素。

(3) 体会探究过程中的猜想、分析和转化的方法。

(4) 领悟求弹力做功时通过细分过程化变力为恒力的思想方法。

2. 教材分析与教学建议

本节内容是在学习重力势能后的进一步拓展，让学生在变力作用的情景下进行功和能关系的探究，再一次感受功和能的紧密联系。同时通过对两种势能的认识过程，为后面的动能定理和机械能守恒定律的学习打下基础。探究是通过学生自己的探索活动，变未知为已知的学习过程。探究的目的是开发学生的创造潜能，启发学生的思维，使学生参与问题解决活动中去。探究可以是实验探究，也可以是理论探究，“探究弹性势能的表达式”属于理论探究。

(1) 分析决定弹簧弹性势能大小的相关因素

教师在教学中可通过各种与弹性势能相关的情景，如观察弹簧、钟表或玩具里的发条及拉弓射箭过程和撑杆跳高过程等，提出弹性势能的概念。

让学生用弹簧进行探究，并启发学生根据实验现象和生活中的感受，猜想并分析决定弹簧弹性势能大小的相关因素。在学生猜想和分析的基础上，让学生进一步将弹性势能与重力势能进行类比：重力势能与弹性势能都是物体凭借其位置而具有的能，重力的功跟重力与物体位置的变化有关，弹力的功跟弹力和弹簧的形变量有关，因弹力大小为 $F=kx$，可以联想到弹簧弹性势能大小与劲度系数 k 和弹簧的形变量 x 有关。

(2) 如何研究拉力的功

从弹力做功来探究弹性势能的表达式的方法、探究过程中化变为恒的思想和用图象法进行处理是本节的重点，也是难点。其中关键的问题是如何研究拉力的功。研究重力势能时是从分析重力做功入手，类比重力势能的探究过程，研究弹性势能也可以从分析弹力做功入手。弹簧的弹力与弹簧受到的拉力等大反向，拉力做功等于克服弹簧弹力做的功，也就等于弹簧弹性势能的变化量。在用类比方法研究时要注意区分重力做功和弹力做功的不同特点。重力势能和弹性势能均是以重力和弹力的存在为前提的。在地球附近，重力是恒力，而在拉伸弹簧的过程中，拉力是随弹簧的形变量的变化而变化的，拉力还因弹簧的不同而不同，因此拉力做功不能直接用功的公式 $W=Fl\cos\alpha$。那么，如何求出拉力的功呢？引导学生回忆研究匀变速直线运动位移时采用的方法，通过类比，让学生自己提出解决方法——可以将弹簧的形变过程分成很多小段，每一小段中近似认为拉力是不变的，所以，每一小段的功分别为：

$W_1=F_1\Delta l_1$，$W_2=F_2\Delta l_2$，$W_3=F_3\Delta l_3$，…

$W_{总}=W_1+W_2+W_3+\cdots=F_1\Delta l_1+F_2\Delta l_2+F_3\Delta l_3+\cdots$

(3) 如何处理弹性势能的表达式

与匀变速直线运动中利用 v-t 图象求位移 x 相似，我们可以画出 F-l 的图象（图 7-4），每段拉力的功就是图中细窄的矩形面积，对这些矩形面积求和，就得到了由 F 和 l 围成的三角形的面积。考虑到课程标准对弹性势能的表达式没有任何要求，对弹性势能表达式的处理就显得比较灵活。对于基础一般的同学，教师只须说明“由 F 和 l 围成的三角形的面积”表示弹性势能的值；对于基础较好的学生，教师可以引导学生运用三角形面积公式得到弹性势能的表达式 $E_p=\frac{1}{2}kx^2$。应该指出的是，得出 $E_p=\frac{1}{2}kx^2$ 的目的仅仅是为了满足学生的好奇心，使学生的探究活动有“成果”。教师不应要求学生利用这个表达式去解题。

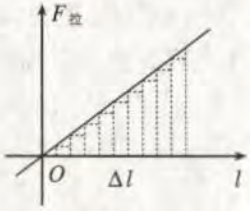


图 7-4

第 6 节　实验：探究功与速度变化的关系

1. 教学目标

(1) 领会探究功与物体速度变化的关系实验的设计思路，经历探究学习的情感体验过程。

(2) 知道用一根橡皮筋所做的功为“单位的功”。

(3) 理解小车做匀速运动阶段测量速度比较合理。

(4) 能进行实验操作，会采集实验数据。

(5) 理解实验数据处理时寻找 W 与 v 的关系的方法。

2. 教材分析与教学建议

通过前几节内容的教学，学生已经建立了重力势能、弹性势能的概念，知道了重力做功、弹力做功与重力势能、弹性势能之间的关系。从内容的逻辑性上来讲，接下来应该是进一步研究和讨论力对物体所做的功与物体的动能间的关系。教科书设置“探究功与物体速度变化的关系”这一实验，这一设计思路存在一个让学生困惑的问题：前面研究做功过程，都是研究做功与能量变化的关系，如重力做功与重力势能的关系，弹力做功与弹性势能的关系，这里为什么研究做功与速度变化的关系了呢？如果学生对这一问题不敏感，教师仍可按照教科书的编写顺序进行教学。

另一种教学的安排是将这节内容与下一节内容合并，首先让学生进行理论探究：设置比较简单的问题情景，如物体所受的力是恒力，物体做直线运动，让学生从已有的运动学公式与牛顿第二定律出发用逻辑推理的方法进行研究，在公式推导的基础上定义动能概念，讨论动能定理，相当于把后面的教学内容提前（具体见下一节的教材分析与教学建议）。在完成上述内容的教学后提出问题：“力对物体所做的功与物体的动能之间的这一关系是否是普遍适用的呢？”“变力对物体所做的功与物体的动能之间是否也存在同样的关系呢？”并让学生进行实验的设计。

由于本内容的教学引入存在上述两种教学顺序，所以实验目的既可以是“探究功与物体速度变化的关系”，也可以是“探究功与物体动能变化的关系”。

在参考案例二中，采用容易获取的橡皮筋作为器材之一，由于橡皮筋的弹力随其改变量的关系是非线性的变力，因而橡皮筋对小车的功无法用现成的公式进行计算。本实验的精妙之处就在于巧妙地回避了功的计算。因为如果一条橡皮筋对小车做功为 W 时，则两条橡皮筋对小车做的功就是 $2W$，三条橡皮筋对小车做功为 $3W$，依此类推，各次实验中橡皮筋对小车的功都可以用 W 的倍数来表达，这种处理方法，把不便于用公式进行计算的橡皮筋对小车的弹力的功转化为用橡皮筋的条数替代，这是一种很好的思维方法，也符合中学生的认知特点，教学中要引导学生深刻体会其妙处。

本节教科书为下一节“动能和动能定理”的理论推导奠定了一个认识基础，通过本节内容的教学，也可以促使学生在学习动能定理后能比较深刻地认识到动能定理不仅在恒力做功的条件下成立，在变力做功的情况下也是成立的。

引入“探究功与物体速度变化的关系”的目的在于给学生增加探究与体验的机会，提高理论联系实际的水平。建议教师要积极创造条件，让学生亲身经历实验探究的过程。教师要引导学生围绕探究的内容，分析探究过程中所要测定的物理量，抓住实验方案的设计与选择、实验条件的控制和实验数据的采集与分析这几个关键环节，进行逐层递进的问题设计。如：物体的动能与哪些因素有关？引起动能变化的原因是什么？力对物体做的功与物体的动能间有什么关系？物体的动能又与什么有关？在实验时需要测量哪些物理量？变力做功如何测量？物体的速度如何测量？实验操作中要控制哪些条件，如何控制等。

基于以上分析，提出以下教学设计思路。

教学片段

(1) 通过播放自然界中能引起强烈震撼的体现动能能量的多媒体视频音像资料（如龙卷风、雪崩、热带风暴、奥运会射箭比赛情景等），激发学生探究的欲望和热情。

(2) 合理运用提问、讨论的方式帮助学生领会实验的思路

问题 1：物体的动能跟哪些因素有关呢？力对物体做的功与物体的动能间又有什么关系呢？

说明：物体的动能与它的速度是密切相关的，而物体速度的变化又与它所受力的功有关。所以，这一节中，我们首先通过实验探究力对物体做功与物体速度变化间的关系。

问题 2：在实验探究中，应如何对物体做功？又怎样表示每次做功的大小呢？

讨论总结：（教师引导学生讨论后总结）既可以考虑用恒力做功，也可以用变力做功。若用恒力做功，例如用一砝码盘牵引着小车做实验，则可以用改变砝码盘的质量，用 $W=Fl$ 表示功的大小。若用变力做功（类比射箭比赛的情景），可以考虑书上所用的每次增加一根橡皮筋的方法来表示功的大小。

问题 3：应该如何来测量物体的速度呢？

讨论总结：（教师引导学生讨论后总结）学生很容易想到用打点计时器，也可以考虑用气垫导轨配套的光电门测量速度，或红外线传感器直接测量物体的速度。

问题 4：选用什么方法来测量物体的速度比较好呢？

讨论：（教师引导学生通过讨论选定采用的方案）采用的实验方法各有什么优缺点？根据现有的实验条件，选择什么方案为好？

说明：在用各种不同的方法测量小车的速度时，教师应引导学生通过各种途径了解实验的原理。学生实验不仅仅是动手实验，更是不断动脑，不断解决问题的过程。实验的价值也体现于此。

(3) 学生进行实验：按照上面的讨论，把这个探究实验需要的有关器材组装起来，进行实验，教师进行巡回指导。

(4) 引导学生进行数据的分析与处理：可以抓住学生所画的 W-v 图象、W-v^2 图象进行评析后，用数表软件进行数据处理，通过电脑进行拟合得出力所做的功与物体速度变化间的关系，使学生对实验探究得出的结论印象更加深刻、更加清晰。

教科书中引入本节内容的主要目的是为了让学生经历和体验探究的过程。但教学时要真正达到探究的目的，教学设计的关键还在于要确保实验的成功。为此，教师应精心的准备。以参考案例二为例，应做好以下几方面的工作。

(1) 实验器材的选择

①小车（前端带小钩，选择有轮缘的轮子，以尽可能保证小车做直线运动）；

②100～200 g 的砝码（在小车的前端加砝码）；

③用铝合金轨道做成的斜轨道、并在斜轨道的一端的两侧适当位置对称地固定两个用于固定橡皮筋的铁夹子；

④电火花打点计时器及纸带；

⑤6 根等长的、长度约为 62 cm 的同规格的、两端分别系有两个小钩的橡皮筋。

选择轮子有轮缘的小车，并使小车在铝合金轨道上运动，是为了尽可能地保证小车做比较

稳定的直线运动。使用研究牛顿第二定律实验中所用的铝合金轨道就是最佳的选择。这样的装置，可有效地避免出现小车运动过程中压橡皮筋的现象。

在小车的前端加上质量为100～200 g的砝码，是为了使小车挂上多条橡皮筋时，纸带上仍能打出足够的点数，也可以避免出现小车在运动中发生跳跃着运动的情形。

(2) 橡皮筋的选择

对于本实验来说，橡皮筋是影响实验效果的关键因素。本实验中，要求用相同规格的橡皮筋。市场上常见的橡皮筋（圈）粗细不一，一致性差，不同橡皮筋（圈）之间的弹力差异也比较大。而且由于它比较粗，弹力偏大，当实验中橡皮筋增至4根以上时由于弹力过大，纸带上打出的点数过少，小车速度过大，以致找不出小车做匀速运动时所打出的点及容易出现小车损坏等情况。因此常用的橡皮筋（圈）不适合用在本实验中。

图7-5

比较适合于本实验的橡皮筋如图7-5所示，它是横截面为圆形、单根半径约为0.7 mm的细橡皮筋。如果在当地找不到这样的橡皮筋，也可以选择服装制作中由多根细橡皮筋组成的带状或圆柱状的松紧带。带状松紧带要仔细地剪成单股，圆柱状松紧带只要去掉外层包裹的纱线即可。

(3) 实验装置的安装

如图7-6所示，先固定好打点计时器，取等长的（长度约为62 cm）同规格的、两端分别系有两个小钩的橡皮筋。依次分别用1根、2根、……、6根橡皮筋两端的小钩套在固定于斜轨道一端两侧呈对称分布的小立柱A、A'上。小车放在B处时，使挂上的橡皮筋处于自然长度，并使AB间的长度大于BC间的长度。

图7-6

实验中，小车的质量、橡皮筋的长度、AB、BC间的距离要视橡皮筋的具体情况做适当的调整，使小车从B位置到C位置的长度BC保证在橡皮筋的弹性限度内。

实验时，也可以采用如图7-7所示的橡皮筋与小车在一条直线上的方法进行实验。这样，小车在B位置时橡皮筋处于自然长度，橡皮筋对小车没有拉力，小车从B向A运动过程中有一段近似匀速运动。采用这种方法时，橡皮筋的长度要适当短一些，A位置一般应该选在轨道的端部。

图7-7

采用图7-6、图7-7所示的实验装置，还可以避免发生小车运动中压橡皮筋的情形，使实验的精确度更高。

本实验也可采用探究加速度与力、质量的关系的实验装置进行研究。

(4) 实验操作情况的控制

①小车质量约200 g，当实验中加到多条橡皮筋时，由于小车的运动速度过大，纸带上打出的点数就可能太少，以至于难以选择合适的点来计算小车的速度。为此，可在小车上加100～200 g的砝码。实验时，可以依次加到6根橡皮筋，打出6条纸带，连同O点，在用图象法进行数据处理时就有7个点，因而在描绘曲线时比较容易判断曲线的函数特征。

②平衡摩擦力时，可以轻轻推一下小车，并利用打点计时器打出的纸带上的点的分布情况

来判断小车是否做匀速运动。

③由于实验器材和每次操作过程的离散性，尤其是实验中选用的每条橡皮筋不可能完全相同，使得每次改变橡皮筋的条数后，纸带上反映匀速运动的点的位置不一定都在预先设定的 B 位置之后，而可能在 B 位置的前后。这是因为小车在几条橡皮筋拉动下运动至 B 点时，有的橡皮筋可能在 B 点的前、后位置时对小车不产生拉力。因此，实验时需要对纸带上的点进行分析，看看 B 点左右或 B 点之后若干个相邻点间的距离是否基本相同？应选择相邻距离基本相同的若干个点来计算小车做匀速运动的速度。

（5）实验数据的处理

①速度数值的获得：实验获得的是如图 7-8 所示的纸带，为探究橡皮筋弹力做功与小车速度的关系，需要测量的是弹力做功结束时小车的速度，即小车做匀速运动的速度。所以，应该在纸带上测量的物理量是图中 A_1、A_3 间的距离 s，小车速度的表达式为 $v=\frac{s}{2T}$，其中 T 是打点计时器的振动周期。

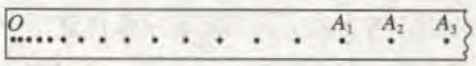


图 7-8

②误差分析：误差的主要来源之一是用多条橡皮筋时，橡皮筋的长度、粗细不一，使橡皮筋对小车的拉力与橡皮筋的条数不成正比。其次，小车受力为 0 的位置也不一定在设定的 B 点。第三，由于小车不受拉力的位置不一定在 B 点，使得拉力的功 W 与橡皮筋的条数不成正比。而实验设计中作图时纵坐标的单位长度依然将功与橡皮筋的条数按正比关系取值，这就使得利用测量值作出的 W 与 v 的各对应点的分布与实际的 W-v 图象发生了偏离。

③实验数据的处理是中学物理教学中的难点，而本实验中实验数据处理的难度尤为突出，从而也更好地体现了探究的特点。因为在 W-v 坐标系中描绘出 W、v 的各对应点后，既要观察各点的位置关系，又要考虑这些点间应有的函数关系。而由于存在着实验误差，这些点的位置既可能表现为直线分布，也可能呈曲线分布。如果实验得到的各点在 W-v 坐标系中大致呈线性分布，又如何解释？如何处理？这些都需要学生进行理性的分析和研究。课文中提出这些引导学生进行探究的内容，是促使学生认真思考问题的好方法，它使实验数据的处理真正提升到了培养学生科学素养的层面上。

④为了使得 W-v 坐标平面上各对应点分布成非线性。可以考虑采用以下几条措施：一是在小车上加砝码，通过增加小车质量的方法，使小车速度不致过快；二是在画 W-v 曲线时加大 W 坐标轴的单位长度；三是从原点 O 开始描绘图线。

⑤为了使 W 与 v 的关系更加直观明确，在让学生对 W-v 图象进行分析后，要适时地引导学生思考是否可以通过描绘 W-v^2 图线来看看 W、v 间的函数关系。

⑥有条件的学校，可以用数表软件进行数据处理。这样，在“添加趋势线”选项中可以实现线性、2 次、3 次、…、n 次等多种曲线性质的选择，使 W-v 坐标平面上作出的各 W、v 离散点间拟合出来的曲线的性质更加直观明确，同时也大大节省了数据处理的时间。

（6）教师对实验中可能出现问题的准备

本实验学生的操作比较多，学生在实际的操作过程会出现许多教师意料之外，甚至教师自己在实验过程中也难以发现的问题。这些问题的出现既影响实验的进程，也影响实验的效果。为了防范这些问题的出现，教师要及时总结学生可能出现的问题，还要加强同一备课组教师间的交流，在学生进行实验操作前加以提醒。对于第一次教学的教师，可先让几个同学提前试做，积累学生可能出现的问题。

本节内容建议分两课时进行。第一课时，通过师生间的互动、共同探究，结合教师适当演示的方式解决实验的设计思路问题，使学生对探究过程有一个初步的认识。第二课时，以学生的探究为主，教师对实验确有困难的学生进行指导。

第 7 节　动能和动能定理

1. 教学目标

(1) 知道动能的符号、单位和表达式，会根据动能的表达式计算运动物体的动能。

(2) 能从牛顿第二定律与运动学公式导出动能定理，理解动能定理的物理意义。

(3) 领会运用动能定理解题的优越性，理解做功的过程就是能量转化或转移的过程。会用动能定理处理单个物体的有关问题。

(4) 知道动能定理也可用于变力做功与曲线运动的情景，能用动能定理计算变力所做的功。

2. 教材分析与教学建议

通过前几节内容的学习，学生已认识到某个力对物体做了功就一定对应着某种能量的变化。在本章第一节“追寻守恒量”中，学生也知道了物体由于运动而具有的能叫动能。那么，物体的动能跟哪些因素有关？引起动能变化的原因是什么？这就是本节要研究的内容。本节内容，具有承前启后的作用。通过本节内容的学习，既深化了对功的概念的理解，使学生对“功是能量变化的量度”有了进一步地理解，拓展了求功的思路，也为机械能守恒定律的学习打下了基础，并为用功能关系处理问题打开了思维通道。因此，本节内容既是本章的关键内容，也是重点内容。

(1) 动能的表达式

通过上节的实验探究发现，力对物体做的功与物体速度变化的关系可能是 $W \propto v^2$。但根据个别实验探究的结果是不能认为就是规律性的结论，在教学中需要对动能定理在理论上进行分析与推导。

使物体速度发生变化的根本原因是由于物体受到了力的作用而且发生了位移。在前面几章的学习中，学生已经知道，用牛顿第二定律和运动学公式可以把力学量与运动量联系起来。因此，引入本节课题时，利用学生已积累了的知识和经验可在总结实验探究结果的基础上，针对基础不同的学生可采用不同的引入方法，进行动能定理的论证。

方案 1：教师简明地向学生指出，理论推导与实验探究都是认识物理规律的一般方法，牛顿第二定律说明：作用力使物体产生加速度，使物体的速度发生变化。因此，我们可以根据牛顿第二定律及运动学公式来研究做功与物体速度变化间的关系。

方案 2：对基础较好的学生，教师可提出问题：能否从理论上研究做功与物体速度变化的关系呢？引导学生讨论，明确根据牛顿第二定律 $F \rightarrow a \rightarrow v$ 变化，因此，可以根据牛顿第二定律来研究做功与物体速度变化的关系。

对动能的表达式，教科书不是简单地直接给出动能的表达式 $\frac{1}{2}mv^2$，而是经过理论推导得出 $W=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2$ 的关系后，进一步推理分析后再定义物体的动能 $E_k=\frac{1}{2}mv^2$。这种处理

方法与重力势能、弹性势能的得出是一脉相承的，学生接受起来也不会有什么太大的障碍。从牛顿第二定律推导动能定理的过程中蕴涵着丰富而深刻的物理内容，能帮助学生很好地理解牛顿第二定律与动能定理的联系、区别，准确把握动能定理的内容以及如何灵活应用动能定理，等等。

在推导动能定理时，可以考虑下面的方案展开教学活动。

方案 1

①给出情景：给质量为 m 物体施加一个恒力 F，使物体在光滑的水平面上做匀加速直线运动，在物体发生位移 l 的过程中，力 F 对物体做功 W，物体的速度由 v_1 变为 v_2。

②提出问题：恒力 F 推动物体发生位移 l 的过程中，所做的功 W 与物体速度的变化间有什么关系呢？

③学生推理：根据牛顿第二定律

$$F=ma \tag{1}$$

恒力 F 在物体发生位移 l 的过程中做功

$$W=Fl \tag{2}$$

物体发生位移 l 的过程中做匀加速直线运动，匀变速直线运动的速度与位移关系

$$v_2^2-v_1^2=2al \tag{3}$$

联立（1）（2）（3）方程，解得 $W=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2$ (4)

④揭示意义：我们已经知道功与能量变化是紧密联系的，重力做功与物体重力势能变化有一定关系，弹力做功与弹性势能变化有一定关系。（4）式左边是力 F 在位移 l 过程中做的功，（4）式右边的 $\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2$ 是物体发生位移 l 过程中“$\frac{1}{2}mv^2$”的变化。换句话说，（4）式就是力对物体做的功与物体动能变化的关系式。

⑤定义动能：力做的功 W 与物理量 $\frac{1}{2}mv^2$ 的变化量相等。可见，$\frac{1}{2}mv^2$ 是一个有特殊意义的物理量，我们将 $\frac{1}{2}mv^2$ 定义为物体的动能。

提问：$\frac{1}{2}mv^2$ 是描述状态的物理量，还是描述过程的物理量？它是矢量，还是标量？动能的单位是什么？引导学生进行类比分析中认识到动能是标量。动能是状态量，而功是过程量，力在一个过程中所做的功等于物体在这个过程中动能的变化。

需要说明的是：由于书面表达的局限，④揭示意义与⑤定义动能给人有先后之感，在教学中④揭示意义与⑤定义动能是交织在一起的，在揭示意义的过程中定义了动能，定义动能之后，对力对物体做的功与物体动能变化的关系式的意义会有更深入的认识。

方案 2

对基础比较好的学生可采用师生互动的方式，由教师启发、引导，而主要由学生完成上述的推导和分析过程。

根据学生的实际情况，教师所设置的物理情景也可复杂一些。如：质量为 m 的物体在光滑水平面上以速度 v_1 向前运动，物体在恒定的斜向上拉力 F 作用下通过位移 l 后速度变为 v_2，问：在这个过程中，力所做的功 W 与物体速度的变化间有什么关系呢？

在让学生进行分析与推导中，可引导学生把力 F 分解为沿位移 l 方向的 $F_1=F\cos\theta$ 和垂

直于位移方向的$F_2=F\sin\theta$。F_2对速度大小的变化不起作用，不予考虑。只需研究F_1对物体的作用。

（2）动能定理

动能定理是一个适用范围很广的物理规律，尽管教科书在推导这一定理时，仅由一个恒力做功引起物体动能变化的过程中，得出“这个力在一个过程中所做的功等于物体在这个过程中动能的变化”的结论。但把它推广到多力做功及变力做功的情形中时却并不构成教学难点。因为，在前面几节内容的学习中，学生对功和能的标量特点已有了充分的认识，对标量的运算也并不陌生，教师只要抓住功是标量的特点，通过实例分析的方法自然地过渡到多力做功、变力做功及曲线运动的做功问题中去。使学生理解动能定理的物理意义是：“合力在一个过程中所做的功，等于物体在这个过程中动能的变化”，或“各力的功的代数和等于物体动能的变化”。

（3）例题的教学

在分析教科书中的两个例题时，建议教师按以下步骤展开教学活动：

①先让学生对教科书中的两道例题运用牛顿运动定律与运动学公式出发求解。

②再让学生用动能定理进行分析求解。

③教师对学生的解题情况进行评析。教师要着重在规范化解题方面进行讲评，帮助学生形成正确的解题思想，学会从物理规律本身的特点出发考虑问题。要努力强化以下内容：

- 认真审题，弄清题意。
- 通过受力分析和运动分析展示清楚物理情景，画物体运动的示意图。
- 分析已知条件，明确所求量。
- 选择合适的物理规律列出方程。
- 代入数据（注意单位的统一）进行计算。及时进行反思总结，逐渐形成分析解决问题的能力。

④教师引导学生对这两种方法进行比较，让学生体会到应用动能定理处理问题的优点，明确在不涉及时间因素或不要求具体的细节问题时，运用动能定理解题时往往会显得更为快捷。

⑤通过补充例题的分析，使学生明确，应用动能定理还能解决一些用牛顿运动定律与运动学规律无法处理的问题。

教科书中，只列举了两个用来说明用动能定理解题具有优越性方面的例题，而教科书中不要求用功的定义式来求变力的功，尽管在“探究弹性势能的表达式”的教学中出现了变力做功的问题，在“重力势能”的教学中也涉及曲线运动中力的做功问题，但变力做功及物体在做曲线运动中力的做功问题学生还是无法驾驭的。因此，在本节的例题教学中，应该为学生提供拓展的机会。为此，我们可以补充这方面的例题。

补充例题：质量为50 kg的游泳运动员，从离水10 m高的跳台上以4 m/s的速度跳出。求：运动员起跳时做了多少功？若不计空气阻力，运动员入水时的速度是多少？若该运动员落水时速度为13 m/s，则他克服空气阻力做了多少功？

教学中一定要用好书上的例题和这个补充例题，教师要不失时机地强调动能定理所蕴涵的物理意义，帮助学生学会用语言的方式来表达合外力的功与物体动能变化量间的关系。在进行启发式教学的过程中要解决好以下几个问题：

①合力的功。通过实例分析，强化“几个力对某物体做功的代数和等于这几个力的合力对这物体所做的功”的思想。让学生明白，由于功是标量，这两种计算总功的方法是等效的。使学生理解运用动能定理时，在恒力做功的情形下，既可以先求出物体所受的合外力，再求出合

力所做的功。也可以先求出各个力做的功，再求出这些功的代数和。如果牵涉到有变力做功的问题时，求合力的功时往往采用各个力做功的代数和的方法。

②动能的变化。动能是标量，只有正值，没有负值，但动能的变化却有正负之分。要引导学生回顾在求“速度的变化”时，这个“变化”是指末状态的速度减去初状态的速度，而不是大的减去小的。动能的变化量为正值，说明物体的动能增加了；动能的变化量为负值，表示物体的动能减小了。

③变力的功。如果是变力做功或物体做曲线运动时，教师要适时渗透“化曲为直”、“以恒代变”等辩证思想，使学生领会可以把力对物体做功过程中的路径分割成许多小段，认为物体在每小段的运动过程中都受到恒力的作用，并把每小段轨迹都当作直线。整个过程中，力对物体所做的功，就等于各个小段中该力所做功的代数和。

3. 问题与练习

内容分析

本节的几个练习，看似情景各异，题目中的所求量迥然不同，但除了第1题外，都是围绕动能定理的应用展开的，这些题目构成了一组思维方法的集成题，使学生在认真分析处理这些问题时，能把握动能定理的本质，达到开阔视野、提高分析问题和处理问题能力的目的。

第1题，主要是为了巩固动能的概念，也为了帮助学生养成用比例法求解物理问题的思维习惯。第2题属于运用动能定理处理问题的基本题型。但这种题目很容易使平时做事粗枝大叶的学生犯错误，这种练习可以培养学生形成运用物理规律考虑问题的意识，克服想当然的缺点。第3题，属于变力做功的问题，它可以使学生认识到有些问题可以运用“化变为恒”的策略进行分析求解。第4题的求解过程中，可以使学生体会到，对于没有涉及时间因素，也不需要求加速度的问题，运用动能定理进行分析往往会体现出很好的优越性。第5题，既牵涉到变力做功，也是一个多过程问题，由于功是标量，利用动能定理所反映的“各力的功的代数和等于物体动能的变化”的物理关系，可以一举求得问题的解决，通过这种问题的分析求解，可以强化学生的整体意识，提高综合分析问题的水平。

解答与说明

1. A. 动能是原来的4倍。B. 动能是原来的2倍。C. 动能是原来的8倍。D. 动能不变。

2. 由动能定理 $W_{合}=E_{k2}-E_{k1}=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2=\frac{1}{2}m(v_2^2-v_1^2)$ 可知，在题目所述的条件下，$(v_2^2-v_1^2)$ 较大的，需要做的功也越多。

汽车的速度由10 km/h加速到20 km/h的过程中：

$$v_2^2-v_1^2=(20^2-10^2)\ \text{km}^2/\text{h}^2=300\ \text{km}^2/\text{h}^2$$

汽车的速度由50 km/h加速到60 km/h的过程中：

$$v_2^2-v_1^2=(60^2-50^2)\ \text{km}^2/\text{h}^2=1\ 100\ \text{km}^2/\text{h}^2$$

可见，后一种情况中，汽车所做的功比较多。

3. 设子弹所受的平均阻力为 F_f，根据动能定理 $W_{合}=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2$，得

$$F_f s\cos 180^\circ=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2$$

所以 $F_f=\frac{m(v_2^2-v_1^2)}{2s}=\frac{2\times10^{-3}\times(300^2-100^2)}{2\times5\times10^{-2}}\ \text{N}=1.6\times10^3\ \text{N}$

子弹在木板中运动 5 cm 的过程中，所受木板的阻力各处不同，题中所说的平均阻力是相对子弹运动这 5 cm 的过程来说的。

4. 人沿气囊下滑过程中，重力与阻力做功。设人受到的阻力为 F_f，根据动能定理 $W_{合}=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2$，有

$$W_G+W_f=\frac{1}{2}mv_t^2-0$$

即 $mgh-F_fs=\frac{1}{2}mv_t^2$

取 $g=10\ \mathrm{m/s^2}$，解得 $v_t=2\sqrt{3}\ \mathrm{m/s}\approx 3.46\ \mathrm{m/s}$

说明：要求学生对运用牛顿运动定律与运用动能定理进行解题的思路进行比较，从而产生感悟，以较好地达到避免乱套公式的目的。

5. 设人将足球踢出的过程中，人对足球做的功为 W，从人踢球到球上升至最大高度的过程中，由动能定理 $W_{合}=\frac{1}{2}m(v_2^2-v_1^2)$，得

$$W+W_G=\frac{1}{2}mv_t^2-0$$

即 $W-mgh=\frac{1}{2}mv_t^2$

$W=\frac{1}{2}mv_t^2+mgh=\frac{1}{2}\times 0.5\times 20^2\ \mathrm{J}+0.5\times 10\times 10\ \mathrm{J}=150\ \mathrm{J}$

第 8 节　机械能守恒定律

1. 教学目标

(1) 知道机械能的各种形式，能够分析动能与势能（包括弹性势能）之间的相互转化问题。

(2) 能够根据动能定理和重力做功与重力势能变化间的关系，推导出机械能守恒定律。

(3) 会根据机械能守恒的条件判断机械能是否守恒，能运用机械能守恒定律解决有关问题。

(4) 能从能量转化的角度理解机械能守恒的条件，领会运用机械能守恒定律解决问题的优越性。

2. 教材分析与教学建议

通过前几节内容的学习，学生知道了重力做功会引起重力势能的变化，弹簧的弹力做功将使弹性势能发生变化，合外力的功将引起物体动能的变化。使学生对于曾在初中阶段学过的一些定性的东西逐渐找到了定量方面的联系，对功能关系的认识加深了，也萌发了继续探究的兴趣。那么，在动能、重力势能和弹性势能都参与转化的过程中，情况又将如何呢？这是学生急待解决的问题，机械能守恒定律的建立已经到了“水到渠成”的时候了。从知识发展的线索来看，本节内容，既是对前面几节内容的总结，也是对能量守恒定律的铺垫。通过本节内容的学习，学生对功是能量变化的量度会有更加深刻的理解，也为从不同角度处理力学问题提供了良

好的途径。本节内容是本章的重点内容。通过学习，学生不难掌握机械能守恒的表达式和运用机械能守恒定律求解比较简单的问题，但对具体问题中机械能守恒条件是否满足的判断还有一定困难，因此，对机械能守恒定律条件的理解是本节内容的难点。

(1) 动能和势能的相互转化

教科书中，通过实例分析的方法，说明动能与势能之间可以相互转化。这是把抽象的内容具体化、形象化。教学中，还要有意识地补充一些实验、动画、视频和图片资料，帮助学生借助形象思维的方式有效地完成思维活动。

教师在教学中，可以按照下面的思路展开教学过程。

教学片段

①通过播放荡秋千、翻滚过山车、撑杆跳高、瀑布等视频材料，让学生深刻感受各种丰富多彩的动能与势能发生相互转化的过程。

②演示滚摆、单摆、自由落体等实验。

教师：上述演示中动能与势能之间相互转化的原因是什么？

学生：受重力作用。

教师：在光滑水平面上做匀速直线运动的物体是否受到重力作用？动能与势能之间是否转化？动能与势能之间相互转化的原因是什么？

学生：重力做功。

教师演示水平弹簧振子在气垫导轨上振动等实验。

教师：上述演示中动能与势能之间相互转化的原因是什么？

学生：弹力做功。

③演示并分析竖直上抛运动的过程中重力做功与动能与势能的转化情况。使学生明白物体高度上升时，重力做负功，动能逐渐转化成重力势能。而当物体的高度降低时，重力做正功，物体的重力势能逐渐转化为动能。从而使学生理解教科书中所说的“通过重力做功或弹力做功，机械能可以从一种形式转化为另一种形式”的含义。

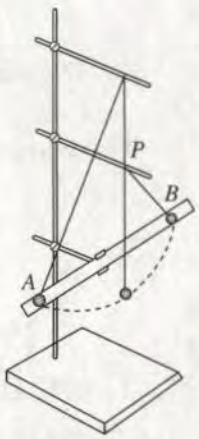


图 7-9

教科书中图 7.8-1 的实验也可用如图 7-9 所示的装置做。悬挂单摆的铁架台上增加一个横杆 P 和一把水平放置的尺子 AB，实验时可分以下几项内容进行观察：调整横杆 P 的高度观察小球的摆动情况；调整水平尺子 AB 的高度使小球从不同的位置摆动，观察小球的摆动情况。然后，让学生进行分析概括，找出实验中所反映的物理本质。

图 7-10

有条件的学校，用如图 7-10 所示的装置进行演示实验比较方便：把单摆用磁铁悬在铁质黑板上，而“挡板”用穿在圆环状磁铁的细铁条代替，也粘在铁质黑板上，同时在黑板上用粉笔画一条水平线。这样的装置，不仅调节用作挡板的细铁条的摆放位置比较方便，而且移动范围也较大，因而更具一般性，也更能说明问题。

(2) 机械能守恒定律

机械能守恒定律的教学中，机械能守恒条件的揭示是关键。要有意识地通过实验演示的方

法，让学生明白机械能守恒定律的成立是有条件的。

例如，首先，可以先让学生再次观察用磁铁悬在铁质黑板上的铁球的摆动情况。之后，让这个铁球贴着黑板摆动，让学生仔细观察铁球的摆动情况。再将铁球换成泡沫塑料球，让学生注意观察泡沫塑料球的摆动情况。让学生体会到只有在重力做功的过程中，物体的动能与重力势能在相互转化的过程中，机械能才守恒。其次，让学生观察图 7-11 所示的放在水平简易气垫导轨上的弹簧振子的振动情况，并让学生比较有气垫与没有气垫时（关掉气源）弹簧振子的振动情况。让学生针对观察到的实验现象进行分析讨论，总结出只有在弹力做功的过程中，物体的动能与弹性势能在相互转化的过程中，机械能才守恒的结论。第三，综合以上两种情况，使学生明白：只有在重力和弹力做功的过程中，物体的动能与势能在相互转化的过程中，机械能才守恒。如果除了重力和弹力以外还有其他力参与做功时，就会发生机械能与其他形式能量间的转化，机械能就不再守恒。

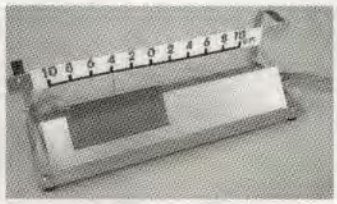


图 7-11

在前面实验与归纳与总结的基础上，让学生讨论以下问题：在铁球贴着黑板摆动的过程中，如果黑板对铁球有摩擦力作用，机械能还守恒吗？铁球被沿水平方向抛出后的运动过程中，机械能是否守恒？物体在向上的拉力作用下，沿竖直向上方向做匀减速运动的过程中，机械能是否守恒？

机械能守恒的比较严格的说法应为“系统所受外力和系统内部非保守内力不做功”。但这样的说法，对一般的高中生来说，是很难理解的。对学有余力的学生可以进行这样的分析，而对多数学生来说，只要通过一些实例进行说明，能使学生理解机械能守恒的条件就可以了。

为了帮助学生强化对机械能守恒条件的理解，建议把“思考与练习”移到例题分析前，通过师生互动的方式进行。为了降低台阶，使问题更加直观，教学中可以根据“思考与练习”中设置的两种情景给出数据，让学生通过计算明白：在两种情景中重力的功都等于物体重力势能的变化量。而物体动能的变化量却不同，在真空中下落的小球，其重力势能的减少量全部转化成了动能。而在粘滞性很强的液体中下落的小球的重力势能却转化成了动能与内能。前者机械能守恒，后者机械能尽管不守恒，但能量的总量却也是保持不变的。从而使学生领悟到机械能既不可能凭空产生，也不会无缘无故地消失掉，机械能的增减是除了重力和弹力以外的其他力做功的必然结果。

要向学生指出，重力势能是由地球与物体所组成的系统所共有的，弹性势能是由因弹力的相互作用而组成的系统所共有的。因此，运用机械能守恒定律求解的对象是由相互作用的物体所组成的系统。

对于基础较好的学生，教师可引导学生用演绎的方法进行机械能守恒定律的推导，将推导过程与对机械能守恒的条件的深入理解结合起来。理论推导的情景可以是自由落体运动或物体在光滑斜面上的运动。

在分析运用机械能守恒定律求解的例题时，教师一定要帮助学生形成良好的解题规范。首先，要引导学生通过受力分析与运动分析展示清楚物理情景。其次，要紧紧抓住机械能守恒的条件进行分析判断，并强调机械能守恒的条件是“除了重力和弹力以外的其他力不做功，而不是不作用”。第三，在机械能守恒条件满足的条件下，运用机械能守恒定律列式求解。如果不满足机械能守恒的条件，则运用动能定理或动力学思路进行分析求解。还要补充一个既可以用机械能守恒定律求解，也可以用牛顿运动定律求解的例题。教师要抓住这两个例题引导学生对

这两种解题思路进行比较，让学生领悟到在解决不涉及时间因素，也不涉及到状态间的过程细节，且满足机械能守恒条件的问题时运用机械能守恒定律解决问题的优越性。

3. 问题与练习

内容分析

本节的几个练习题，主要是围绕机械能守恒的条件与机械能守恒定律的应用展开的，主要目的是为了帮助学生掌握用机械能守恒定律处理问题的基本思路，领悟用机械能守恒定律处理问题的优越性。

第 1 题，主要是为了让学生进一步明确机械能守恒定律是动能定理在只有重力和弹力做功情形下的一种特殊形式，也是为了帮助学生揭示知识间的联系，弄清楚知识的来龙去脉。第 2 题，首先是为了强化学生的问题意识与条件意识，让学生明白许多物理规律的成立都是有条件的，机械能守恒也是有条件的，离开了规律成立的条件去运用物理规律是毫无意义的。其次，也是为了帮助学生巩固对机械能守恒的条件的理解。第 3 题，对物体做曲线运动问题的处理，通常都比较麻烦。但在处理不需要考虑物体运动的细节，也不涉及时间因素的问题时，从能量的角度入手分析往往会快捷、简便得多。也为了促使学生能比较全面地分析和考虑问题，使学生在求解物理问题时能更加注重物理情景的分析与把握。其中第（2）小题，则是为了帮助学生形成善于运用物理规律找出相关因素的表达式后再进行分析淘汰的解题策略。第 4 题，主要是为了使学生学会用假设法考虑问题及善于运用物理规律进行分析推理的方法。

解答与说明

1.（1）小球下滑的过程中，曲面的支持力与速度方向垂直，不做功。整个过程只有重力做功。根据动能定理 $W_{合}=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2$，得

$$mg(h_1-h_2)=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2$$

上式表明，小球动能的增加等于重力势能的减小。

（2）小球在从 A 点下落至 B 点的过程中，由重力做功与重力势能的关系得

$$mgh_1-mgh_2=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2$$

将以上方程变形，得

$$mgh_1+\frac{1}{2}mv_1^2=mgh_2+\frac{1}{2}mv_2^2$$

等式左边表示物体在 A 点时的机械能，等式右边表示物体在 B 点时的机械能。由上式可以看出，小球从 A 点运动到 B 点的过程中，机械能守恒。

2. A. 飞船升空阶段，动力对飞船做功，飞船的机械能增加。

B. 飞船在椭圆轨道上绕地球运行阶段，只有引力对飞船做功，机械能守恒。

C. 飞船在空中减速后，返回舱与轨道分离，然后在大气层以外向着地球做无动力飞行的过程中，只有引力做功，机械能守恒。

D. 进入大气层并运动一段时间后，降落伞张开，返回舱下降的过程中，空气阻力做功，机械能减少。

3.（1）石块从抛出到落地的过程中，只有重力做功，机械能守恒。设地面为零势能参考面，根据机械能守恒定律，得

$$\frac{1}{2}mv_0^2+mgh=\frac{1}{2}mv_t^2$$

所以：$v_t=\sqrt{v_0^2+2gh}=\sqrt{5^2+2\times10\times10}$ m/s=15 m/s

由动能定理，有

$$mgh=\frac{1}{2}mv_t^2-\frac{1}{2}mv_0^2$$

解出 $v_t=\sqrt{v_0^2+2gh}=\sqrt{5^2+2\times10\times10}$ m/s=15 m/s

(2) 由 $v_t=\sqrt{v_0^2+2gh}$ 可知，石块落地时速度大小与石块初速度大小及石块抛出时的高度有关，与石块的质量和石块的初速度的仰角无关。

4. 由题意，切断电动机电源的列车，假定在运动中机械能守恒，欲使列车冲上站台，此时列车的动能 E_k 至少要等于列车在站台上的重力势能 E_p。

列车冲上站台时的重力势能为 $E_p=mgh$

列车在 A 点时的动能为 $E_k=\frac{1}{2}mv^2$

$v=25.2$ km/h=7 m/s

$$\frac{E_p}{E_k}=\frac{mgh}{\frac{1}{2}mv^2}=\frac{2gh}{v^2}=\frac{2\times10\times2}{7^2}=\frac{40}{49}<1$$

可见，$E_k>E_p$，所以列车能够冲上站台。

设列车冲上站台后的速度为 v_1，根据机械能守恒定律得

$$E_k=E_p+\frac{1}{2}mv_1^2$$

即 $\frac{1}{2}mv_1^2=E_k-E_p=\frac{1}{2}mv^2-mgh$

所以 $v_1^2=v^2-2gh$

$v_1=\sqrt{v^2-2gh}=\sqrt{7^2-2\times10\times2}=3$ m/s

第 9 节　实验：验证机械能守恒定律

1. 教学目标

(1) 理解实验的设计思路，明确实验中需要直接测量的物理量。

(2) 知道实验中选取测量点的有关要求，会根据实验中打出的纸带测定物体下落的距离，掌握测量物体运动的瞬时速度的方法。

(3) 能正确进行实验操作，能够根据实验数据的分析得出实验结论。

(4) 能定性地分析产生实验误差的原因，并会采取相应的措施减小实验误差。

2. 教材分析与教学建议

本节内容安排在学习机械能守恒定律之后的目的，是为了使学生在理论上对机械能守恒定律有所了解的基础上，通过实验测量及对实验数据的分析处理，对机械能守恒定律及条件有深刻的认识。

学生对实验中所用到的打点计时器、天平等测量仪器已比较熟悉，实验的操作过程也比较简单。因此，在本节内容的教学中，教师在引导学生把握瞬时速度的测定、计数点的选择等几个关键环节后，就应该放手让学生进行实验。

本节教科书的重点是实验的设计思路、瞬时速度的测定及实验数据的采集与处理。在学生进行实验前，可用问题讨论的方法解决实验操作中应该注意的一些问题。

①为什么要选择自由落体运动来验证机械能守恒定律？是否还有其他运动形式可以选择？

②该实验的原理是什么？实验时需要测量哪些物理量？需要用到哪些实验器材？

③在进行实验数据处理时，最好选择哪两个位置作为过程的开始和终结位置为好？

④实验中，怎样测量物体重力势能的减少量呢？

⑤用实验测量物体的瞬时速度时可以采用哪些方案？我们选用什么实验方案测瞬时速度比较好？应怎样具体地测出物体的瞬时速度？

⑥教科书选用的实验方案中，引起实验误差的原因有哪些？为了尽可能地减小实验误差，应该在哪些方面动脑筋呢？

⑦写实验报告时应该包括哪些内容？

3. 问题与练习

内容分析

本节的几个练习题，主要是为了培养学生的建模意识，提高学生学以致用的本领和分析解决实际问题的能力，也是为了帮助学生拓展用机械能守恒定律处理问题的视野，加深对机械能守恒定律的理解。

第1题，是一个比较复杂的情景题，主要目的是为了培养学生善于根据物理过程发生、发展和变化的过程进行物理情景展示的能力。通过该题的求解，可以使学生认识到展示清楚物理情景是解题的关键，根据物理情景和物理条件选择相应的物理规律是解题的基本原则。第2题，既为了进一步使学生树立模型意识，培养建模能力，也为了提高学生分析解决实际问题的能力。第3题，主要是为了帮助学生树立问题意识，培养学生的钻研精神，提高分析和解决实际问题的能力。

解答与说明

1.（1）从状态甲至状态丙过程中，弹性势能逐渐减少，动能和重力势能逐渐增大，当弹簧对小球向上的弹力大小与小球所受重力大小相等时，小球的动能最大。之后，弹性势能和动能逐渐减少，重力势能逐渐增大，当弹簧恢复到自然长度时，弹性势能为0。之后，重力势能仍逐渐增大，动能逐渐减少，到达C点时，动能减少到0，重力势能达到最大。

小球从状态甲运动到状态丙的过程中，机械能守恒。故状态甲中，弹簧的弹性势能

$$E_p=mg(h_{AB}+h_{BC})=0.2\times10\times(0.1+0.2)\ \mathrm{J}=0.6\ \mathrm{J}$$

（2）小球从状态乙到状态丙的过程中，动能逐渐减少，重力势能逐渐增大。

小球从状态乙到状态丙的过程中，机械能守恒，所以小球在B点的动能与小球在C点的势能相等。故小球在状态乙中的动能

$$E_k=mgh_{BC}=0.2\times10\times0.2\ \mathrm{J}=0.4\ \mathrm{J}$$

2. 设小球的质量为m，小球运动到圆轨道最高点B时的速度为v，受到圆轨道的压力为F_N。小球从A点下滑至最高点B的过程中，由于只有重力做功，机械能守恒。设在圆轨道最低点为重力势能的零参考平面，则在这个过程中，根据机械能守恒定律，有

$$mg(2R)+\frac{1}{2}mv^2=mgh$$

在圆轨道的最高点 B 处，根据牛顿第二定律，有

$$F_N+mg=m\frac{v^2}{R}$$

欲使小球顺利地通过圆轨道的最高点，则小球在最高点 B 处时，必须满足条件

$F_N\geqslant 0$

即 $mg\leqslant m\frac{v^2}{R}$

联立以上两式，可得 $h\geqslant\frac{5}{2}R$

可见，为了使小球顺利地通过圆轨道的最高点，h 至少应为 $\frac{5}{2}R$。

3. 用平抛运动的知识测出的小球离开桌面时的速度要略小于用机械能守恒定律算出的速度，这是由于小球做平抛运动时所受的空气阻力做负功，减小了它落地时的机械能。

第 10 节　能量守恒定律与能源

1. 教学目标

(1) 了解各种不同形式的能，知道能量是一个重要的物理量。

(2) 知道确立能量守恒定律的两类重要事实。

(3) 能够叙述能量守恒定律的内容，会用能量守恒的观点分析、解释一些实际问题。

(4) 认识建立能量守恒定律的重大意义。

(5) 了解能量耗散，了解自然界宏观过程中能量守恒以及能量转化和转移的方向性，认识提高能量利用效率的重要性。

(6) 知道能源短缺和环境恶化是关系到人类社会能否持续发展的大问题，增强节约能源和环境保护的意识。

2. 教材分析与教学建议

本节内容是对本章知识的总结与拓展。学生通过机械能的学习，已经形成了有关能量转化的一些图景，体会到能量概念是对自然现象的抽象与概括，具备了从“机械能的转化与守恒”扩展到“自然界中各种能量在转化和转换中总能量是否会守恒”的基础。

(1) 能量守恒定律

这部分内容，以科学家在寻找各种能量间的关系的过程中的一系列发现为线索，简略地介绍了人们在寻找不同的运动形式在相互转化中的某种联系时，抽象出来的一个共同的概念——能量，发现能量在数量上存在着某种确定的关系，并在大量事实和广泛的科学研究的基础上，最终建立了能量守恒定律。主要目的在于帮助学生树立科学的世界观，形成科学理论是发展的观念，也为学生能够在更加宽广的知识背景中去考虑问题，提高理论联系实际的能力奠定基础，也使学生有关能量的知识结构更加完整。

(2) 能源和能量耗散

能源是人类社会活动的物质基础。这部分内容，简要地介绍了人类利用能源的几个阶段，

以及能源利用过程中能量的转化过程，特别是提出了“能量耗散”对人类生存环境的影响。这对能源问题已成为突出的国际问题的今天，是非常有意义的，也是每个学生必须了解的内容。

本节的“思考与讨论”中，对能源问题提出的讨论，是一个质疑的范例。它引导我们考虑能量转化与转移中的方向性。从物理学角度研究宏观过程的方向性，在中学阶段只需用日常生活或学习中的一些简单的例子，让学生有个基本的认识就可以了。譬如，物体克服摩擦做功的过程中，要消耗机械能产生热量，但产生的热量不可能再全部转化为机械能。也要使学生认识到，在其他过程中也是如此。通过这些事例，使学生认识到，在能量的转化与转移的过程中，能量是守恒的，但能量的品质却降低了，可被人类直接利用的能在逐渐减少，这是能量耗散现象。所以说，能量虽然守恒，但我们还要节约能源。新一轮课程改革中，更加关注生产与生活中的实际问题，注重与社会的联系。教师要积极地组织学生进行讨论，并鼓励学生大胆地联系能源问题提出自己的看法和想法，培养一个公民应该具备的节约能源的意识。

在教学中，教师应要求学生通过文献查阅和调查研究的方法。本节内容的教学采用问题讨论教学法比较合适，但教师与学生课前都应精心地准备。

课堂讨论中，教师要引导学生逐渐认识能量是从更深的层次上反映物质运动和相互作用的本质，能量守恒定律是人们认识自然的重要工具，能源关系到人们的衣食住行，关系到国家的兴旺发达。提出“既然能量是守恒量，不可消灭，可为什么我们还要节约能源”的问题先让学生分组进行讨论，然后将讨论结果进行汇报、交流。

根据以上分析，对本节内容的教学提出以下教学设计方案。

教学片段

首先，发动学生进行素材的采集与整理。可以预先布置学生通过上网搜索、在图书资料中检索等方式查找教科书方框中所提示的与形成和建立能的转化与守恒思想有关的资料。通过调查访问的方法搜集本地生产、生活中与能源有关的材料，并要求学生通过小论文的形式，对自己所占有的资料进行分析研究，形成自己的观点。

其次，根据教科书的要求，针对学生现有的知识水平和认知水平编拟讨论提纲让学生进行学生课前自学，准备讨论。

①请你说说：人类在建立起能量守恒定律过程中经历了哪些主要的事件？哪些科学家作出了卓著的贡献？

②导致能量守恒定律最终确立的重要事实有哪些？能量守恒定律的发现是偶然的，还是人类对自然认识发展到一定阶段后必然的产物？

③有人曾经怀疑某种过程中“能量不守恒”，这种怀疑是否有价值？

④能量守恒定律是怎么表述的？在力学范畴内，能量守恒定律应该如何表达？

⑤能源是人类社会的物质基础，人类利用能源大致经历了哪几个过程？

⑥为什么说能源短缺和环境恶化已成为关系到人类社会能否持续发展的大问题？

⑦既然能量是守恒的，不可能消灭，为什么我们还要节约能源？

⑧什么叫能量耗散？你怎么看待能量耗散？

⑨你是怎么理解“能量的利用受方向性的制约”这句话的意思的？请你举例说明。

再次，课堂讨论。课堂讨论中，先以学习小组为单位，组织学生交流调查报告，针对讨论提纲进行讨论。再让各小组推荐代表汇报。教师要积极捕捉学生提出的有代表性的问题组织全

班学生开展课堂大讨论。在讨论中明确要点，解决问题。

最后，课外社会实践活动。请你调查一下附近的工厂企业和学校单位中能源的利用情况，在分析综合的基础上写一篇调查报告，向政府的有关部门提出自己的建设性的意见或建议。

3. 问题与练习

内容分析

本节中的几个练习题，主要是围绕生产和生活实践中的实际问题展开的，主要目的是为了培养学生关注社会、关注生活的意识，帮助学生提高理论联系实际的水平。

第1题，与日常生活问题挂钩，既是为了培养学生理论联系实际的能力，也是为了帮助学生通过知识的应用深化对能量守恒定律的理解。第2题属于综合应用问题，通过解题过程强化学生学以致用的意识，也可以促使学生关注我国的能源情况，对实际问题有一些基本的了解，形成正确的人生观和科学观。另外，学生在审题过程会在头脑中形成一幅相对而言比较综合的物理图景，这对培养学生的形象思维能力也有好处。第3题，这是一道引导学生关注社会、了解社会，激发学生为社会服务的意识的好题目。用好这种题目，也可以培养学生对社会的责任感，树立良好的公民意识，对学生的成长和发展会产生深远的影响。

解答与说明

1. 家用电饭锅是把电能转化为内能；洗衣机是把电能转化为动能；煤气炉燃烧时，是把化学能转化为内能；等等。

2. (1) 由题意可知，三峡水库第二期蓄水后，用于发电的水流量

$$Q=1.35\times10^4\ \mathrm{m^3/s}-3\ 500\ \mathrm{m^3/s}=1.0\times10^4\ \mathrm{m^3/s}$$

每秒转化成的电能即发电功率是

$$P=\frac{mgh\times20\%}{t}=\frac{\rho Vgh\times20\%}{t}=1.0\times10^3\times1.0\times10^4\times10\times100\times20\%\ \mathrm{J/s}=2.0\times10^9\ \mathrm{J/s}$$

发电功率最大为 $2.0\times10^9\ \mathrm{W}=2.0\times10^6\ \mathrm{kW}$。

(2) 设三口之家每户家庭的生活用电功率为1 kW，考虑到不是每家同时用1 kW的电，我们假设平均每家同时用电0.5 kW，则三峡发电站能供给 $\frac{2.0\times10^6}{0.5}=4.0\times10^6$ 户用电，人口数为 $3\times4.0\times10^6=12\times10^6$ 人，即可供12个百万人口的城市的生活用电。

3. 略。可以布置学生做做能源的合理利用方面的小课题，在培养学生课题意识的同时，也可以提高分析问题和解决问题的能力。

三、教学设计案例

机械能守恒定律

【教学目标】

(1) 知道机械能的概念，理解物体的动能和势能可以相互转化。

(2) 理解机械能守恒定律的内容和守恒的条件。

(3) 学习从物理现象分析、推导机械能守恒定律及适用条件的研究方法。

(4) 会判定具体问题中机械能是否守恒，能运用机械能守恒定律分析实际问题。

(5) 体会科学探究中的守恒思想，领悟运用机械能守恒定律解决问题的优点。

【教学重点】

学习推导机械能守恒定律，理解机械能守恒定律的含义，明确机械能守恒定律的条件，并运用机械能守恒定律解决实际问题。

【教学难点】

理解机械能守恒定律的内容及条件，进一步分析物体系统内所具有的机械能，判断研究对象在所经历的过程中机械能是否守恒。

【教学器材】

钢球、泡沫塑料球、细线、小球、钉子，铁架台、弹簧振子，气垫导轨等。

【教学过程】

一、导入新课

1. 提出课题——机械能守恒定律。

2. 力做功的过程也是能量从一种形式转化为另一种形式的过程，物体的动能和势能总和称为机械能，举例：通过重力或弹力做功，动能与势能相互转化。(展示图片和视频)

瀑布、荡秋千、过山车、撑杆跳高等

师生共同分析上述各个过程中能量转换及重力、弹力做功的情况。

实验 1：(激疑) 钢球用细绳悬起，请一同学靠近，将钢球拉至同学鼻子处释放，摆回时，观察该同学反应，并进行分析。

二、新课教学

1. 寻找守恒量

实验 2：将小钢球用细线悬挂，一端固定在小黑板的上部，让小球摆动，通过实验发现，小球可以摆到跟释放点等高处，再用一钉子固定在小黑板上某点挡住细线，再观察，发现仍等高(如图 7-12)。

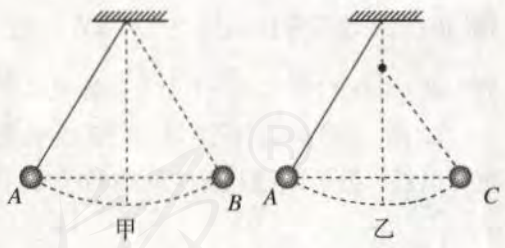


图 7-12

引导学生讨论探究摆动中能量转换，分析实验现象所展示的能量转化特点，实验 1 和实验 2 中小球在摆动过程中通过重力做功，势能与动能互相转换：

重力做正功，重力势能减少，动能增加；

重力做负功，重力势能增加，动能减少。

小球摆动过程中总能回到原来高度，好像“记得”自己原来的高度，说明在摆动过程中有一个物理量是保持不变的，是什么呢?

重力势能与动能的总和保持不变，也就是机械能保持不变。

实验 3：将小钢球换成泡沫塑料球再做，观察现象，发现泡沫塑料球很快停下来。分析原

因是受空气阻力的作用。

提出问题：小球有时能摆到原来的高度，有时不能摆到原来的高度。什么情况下机械能保持不变？

2. 探究规律，找出机械能不变的条件。

提出研究方法：在探究物理规律时，应该是由简单到复杂，逐步深入，先对简单的物理现象进行探究，然后加以推广深化。在动能与势能转化的情景中，自由落体（只受重力）应该是比较简单的。

(1) 只受重力作用时的分析

引导学生自主探究，不失一般性，设物体下落过程中经过高度为 h_1 的 A 点时速度为 v_1，经高度 h_2 的 B 点时速度为 v_2（如图 7-13）。用学习过的知识（牛顿运动定律或动能定理），分析物体下落过程中在 A、B 两位置的机械能之间的数量关系。

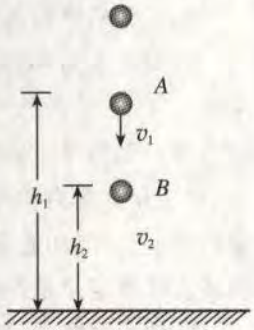


图 7-13

A 点到 B 点，$W_G=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2=E_{k2}-E_{k1}$

由重力做功和重力势能变化的关系有

$W_G=mgh_1-mgh_2=E_{p1}-E_{p2}$

得到　$E_{k2}-E_{k1}=E_{p1}-E_{p2}$　　①

移项后，得　$E_{p1}+E_{k1}=E_{p2}+E_{k2}$　　②

即　$E_1=E_2$

引导学生讨论①式的含义是什么？②式的含义又是什么？

在表达式①中左边是物体动能的增加量，右边是物体重力势能减少量，该表达式说明：物体在下落过程中，重力做了多少正功，物体的重力势能就减小多少，同时物体的动能就增加多少。在表达式②中，左边是物体在末位置时的机械能，右边是物体在初位置时的机械能，该式表示：动能和势能之和即总的机械能保持不变。

(2) 只有重力做功时的分析

上述结论是在物体运动过程中只受重力作用的时候得到的，如果物体沿光滑斜面下滑，上述结论成立吗？(学生分析，推导)

在沿光滑斜面下滑过程中，斜面的弹力不做功，由动能定理分析，通过重力做功，使重力势能转化为动能，总的机械能保持不变。

教师进一步提出问题情景：如果物体沿光滑曲面滑下，上述结论成立吗？如何进行分析？(由学生通过重力势能的分析中将曲面看成无数个小斜面的处理方法，得出结论。)

小结：在只有重力做功的情形下，不论物体做直线运动还是曲线运动，总的机械能保持不变。进一步分析实验 2 中摆球摆动过程，受重力与细线拉力，两拉力方向始终与运动方向垂直，不做功，则上式推导过程及结论都相同。

(3) 分析守恒条件

分析讨论：为什么泡沫塑料球不能摆到等高处？

泡沫塑料球受到的阻力不能忽略，前面的推导过程中

$$W=W_G+W_f,\ E_{p1}+E_{k1}\neq E_{p2}+E_{k2}$$

从能量转化角度看，有机械能转化为热能，所以机械能将不断减少。

通过实验和理论推导的证明：系统内只有重力做功时，物体系统内的机械能守恒。(此处

进一步说明：重力势能是物体和地球组成的系统具有的）

（4）只有弹力做功时的分析

提出问题：势能包括重力势能和弹性势能，只有弹力做功时，机械能也守恒吗？

实验 4：气垫导轨上的水平弹簧振子，观察振动过程。

由同学分析振动过程的能量转化和实验结论，结合前面已经探究过的弹力做功与弹性势能的关系，类比重力做功，进行定性分析。

结论：系统内只有弹力做功时，系统机械能守恒。

（5）分析守恒条件，归纳结论

在只有重力和弹力做功的物体系统内，动能和势能可以互相转化，而总的机械能保持不变。

（6）引导学生分析结论，加深理解：

“在只有重力和弹力做功的物体系统内”是机械能守恒的条件，而“总的机械能保持不变”是结论。“动能和势能可以互相转化”是系统内重力或弹力做功的结果。从能量转化角度看，机械能守恒定律是普遍的能量守恒定律的一种特殊情况。

条件：系统内只有重力（或弹力）做功。

公式：$E_{p1}+E_{k1}=E_{p2}+E_{k2}(E_1=E_2)$

（7）共同分析教科书中的思考与讨论：

一小球在真空中下落，另有一质量相同的小球在粘滞性较大的液体中匀速下落，它们都从高度为 h_1 的地方下落到 h_2 的地方，在两种情况下，重力所做的功相等吗？重力势能各转化为什么形式的能？机械能守恒吗？

三、巩固应用

例题 1：分析下列情况下机械能是否守恒？

A. 跳伞运动员从空中匀速下落过程

B. 物体以 5 m/s² 的加速度做直线运动

C. 物体做平抛运动过程

D. 物体在细线拉力作用下沿光滑斜面上滑过程

通过以上具体问题，巩固对机械能守恒条件的理解和掌握。其中选项 B 要求学生联系各种实际的运动情景进行分析，如当物体沿光滑斜面以 5 m/s² 的加速度做直线运动时机械能守恒，而以 5 m/s² 的加速度竖直下落时则不守恒；选项 D 用意是让学生通过辨析清楚系统内只有重力或弹力做功机械能守恒。

例题 2：把一个小球用细绳悬挂起来，就成为一个摆（如图 7-14），摆长为 l，最大偏角为 θ。小球运动到最低位置时的速度是多大？

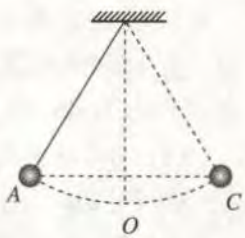


图 7-14

分析：这个问题直接用牛顿第二定律和运动学的公式来处理，需要用高等数学。通过前面的分析，我们知道小球在摆动过程中机械能守恒，可以用机械能守恒定律求解。

教师引导学生对解答进行评价、修正，让学生认识到，物体重力势能大小与所选取的参考平面（零势能面）有关；而重力势能的变化量是与所选取的参考平面无关的。在讨论物体系统的机械能时，应先确定参考平面。

（归纳）使用机械能守恒定律解题的一般步骤：

1. 受力分析，判断是否符合机械能守恒定律的条件——只有重力或弹力做功；

2. 列出初、末两个状态的机械能(E_A、E_B)；

3. 根据机械能守恒定律列出等式($E_A=E_B$)。

例题 2 拓展：

(1) 若小球摆到最低点时细绳断裂，小球水平飞出时离地高度为 h，则小球落地时的速度多大?

(2) 讨论能否用机械能守恒定律求出细绳断裂后小球从飞出到落地经过的时间和落地时速度的方向?

教师引导学生对不同的解题方法进行讨论、比较和评价。

教师评价：问题 (1) 的平抛运动问题可用牛顿定律和运动的合成与分解知识来求解，也可以用机械能守恒定律求解。比较两种方法，用机械能守恒定律求解更简练。问题 (2) 中涉及时间和速度矢量的方向，则只能用牛顿定律和运动的合成与分解知识来求解，不能用机械能守恒定律求解。

在应用的基础上，归纳使用机械能守恒定律解题的一般步骤：

1. 受力分析，判断是否符合机械能守恒定律的条件——只有重力或弹力做功；

2. 列出初、末两个状态的机械能(E_1、E_2)；

3. 根据机械能守恒定律列出等式求解($E_1=E_2$)。

(引出应用机械能守恒定律解题的优越性)

机械能守恒定律不涉及运动过程中的加速度和时间，用它来处理问题要比牛顿运动定律方便；应用机械能守恒定律解决问题，只需考虑运动的始末状态，不必考虑两个状态之间过程的细节。如果直接用牛顿运动定律解决问题，往往要分析过程中各个力的作用，而这些力往往又是变化的，因此一些难以用牛顿运动定律解决的问题，应用机械能守恒定律则易于解决。这是用机械能守恒定律解题的优越性，但它无法解决涉及时间和有关矢量计算的问题，说明用机械能守恒定律解题也有局限性。

【教材设计说明】

机械能守恒定律一节的内容与本章的各节内容有紧密的逻辑关系，是全章知识链中重要的一环，机械能守恒定律的探究建立在前面所学知识的基础上，而机械能守恒定律又是普遍的能量守恒定律的一种特殊情况，教材通过“做一做”小实验展示了与探究守恒量的联系，通过多个具体实例，先猜想动能和势能的相互转化的关系，引出对机械能守恒定律及守恒条件的探究，联系重力势能和重力做功及弹性势能与弹力做功的关系的学习，由定性分析到定量计算，逐步深入，最后得出结论，并通过应用使学生领会定律在解决实际问题时的优越性。学生在此前已经历了探究守恒量、重力势能的概念和弹性势能的表达式的学习，知道机械能的概念，了解力做功过程也是能量从一种形式转化为另一种形式的过程，这些知识是本节内容学习的基础。

本节教学内容的重点是通过机械能守恒定律的推导知道机械能守恒定律的含义，理解机械能守恒定律的条件和机械能守恒定律的实际应用；而正确分析物体系统内所具有的机械能，判断研究对象在所经历的过程中机械能是否守恒及定律的应用是学生学习中的难点。在教学设计时，要根据教材内在的逻辑关系和学生认知的发展规律来设计教学活动的基本流程，力求达到最优化的组合。本设计力图通过生活实例和物理实验，展示相关情景，激发学生的求知欲，引出对机械能守恒定律的探究，体现“从生活走向物理”的理念。通过建立物理模型，由浅入深

进行探究，让学生领会科学的研究方法，并通过规律应用巩固知识，初步掌握运用能量转化和守恒来解释物理现象及分析问题的方法，体会科学探究中的守恒思想，体会物理规律对生活实践的作用，领悟机械能守恒规律解决问题的优点，形成科学价值观。

（浙江省义乌中学　王树民）

四、教学资源库

（一）概念、规律和背景资料

1. 费曼谈能量守恒（1）

能量守恒更加困难一点，因为这一次我们有一个不随时间变化的数，但这个数不代表任何特定的东西。我想用一个简朴的类比来对它做一点说明。

我想要你设想一位母亲有一个孩子，这位母亲把孩子单独留在一间房间里，并且给了他28块绝对不可能毁坏的积木。那个孩子成天玩着那些积木，然后当母亲回来的时候，她发现房里确实有28块积木；她就检查出积木的数目是在所有时间里一直守恒的。这样过了几天，然后有一天，当她回来的时候只有27块积木了。然而，她发现在窗外有一块积木，那是小孩把它扔出去的。那么，你在评价守恒定律是否成立的时候，你必须盯住你要检验的那些东西不会越墙而去。同样的事情也会以其他的方式出现，如果有一个男孩来同这个孩子玩，并且带了一些积木进来的话。当你谈论守恒定律的时候，你显然要考虑到这些事情。假定有一天，母亲回来数积木块的时候，发现只有25块了，但她疑心那个孩子把另外三块积木藏在一个小的玩具盒里面了。于是她说，“我要打开这个盒子。”而他说，“不，你不能打开盒子。”这位非常聪明的母亲会说，“我知道这个盒子空的时候重16盎司(1盎司=28.35 g)，而每一块积木重3盎司，因而我要做的事是去称量这个盒子。”她把积木块的总数加起来，就会得出公式：

$$\text{看到积木块的数目}+\frac{\text{盒子的重量}-16\text{ 盎司}}{3\text{ 盎司}}$$

结果重新得到28。这种做法在一段日子里是成功的，然后有一天检查出来的总数又不对头了。然而，她注意到污水槽的水平面升高了。她晓得当水槽里没有积木的时候其水深是6英寸，而在水中有一块积木的时候会升高1/4英寸（1英寸=2.54 cm），于是她在她的公式里再加上一项，现在她有了一道新的公式：

$$\text{看到积木块的数目}+\frac{\text{盒子的重量}-16\text{ 盎司}}{3\text{ 盎司}}+\frac{\text{水面高度}-6\text{ 英寸}}{1/4\text{ 英寸}}$$

并且加起来的结果再次得到28。当那个孩子道高一尺的时候，那位妈妈就魔高一丈，在她的公式里添加更多的一项又一项，其中每一项都代表的是积木块，但从数学的立场看那是一些抽象的运算，因为在后面那些项里并没有出现积木。

现在我做出我的类比，并且告诉你们在这个比喻和能量守恒之间，哪一些是共同的，哪一些是不同的。首先假定在一切的情况下你都没有看见过任何积木块。根本没有“看到积木块的数目”那一项。那么，那位母亲就总是在计算诸如“盒子里的积木”，“水槽里的积木”等许多项。对能量说来有一点差别，就我们所知而言，在能量的情况下根本没有什么一块一块的积木。而且，与积木的情况不同，对能量说来那些数值并不是以整数出现的。我要假定那位可怜

的母亲也许会计算出有一项的结果是 $6\frac{1}{8}$ 块积木，算出另一项的结果是 $\frac{7}{8}$ 块，还有一项是 21 块，加起来仍然是 28。那就是能量的数值看起来的样子。

我们关于能量已经发现了的是，我们有了由一系列规则构成的一个方案。从每一组不同的规则，我们能够为每一不同种类的能量计算出一个数值。当我们把来自所有不同形式的能量的这些数统统加起来，它总是给出同样的总数。但至今我们不知道能量有什么真实的基本单元，不知道有什么作为能量基元的微小滚珠。它是抽象的，纯粹数学化的，有这样的一个数，无论什么时候你计算它，它都是不改变的。我不能够把它解释得比这更明白了。

能量具有各种类型的不同形式，就像上面说的盒子里的积木，水槽里的积木等一样。有由运动产生的叫做动能的能量，由引力作用产生的能量（它被称为引力势能），热能，电能，光能，在弹簧等物体中的弹性能，化学能，核能等，还有一种一颗粒子仅仅由于其存在就具有的能量，一种直接取决于其质量的能量。这最后一种能量是爱因斯坦的贡献，你们肯定都已知道。$E=mc^2$ 就是我正在谈论的定律的著名方程。

2. 费曼谈能量守恒（2）

在自然界有好些有趣的现象，向我们展示了关于能量的一些稀奇古怪的问题。新近发现了一种叫做类星体的东西，它们离我们非常远，并且以光和无线电波的形式辐射出那么多的能量，我们不禁要问，它从哪里得来这些能量呢？如果能量守恒是对的话，类星体辐射出了如此巨额的能量之后，它的状况必定与辐射之前不同。问题是，那些能量是来自引力能吗——是不是那个东西在一种不同的引力条件之下，发生了引力坍缩？谁也不知道。你也许会提出说，能量守恒定律是不对的。好了，当一样东西像类星体那样还没有被研究透彻（类星体遥远到天文学家不容易观察它们），那么如果这样一个东西似乎同一些基本定律抵触的话，极不可能的是那些基本定律错了，通常正是由于对那些东西的细节还不清楚的缘故。

另一个关于能量守恒定律的应用的有趣例子是一颗中子蜕变为一颗质子、一颗电子和一颗反中微子的反应。起先人们设想的是一颗中子转变为一颗质子加上一颗电子。但衰变前后所有粒子的能量都是可以测量的，而一颗质子和一颗电子的能量加起来达不到中子的能量。存在着两种可能性。可能是能量守恒定律不成立了；事实上玻尔一度提出，或许能量守恒定律只是在统计意义上成立，即只对平均值成立。但后来的结果表明，另一种可能性才是对的，能量收支不平衡是因为有一样别的什么东西跑掉了，那就是我们现在称为一颗反中微子的东西。反中微子把能量带走了。你会说，反中微子不过是为了保持能量守恒而设想出来的东西。但它还使得其他许多事情正确无误，例如动量守恒定律和其他一些守恒定律，并且新近已经直接证实了，这样的中微子是确实存在的。

这个例子说明了一点，我们怎么样有可能把我们的定律推广到我们尚未清楚明白的领域呢？为什么因为我们在这里检查过能量守恒是对的，我们就总是那么有信心在遇到一种新的现象时能够说要满足能量守恒定律呢？每每你会偶尔在文章里读到，物理学家发现了他们所喜爱的定律之一是错误的。那么把一条定律的正确性推广到你还没有来得及看清楚的领域，是不是犯了错误呢？如果你永远也不说一条定律在你还没有看清楚的领域是对的，那你就不会知道什么新的东西。如果你发现的那些定律仅仅是在你已经完成观察的领域之内，那么你永远也不能做出新的预言。而科学的惟一用处，就是在不断进步的过程中尝试做出新的猜想。因而我们总要去做的事，乃是不顾一切往前进。至于说到能量，最可能的事情就是它在别的地方也是守恒的。

当然这意味着科学不总是确定的；当你对一个你未曾直接体验过的领域提出主张的时候，你必定是不确定的。但是我们总是必须对我们还没有仔细考察过的领域提出设想，不然整个事情就一筹莫展了。例如，一个物体的质量在它运动的时候发生变化，这是因为能量守恒的缘故。由于质量与能量的关系，和运动相联系的那部分能量表现得像一份额外的质量，因而物体在它们运动时就会变重。牛顿相信的不是这种情况，他相信物体的质量是保持恒定不变的。当发现了牛顿的观念错了的时候，每一个人都禁不住说物理学家发现了他们过去错了，这是多么可怕的一件事啊。为什么那些物理学家过去以为他们是对的呢？新发现的修正效应一般是很小的，并且只在你接近光速时才表现出来。如果你转动一只陀螺，它的重量与你没有转动它的时候是一样的，其差别是非常非常小而觉察不到的。那么他们是否应当说，“如果你运动得不那么快，如此等等，那么质量不就没有变化了吗？”那样看来就是如此了。不，因为如果做过了的实验，只限于用木制的、铜制的和钢制的陀螺，那么他们本来应当说的是，“木制的、铜制的和钢制的陀螺，当它们的运动不比什么什么快的时候会怎么样怎么样……”你看，我们不知道在一个实验里我们所需要知道的所有条件，并不知道一个辐射性的陀螺是否具有一种守恒的质量。因而，我们为了发挥科学的一点点用处，就要提出猜想。为了避免简单地描述已经做过的那些实验，我们要在它们观察到的范围之外提出定律。这样做一点也没有错，尽管那样做事实上会使得科学变得不确定。如果你先前想象科学是完全确定的，噢，那只是你那方面的一个失误。

（选自《物理定律的本性》，R. P. 费曼著，关洪译，湖南科学技术出版社）

3. 能量守恒定律的确立

尽管早在17世纪初，伽利略就已接近机械能守恒的思想，后来莱布尼茨又引入“活力”的概念并明确提出“活力守恒”的观念，但是一直到19世纪初，始终没有一个人能够提出能量守恒定律。只是到了19世纪30年代，人们通过对蒸汽机的长期使用和研究，对热运动向机械运动的转化积累了丰富的知识；同时，在电学、化学和生物学等各方面的实验研究中也都已取得很大进展以后，各种运动形式之间的联系和相互转化问题才普遍引起人们从多方面的注意。另一方面，长期以来人们反复设计、试制永动机的失败教训也从反面启示人们想到能量的守恒，而对形而上学的热质说的冲击也为扫除人们思想上的障碍创造了有利的条件，所有这一切就为能量守恒定律的发现，造成了一个万事俱备，势在必行的局面。果然，瓜熟蒂落，到了19世纪30年代末、40年代初，有分别属于西欧的四五个国家，从事七八种专业的十几位科学家，分别通过不同的途径，各自独立地发现了这个伟大的定律。下面将重点介绍这十几个人中三个人的工作，这三个人就是迈尔、焦耳和亥姆霍兹。

德国医生出身的迈尔主要是通过对动物热的研究达到发现能量守恒定律的。1840年，迈尔在一艘从荷兰驶往东印度的船上当随船医生。当船航行到热带地区时，他发现海员患者的静脉血比在欧洲时要红。在拉瓦锡燃烧理论的启示下，他认为这是由于血液含氧较多的缘故。因为在高温的情况下，人的机体只需要吸收食物中较少的热量，所以机体中食物的燃烧过程减弱了，而在静脉血里留下了较多的氧。由此出发，迈尔认为，食物所含的化学能，就像机械能一样，可以转化为热。他还听到海员们闲谈时说，暴风雨时海水比较热，这也启发他联想到热与机械运动的相当性。他认为落体在重力影响下获得“活力”，与气体受压缩时产生热具有类似性。于是，在1841年航行结束后，他写了一篇论文《论力的量和质的测量》，论述各种自然力之间的相互转化。可惜由于缺少精确的实验根据而未获发表。这激励迈尔发奋自学了数学和物理，并接受朋友的劝告，决心用实验来证实自己的思想。有志者事竟成，1842年他在德国

《化学与药学年刊》杂志上发表了题为《论无机界的力》的论文。文中迈尔从“无不生有，有不变无”的哲学观念出发，得出了“力就是不灭的、能够转化的、无重量的客体”的结论。他所说的“力”就是“能量”的意思。他把这个思想运用到“落体力”（势能）、“运动的力”（动能）和热的转化与守恒，并根据气体比热的测量值，在世界上第一个得出了热的机械当量（即热功当量）为 3.58 焦耳/卡①。这样，迈尔就成了第一个发表能量守恒定律的人。但是，由于这篇论文是发表在德国化学刊物上，没有引起英国物理学界和工程界的注意，所以英国的焦耳在后来又独立地发现了这一定律，并且和迈尔争起了优先权。

1845 年，迈尔又自费出版了一篇更重要的论文《论有机运动与新陈代谢》。文中他首先说明了“力”的守恒和转化定律，认为它是支配宇宙的普遍规律；接着考察了 5 种不同形式的“力”，即“运动的力”、“下落力”、“热”、“电”和“化学力”；描写了运动转化的 25 种情况，并将热功当量的值由 3.58 焦耳/卡修改为 3.60 焦耳/卡。

1848 年，迈尔发表了《通俗天体力学》一文，文中他解释了陨石的发光是由于它们在大气中损失了动能，并应用能量守恒定律解释了潮汐的涨落。就在这一年，英国的焦耳发表文章，和迈尔展开了关于测定热功当量优先权的争论。1851 年迈尔又写成了《论热的机械当量》一文，保护了自己的优先权。

迈尔虽是第一个发表能量守恒定律的人，但他对定律的表述不够完善。这不仅是用词不准，即用“力”代替“能量”的问题（当时几乎人人都有这个问题），而且还有其他方面，例如开始用 mv，后来又用 mv^2 来表示“运动的力”。特别是，他的研究工作主要是从哲学观念出发进行推理，除了机械功和热的关系外，缺乏准确的数学计算和实验的证实。在这方面他不如后来居上的焦耳。

英国青年业余物理学家焦耳，是从对电磁现象的研究入手独立发现能量守恒定律的。

焦耳是曼彻斯特一个酿酒师的儿子。为了提高他父亲所创办的酿酒厂的工作效率，他企图以电磁机（即磁电式发电机）代替蒸汽机，他很早就关心各种物理力，特别是在当时已显示出其发展前景的电力的应用价值的研究。

焦耳一开始就沿着正确的道路前进，他倾力于实验工作，在 1840 年就发现了关于电流热效应的焦耳定律。在实验过程中他认识到机械、热、电、化学力等是相当的，并可以互相转化，于是他致力于热功当量的实验测定，初步成果反映到 1843 年 8 月 21 日宣读的一篇论文《磁电的热效应和热的机械值》中，他得到：“使 1 磅水增加 1° F 的热量等于把 838 磅物体提高 1 呎的机械功。”用现在的通用单位，热功当量的这个测量值约为 4.51 焦耳/卡。在该文的附录中他又补充说：“最近，测定水通过窄管时所产生的热，我得到使 770 磅物体提高 1 呎的机械力可使 1 磅水增加 1° F。我将立即重复并扩展这些实验，以证实自然界的力根据创世主的意志是不能毁灭的，凡是消耗了机械力的地方，总能得到相当的热。”可是，这里已被焦耳用实验证实了的热只是能量变换的一种形式的结论以及焦耳所透露的普遍的能量守恒定律的思想，却受到一些大物理学家的怀疑和不信任。

焦耳决心以更多、更精确的实验证明他的结论。1844 年他又做了测定空气在压缩和膨胀时所产生的热量的实验，用这种新的方法得到的热的机械当量的值分别为 4.27 焦耳/卡和 4.23 焦耳/卡。这些实验的结果反映在他以《论由空气的胀缩所产生的温度变化》（1845 年）

① 当时，热功当量的值都是用英制单位给出的，为了使读者便于与现在的通用值 4.18 焦耳/卡比较，文中做了换算，下同。

的论文中。当他要求在英国皇家学会宣读这篇论文时，竟然遭到拒绝。直到1847年6月，英国科学促进协会才勉强接受了这篇论文。但论文宣读后，引起了当时已经很有名气的青年物理学家威廉·汤姆逊的注意。汤姆逊认为，他从焦耳那里得到以前从未有过的关于热的新观念。汤姆逊即后来的开尔文勋爵（Lord Kelvin），这是由于他对科学的重大贡献，而被英国皇家赐予了贵族封号，现在国际单位制中温度的单位“开”，就是为纪念他而命名的。

1849年6月，英国皇家学会刊印了焦耳的重要论文《论热的机械当量》，这是焦耳进行了摩擦生热的实验后写成的。文中焦耳总结了自己以往的工作，并介绍了现在经常被写入物理教科书上的那个利用摩擦生热测定热功当量的经典实验。焦耳用水做实验所得的结果是：“要产生1磅水（在真空中称量，温度55°F到60°F之间）升高1°F的热量，需要花费相当于772磅重物下降1呎所做的机械功”。这个值就是4.16焦耳/卡。这个测量结果同30年后，即1879年由美国物理学家罗兰所做的测定，在0.025的误差范围内是相一致的。一个物理测量值在30年内仍能保持不变，这在物理学史上是极为罕见的，焦耳实验的精确性由此可见一斑。

此后，焦耳还继续进行他的实验测量，一直到1878年，他前后用了近40年的时间，做了400多次实验，确定了热功当量的精确数值，为能量守恒定律的建立提供了坚实可靠的实验基础。

军医出身的德国生理学家和物理学家亥姆霍兹在数学和物理上造诣深厚，是从试图用物理学方法研究生理学而走上物理学的研究道路的。他反对德国传统的生理学思想，力排用非物理学的生命力论来解释生命过程的做法，积极倡导用物理学和化学的技术来发展生理研究。他认为，生命力论实际上是赋予了生命体以永动机的性质。所以他的论证也是由永动机不可能实现入手的。在1847年自费出版的《论力的守恒》一书中，亥姆霍兹论述了活力守恒原理和力的守恒原理。他把永动机之不可能同中心力（即有心力）的保守性相联系，得出在这种力的作用下“系统中的张力和活力之和是始终不变的”。他所说的“张力”和“活力”就分别指的是势能和动能。亥姆霍兹把他所得出的能量守恒原理推广到光、热、电磁现象、化学运动以及生物机体内进行的过程上，指出“这一定律与自然科学中任何一个已知现象都不矛盾”。亥姆霍兹的著作中包括了迈尔的深刻思想，采用了焦耳等人的实验数据，充分地运用了精确的数学方法和严密的逻辑推理，使用了物理学家惯用的语言，因而便于被物理学家所理解和接受。他在促使人们最终确认能量守恒定律上起着重大的作用。

除了上述这三个人以外，在独立发现能量守恒定律的众多科学家中还有英国律师出身的电化学家格罗夫、丹麦工程师格尔丁、法国的工程师赫因以及在前面提到过的德国化学家莫尔等。还有一个人值得具体提上两句，这就是法国工程师萨迪·卡诺，他是关于热机循环的卡诺定理的提出人。他早在1830年就已经认识到了“热不是别的什么东西，而是动力，或者可以说，它是改变了形式的运动”，并由此得到了一个普遍的命题：“自然界中存在的动力，在量上是不变的，准确地说，它既不能产生，也不能消灭。”他还给出了热功当量的数值——3.63焦耳/卡。由上述内容看，卡诺应是世界上最早发现能量守恒定律的人。遗憾的是，1832年他死于霍乱，没有来得及发表自己的见解。直到1878年，他的一束遗稿被发现，这些见解才得到公开发表，可这时能量守恒定律早已确立多年了。

4. 机械功的定义和计算

机械功是所有广义功中最基本，也是最重要的一类。实际上，顾名思义，广义功的概念是由机械功推广而来的。由于机械功是系统机械能传递与转化的量度，所以把它与能量，特别是机械能分开来讨论是不可能的。以下我们一般把机械功就简称为功。

一个质点 m，在恒力 $\boldsymbol{F}$ 的作用下发生了一段有限的直线位移 $\Delta\boldsymbol{r}$，$\boldsymbol{r}$ 是质点 m 相对于所选的参考系固定的任意点 O 的位置矢量，$\Delta\boldsymbol{r}$ 与 $\boldsymbol{F}$ 之间的夹角为 θ，如图 7-15，则力 $\boldsymbol{F}$ 对该质点所做的功 W 被定义为

$$W=\boldsymbol{F}\cdot\Delta\boldsymbol{r}=\boldsymbol{F}\cdot|\Delta\boldsymbol{r}|\cdot\cos\theta \tag{1}$$

这个定义式是说，恒力对质点在一段直线位移上所做的功，等于该力与质点位移的标积，或说等于力的大小、位移的大小及力与位移间夹角的余弦三者的乘积。

由这个定义式可以讨论几个问题。

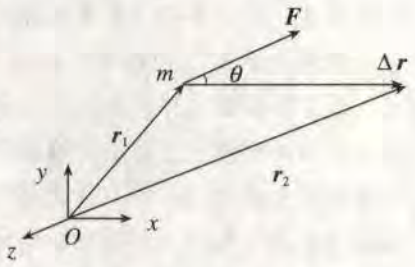


图 7-15

(1) 质点是一种理想模型，实际中并不存在，对质点定义功，是为了概念和计算的精确。在功的定义中涉及的(线) 位移，原则上也只对质点有定义；经推广，可用于做平动的刚体及一般力学系统的平动分运动。

但是，在现行的初中物理教材中没有介绍过质点模型；高中教材中虽做了介绍，但在其力学的动力学部分中根本没有使用，所以把做功与被做功的对象统称为“物体”。这样做的一个好处是，可以使初学者更容易理解“功是能量变化的量度”这一本质。“能量变化”是必定要发生在实际物体之中或实际物体之间的。

(2) 凡是把被做功的对象称之为“物体”的教材，对做功过程中发生的位移都说是“力的作用点的位移”或“物体的位移”。

力的作用点也称为物体的受力点，这也是一个抽象的概念，实际中不存在物体的受力部位是一个没有尺寸大小的几何点的情况。如果物体的受力部位比较集中，那么在一定条件下可以把受力部位视为一个点，这就是力的作用点。例如，用一根细绳牵引物体，那么物体上与绳的连接部位就可以视为绳对物体的拉力的作用点。这里，绳为细绳是条件。所以，所谓“作用点的位移”，一般应理解为物体受力部位能视为质点时该质点的位移。

如上所言，位移只对点有定义。所以，所谓“物体的位移”是指物体可以视为质点时的位移。例如，对一个只做平动的刚体就可以言及它的位移；对于一般物体的平动分运动也可以言及位移。如果这样的位移是在某个力的作用下发生的，就可以用 (1) 式计算这个力在该位移上对物体做的功。前面已经提过，在现行的初、高中教材中都把被做功的对象称为“物体”，如说“物体在力的方向上通过的距离”、“物体……在力的方向上发生一段位移”等，这里的“物体”都应理解为可以抽象成质点的。

(3) 功的计算与参考系的选择有关，(1) 式须对指定参考系应用。(按习惯，凡不特别说明的，都是以地面参考系为指定参考系。)

做功的两个必要因素——力和位移与参考系的关系是不同的。力学中常见的作用力，有的只和相互作用的质点间的距离有关，如万有引力（含重力）、弹性力，而摩擦力本质是分子力和库仑力，它们也是由相互作用的质点间的距离决定的；有的由宏观上看只与质点间的相对速度有关，如介质阻力。但由经典力学的伽利略变换可知，质点间的距离与彼此间的相对速度与参考系的选择无关。所以，在经典力学范围内，作用力与参考系的选择无关。但是位移作为一个运动学的量，与参考系的选择有明显的关系。这样，综合起来看，一个作用力的功有相对性，即与参考系的选择有关，这是由受力质点的位移有相对性决定的。

(4) 在注意了功的相对性之后，再来讨论一个有关位移的问题。由于实际中被做功的对象都是有大小尺寸的物体，所以有时会发生力的作用点（受力质点）在物体上改变位置的情况。

作用点的位置改变，不算为作用点对指定参考系发生位移，在这个改变上该力没有对物体做功。例如，如图 7-16 所示，手捏住一端固定于墙壁上的绳并在绳上滑动，绳上不同点顺次充当手对绳的摩擦力 $\boldsymbol{F}$ 的作用点；但各作用点均未对指定参考系（地面）发生位移，故这个摩擦力对绳不做功。又如，如图 7-17 所示，子弹头射入一固定于地面的木块中，弹孔壁上的不同点（实际上是一圈）顺次充当子弹对木块的摩擦力 $\boldsymbol{F}$ 的作用点；但各作用点均未对指定参考系发生位移，故这个摩擦力对木块不做功。但是，若木块不固定，在子弹射入并停止在其中的过程中，相对地面发生了一段直线平动位移 $\Delta \boldsymbol{r}$，则在这个位移上 $\boldsymbol{F}$ 对木块做功，若将 $\boldsymbol{F}$ 视为恒力，则这个功为 $\boldsymbol{F} \cdot \Delta \boldsymbol{r}$。

图 7-16

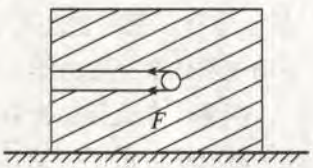


图 7-17

（5）不同的书中会出现“力做功”及“物体做功”两种提法。那么，这两种提法究竟有没有区别呢？首先应该说，从原则上讲这两种提法是通用的，没有什么不同，说物体做功，也是说物体对被做功的对象所施的力在做功。但仔细玩味，二者还是有些细微差别的。由功是能量的传递与转化的量度这一角度来看，提“物体做功”更实际一些，所以认为它只是“力做功”的简单说法似乎粗糙了一些。另外，对初中学生来说，“力做功”太抽象了，不如“物体做功”容易接受。当到了高层次的学习阶段，所遇到的做功的情况复杂起来了。用“力做功”的提法分析起来就会更精确。什么“作用力的功”、“反作用力的功”、“合力的功”、“分力的功”等等都能分得很清楚，表达得很简明。所以，“力做功”的提法会更好用。例如，对“合力的功等于诸分力功的代数和”这一定理的表述和证明，改用“物体做功”的提法就很难进行。

（6）在（1）式中，若有 $\frac{\pi}{2}<\theta \leqslant \pi$，则有 $W<0$，即力对物体做负功。由动能定理来看，力对物体做负功，是使物体的动能减少。

在习惯上，对这个问题还有一种提法，叫做“物体克服阻力做了功”。对这种提法存在着不同的理解。例如，某书中说：“一个力对物体做了负功，是因为这个力阻碍物体的运动，成为物体运动的阻力。在这种情况下，我们也常常说成是物体克服这个力做了功（取绝对值）。所以，摩擦力对前进中的机车做负功，也可以说成是机车克服摩擦力做了功。向上抛出的物体在向上运动时，重力对物体做负功，也可以说成是物体克服重力做了功。”由这段话可以看出，这里是把这两种提法视为是两件事，在前一件事中被做了负功的物体，在后一件事中成了对外做等值正功的物体，而隐含的转换条件就是“作用力的功与反作用力的功等值异号”。但是，这条“规律”并不是普遍存在的。所以有人对此提出异议，提出了“滑动的物体在克服摩擦阻力前进的过程中，究竟是物体的哪一个力做了正功；物体在克服重力上升的过程中，究竟是物体的哪个力做了正功”等问题。

（二）联系生活、科技和社会资料

1. 柴油机车的功率与效率

以柴油机产生动力通过传动装置驱动车轮的机车称为柴油机车。

柴油机不能自己启动，需要借助另一小功率动力机械或高压压缩空气在无负荷（与机车动

轴脱离联系）状态下才能启动。启动后要在一定的转速范围内才能获得足够的转矩和功率来驱动机车。而机车的速度变化非常大，从静止到最高速度，即动轮转速从0到最高转速。故不能将柴油机轴直接和机车轴连接，必须在两者之间配装一套可变转速和转矩的传动装置作媒介，将动力传送到机车动轴。传动装置应能充分发挥柴油机功率，又使机车具有良好的牵引特性，而且效率要高。常用的柴油机车的传动装置有机械传动装置、液力传动装置（液力耦合器和液力变扭器）和电力传动装置。

①机械传动装置：用机械方式变换机车动轮和原动机（柴油机）的转速比和转矩比以传递动力的装置。柴油机经过主离合器与多挡位的齿轮变速箱相连，变速箱的输出轴通过万向轴和车轴齿轮箱连接（或通过曲拐和连杆），驱动机车车轮。启动柴油机时，先将主离合器脱开，柴油机工作平稳后，闭合主离合器，使机车启动。随着机车速度的加快，柴油机转速也成正比地上升。到柴油机转速上升到最高转速时，必须即时换接齿轮变速箱的下一挡位，以减少变速箱输出轴和输入轴的转速比。换挡时，先降低柴油机转速，换挡完成后，再提高柴油机转速以增加机车速度，直至柴油机又达到最高转速，再换接到下一挡位。柴油机在每一变速挡位下的转速与机车速度成正比，它的功率也就基本上与机车速度成正比，因而柴油机几乎总不能发挥它的全部功率的潜力。机车牵引曲线只能呈阶梯形。阶梯的级数等于变速的挡位数。级数越多，功率的利用越好，但传动装置也越复杂、越重、越贵。柴油机车的传动装置一般为4～5级。

②液力传动装置：利用原动机驱动离心泵，使获得能量的工作液体（机车用油）冲击涡轮从而驱动车轮来实现传递动力的装置。1902年德国的费廷格提出了液力循环元件（液力耦合器和液力变扭器）的方案，即将泵轮和涡轮组合在同一壳体内，工作液体在循环流动，这种元件大大提高了液力传动装置的效率。

液力耦合器有相对布置的一个泵轮和一个涡轮，泵轮和涡轮的扭矩相等。涡轮转速略低于泵轮转速，两者转速之比即为液力耦合器的效率。液力耦合器用于机车主传动时，效率约为97%。液力变扭器除泵轮和涡轮外，还有固定的导向轮。涡轮与泵轮的扭矩之比称为变扭比，转速比越小则变扭比越大。在同样的泵轮转速下，涡轮转速越低则涡轮扭矩越大。因此，机车速度越低则牵引力越大。机车起动时牵引力最大。液力变扭器的效率只在最佳工况下达到最大值。现代机车用的液力变扭器效率可达90%～91%。但当转速比低于或高于最佳工况时，效率曲线呈抛物线形状下降。

液力传动装置不用铜，重量轻，成本低，可靠性高，维修量少，并具有隔振、无级调速和恒定功率特性好等优点，因而得到广泛的应用。

③电力传动装置：把机车原动机的动力变换成电能，再变换成机械能以驱动车轮而实现传递动力的装置。电力传动装置按发展的顺序有直—直流电力传动装置、交—直流电力传动装置、交—直—交流电力传动装置、交—交流电力传动装置四种。它们所用的牵引发电机、变换器（指整流器、变送器、循环变频器等）和牵引电动机类型各不相同。

（ｉ）直—直流电力传动装置：工作原理如图7-18所示，原动机G为柴油机，通过联动器驱动直流牵引发电机ZF，后者把柴油机轴上的机械能变换成可控的直流电能，通过电线传送给1台或多台串并联或全并联接线的直流牵引电动机ZD，直流牵引电动机将电能变换成转速和转矩都可调节的机械能，经减速齿轮驱动机车动轮，实现牵引。此外设有自控装置。自控装置由既对柴油机调速又对牵引发电机调磁的联合调节器、牵引发电机磁场和牵引电动机磁场控制的装置等组成，用来保证直—直流电力传动装置接近理想的工作特性。

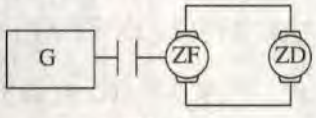


图7-18

（ⅱ）交—直流电力传动装置：工作原理如图 7-19 所示，与直—直流电力传动装置原理相似，可以看出两者的差异在于柴油机 G 驱动同步牵引发电机 TF，经二极管整流桥 ZL，把增频三相交流电变换成直流电，事实上 TF 和 ZL 组成无整流子直流电机。其余部分和自控装置主要工作原理与直—直流电力传动装置相同。

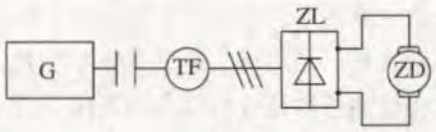


图 7-19

（ⅲ）交—直—交流电力传动装置：异步牵引电动机结构简单，体积小，工作可靠，在变频调压电源控制下能提供优良的调整性能。如图 7-20 所示，柴油机 G 驱动同步牵引发电机 TF，产生恒频可调三相交流电（柴油机恒速时），经整流桥 ZL 变换成直流电，再经过可控硅逆变器 N（具有分谐波调制功能）再将直流电逆变成三相变频调压交流电，通过三根电线传输给多台并联接线的异步牵引电动机 AD。AD 将交流电能变换成转速和转矩可调的机械能，驱动机车动轮，实现牵引。它的自控装置由联合调节器以及对同步牵引发电机磁场、变换器、异步牵引电动机作脉冲、数模或逻辑控制的装置组成，从而提供接近理想的工作特性。

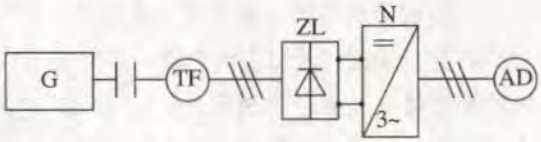


图 7-20

（ⅳ）交—交流电力传动装置：交—直—交流变频调压电能经二次变换，降低了传动装置的效率，而且逆变器用可控硅需要强迫关断，对主电路技术有较高的要求。为提高效率，在交—交流电力传动装置中采用了自然关断可控硅相控循环变频器，如图 7-21 所示，柴油机 G 驱动同步发电机 TF，发出增频可调压交流电，经相控循环变频器 FB 变换成可变频调压的三相交流电（降频），输给多台全并联接线的异步牵引电动机 AD（也有用同步牵引电动机的）。AD 将交流电能变换成转速和转矩可调的机械能，驱动动轮实现牵引。它的自控装置也是由联合调节器、脉冲、数模、逻辑电路等装置构成（但对可控硅导通程序要求严格），同样能保证优良的工作特性。

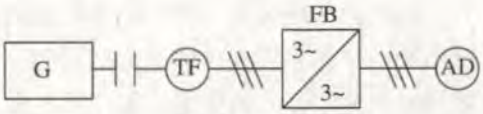


图 7-21

2. 电力机车的功率与效率

①直流电力机车：装有直流串励牵引电动机的机车，接触网电压为 1 500 V 或 3 000 V 直流电压。直流电力机车的起动和速度调节以往是借助于调节起动电阻和牵引电动机的串联—并联转换来完成的。但这种起动和调速方式不能做到连续平滑地调节速度，而且电能耗损大，线路转换复杂。随着直流斩波技术的发展，逐渐为新的脉冲调压方式所代替。在直流电力机车上通常采用牵引电动机磁场削弱的办法来提高机车的速度，增加机车功率。磁场削弱的级数一般为二至三级。

②交流电力机车：接触网电压 20 kV 或 25 kV，单相工频为 50 Hz 或 60 Hz。在欧洲少数国家如德国、瑞典、瑞士等国亦有采用单相低频交流制的，此时接触网电压为 11～16 kV，单相工频为 $16\frac{2}{3}$ Hz 或 25 Hz。交流电力机车根据变流装置和牵引电动机类型，主要有以下三种类型。

（ⅰ）整流器电力机车：又称单相—直流电力机车，是当前应用最广的一种交流电力机车。在整流器电力机车上，接触网上的单相高压交流电首先通过牵引变压器降压，然后通过硅整流元件或晶闸管组成的整流装置将单相交流电变换为直流电，供给电动机。一般采用脉流串励电

动机作为牵引电动机。这种电力机车有变压器和整流装置，因此采用改变变压器副边电压或对整流装置实行相位控制的办法均可改变整流器电压，从而达到调节机车速度的目的。

（ⅱ）单相整流子电动机电力机车：又称直流式交流电力机车，采用单相整流子牵引电动机。接触网上的高压交流电经过变压器降低电压后，就直接供电给牵引电动机。这种机车电气设备简单，但单相整流子电动机的换相条件随交流电频率的增高而恶化，因此多用于单相低频交流制的电气化铁路上。

（ⅲ）交—直—交流电力机车：有时又称为单相—三相电力机车。在这种机车上，接触网上的高压交流电首先通过牵引变压器降压整流，使中间直流环节保持稳定的直流电流。然后再由逆变电路将中间直流电变换为三相交流电供给三相异步牵引电动机或三相同步牵引电动机。改变逆变装置输出的三相交流电的频率和电压即可调节机车的功率和速度。

（摘自《中国大百科全书·物理卷》，中国大百科全书出版社）

（三）实验参考资料

1. 研究弹簧的弹性势能与形变的关系

弹性势能无法直接测量。本实验让弹性势能转换为物体的动能，然后通过测量物体的动能来比较原来弹性势能的大小。

器材 气垫导轨，气源等。

操作

（1）把两弹簧的一端与滑块连接，另一端固定在导轨的两端。在滑块上装上一个挡光框，待滑块静止后，将光电门放在平衡处，使挡光框正好挡住光线。

（2）毫秒计的功能开关置 S_2 挡，时间选择开关用最小的一挡。使滑块偏离平衡位置10.0 cm（从导轨的标尺上可看出），由静止释放。滑块经过光电门时，毫秒计记下挡光时间 t，如果挡光框两前沿之间的距离为 d，则滑块经过光电门时的速度 $v=d/t$。如果滑块的质量是 m，则滑块的动能 $E_k=\frac{1}{2}mv^2=md^2/(2t^2)$。

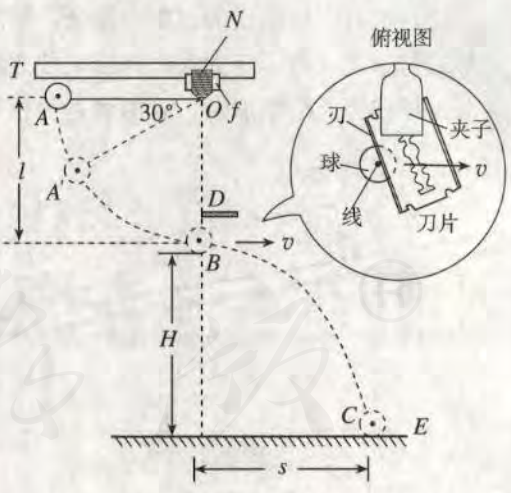


图 7-22

（3）改变滑块偏离平衡位置的距离 x（例如15.0 cm，20.0 cm，…），重复操作（2），得到若干组（x，E_k）值。

（4）作 E_k-x^2 图，得到一条过原点的直线，说明弹簧的弹性势能与它的形变的平方成正比。

2. 实验验证机械能守恒定律

（1）用单摆做定量测量：装置如图 7-22 所示。在长 l 约 0.5 m 的细线下端拴一个质量为 m 的金属球，细线的上端用两片形状如图中 N 所示的木片夹牢，木片由烧瓶夹 J 固定在铁架（图中未画出）的上部。水平木条 T 也装在铁架上部，铁架下部装一个刮脸刀片 D，刀片平面取水平方向，刀刃应与摆线的运动方向 v 斜交而不要垂直（见俯视图），这样才能迅速把线割

断。仔细调整刀刃的位置，使之恰好能在球摆到最低点时把线割断，割断处应尽量靠近摆球。在水平地面上放一张白纸，上面再放一张复写纸，即图中的 E。

实验方法是：在摆球静止时，量出摆长 l（悬点 O 到球心距离）和球的下缘到地面的竖直高度 H。以木条 T 为基准，把摆拉成水平，自 A 点由静止开始释放。摆到最低点 B 时，线被割断，球被平抛出去，落在复写纸 E 上，打出痕迹，记录下落地点 C，再量出水平射程 s。利用平抛运动规律（学生没有学过，可直接告诉学生）求出球在 B 点速度 $v=\dfrac{s}{\sqrt{\dfrac{2H}{g}}}$，再计算球由 A 到 B 过程中动能的增加量 $\Delta E_k=\dfrac{1}{2}mv^2$，由 l 值计算球由 A 到 B 过程中重力势能的减少量 $\Delta E_k=mgl$。最后看 ΔE_k 是否与 ΔE_p 近似相等而得出机械能守恒的结论。

没有配备打点计时器的学校，还可以用此法让学生做分组实验。

（2）用气垫导轨：先非常仔细地把导轨调成水平，然后如图 7-23 所示用垫块把导轨的一端垫高 H。滑块 m 上面装 $l=3$ cm 的挡光框，使它由轨道上端任一处滑下，测出它通过光电门 G_1 和 G_2 时的速度 v_1 和 v_2，就可算出它由 G_1 到 G_2 这段过程中动能的增加量 $\Delta E_k=\dfrac{1}{2}m(v_2^2-v_1^2)$。由图可知 $\dfrac{h}{s}=\dfrac{H}{L}$，由已知的 L 值和所取的 H、s 值可算出 h 值，再算出滑块由 G_1 到 G_2 这段过程中重力势能的减少量 $\Delta E_p=mgh$。由实验结果可看出 $\Delta E_k\approx\Delta E_p$ 从而证明机械能守恒。实验时，s 值要取得小些，可减少滑块克服阻力做的功，使结果 ΔE_k 与 ΔE_p 两个值更接近。

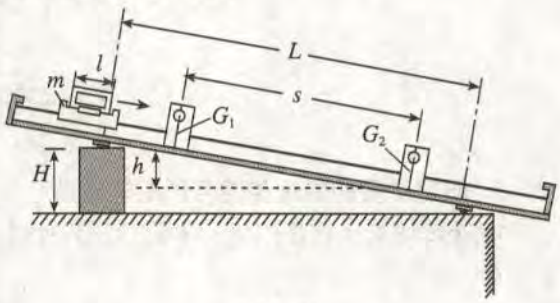


图 7-23

（3）也可以用相反的过程来验证，如图 7-24 所示。用轨道下端支架上的橡皮筋把滑块以足够的初速度（但不宜太大）弹出，使之沿轨道向上端运动，测定它由 G_1 到 G_2 过程中动能的减少量和势能的增加量，看两者是否相等，测算方法同前。

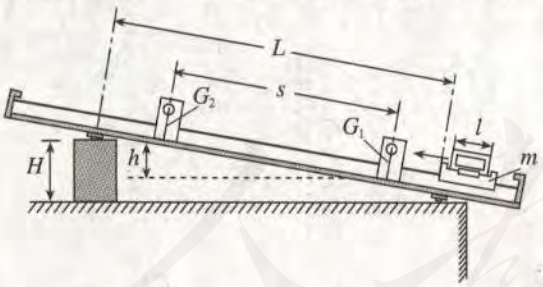


图 7-24

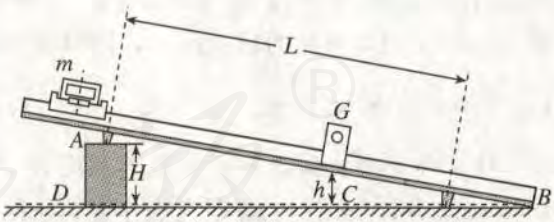
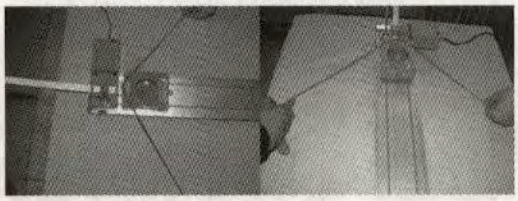


图 7-25

也可以测算若干点的总机械能，看是否相等。方法如图 7-25 所示令滑块 m 从轨道上端某一点 A 由静止开始下滑，重复多次，改变光电门 G 的位置 C，测出滑块到达不同点的速度 v。以轨道末端的水平面 BD 为零势面，确定所测各点的高度 h，$h=\overline{BC}\times\dfrac{H}{L}$。然后计算出每一点的总机械能 $E=E_k+E_p$，看它们是否相等。注意要使 C 点距 A 点近一些，这样实验结果的误差较小。

3. 探究功与物体速度变化的关系

实验题目	探究功与物体速度变化的关系	实验分类	演示实验
实验目的	1. 选择合适的材料 2. 实验操作技巧		
实验仪器和型号	不同粗细的橡皮筋、轨道、轨道小车、打点计时器，如图 7-26  图 7-26		
实验原理	小车在橡皮筋的作用下沿木板滑行，用一条橡皮筋拉小车，橡皮筋伸长一定长度，小车具有速度 v（速度可用打点计时器和纸带测出），橡皮筋对小车做功为 W_0。分别用 2 条、3 条、…橡皮筋拉小车，控制橡皮筋伸长长度与第一次相同，橡皮筋对小车做功分别为 $2W_0$、$3W_0$、…相对应的小车速度也发生改变，做出 W-v 曲线，可以得知橡皮筋对小车做的功与小车获得的速度的定量关系。		
实验内容及步骤	1. 用手固定橡皮筋，使小车弹出，沿木板滑行，第一次用一条橡皮筋，第二次用两条…… 2. 换用不同橡皮筋重复上述实验		

实验数据处理及图象

1. 黑色细橡皮筋（小车有负重）

橡皮筋条数	匀速车速	$\frac{W}{v}$	$\frac{W}{v^2}$	$\frac{W}{v^3}$	$\frac{W}{\sqrt{v}}$
1	0.460	2.174	4.726	10.273	1.474
2	0.665	3.008	4.523	6.800	2.452
3	0.835	3.593	4.303	5.153	4.283
4	0.939	4.260	4.537	4.831	4.127
5	1.058	4.726	4.467	4.221	4.861
6	1.141	5.259	4.609	4.039	5.617

2. 黑色细橡皮筋（小车无负重）

橡皮筋条数	匀速车速	$\frac{W}{v}$	$\frac{W}{v^2}$	$\frac{W}{v^3}$	$\frac{W}{\sqrt{v}}$
1	0.805	1.242	1.543	1.916	1.114
2	1.060	1.887	1.780	1.679	1.942
3	1.330	2.256	1.696	1.275	2.601
4	1.531	2.613	1.707	1.114	3.232
5	1.654	3.023	1.828	1.105	3.887
6	1.885	3.183	1.689	0.895	4.370

续表

实验题目	探究功与物体速度变化的关系	实验分类	演示实验

3. 白色宽橡皮筋（小车有负重）

橡皮筋条数	匀速车速	$\frac{W}{v}$	$\frac{W}{v^2}$	$\frac{W}{v^3}$	$\frac{W}{\sqrt{v}}$
1	0.810	1.235	1.524	1.881	1.111
2	1.145	1.747	1.526	1.332	1.869
3	1.445	2.076	1.437	0.994	2.495
4	1.665	2.402	1.443	0.866	3.099

图象：横坐标表示功。前面三个图的纵坐标表示小车获得的速度，后面三个图的纵坐标表示速度的平方。

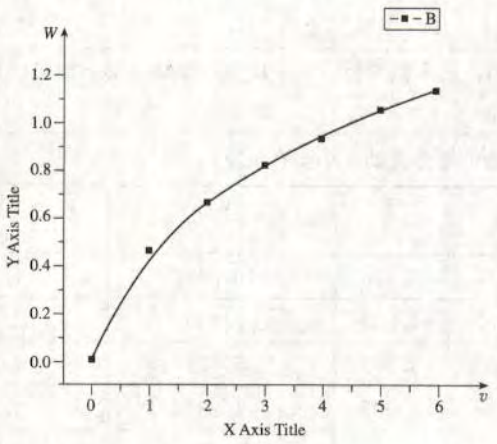


图 7-27

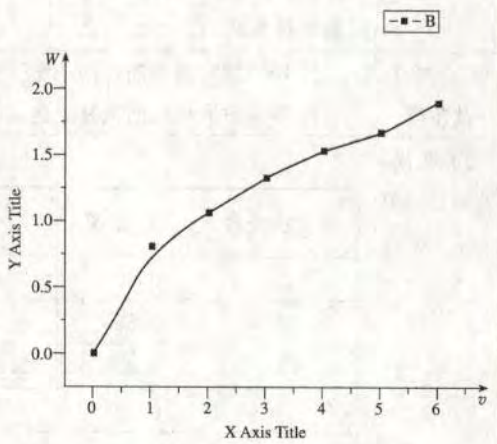


图 7-28

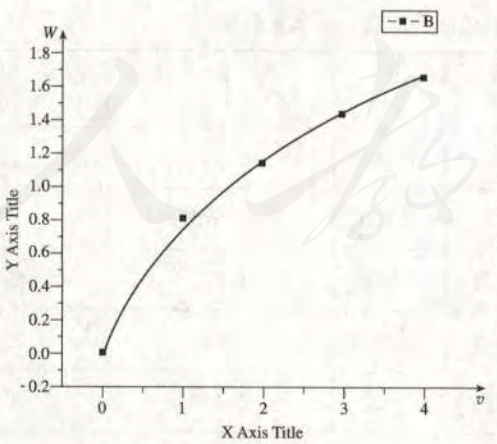


图 7-29

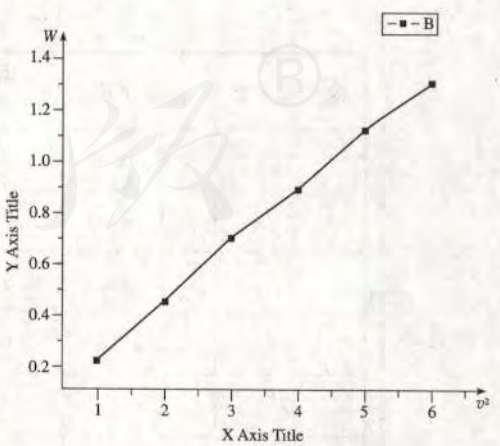
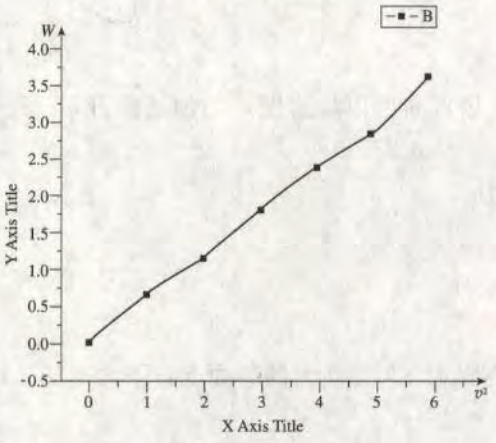
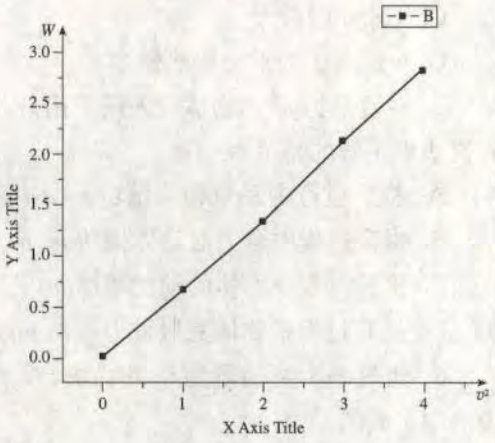


图 7-30

续表

实验题目	探究功与物体速度变化的关系	实验分类	演示实验
	 图 7-31  图 7-32		
实验结论	1. 橡皮筋选择细的为好，可以得到功与物体速度变化的关系。 2. 增加橡皮筋时要保证每根橡皮筋的有用长度相同。实验时如果用钉子固定橡皮筋，通过栓记来实现所有橡皮筋长度相同，操作上比较困难。改进方法：可以由两名同学合作完成，改用手按住橡皮筋。		

（河北省正定中学提供）

五、补充习题

A 组

1. A、B 两物体质量分别为 m 和 $2m$，A 静止于光滑水平面上，B 静止于粗糙水平面上，用相同水平力分别推 A 和 B，使它们前进相同位移。在此过程中，下面说法正确的是（　　）

A. 两次推力做功一样多　　B. 对 A 的推力做功多一些

C. 两次推力做功的功率一样大　　D. 对 B 的推力做功的平均功率较小

2. 质量为 m 的汽车，启动后沿平直路面行驶，如果发动机的功率恒为 P，且行驶过程中受到的摩擦阻力大小一定，汽车速度能够达到的最大值为 v，那么当汽车的车速为 $v/4$ 时，汽车的瞬时加速度的大小为（　　）

A. $P/(mv)$　　B. $2P/(mv)$　　C. $3P/(mv)$　　D. $4P/(mv)$

3. 一人用力踢质量为 0.5 kg 的皮球，使球由静止开始以 20 m/s 的速度飞出。假定人踢球瞬间对球平均作用力是 100 N，球在水平方向运动了 20 m 后停止，则人对球所做的功为（　　）

A. 25 J　　B. 50 J　　C. 100 J　　D. 2 000 J

4. 如图 7-33，A、B 两球质量相等，A 球用不能伸长的轻绳系于 O 点，B 球用轻弹簧系于 O' 点，O 与 O' 点在同一水平面上。分别将 A、B 球拉到与悬点等高处，细绳和轻弹簧均处于水平，弹簧处于自然状态。将两球分别由静止开始释放，当两球达到各自悬点的正下方时，

两球仍处在同一水平面上，则两球各自到达悬点正下方时（　　）

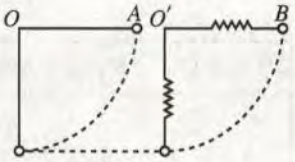


图 7-33

A. 两球动能相等

B. A 球动能较大

C. B 球动能较大

D. A 球减少的重力势能较多

5. 一质量为 m 的物体被人用手由静止竖直向上以加速度 a 匀加速提升 h，关于此过程下列说法中正确的是（　　）

A. 提升过程中手对物体做功 $m(a+g)h$

B. 提升过程中合力对物体做功 mah

C. 提升过程中物体的动能增加 $m(a+g)h$

D. 提升过程中物体克服重力做功 mgh

6. 如图 7-34，质量为 m 的物块，始终固定在倾角为 θ 的斜面上，下面说法中正确的是（　　）

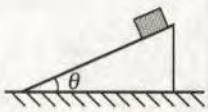


图 7-34

A. 若斜面向左匀速移动距离 x，斜面对物块的作用力没有做功

B. 若斜面向上匀速移动距离 x，斜面对物块的作用力做功 mgx

C. 若斜面向左以加速度 a 移动距离 x，斜面对物块的作用力做功 max

D. 若斜面向下以加速度 a 移动距离 x，斜面对物块的作用力做功 $m(g+a)x$

7. 一滑块在水平地面上沿直线滑行，$t=0$ 时其速度为 1 m/s。从此刻开始在滑块运动方向上再施加一水平作用力 F，力 F 和滑块的速度 v 随时间 t 的变化规律分别如图 7-35 所示。设在第 1 s 内、第 2 s 内、第 3 s 内，力 F 对滑块做功的大小分别为 W_1、W_2、W_3，则以下关系正确的是（　　）

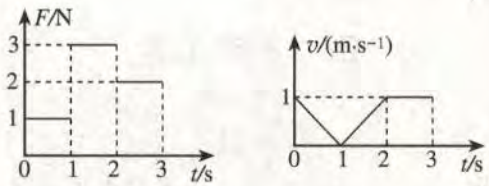


图 7-35

A. $W_1=W_2=W_3$　　B. $W_1=W_2<W_3$　　C. $W_1<W_3<W_2$　　D. $W_1<W_2<W_3$

8. 如图 7-36 所示，分别用恒力 F_1 和 F_2 先后将质量为 m 的物体从静止开始沿着同一个粗糙的固定斜面由底端推到顶端，第一次力 F_1 的方向沿斜面向上，第二次力 F_2 的方向沿水平向右，两次所用的时间相同，在这两个过程中（　　）

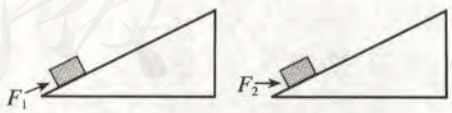


图 7-36

A. F_1 和 F_2 所做的功相同

B. 物体机械能变化量相等

C. 第二次物体所受的合力做功较多

D. 物体的动能的变化量相同

9. 如图 7-37，一条很长的、不可伸长的柔软轻绳跨过光滑定滑轮，绳两端各系一个小球 a 和 b。a 球质量为 m，静置于地面；b 球质量为 $3m$，用手托住，高度为 h，此时轻绳刚好拉紧。从静止开始释放 b 后，a 可能达到的最大高度为（　　）

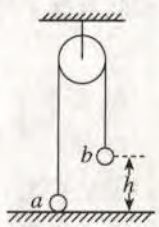


图 7-37

A. h　　B. $1.5h$　　C. $2h$　　D. $2.5h$

10. 如图 7-38，小球自 a 点由静止自由下落，到 b 点时与弹簧接触，到 c 点时弹簧被压缩到最短。若不计弹簧质量和空气阻力，在小球由 $a \rightarrow b \rightarrow c$ 的运动过程中，下列说法正确的是（　　）

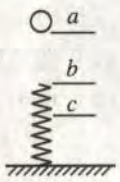


图 7-38

A. 小球、弹簧和地球构成的系统总机械能守恒

B. 小球的重力势能随时间先减少后增加

C. 小球在 b 点时动能最大

D. b 到 c 点过程中小球动能的减少量等于弹簧弹性势能的增加量

11. 质量为 m_1 的子弹，以水平速度 v 射入静止在光滑水平面上质量为 m_2 的木块，并留在其中。下列说法正确的是（　　）

A. 子弹克服阻力做的功与木块获得的动能相等

B. 阻力对子弹做的功与子弹减少的动能数值相等

C. 子弹克服阻力做的功与子弹对木块做的功相等

D. 子弹克服阻力做的功大于子弹对木块做的功

12. 如图 7-39 所示，长度相同的三根轻杆构成一个正三角形支架，在 A 处固定质量为 $2m$ 的小球，B 处固定质量为 m 的小球，支架悬挂在 O 点，可绕过 O 点并与支架所在平面相垂直的固定轴转动。开始时 OB 与地面相垂直，放手后开始运动，在不计任何阻力的情况下，下列说法正确的是（　　）

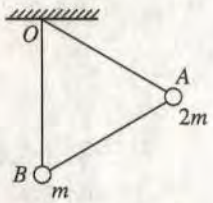


图 7-39

A. A 球到达最低点时速度为 0

B. A 球机械能减少量等于 B 球机械能增加量

C. B 球向左摆动所能达到的最高位置应高于 A 球开始运动时的高度

D. 当支架从左向右回摆动时，A 球一定能回到起始高度

13. 如图 7-40 所示，从倾角 θ 的斜面上的 M 点水平抛出一个小球，小球的初速度为 v_0，最后小球落在斜面上的 N 点。重力加速度为 g，在已知 θ 和 v_0 的条件下，空气阻力不计，则（　　）

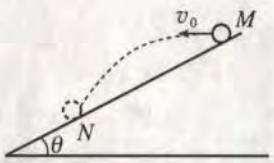


图 7-40

A. 可求出 M、N 之间的距离

B. 可求出小球落到 N 点时的动能

C. 可求出小球落到 N 点时的速度的大小和方向

D. 可求出小球从 M 点到达 N 点的过程中重力所做的功

14. 如图 7-41 所示，质量为 m 的物体，放于水平面上，物体上竖直固定一长度为 l、劲度系数为 k 的轻质弹簧。现用手拉住弹簧上端 P 缓慢向上提，使物体离开地面上升一段距离，若在这一过程中 P 端上移的距离为 h，则此过程物体重力势能的增加量为_____。

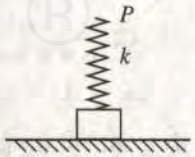


图 7-41

15. 把质量为 m 的篮球竖直向上抛出，若所受空气阻力大小恒为 F，上升的最大高度为 h，则人对篮球所做的功为_____，篮球落回原抛出位置的速度大小为_____。

16. 如图 7-42 所示，用恒力 F 通过定滑轮把静止于水平面上的物体从位置 A 拉到位置 B，不计滑轮和物体的大小，滑轮离地的高度为 h，物体在 A、B 位置时，细绳与水平面间的夹角分别是 θ_1、θ_2，则拉力 F 在这一过程中所做的功为_____。

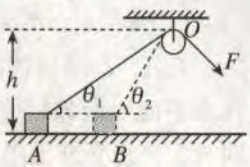


图 7-42

17. 质量为 5 kg 的物体静置于水平地面上，现对物体施以水平方向

的恒定拉力，1 s末将拉力撤去，物体运动的 v-t 图象如图 7-43 所示，试求：

（1）滑动摩擦力在 0～3 s 内做的功；

（2）拉力在 1 s 末的功率。

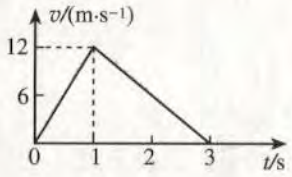


图 7-43

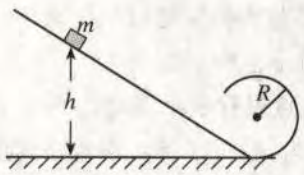


图 7-44

18. 如图 7-44 所示，位于竖直平面内的光滑轨道，有一段斜的直轨道和与之相切的圆形轨道连接而成，圆形轨道的半径为 R。一质量为 m 的小物块从斜轨道上某处由静止开始下滑，然后沿圆形轨道运动。要求物块能通过圆形轨道最高点，且在该最高点与轨道间的压力不能超过 $5mg$（g 为重力加速度）。求物块初始位置相对圆形轨道底部的高度 h 的取值范围。

B 组

1. 一物体在粗糙的水平面上受到水平拉力作用，在一段时间内的速度随时间变化情况如图 7-45 中左图所示。则拉力的功率随时间变化的图象可能是图中的（g 取 10 m/s²）（　　）

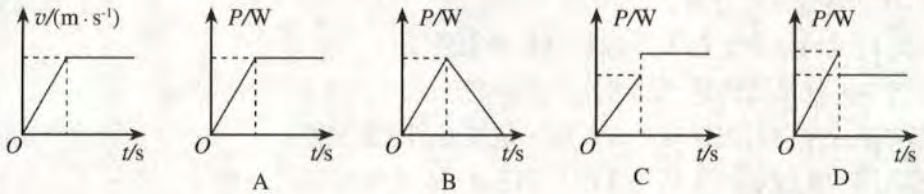


图 7-45

2. 如图 7-46，用与水平方向成 θ 的力 F，拉质量为 m 的物体水平匀速前进 x，已知物体和地面间的动摩擦因数为 μ，则在此过程中 F 做功为（　　）

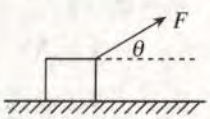


图 7-46

A. mgx　　B. μmgx

C. $\dfrac{\mu mgx}{\cos\theta+\mu\sin\theta}$　　D. $\dfrac{\mu mgx}{1+\mu\tan\theta}$

3. 一轻质弹簧固定于水平地面上，一质量为 m 的小球自距地面高为 h_{1m} 处自由下落到弹簧上端，并将弹簧压缩，设速度达到最大的位置离地面的高度为 h_1，最大速度为 v_1。若让此小球从离地面高度为 h_{2m} 处自由下落，速度达到最大时的位置离地面的高度为 h_2，最大速度为 v_2。已知 $h_{2m}>h_{1m}$，则（　　）

A. $v_1=v_2$，$h_1=h_2$　　B. $v_1>v_2$，$h_1>h_2$

C. $v_1<v_2$，$h_1=h_2$　　D. $v_1=v_2$，$h_1<h_2$

4. A、B 两物体的质量之比 $m_A:m_B=2:1$，它们以相同的初速度 v_0 在水平面上做匀减速直线运动，直到停止，其速度图象如图 7-47 所示。则 A、B 所受摩擦阻力之比 $F_A:F_B$ 与 A、B 两物体克服摩擦阻力做的功之比 $W_A:W_B$ 分别为（　　）

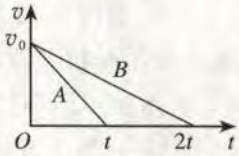


图 7-47

A. 4∶1，2∶1　　B. 2∶1，4∶1

C. 1∶4，1∶2　　D. 1∶2，1∶4

5. 光滑水平面上以速度 v_0 匀速滑动的物块，某时刻受到一水平恒力 F 的作用，经一段时间后物块运动到 B 点，速度大小仍为 v_0，方向改变了 90°，如图 7-48 所示，则在此过程中（　　）

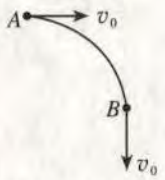


图 7-48

A. 物块的动能一定始终不变

B. 水平恒力 F 方向一定与 AB 连线垂直

C. 物块的速度一定先增大后减小

D. 物块的加速度不变

6. 小球由地面竖直上抛，上升的最大高度为 h_m，设所受阻力大小恒定，地面为零势能面。在上升至离地高度 h 处，小球的动能是势能的 2 倍，在下落至离高度 h 处，小球的势能是动能的 2 倍，则 h 等于（　　）

A. $h_m/9$　　B. $2h_m/9$

C. $h_m/3$　　D. $4h_m/9$

7. 如图 7-49 所示，固定的光滑竖直杆上套着一个滑块，用轻绳系着滑块绕过光滑的定滑轮，以大小恒定的拉力 F 拉绳，使滑块从 A 点起由静止开始上升。若从 A 点上升至 B 点和从 B 点上升至 C 点的过程中拉力 F 做的功分别为 W_1、W_2，滑块经 B、C 两点时的动能分别为 E_{kB}、E_{kC}，图中 $AB=BC$，则一定有（　　）

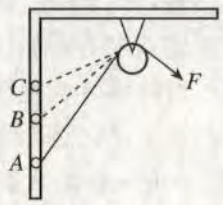


图 7-49

A. $W_1>W_2$　　B. $W_1<W_2$

C. $E_{kB}>E_{kC}$　　D. $E_{kB}<E_{kC}$

8. 如图 7-50 所示，小车上有固定支架，支架上用细线拴一个小球，线长为 l（小球可看做质点），小车与小球一起以速度 v_0 沿水平方向向左匀速运动。当小车突然碰到矮墙后车立即停止运动，此后小球升高的最大高度可能是（线未被拉断）（　　）

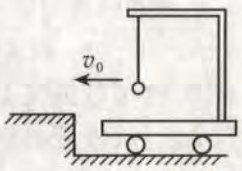


图 7-50

A. 大于 $\frac{v_0^2}{2g}$　　B. 小于 $\frac{v_0^2}{2g}$

C. 等于 $\frac{v_0^2}{2g}$　　D. 等于 $2l$

9. 如图 7-51 所示，小木块可以分别从固定斜面沿左边或右边由静止开始滑下，且滑到水平面上的 A 点或 B 点停下。假定小木块和斜面及水平面间的动摩擦因数相同，斜面与水平面平缓连接，图中水平面上的 O 点位于斜面顶点正下方，则（　　）

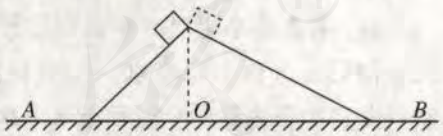


图 7-51

A. 距离 OA 等于 OB　　B. 距离 OA 大于 OB

C. 距离 OA 小于 OB　　D. 无法做出明确的判断

10. 将一个力传感器连接到计算机上，我们就可以测量快速变化的力。某一小球用一条不可伸长的轻绳连接，绳的另一端固定在悬点上。当小球在竖起面内来回摆动时（如图 7-52 甲），用力传感器测得绳子对悬点的拉力随时间变化的曲线如图 7-52 乙所示。取重力加速度 $g=10\ \mathrm{m/s^2}$，求绳子的最大偏角 $\theta=$_____。

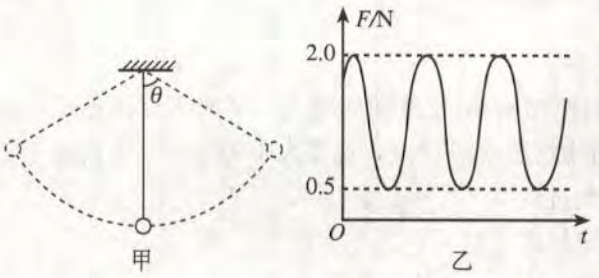


图 7-52

11. 某地风速为 $v=20$ m/s，设空气的密度为 $\rho=1.3$ kg/m^3，如果通过横截面积 $S=20$ m^2 的风的动能全部转化为电能，则利用上述已知量计算电功率的公式 $P=$_____，计算其数值约为_____ W（取一位有效数字）。

12. 质量均为 m 的物体 A 和 B 分别系在一根不计质量的细绳两端，绳子跨过固定在倾角为 30°的斜面顶端的定滑轮上，斜面固定在水平地面上，如图 7-53。开始时把物体 B 拉到斜面底端，这时物体 A 离地面的高度为 0.8 m。若摩擦力均不计，从静止开始放手让它们运动（斜面足够长），求：

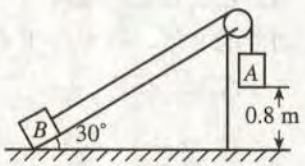


图 7-53

（1）物体 A 着地时的速度；

（2）物体 A 着地后物体 B 沿斜面上滑的最大距离。

13. 跳台滑雪是冬奥会的比赛项目之一，如图 7-54 为一简化后的跳台滑雪的雪道示意图。助滑坡由 AB 和 BC 组成，AB 是倾角为 37°的斜坡，BC 是半径为 $R=10$ m 的圆弧面，圆弧面和斜面相切于 B，与水平面相切于 C，AB 竖直高度差 $h_1=35$ m，竖直跳台 CD 高度差为 $h_2=5$ m，跳台底端与倾角为 37°的斜坡 DE 相连。运动员连同滑雪装备总质量为 80 kg，从 A 点由静止滑下，通过 C 点水平飞出，飞行一段时间落到着陆坡上，测得着陆坡上落点 E 到 D 点距离为 125 m（不计空气阻力，$\sin 37°=0.6$，$\cos 37°=0.8$）。求：

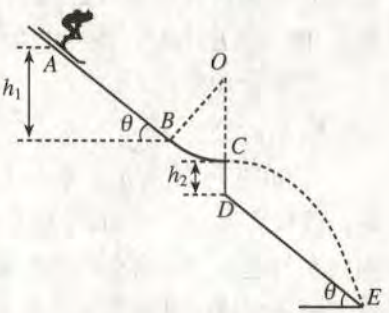


图 7-54

（1）运动员到达 C 点的速度大小；

（2）运动员由 A 滑到 C 克服雪坡阻力做了多少功？

14. 某兴趣小组对一辆自制遥控小车的性能进行研究，他们让这辆小车在水平的直轨道上由静止开始运动，并将小车运动的全过程记录下来，通过处理转化为 v-t 图象，如图 7-55 所示（除 2～10 s 时间段图象为曲线外，其余时间段图象均为直线）。已知在小车运动的过程中，2～14 s 时间段内小车的功率保持不变，在 14 s末停止遥控而让小车自由滑行，小车的质量为 1.0 kg。可认为在整个运动过程中小车所受到的阻力大小不变。求：

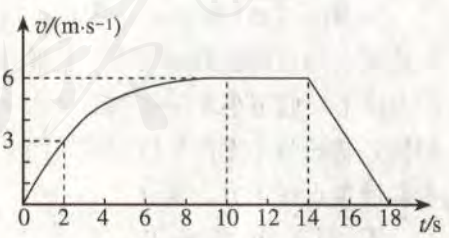


图 7-55

（1）小车所受到的阻力；

（2）小车匀速行驶阶段的功率；

（3）小车在加速运动过程中（0～10 s 内）位移的大小。

参考答案

A 组

1. AD　2. C　3. C　4. B　5. ABD　6. ABC　7. D　8. BD　9. B　10. A　11. BD

12. BCD　13. AC　14. $mg\left(h-\frac{mg}{k}\right)$　15. $(mg+F)h$；$\sqrt{2\left(g-\frac{F}{m}\right)h}$

16. $Fh\left(\frac{1}{\sin\theta_1}-\frac{1}{\sin\theta_2}\right)$　17. (1) −540 J　(2) 1 080 W　18. $\frac{5}{2}R\leqslant h\leqslant 5R$

B 组

1. D　2. D　3. C　4. A　5. BD　6. D　7. A　8. BCD　9. A　10. 60°

11. $\frac{1}{2}\rho Sv^3$，1×10^5　12. (1) 2 m/s　(2) 0.4 m　13. (1) 25 m/s　(2) 4 600 J

14. (1) 在 14 ～18 s 时间段

$$a=\frac{0-6}{18-14}\ \text{m/s}^2=-1.5\ \text{m/s}^2$$

$$F_f=ma=-1.5\ \text{N}$$

负号表示方向与运动方向相反。

(2) 在 10～14 s 小车做匀速运动，牵引力 $F=F_f=1.5$ N，$P=Fv=1.5\times6$ W=9 W。

(3) 速度图象与横轴之间的“面积”等于物体运动的位移。

0～2 s 内：$x_1=\frac{1}{2}\times2\times3$ m=3 m

2 ～10 s 内：根据动能定理 $Pt-F_fx_2=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2$，得 $x_2=39$ m。

加速过程中小车的位移大小：$x=x_1+x_2=42$ m。