

高级中学  
物理（甲种本）第一册  
教学参考书

人民教育出版社物理室 编

1986 年 2 月

# 目 录

<b>前 言</b>	i
<b>高中物理甲种本第一册的说明</b>	ii
<b>引言——怎样学好物理知识</b>	v
第一节 教学要求 . . . . .	v
第二节 教学建议 . . . . .	vi
第三节 实验指导 . . . . .	vii
第四节 参考资料 . . . . .	ix
<b>第一章 力</b>	1
第一节 教学要求 . . . . .	2
第二节 教学建议 . . . . .	3
第三节 实验指导 . . . . .	7
第四节 习题解答 . . . . .	17
第五节 参考资料 . . . . .	30
<b>第二章 直线运动</b>	33
第一节 教学要求 . . . . .	34
第二节 教学建议 . . . . .	36
第三节 实验指导 . . . . .	41
第四节 习题解答 . . . . .	47
第五节 参考资料 . . . . .	61
<b>第三章 运动定律</b>	65
第一节 教学要求 . . . . .	66
第二节 教学建议 . . . . .	67
第三节 实验指导 . . . . .	72
第四节 习题解答 . . . . .	76
第五节 参考资料 . . . . .	92

<b>第四章 曲线运动</b>	<b>96</b>
第一节 教学要求	97
第二节 教学建议	98
第三节 实验指导	103
第四节 习题解答	109
第五节 参考资料	123
<b>第五章 万有引力定律</b>	<b>127</b>
第一节 教学要求	128
第二节 教学建议	129
第三节 实验指导	133
第四节 习题解答	134
第五节 参考资料	141
<b>第六章 物体的平衡</b>	<b>146</b>
第一节 教学要求	147
第二节 教学建议	148
第三节 实验指导	151
第四节 习题解答	156
第五节 参考资料	168
<b>第七章 机械能</b>	<b>170</b>
第一节 教学要求	171
第二节 教学建议	172
第三节 实验指导	179
第四节 习题解答	182
第五节 参考资料	198
<b>第八章 动量</b>	<b>200</b>
第一节 教学要求	200
第二节 教学建议	201
第三节 实验指导	205
第四节 习题解答	210
第五节 参考资料	220
<b>第九章 机械振动和机械波</b>	<b>223</b>
第一节 教学要求	224
第二节 教学建议	226
第三节 实验指导	235

第四节 习题解答 . . . . .	246
第五节 参考资料 . . . . .	255

# 前 言

为了帮助教师使用好高中物理（甲种本）第一册教材，我们编写了这本教学参考书，内容包括全册书的说明，引言和各章的教学说明和资料。

全册书的说明对这册教材的内容安排、全书的一些重要问题以及课时安排，作了简要的说明。

各章的教学说明和资料，包括教学要求、教学建议、实验指导、习题解答、参考资料五项内容。在“教学要求”中对各章的教学内容提出了具体的要求和说明，在“教学建议”中对怎样进行教学提出了参考性意见。在“实验指导”中提出了演示实验、学生实验及课外实验活动中应当注意的问题，还提供了自制简单仪器的制作方法和不同的实验方法，补充了一些实验内容，供教师选用。在“习题解答”中给出了课本中全部练习和习题的解答，供教师参考。在“参考资料”中提供了一些教学中可供参考的材料，这些参考资料只供教师参考，个别的也可在教学中引用。

本书第一章和第二章“教学建议”、“习题解答”由吴孟明编写，第三章和第四章的“教学建议”、“习题解答”、“参考资料”及全书的“实验指导”由袁哲诚编写，第五章和第九章的“教学建议”、“习题解答”及部分“参考资料”由曹磊编写，第六章、第七章和第八章的“教学建议”、“习题解答”及第七章的“参考资料”由唐锦顺编写，其余部分由郭连璧编写。全书由郭连璧统稿，统稿中刘克桓、董振邦给予了很多帮助，最后经雷树人审阅修改。

欢迎教师对本书提出宝贵意见。

# 高中物理甲种本第一册的说明

(1) 高中物理课本(甲种本)第一册全部讲力学知识. 第一章讲解力的基本知识, 第二章讲解怎样描述运动. 在这两章的基础上第三章讲解运动和力的关系. 前两章是必要的预备知识, 而牛顿定律是力学的核心, 第四章讲解曲线运动, 是运动定律知识的具体应用和扩展, 第五章讲解万有引力定律, 把已学知识应用到天体运动中去, 第六章讲解静力学的基本知识, 可视为动力学的特殊情形, 第七章和第八章分别讲解机械能和动量, 是牛顿力学的进一步展开, 特别是得出守恒定律, 为解决力学问题开辟了新的途径. 最后一章是利用以前学过的知识来分析更为复杂的运动——振动和波.

上述安排, 第一章不涉及力的平衡, 第二章不讲述平抛和斜抛物体的运动, 这样, 使得教学难点后移, 头一、二章的内容相对集中, 只包括了学习牛顿定律所必需的预备知识, 有助于降低初高中的台阶, 另外, 万有引力定律单独设章, 使每一章的中心突出, 便于教学.

(2) 高中物理难学主要在力学部分, 原因之一是某些内容要求偏高. 为了减轻学生的学习困难, 使他们对基础知识掌握得更好些, 教学要从实际出发, 要求要适当. 这里, 对大家一直很关心的几个问题作些说明.

关于矢量. 中学物理中需要用矢量解决的问题, 一般比较简单, 只要有一维矢量运算以及矢量的合成和分解的知识, 也就够用了, 不需要系统地讲解矢量运算的知识, 因此, 物理量和公式可以不用矢量符号和矢量式来表示, 关于矢量的教学要求可以归结为三点: 第一, 懂得什么是矢量, 什么是标量, 知道它们之间有什么不同; 第二, 知道矢量加法服从平行四边形法则, 并且会用它对矢量进行合成和分解; 第三, 知道一维矢量的运算可以化成代数运算, 并且学会这种运算.

关于连接体. 一般的连接体问题本来不是很难, 对于培养学生综合运用知识和分析问题的能力也有好处. 但是讲了连接体, 会派生出大量的难题, 大大增加了学生负担. 因此, 从整体来看, 目前, 在中学以不讲连接体为宜. 对于个别学校, 如果学生理解力较强, 教师可以自己补充少量不太难的连接体问题. 这样师生都比较主动, 也符合因材施教的原则.

不讲连接体问题, 并不是不讲隔离法. 把所研究的对象从周围物体中孤立出来或者隔离出来, 单独对它进行受力分析, 并运用动力学或静力学的规律来解决问题, 这种分析问题和解决问题的方法, 学生应当学会.

(3) 教学要符合学生的认识水平和认识规律, 努力做到循序渐进.

物理的概念和规律的特点之一是有严格的含义, 但是在中学阶段, 对物理概念的讲

解，不宜过分追求严谨。例如即时速度这个概念，严格的讲，用极限和微分的知识才能讲解清楚。由于学生没有学过极限和微分，初学者要透彻理解这个概念比较困难。因此，讲解这个概念，不宜采用数学意义较浓的讨论，而要着重从物理意义上予以说明。又如加速度的概念，一开始就区分平均加速度和即时加速度，这固然严谨，学生接受却有困难。就匀变速运动来讲解加速度，不再区分平均加速度和即时加速度，可以克服上述困难，便于教学。

学生掌握知识要有个过程。一个概念，只知道它的定义，远不能说掌握了它。要在具体问题中不断运用它，逐步体会它的含义，要在逐步揭示与其他概念的联系中，逐步加深对它的理解。掌握物理规律和某种分析问题的方法，情况也类似。例如力这个概念，学生对它的认识是逐步丰富起来的。一开始只明确力是物体间的相互作用；讲过力的合成和分解之后，又明确了力是矢量，服从矢量运算规则；讲到动力学揭示出力和加速度的关系，学生才认识到力是产生加速度的原因，懂得了牛顿第二定律，在这个基础上，再提出力的独立作用原理加以讨论，对于物体受力分析的教学，也要逐步深入。一开始就分析很多复杂的事例，企图一下子就掌握好，一劳永逸地解决问题，实际上是办不到的。

(4) 教学中，在讲解知识的同时，应该注意渗透物理学的研究方法，以提高学生分析和处理物理问题的能力。

研究和处理问题，首先要明确研究对象，这一点看起来简单，在具体运用中学生却往往不能把握，造成分析上的混乱。这一点要在教学中通过具体事例强调说明，使学生能够掌握。

研究问题要从简单情况入手，这不仅是为了方便，而且是一种科学的研究方法。在简单情况下考虑的因素少，容易把问题搞清楚。然在此基础上逐步把以前未考虑的因素考虑进去，情况逐渐复杂，研究逐步展开。研究直线运动从匀速运动开始，研究振动从简谐振动开始，都属于这种情形，希望学生对此有所体会。

从简单情况入手研究问题，需要理想化的方法，需要科学的抽象。教材在讲述质点这一概念时，第一次介绍了这种方法，此后，凡遇到这种情况，也都予以说明，理想实验也属于理想化方法。伽利略的斜面对接实验是一个理想实验，介绍这个实验，可以使学生了解用理想实验这种推理形式能够深入地把握现象的本质。

从简单情况入手以及理想化的方法，需要分清主次，即抓住主要因素，暂时舍去次要因素，把问题予以简化，这在研究和处理问题时十分重要，例如在分析物体受力情况时，如果物体在光滑平面上运动，可以忽略滑动摩擦力；如果物体的截面积较小而且运动速度不大，可以不考虑空气阻力，都是采用了这种简化方法。

还有一些研究处理问题的方法，不再一一列举，希望在教学中予以注意。

(5) 高中物理中抽象思维的作用虽然有所加强，但实验的重要性不能削弱。高中物理仍然是以实验为基础，要重视实验教学。

对于学生的实验要求有这样的设想。懂得实验原理，能根据实验课文的叙述自己确定实验步骤，能正确地使用仪器，会读取数据并设计表格记录数据，知道怎样分析数据得出结论，会写简明的实验报告 - 这些是对所有实验的共同要求。至于分析误差以及对实验结

果的进一步讨论等，则只对部分实验作要求。

习题中的实验题，要求学生课外自己做，课外实验，不作要求，但应该鼓励学生去做。有的实验活动，需要教师给予必要的指导，有的器材学生没有，学校可以借给学生使用。

(6) 课本中的练习题分为两种。一是练习，设在每节或每单元之后，是基本练习题，一部分可随堂做，一部分可留为作业。一是习题，设在每章之后，其中有综合题和较难的题，一部分可在习题课中解决，一部分可留为作业。习题中个别有代表性的题或较难的题，给出了解。这类带解的习题可让学生自己看，也可作为例题讲，由教师酌定。

习题的安排，要求是逐步提高的。头两章内容是基础性的，学生又是刚到高中学习，因此安排的都是基本题目。从第三章开始增加了综合题。第七、八章的要求更高些，注意培养学生灵活运用知识的能力。经验证明，对学生解题能力的培养，必须循序渐进。一开始就布置过多过难的练习题，往往是师生负担重，教学效果不够好的重要原因。这一经验教训，应充分吸取。

每一章后都有复习题。复习题大都很简单，目的是让学生通过解答复习题自己写出全章的复习提纲。有的复习题要求高些，让学生理一下全章的基本思路，总结一下学习经验。

(7) 高中物理课本（甲种本）第一册的教学内容可按每周 4 课时，全学年共 128 课时讲授完。各章所用的课时数是：引言 6(3) 课时（括号内的数字是学生实验的课时数，下同），第一章力 11(2) 课时，第二章直线运动 14(3) 课时，第三章运动定律 12(2) 课时，第四章曲线运动 12(2) 课时，第五章万有引力定律 6 课时，第六章物体的平衡 7(1) 课时，第七章机械能 15(2) 课时，第八章动量 13(3) 课时，第九章机械振动和机械波 18(1) 课时，平时复习和机动时间 14 课时。

# 引言——怎样学好物理知识

---

第一节 教学要求 . . . . .	v
第二节 教学建议 . . . . .	vi
第三节 实验指导 . . . . .	vii
一、学生实验 . . . . .	vii
(一)练习分析实验数据 . . . . .	vii
(二)游标卡尺的使用 . . . . .	vii
(三)螺旋测微器的使用 . . . . .	viii
第四节 参考资料 . . . . .	ix
一、测量误差的估计 . . . . .	ix
(一)多次测量结果偶然误差的估计 . . . . .	ix
(二)一次测量结果误差估计 . . . . .	ix
二、绝对误差和相对误差 . . . . .	x
三、测量仪器的读数规则 . . . . .	x
四、游标卡尺的读数问题 . . . . .	xi

---

## 第一节 教学要求

学生在开始学习高中物理时，往往会不适应，感到困难。这是因为跟初中物理比较起来，高中物理在广度上有所扩大，在程度上也有明显的提高。抽象思维和推理论证的作用增大了，数学的应用增多了，学生实验的要求也提高了。课本安排了《引言》这一部分内容，先集中讲一讲怎样学好物理知识，就是要在学习方法上给学生一些引导，使他们能较快地适应高中物理的学习。

学生实验要测量读取数据和分析处理数据。在做第一次学生实验前，有必要让学生了解误差和有效数字的初步知识。因此，在教过《引言》之后，要进行学生实验部分的《误差和有效数字》的教学。

《引言》及《误差和有效数字》的教学要求是：

1. 了解进一步学习物理知识的重要性以及怎样才能学好高中物理。
2. 了解误差的概念和有效数字的意义，知道在实验测量中要按有效数字规则读数。

在《引言》的教学中，对于教材中提出的学好高中物理应该注意的几个问题，学生只要有个初步的了解就可以了，不能要求他们一下子领会得很好，以后还可以结合各章的教学，使他们逐步加深认识，不断改进学习方法，适应高中阶段的学习要求。

关于误差的教学，要求学生了解误差的概念，即知道什么是误差，什么是系统误差和偶然误差，知道误差是不可避免的，初步知道怎样分析产生误差的原因，但不要求定量地讨论和计算误差。

由于有效数字的运算规则比较复杂，教材未作介绍，也不要求教师讲解。只要求学生懂得有效数字的意义，在实验测量中能按有效数字规则读数，在处理实验数据和解题时，运算结果一般取两位或三位数字就可以了。

## 第二节 教学建议

《引言》从回顾初中学过的物理知识讲起，进一步明确物理知识的重要，指出了高中物理的特点。重点是对怎样学好高中物理提出了几个应当注意的问题，即如何做好物理实验、如何学好物理概念和规律以及如何做好练习。

《引言》的教学不必拘泥于课文的叙述，教师可以根据《引言》的教学要求、自己的教学经验和学生的实际情况，灵活地组织教学。

1. **消除物理难学的惧怕心理** 在说明高中物理的特点，指出跟初中物理相比较有明显提高时，还要注意消除一般学生思想上存在的物理难学的惧怕心理，树立学好高中物理的信心，这可以从两个方面来说明：一是已有两年初中物理的学习基础；二是只要注意不断改进学习方法，就会逐步适应高中物理的学习。
2. **激发学生学习物理的兴趣** 学生只有对学习物理发生了兴趣，才能积极主动、心情愉快地学习物理，收到良好的学习效果，因而在引言的教学中，如何激发学生学习物理的兴趣，显得十分重要。学生的学习兴趣在很大程度上产生于求知的渴望，教学中应该多举一些学生熟悉和感兴趣的事例，来说明物理知识的重要。例如，人造卫星为什么能够围绕地球运行？电冰箱为什么能够致冷？收音机和电视机为什么能接收声音和图像信号，把它们再现出来？照相机和电影放映机的原理又是什么？什么是原子能？等等。要了解这些问题，都需要学习物理知识。还可以通过能为学生接受的，生动具体的事例，说明物理学对促进科学技术的发展和人类社会的进步所起的巨大作用。让学生了解，目前世界已进入了原子能、电子计算机、自动化、半导体、激光、空间科学等新技术的时代，现代科学技术正经历一场伟大的革命，使学生把学习物面向现代化、面向世界、面向未来联系起来，增强他们的学习责任感，激发他们的求知欲望。
3. **密切联系实际，指导学习方法** 讲述如何做好物理实验、如何学好物理概念和规律以及如何做好练习时，切忌照本宣科，空洞地说教。要通过具体的事例来说明问题。例如，讲述做实验的要求，可结合学生在初中实验中存在的一般问题，来说明怎样做是对的，怎样做是不对的；讲述要注意观察演示实验时，可实际做一、两个简单的实验，具体说明这个实验研究的是什么问题，应当观察什么，怎样观察，应当记录什么现象和数据，怎样记录，怎样分析看到的现象和处理实验数据，最后得到怎样的结论，等等；讲述如何解题时，也应结合具体例题说明解题的思考方法和一般步骤，给学生做一个良好的示范。

4. 误差和有效数字的教学 这部分内容按照课本的要求进行教学就可以了，不宜作更多的补充。参考资料中介绍的有关内容，只供教师参考，不宜向学生讲述。但可以告诉学生，误差和有效数字之间的关系；有效数字的最后一位就是误差所在的一位；由误差决定有效数字，这是处理一切有效数字问题的依据。因此在中学物理实验中，一般来说，要求估读到测量仪器最小分度的十分之几。由于误差和有效数字问题比较复杂，在处理实验数据和解题时，运算结果一般取两位或三位数字就可以了。还应告诉学生，对于原来有效数位数不多的数字，运算结果再取更多的位数，也是毫无意义的。

## 第三节 实验指导

### 一、学生实验

#### (一) 练习分析实验数据

这个实验并不要求学生进行实际测量，而是根据课本给出的某一次实验中所得的数据，来练习分析和处理实验数据的技能，了解分析实验数据对于得出物理量之间的关系和研究物理量变化规律所具有的重要意义。

教材要求通过给出的实验数据，用图象方法找出一定量的水，从容器底部不同直径的排水孔流出时，排尽水的时间  $t$  跟排水孔直径  $d$  的定量关系。在讲解这种方法时，要使学生了解“自变量”和“因变量”是根据所要研究的两个物理量的变化关系来确定的。对于容器中一定量的水来说，排尽水的时间  $t$  由水孔直径的大小  $d$  所决定，所以排水孔直径  $d$  是自变量，排尽水的时间  $t$  是因变量。但是，应该让学生注意，由于研究的问题不同，同一个物理量，有时是自变量，有时又是因变量。譬如，在研究做匀速直线运动的物体经过的路程对时间的关系时，时间就不再是因变量，而是自变量了。

在得出  $t-d$  图象是一条曲线之后，可以看出  $t$  随  $d$  的增大而减小，但这只是一个定性的关系，从生活经验或单从数据表也就足以判断了。所以必须作进一步的分析与猜想，以便得出定量的关系。由于水是从整个圆孔排出的，排尽水的时间  $t$  是否跟圆孔的横截面积  $S$  存在简单的反比关系呢？因为圆面积  $S$  是跟直径  $d$  的平方成正比的，如果这一猜想成立，那么，排尽水的时间  $t$  应该和  $d$  成反比，即  $t$  与  $1/d^2$  成正比。因此要计算出  $1/d^2$  的数值，描绘出  $t-1/d^2$  图象，看看是不是一条直线。要使学生明白建立在实验基础上的合理的猜想，是研究物理问题的一种重要的思想方法。

在分别画出水深为 30 厘米和水深为 10 厘米的  $t-1/d^2$  图象后，可以让学生自己得出排尽水的时间  $t$  跟排水孔横截面积  $S$  存在着怎样的关系，还可以让他们考虑，这一关系是否会因排水时的水深不同而有所改变？

#### (二) 游标卡尺的使用

这个实验要求学生通过实际操作，了解游标卡尺的构造和它的读数原理，正确掌握读数方法，学会正确使用游标卡尺。

实验前可利用游标卡尺的放大模型（也可以按课本图 10.2 所示的游标尺部分自制）先

使学生理解主尺最小分度是 1 毫米、游标尺上有 10 个小的等分刻度、总长度等于 9 毫米、准确度为 0.1 毫米的游标卡尺的读数原理。使用这种游标卡尺读数时在 0.1 毫米后还可估读一位，但不要求估读（详见参考资料）。

根据学生实际使用的游标卡尺制成游标尺部分的放大模型，让学生结合所用的游标卡尺，观察了解这种卡尺的主尺最小分度是多少毫米？游标尺上有多少个小的等分刻度  $t$  总长度等于多少毫米？读数时的准确度为多少毫米？如果使用准确度为 0.05 毫米或 0.02 毫米的游标卡尺，由于读数误差发生在毫米读数的百分位，因此不应再估读一位（详见参考资料）。

在使用游标卡尺练习测量金属管的长度、内径和外径时，课本要求在测长度时每次测量后让金属管绕轴转过  $45^\circ$  再测量下一次；测内径和外径时，要在管子的两端分别量出两个互相垂直的内、外径，然后分别求出它们的平均值。应该使学生了解为什么要这样测量的原因。采用多次测量求平均值的方法可以减小测量时的偶然误差，但是在这个实验中多测量是为了弥补金属管可能不是一个理想圆柱体而造成的误差，这也是一种常规的测量方法。

得出金属管的内径和外径的平均值求得金属管的体积后，还可以启发学生思考，利用这些数据如何来计算金属管的管壁厚度？

### （三）螺旋测微器的使用

这个实验要求学生通过操作了解螺旋测微器的构造和它的读数原理，正确掌握读数方法，学会正确使用螺旋测微器。

实验前可利用螺旋测微器的放大模型，让学生结合所用的螺旋测微器进行观察，了解其结构，并让学生将旋钮  $K$  向逆时针方向慢慢旋动，使测微螺杆  $P$  慢慢后退，同时观察当  $P$  后退 0.5 毫米时，可动刻度  $H$  恰好转过 50 格，即转过一周。因此，可动刻度每转过 1 格，就相当于沿着螺旋的轴线方向移动  $0.5/50$  毫米 = 0.01 毫米（不要误认为可动刻度上每 1 格的长度 - 两条刻度线间的距离等于 0.01 毫米），所以用螺旋测微器测量长度时可以准确到 0.01 毫米。

关于读数问题。螺旋测微器的零误差在使用前应先调整好，使得基本上没有零误差，这样，在读数时只需先读出固定刻度尺上的毫米读数，再加上可动刻度的读数，而不必考虑零误差的存在。读数时要特别注意观察固定刻度尺上表示半毫米的刻线是否已经露出，由于固定刻度尺上的刻线较粗，有时很难判断究竟半毫米的刻线已经露出还是即将露出，这时就应看可动刻度  $H$  上零刻线的位置是在固定刻度尺的准线之上，还是在准线之下，如果在准线之下，就表示半毫米的刻线已经露出（图 1），则在读数时应加上 0.5 毫米。此外，在读数时还应估计一位读数（不可靠的），如果认为可动刻度  $H$  上的基条刻线正好跟固定刻度尺  $S$  上的准线重合，则读数时最后一位的估计读数应为 0，在记录读数时，这个 0 也应写出，虽然这个 0 并不是可靠的。如图 1 所示的读数应为 6.540 毫米。

关于正确使用螺旋测微器的方法，应指导学生阅读课本 340 页上有关的叙述，并通过演示示范，要求学生严格遵守。

在完成课本要求的测量后，还可让学生用螺旋测微器测量一下自己的头发的直径，如

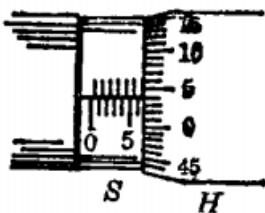


图 1

果时间允许，还可以事先准备一些包装香烟用的薄铝箔（去除后面的衬纸，铝箔厚度约为 0.01 毫米左右），让学生分别用游标卡尺和螺旋测微器测量它的厚度，从而体会螺旋测微器是比游标卡尺更精密的测量长度的工具。

## 第四节 参考资料

### 一、测量误差的估计

测量的结果不可能绝对精确，总会产生误差，对于测量结果，可以信任到何种程度，需要知道测量误差，由于误差是测量值与真实值之差，而真实值本身是不能确切知道的，因此对于测量误差只能是估计。

#### (一) 多次测量结果偶然误差的估计

为了减少偶然误差，在可能的情况下，总是采用多次测量，以多次测量的算术平均值作为测量结果，即

$$N = \bar{N} = \frac{1}{k}(N_1 + N_2 + \dots + N_k)$$

根据误差的统计理论，算术平均值  $N$  最接近于真实值。

在这种情况下，通常简单的估计方法，是用算术平均偏差  $\delta$  来表示多次测量结果的偶然误差。

设第  $i$  次测量值  $N_i$ ，与平均值  $N$  的偏差为  $\delta_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$ , 即

$$\delta_1 = N_1 - N, \delta_2 = N_2 - N, \dots, \delta_k = N_k - N$$

则算术平均偏差

$$\delta = \frac{1}{k}(|\delta_1| + |\delta_2| + \dots + |\delta_k|)$$

#### (二) 一次测量结果误差估计

有些情况下，测量不能重复或者不需要精确测量，则需要估计一次测量结果的误差，这时可以根据测量仪表所注明的误差来估计。例如 2.5 级电表，它的一次测量误差可估计为满刻度的 2.5%，如果没有注明，可取仪表最小分度值的一半作为测量误差，例如最小分度为毫米的刻度尺，它的一次测量误差可估计为 0.5 毫米。

需要说明的是，测量误差应当包括系统误差和偶然误差两个方面，有些情况下，主要是系统误差；有些情况下，主要是偶然误差。估计误差时，要作具体的分析，实际上，往

往情况比较复杂，要对测量结果的误差作出估计，不是一件容易的事，在中学，并不要求学生估计误差。

## 二、绝对误差和相对误差

实际上，常把测量结果写成  $N \pm \Delta N$  的形式。其中  $N$  是测量值，它可以是一次测量值，也可以是多次测量的平均值  $\bar{N}$ ； $\Delta N$  是测量误差值，叫做绝对误差。绝对误差给出了测量值的误差范围，但这并不排除多次测量中有的测量值在  $N \pm \Delta N$  以外。

用绝对误差不能对测量结果的好坏给出一个十分清楚的概念。于是引入了相对误差的概念，相对误差用  $\Delta N/N$  表示，也叫做百分误差。

相对误差与绝对误差的关系是

$$\Delta N = N \times \frac{\Delta N}{N}$$

误差与有效数字密切相关，由于误差本身是一个估计数，所以，一般情况下误差的有效数字只取一位，在特殊情况下也不超过两位，多了是没有意义的。

根据有效数字的含义，有效数字的最后一位是有误差的。因此，有效数字的最后一位一定要同误差所在的一位取齐。这就是说，有效数字的位数取决于绝对误差。

相对误差与有效数字之间的关系，大体上讲，有效数字的位数越多，相对误差就越小；有效数字的位数越少，相对误差就越大，例如， $1.320 \pm 0.001$  厘米，有效数字是 4 位，相对误差  $\frac{0.001}{1.320} \approx 0.08\%$ ； $1.3 \pm 0.1$  厘米，有效数字是 2 位，相对误差  $\frac{0.1}{1.3} \approx 8\%$ ，一般说来，两位有效数字的相对误差为十分之几至百分之几，三位有效数字的相对误差为百分之几至千分之几，依此类推。

## 三、测量仪器的读数规则

原教育部颁布的《高中物理教学纲要（草案）》，要求学生实验测量中能按有效数字规则读数。那么，有效数字的读数规则是什么，如何要求学生按有效数字规则读数呢？

有效数字的最后一位一定要同误差所在的一位取齐，这是考虑有效数字的依据。因此，测量仪器的读数规则应当是：测量误差出现在哪一位，读数时就应读到哪一位，这样，就要首先估计测量误差，然后再确定读到哪一位。这里讨论一下电表的读数问题，中学生使用的电表的准确度是 2.5 级，即在规定的使用条件下，最大误差不超过满刻度的 2.5%。

安培表有 3 安培和 0.6 安培两个量程，使用 3 安培量程时，误差是  $3 \text{ 安} \times 2.5\% = 0.075$  安，即误差出现在安培的百分位。这时表的最小分度是 0.1 安培，即可以准确读到安培的十分位，因此，使用 3 安培量程时，应估读一位到安培的百分位。使用 0.6 安培量程时，误差  $0.6 \text{ 安} \times 2.5\% = 0.015$  安，即误差也是出现在安培的百分位，这时表的最小分度是 0.02 安培，即可以准确读到 0.02 安培，因此，使用 0.6 安培量程时，只能读到安培的百分位，可以估读半小格，如果估读到安培的千分位，则是无意义的了。

伏特表有 15 伏特和 3 伏特两个量程使用 15 伏特量程时，误差是 0.37 伏特，即误差出现在伏特的十分位。这时表的最小分度是 0.5 伏特，即可以唯确读到 0.5 伏特。因此，使用 15 伏特量程时，应读到伏特的十分位，即可以估该五分之一小格，使用 3 伏特量程时，

跟安培表 3 安培量程的情况一样，应估读一位到伏特的百分位。

可以看出，实验测量中，究竟读取几位有效数字，要作具体分析。然而，中学关于误差和有效数字的教学要求不高，并不要求估计测量误差，在处理实验数据和解题时，运算结果一般取两位或三位数字就可以了。因此，在中学的实验测量中，一般来说，可以要求学生估读到测量仪器最小分量的十分之几。

#### 四、游标卡尺的读数问题

课本里讲的十分度游标卡尺，游标有 10 个等分刻度，总长等于 9 毫米（图 2）。这种卡尺的游标读数值（即主尺与游标每个分度的差值）是  $1.0\text{mm} - \frac{9.0}{10}\text{mm} = 0.1\text{mm}$ ，还有一种十分度游标卡尺的游标总长等于 19 毫米（图 3）。这种情况下，主尺上的两个分度（2 毫米）与游标上的一个分度相当，因此它的游标读数值是  $2.0\text{mm} - \frac{19}{10}\text{mm} = 0.1\text{mm}$ ，即也是 0.1 毫米。

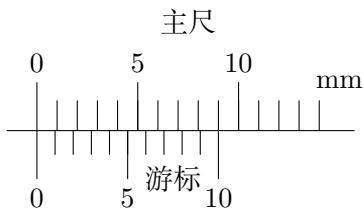


图 2

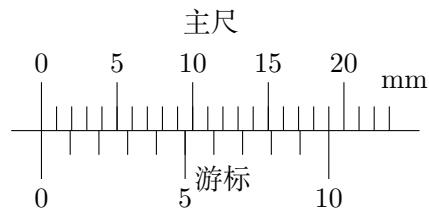


图 3

不难看出，游标卡尺的测量误差为游标读数值的一半。因为当我们采用游标上的某一刻度读数时，这一刻度与主尺上相当的刻度的距离就不会超过游标读数值的一半。否则，跟游标上这一刻度左右相邻的两个刻度中，必有一个跟主尺上的刻度更为接近。

因此，游标读数值是 0.1 毫米的游标卡尺，误差是 0.05 毫米，即误差出现在毫米的百分位。于是，这种游标卡尺，毫米的百分位可以估读为“0”，表示误差出现在毫米的百分位，如果无法判断游标上相邻的两条刻度哪一条跟主尺上的刻度重合或更接近，则毫米的百分位可估读为“5”。如图 4 所示，读作 0.55 毫米。

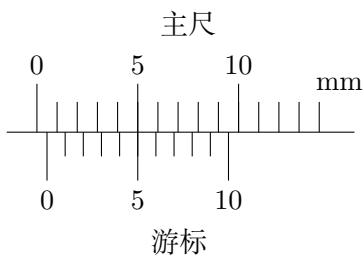


图 4

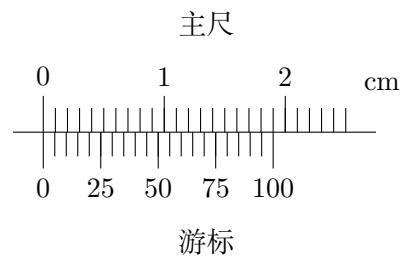


图 5

二十分度（即游标有 20 个等分刻度）游标卡尺的游标总长等于 19 毫米（图 5）或等于 39 毫米（图 6）。它们游标读数值是  $1.0\text{mm} - \frac{19}{20}\text{mm} = 0.05\text{mm}$  或  $2.0\text{mm} - \frac{39}{20}\text{mm} = 0.05\text{mm}$ ，即都是 0.05 毫米，还有一种十分度游标卡尺，主尺的最小分度是 0.5 毫米，游标总长等于 4.5 毫米（图 7）。它的游标读数值也是 0.05 毫米（注意：这种情况下，主尺上的一个分度是 0.5 毫米，跟游标上的一个分度 0.45 毫米相当）。

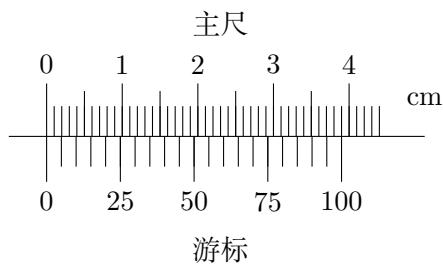


图 6

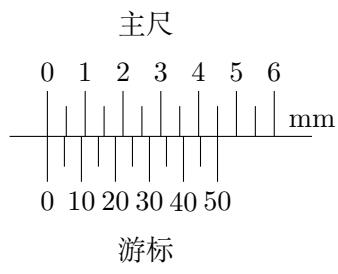


图 7

对于游标读数值是 0.05 毫米的游标卡尺，误差是 0.025 毫米，即误差出现在毫米的百分位，而用这种游标卡尺测量长度时，可以直接读到毫米的百分位，因此无需再估读了。

还有两种游标读数值是 0.02 毫米的游标卡尺，如图 8 和图 9 所示，它们的误差是 0.01 毫米，即误差也是出现在毫米的百分位，用这种游标卡尺测量长度时，也是可以直接读到毫米的百分位，因此也无需再估读了。

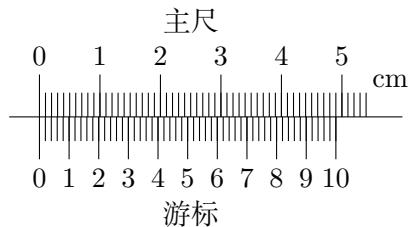


图 8

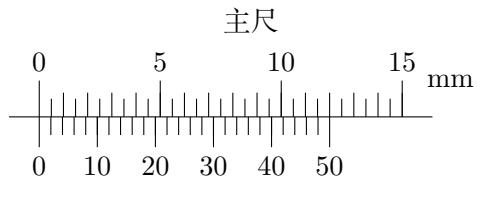


图 9

综上所述，用各种常用的游标卡尺测量长度时，误差都出现在毫米的百分位。由于游标卡尺的误差问题比较复杂，游标读数值为 0.02 毫米和 0.05 毫米的游标卡尺也不需要估读，因此中学课本里没有讲解游标卡尺的误差问题，也不要要求中学生使用游标卡尺时进行估读。

# 第一章 力

---

<b>第一节 教学要求</b>	<b>2</b>
<b>第二节 教学建议</b>	<b>3</b>
一、第一单元	3
(一)力的概念和图示	3
(二)重力	4
(三)形变与弹力	4
(四)摩擦力	5
(五)作用力和反作用力	5
(六)物体受力情况分析	5
二、第二单元	6
(一)力的合成	6
(二)力的分解	6
三、第三单元	7
(一)矢量与标量	7
(二)一维矢量运算	7
<b>第三节 实验指导</b>	<b>7</b>
一、演示实验	7
(一)重心的实验测定方法	7
(二)物体形变时产生的弹力	8
(三)显示微小形变的实验装置	8
(四)扭转形变	9
(五)静摩擦和滑动摩擦	9
(六)作用力和反作用力	9
(七)力的合成的平行四边形法则	10
(八)合力的大小跟分力夹角的关系	11
(九)力的分解	11
二、学生实验	14
(一)测量滑动摩擦系数	14
(二)互成角度的两个力的合成	14
三、课外实验活动	15
(一)测量尼龙丝的抗断拉力	15
<b>第四节 习题解答</b>	<b>17</b>
一、练习一	17

二、练习二 . . . . .	18
三、练习三 . . . . .	18
四、练习四 . . . . .	19
五、练习五 . . . . .	20
六、练习六 . . . . .	22
七、练习七 . . . . .	23
八、习题 . . . . .	26
<b>第五节 参考资料 . . . . .</b>	<b>30</b>
一、四种基本的力 . . . . .	30
二、力的等效移动 . . . . .	30
三、关于塔式起重机的简单说明 . . . . .	32

---

## 第一节 教学要求

这一章讲述力的初步知识，为了减少学生开始学习高中物理时遇到的困难，降低与初中物理的台阶，本章不讲静力学的知识，只讲学习动力学所必需的预备知识。

这一章的教学要求是：

1. 正确理解力的概念，认识力是物体对物体的作用；知道重力、弹力、摩擦力的产生条件以及它们的大小和方向；掌握倔强系数，会计算弹簧的弹力；掌握滑动摩擦系数，会计算滑动摩擦力。
2. 进一步认识力是物体间的相互作用，掌握牛顿第三定律。
3. 初步学会分析物体的受力情况，会画物体受力图。
4. 理解合力和分力的概念，掌握平行四边形法则，知道三角形法，会用作图法和公式法求合力和分力。

在重力的教学中讲到了物体静止时拉紧悬绳的力或压在水平支持物上的力，其大小等于物体所受的重力。在这节很难从道理上把这一点讲清楚，先要求学生作为事实接受下来，讲过牛顿第三定律后再来解决，这里所以要提到这一点，是使学生对重力的大小有个具体认识，但主要还是因为在讲牛顿第三定律之前就要用到它，如在计算摩擦力的习题中，在测定滑动摩擦系数的学生实验中，都要用到。

弹力的方向问题比较复杂，在中学阶段经常遇到的弹力大都是支持力和拉力，因此，弹力的方向是就支持力和拉力这两种情形来讲解的，并要求学生掌握，以便以后进行力的分析。

在讲述胡克定律之前，为了扩展学生的眼界，先就几种基本的形变定性说明：形变越大，弹力也越大，对金属丝的扭转形变，说明扭转角度越大，弹力也越大，是考虑到以后讲卡文迪许扭秤和库仑扭秤时要用到，这里并不要求详细地讨论。胡克定律是就弹簧的弹力来讲的，给出了倔强系数的概念，但不要求全面分析它跟弹簧的哪些因素有关，胡克定律的公式写成  $f = kx$ ，没有写成  $f = -kx$ ，是考虑到这里还没有讲一维矢量的运算，写成前者初学者容易接受；讲到简谐振动时再考虑弹力的方向，写成后者。

摩擦力的教学，重点是讲述滑动摩擦力，静摩擦的教学，只要求学生了解静摩擦和最大静擦力的概念，不讲静摩擦系数。在讲解滑动摩擦时提到相对滑动，在讲解静摩擦时提到相对运动趋势，只是为了讲解得确切一些，不要求涉及较为复杂的情形（例如一个物体在传送带上相对滑动或相对静止）来展开讲解。

讲述物体受力分析，既是教给学生一种分析方法，也是前面学过的知识的综合运用。考虑到学会物体受力分析要贯穿在整个力学教学中，本章只限于分析最基本的事例。讲述分析方法，要强调明确研究的对象，分析时应强调力是物体对物体的作用。至于按照什么顺序（如按重力、弹力、摩擦力的顺序）来分析力，不宜过分强调，强调得过分，甚至要求学生死记住一个分析的顺序，对于学生灵活运用知识，学会分析方法，都是没有好处的。物体的受力情况实际上往往是很复杂的，根据具体的问题，可以略去某些次要因素。这种研究问题的方法，应该作为一项要求向学生提出，在以后作力的分析时也要注意这一点。

力的合成和分解的教学，主要是使学生掌握力的平行四边形法则。三角形法在实际中常常用到，学生应当知道。但应该使学生明确，三角形法并不是另外一种新方法，只是平行四边形法的简化。

## 第二节 教学建议

这一章内容，建议在教学中分为三个单元：

第一单元（第 1 节——第 7 节）讲述力的概念和力学中常见的三种力，并在此基础上讲述牛顿第三定律和物体受力情况分析。

第二单元（第 8 节——第 10 节）讲述力的合成和分解。

第三单元（第 11 节——第 12 节）在前面讲过的力的矢量性的基础上，讲述矢量的初步知识。

### 一、第一单元

这一单元，首先通过重力、弹力、摩擦力这三种常见的力和牛顿第三定律的教学，使学生比较具体地认识力的概念和性质，包括力是物体之间的相互作用，力有大小、方向和作用点等，然后引导学生初步掌握物体受力情况分析的方法，为进一步学习力学知识打下基础。

#### （一）力的概念和图示

这部分内容大部分在初中已经学过，是复习性的。但是有一些学生，虽然能记住学过的知识，并不真正理解、会用，所以对这部分内容的教学仍然要给予足够的重视。

力的概念的教学，最主要的是通过演示和说明使学生真正理解力是物体对物体的作用，只要有力就一定有施力物体和受力物体，力不能离开物体而存在。这是力学中最基本的事实。可以通过一些实际的例子让学生指出施力物体和受力物体，学生牢牢地掌握这一点，就不会离开物体的作用凭空设想出多余的力来，有助于学好后面的物体受力分析。

关于力的图示，要强调表示力的每条有向线段，都要根据选择好的标度，按照一定的比例来画。有的同学，往往用不同的标度来画同一物体所受的不同的力，这种错误应该及

时给予纠正，一般情况下，力的作用点都可画在物体的质心上。由于教材没有介绍质心这个概念，在实际作图时，只要在表示物体的图形中间选择一个适当的点来表示力的作用点就可以了，但是也有个别情况，例如第一次介绍摩擦力的方向时（课本图 1.12），为了清楚起见，把摩擦力  $f$  画在接触面上，而且还把相互接触的两个物体画得离开一些。以后还应逐步使学生知道，在分析力学问题时，有时只须画出力的示意图。力的示意图常常是为了使物体的受力分析更清楚而作的，它在力的大小、标度上的要求，不象力的图示中要求的那么严格，但是对力的方向、力的相对大小也不能画错。在另一些情况下，例如，在物体的受力分析之后，需作它的受力图并用图示法来解题，这时的受力图又必须按力的图示的要求来作图了。但是在本节的教学中，只须按课本上的要求进行就可以了。

## （二）重力

关于重力的概念，按教材上所讲的“由于地球的吸引而使物体受到的力叫做重力”来进行教学是适宜的，它既浅显易懂，也没有把引力与重力等同起来。这里也不宜过早的把地球对物体的引力与重力相区别，以后在教学中会逐步讲清楚的。

应该注意的是，教材上把重量定义为物体所受的重力，按照国务院颁布的法定计量单位，重量是质量的同义词。这种差别的产生是因为教材是在法定计量单位颁布前编写的。这一点，在教学中应该向同学们讲清楚。

物体所受重力的大小，可以用静力学的方法来确定，这就是教材上讲的物体静止时拉紧悬绳的力或压在水平支持物上的力，它们的大小都跟物体所受的重力相等。应该让学生注意的是，重力是地球作用在物体上的力，受力者是物体，而物体对悬绳的拉力或对支持物的压力，受力者是悬绳或支持物，它们跟重力是作用在不同物体上的力，不能把它们跟重力相混淆。

重力这一节的教学，也是具体地通过这种常见的力来表明：力是物体对物体的作用，力有大小、方向和作用点，从而使学生逐步加深对力这个抽象概念的理解。重心的概念，也是从重力的概念引伸出来的，因为课本不讲同向平行力的合成，不要追求概念的严谨，补充重心的定义，通过课本中图 1.2 的演示，很容易说明“一个物体的各部分都要受到地球对它的作用力，我们可以认为重力的作用集中于一点，这一点叫做物体的重心。”

## （三）形变与弹力

这一内容的教学，应着重于有关形变与弹力的实验演示（包括显示微小形变的实验演示），使学生从直观上来理解和接受，而不宜增加关于形变产生弹力的微观解释。课本中说明弹力与重力不同，弹力只有在物体直接接触并产生形变时才能产生。而实际上，有时微小形变又不易察觉，这样从表观上就不易直接判别出相互接触的物体之间究竟是否有形变与弹力产生。原则上这里只须提醒同学注意这个问题，至于进一步具体判断的方法，应在以后学习物体的平衡等节内容时再作讨论。有关弹力方向的问题，宜按课本中的提法，即第 13 页和第 14 页两段有波纹线的文字，说明支持力和拉力的方向，由于还存在扭转、切变等种种形变，教学中不宜笼统地表述为“弹力的方向总是指向……”的形式。

#### (四) 摩擦力

摩擦力一节的教学重点是滑动摩擦力，教学时可在初中学过的知识基础上，通过演示得出关系式  $f = \mu N$ ，引出滑动摩擦系数的概念，对于这个公式，有的同学往往误认为压力  $N$  的大小总是跟滑动物体所受的重力相等，教师应该让他们知道，压力  $N$  是跟两个物体的接触面垂直的。只有物体在水平拉力作用下沿水平面滑动时，压力  $N$  的大小才跟物体所受的重力相等，在其他情况下，例如物体沿斜面下滑时，压力  $N$  并不等于物体所受的重力。

摩擦力不是教学的重点，在判断静摩擦力的方向时，同学们对相对运动趋势常常感到比较抽象。在不讨论静摩擦力作为动力的情况下（如传送带上的物体等），可引导同学这样来认识：按照已经给定的力来看，物体本是要运动的，但实际上物体却处于静止状态，那阻碍物体运动的力便是静摩擦力。这样静摩擦力的方向也就随之而明确了。

#### (五) 作用力和反作用力

牛顿第三定律是一个基本定律，是本章的重点，讲好重点知识，应该引导学生抓住定律的主要之点。对初学者来说，牛顿第三定律的主要之点就是作用力和反作用力分别作用在相互作用的两个物体上，教材正是抓住了这一点，通过实例和演示，反复加以说明，而没有侧重于作用力和反作用力是同种性质的力，它们同时产生、同时消失。在教学中应该注意这个问题，不能把主要之点当作自明之理一带而过，把力量耗费在讲述一些次要问题上。讲解牛顿第三定律，也是在进一步扩展学生对力的概念的认识，明确力是物体对物体的相互作用。关于作用力和反作用力跟平衡力之间的区别，学生常常理论上知道，实际上还会混淆。教学中要通过一些实例，引导学生搞清两者的区别。例如，可以分析放在桌面上的静止物体，找出它所受的一对平衡力，以及物体所受的重力和它对桌面的压力的反作用力，还可以分析用悬绳挂在天花板下的物体，找出作用在物体和悬线上的平衡力，以及地球和物体，物体和悬绳、悬绳和天花板间的作用力和反作用力。当然这个问题也不是一堂课所能解决的，下一节物体受力分析，还要讨论这类问题。

#### (六) 物体受力情况分析

这一节内容，是在以前各节预备知识的基础上提出的，是前面各节有关知识的应用，这一节内容的安排也是循序渐近的：从静止物体到运动物体，从平面上的物体到斜面上的物体，从具体实例上升到分析物体受力情况的一般方法——隔离法。

在教学上要注意：

1. 引导学生正确地搞清楚研究对象，施力物体与受力物体；
2. 要找到分析对象受到的所有力，不能遗漏，但也不能“无中生有”，不能“张冠李戴”；
3. 不能只讲一般原则和注意事项，不能仅靠课堂上受力分析的示范，还要行适量的实例练习，画出受力图，及时发现问题，及时引导同学自觉纠正错误，逐步掌握正确的受力分析方法。

物体受力情况是各种各样的，因此不可能在这一节教学中要求学生完全掌握，要有一

个过程。循序渐进在这里特别重要，切不可一次就补充很多复杂的题目让同学分析。这样反而会使同学无所适从，甚至产生畏难情绪。对隔离法的教学要求尤宜如此，所以课本中没有提出连接体之类的繁难问题，而把重点放在引导学生理解和掌握受力分析的方法和思路上。如果学生能掌握正确的方法和思路，则他们自己也会逐渐独立地解析各种力学题目。

在受力分析时，常常忽略某些次要因素，这也是使所研究的问题理想化，应该在教学中引导同学重视并逐渐熟悉这种方法。例如物体下落时，相对于重力来说，可以忽略空气阻力这一次要因素，通过理想化才构成了自由落体运动这一模型。以后的教学中还要不止一次地运用这种方法，使本来很复杂的问题，能够较容易地入手研究。当然这些话并不是都要在这节课中向学生一一说明的。

## 二、第二单元

这一单元讲力的合成和分解，主要使学生掌握力的平行四边形法则。这个法则是进行力学计算的基本规律，是本章的又一重点，由于学生初次接触这种运算，很不习惯，因此也是难点。教学中应该通过演示，实验和力的图示，使学生理解和掌握这一规律。

### (一) 力的合成

在讲合力和力的合成的概念时，首先要从生活中的事例出发，让学生理解几个力共同作用的效果可以跟另外一个力单独作用的效果相同，例如，一件行李，可以由两个人共同提，也可以由一个人提；吊起一个重物，可以用两根悬绳，也可以只用一根悬绳；一辆车子，可以由几个人推着它匀速前进，也可以由一个人推着它匀速前进，等等，然后再引入合力和力的合成的概念，这可以使抽象的概念具体化，便于学生理解。力的平行四边形法则的教学，做好课本中图 1. 22 的演示实验是个关键。可以把实验装置装在竖立的小黑板上，边讲边画出力的图示，还要事先设计好几组不同的数据，不要只由一次实验的结果就总结出规律来。在处理力的三角形法时，可以只把它当作代替力的平行四边形法则的简单的作图法，介绍三角形法时，要学生搞清楚“首尾相接”的意思，以免把合力的方向搞错，有的同学对于合力跟分力之间的关系认识不清，学了力的合成以后，往往认为物体在受到几个力作用的同时，还要受到它们的合力的作用。这种错误认识应该纠正，要使学生认识，合力与分力之间是等效“代替”的关系，而不是合力跟分力同时作用在物体上。

### (二) 力的分解

在讲力的分解时，也要通过实例和演示，使学生体会：一个力往往可以产生几个效果。例如，在同一悬点上，用两根悬绳吊起一个物体，物体对悬点的竖直向下的拉力，产生了同时拉紧两根悬绳的效果，由此可以引出分力和力的分解的概念。

在讲述怎样分解一个力时，教材是通过两个实际的例子，得出一个力可以根据它产生的效果进行分解的结论，在这里，教材上的提法是谨慎的、留有余地的。因为在许多情况下，力的分解不是根据它产生的实际效果，而是要按照研究问题的方便来进行的，大家熟知的力的正交分解法就是一个很好的例子。

### 三、第三单元

这个单元是在前两个单元的知识基础上，提出矢量的概念，并学习同一直线上的矢量的运算方法，为以后直线运动中位移和速度的合成提供了依据。

#### (一) 矢量与标量

这节教材的教学，主要在于讲清楚矢量与标量的不同含义和不同运算法则。这里从力的合成要按照平行四边形法则来进行，外推到平行四边形法则也是矢量合成（矢量加法运算）的普遍法则就够了，无须再举例展开，矢量与标量在运算规则上的不同，教学中也只举加法运算为例，至于矢量的减法和乘、除运算就更不须提出来进行比较了。

#### (二) 一维矢量运算

在同一直线上的矢量的运算，是矢量运算中最简单的情况，在讲过一般的矢量加法运算之后，在这里作较为详细讲述，是因为以后讲直线运动时要用到这一知识，要着重讲清：先要沿着矢量所在的直线选定一个正方向，规定凡是方向跟正方向相同的矢量都取正值，凡是方向跟正方向相反的矢量都取负值。这样，就可以用一个带有正负号的数值把矢量的大小和方向都表示出来，从而把同一直线上的矢量运算简化为代数运算，为下一章直线运动中位移和速度的运算提供了很大的方便。教学中应该引导学生重视这一节内容并仔细阅读认真领会课文，要弄清楚课本上说的“可以用一个带有正负号的数值把矢量的大小和方向都表示出来”的含义，是把矢量的大小和方向分开来表示的。例如  $F = -6$  牛，力的大小用数值和单位（6 牛）表示，而力的方向则按跟预先规定的正方向相同或相反（取正号或负号）来表示，掌握了这个基本点，一维矢量的运算就容易弄清楚了。

## 第三节 实验指导

### 一、演示实验

#### (一) 重心的实验测定方法

在演示课本图 1.4 所介绍的用悬挂法测物体的重心位置时，应使学生明确：

- 利用这种方法测重心只能用于薄板状（即厚度极小可以忽略）的物体，任何有厚度的物体的重心不会在物体的某一个表面上。
- 重心可以不在物体上，如用悬挂法可以测出一个薄板状的塑料衣架的重心  $C$  并不在衣架上（图 1.1）。一个薄板状的圆环的重心一定在环心上。

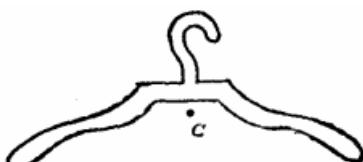


图 1.1

### (二) 物体形变时产生的弹力

在做课本图 1.5 的实验时, 为了突出所观察的是一端固定的弹簧被拉长和被压缩时所产生的弹力对小车的作用, 小车上不必加放砝码, 以免分散学生的注意力。如果为了使效果明显可用倔强系数较小的弹簧。

课本图 1.6 所示的现象, 要用较大的、一侧透明的水槽, 圆木的质量又必须足够大, 一般不容易演示, 如果用投影仪, 则不易看清细木棍的弯曲形变的恢复过程, 因此建议改用细木条 (用制作模型飞机的木条  $1 \times 2 \times 300\text{mm}^3$ ) 把一辆原来静止的小车推开的现象来演示。

演示课本图 1.7 的现象时, 可用洗澡用的或做沙发床垫用的塑料, 观察发生形变和形变的恢复, 效果较好。

### (三) 显示微小形变的实验装置

可按课本图 1.10 的装置进行演示, 为了使效果明显, 应使两块平面镜  $M$  和  $N$  间的距离相隔得尽可能远些, 屏幕可利用教室的墙壁, 以便离开平面镜  $N$  的距离更大些。如果用激光作为光源, 在教室内就可演示。如果用白炽灯制成的平行光源, 则需在作为屏幕的墙的一边, 用黑窗帘 (或黑纸) 把窗户局部遮光。

这一装置是利用光在均匀媒质中的直线传播和平面镜组对于光线的二次反射原理制成的, 在入射光线的方向不改变的情况下, 如果平面镜转过  $\theta$  角, 则反射光线将偏转  $2\theta$  角 (图 1.2), 当在桌面上施加一个压力, 桌面发生微小的弯曲形变时, 两块原来平行放置的平面镜就不再平行了,  $M$  将向左侧偏斜一个微小角度  $\theta$ ,  $N$  将向右侧偏斜一个微小角度。由于  $M$  的偏斜, 使得反射角变小了  $2\theta$ 。对平面镜  $N$  来说, 入射光线的方向已发生了变化, 又由于  $N$  的偏斜, 使得入射角比原来减小了  $2\theta - \theta'$ 。于是从  $N$  反射的光线的偏离程度就更大。即反射角将变小  $2(2\theta + \theta')$ 。再加上由于屏幕离  $N$  的距离  $r$  较远, 即使  $\theta$  和  $\theta'$  都十分微小, 光点在屏幕上的移动距离  $\Delta s \approx r \times 2(2\theta + \theta')$  仍是十分明显的, 这种利用光线的二次反射把微小效应放大的作用, 常称为“光杠杆的放大作用”。

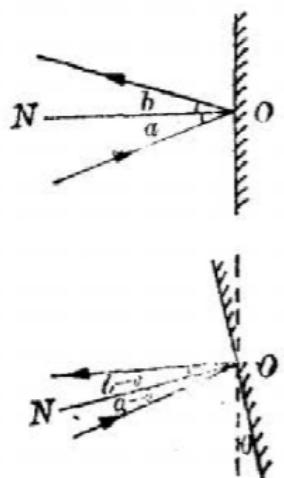


图 1.2

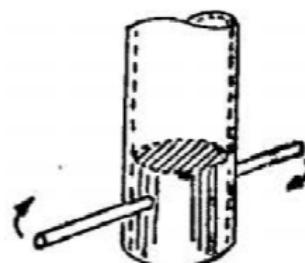


图 1.3

#### (四) 扭转形变

课本图 1.11 所示的扭转形变，可用直径为 20—25 毫米的橡皮管进行演示，沿着管轴方向平行地用颜色漆划几条线，在橡皮管的两端各塞上一小段圆木，把管子的一端用试管夹固定起来，在另一端用一根粗铁丝沿塞子的直径方向穿过（图 1.3）。这样，当在铁丝上加一力偶使它转过一个角度时，就可明显地显示出扭转形变。

#### (五) 静摩擦和滑动摩擦

如图 1.4 所示，先用水平仪把长木板调节水平，并调节滑轮  $P$  或调节固定在木块  $B$  上的钩子  $C$  的位置，使得细绳被拉直时与长木板表面平行。在砝码盘  $A$  中加一小砝码，木块  $B$  仍能保持静止。通过对木块  $B$  进行受力情况的分析，说明静摩擦力的存在，然后在砝码盘  $A$  中逐渐增加砝码，直到  $B$  开始运动。这说明在木块开始运动之前所受到的静摩擦力是随着细绳拉力的增大而增大的，但静摩擦力的增大有一限度，即存在一个最大静摩擦力。

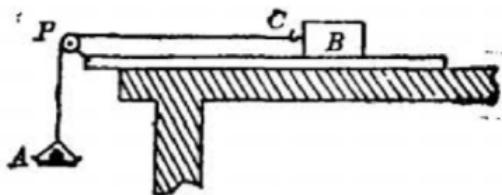


图 1.4

适当调整盘中砝码的数量，使得木块  $B$  能沿着长木板做匀速直线运动（不要求很精确，只要大致是做匀速运动就可以了），通过对木块  $B$  进行受力情况的分析，可知木块所受到的滑动摩擦力的大小等于细绳的拉力。通过对砝码盘  $A$ （连同其中的砝码）的受力分析，可知细绳的拉力等于盘和盘中所加砝码所受重的和，从而可知这时木块所受到的滑动摩擦力的大小就等于盘  $A$  和盘中砝码所受重力的和。

在木块  $B$  上加一大砝码（100 克或 200 克），必须重新调整盘中砝码的数量，才能使  $B$  做匀速直线运动，测出增大了压力后滑动摩擦力的数值，由此可说明滑动摩擦力的大小是跟接触面间的压力大小有关。

在木块  $B$  的另一个面上事先贴好一张比较粗糙的纸，再用这个粗糙面跟木板接触，重做实验，发现必须重新调整盘中砝码的数量，才能使  $B$  做匀速直线运动。这说明在压力不变的情况下，滑动摩擦力的大小还跟接触面的材料性质和粗糙程度有关。

#### (六) 作用力和反作用力

课本图 1.13 的实验在课堂上不能做，可以要求学生在划船活动时有意识地进行。在课堂教学中可以用两辆小平板车，请两位学生蹲在小车上，面对面地用手互相推动，来观察两辆小车互相被推开，向相反方向运动的情况，演示时可让甲同学将手掌对着乙同学，由乙同学推甲同学的手；再让乙同学将手掌伸向甲同学，由甲同学施力于乙同学；最后再由甲、乙两同学同时通过手掌施力于对方。可以观察到这三种情况下，小车的运动情况是

相同的.

课本图 1.14 的现象要用投影仪来观察, 所用的小磁铁和铁块的质量要相近, 但不要太大, 软木塞要用大些的, 不然由于重心较高, 在软木塞运动过程中磁铁(或铁块)可能会翻落下去, 也可以将磁铁和铁块分别用细线缚在软木塞上, 并且都把它们翻过来放置, 让磁铁和铁块在水中相互吸引, 这在投影时的效果是相同的.

为了便于直接观察, 也可以用一块较大的条形磁铁和一块质量相近的铁块, 分别在它们的下面垫放几支粉笔(如果粉笔是圆台形的, 刚应将粉笔粗的一端和细的一端交错放置)以减少摩擦, 直接在讲台上演示, 效果很明显. 演示时可先将磁铁用手按住, 使铁块接近到某一适当距离, 可观察到铁块被吸引过来; 再将铁块按住, 使磁铁接近到某一适当距离, 可观察到磁铁被吸引过来; 然后再将两手控制住磁铁和铁块, 调节它们之间的距离, 同时将手放开, 可观察到磁铁和铁块相互吸引, 彼此靠近直到吸在一起, 这一演示说明了力是物体与物体间的相互作用, 任何施力物体也必然是受力物体.

课本图 1.15 的实验定量地说明了作用力和反作用力的关系, 是讲解牛顿第三定律的实验基础. 在进行这个实验之前, 事先应做好准备, 试一下这两个弹簧秤的钩子勾在一起沿水平方向拉动时, 两个弹簧秤的示数是否总是相等. '为了增加可见度, 可在弹簧秤的指示器上贴两块小纸.

将一玩具汽车(电动的或弹簧发条的)放在一块较大的泡沫塑料平板上, 平板下面垫放若干玻璃试管以减小摩擦. 当汽车开动时, 可观察到塑料平板向相反方向运动(图 1.5), 说明物体间的摩擦力也是相互作用的.

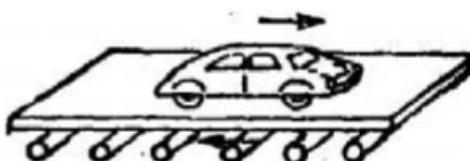


图 1.5

### (七) 力的合成的平行四边形法则

课本图 1.22 的实验, 为了便于计算, 可使  $F_1$  等于三个等重钩码的重量, 使  $F_2$  等于四个等重钩码的重量, 并使当拉绳的结点到达位置  $O$  时, 两根细绳的夹角恰为  $90^\circ$ , 于是可认为这两个共点力  $F_1$  和  $F_2$  的方向夹角为  $90^\circ$ , 在这两个力的共同作用下, 使橡皮条发生了长度为  $EO$  的伸长形变.

当演示用一个定滑轮和一组钩码, 通过细绳拉橡皮条使之发生相同的伸长形变时, 可以逐次增加钩码, 一直加到五个钩码, 可以看到结点恰好到达位置  $O$ , 加到第六个钩码时结点已超过位置  $O$ , 或者可以先加七个钩码, 观察结点已远远超过位置  $O$ , 然后逐步减少钩码数, 直到还剩五个钩码时, 观察结点恰到达位置  $O$ . 于是这五个钩码所引起的绳子拉力就等于合力的大小.

### (八) 合力的大小跟分力夹角的关系

课本 36 页最后一段文字叙述：“当  $F_1$  和  $F_2$  的夹角  $\theta$  在  $0^\circ$  到  $180^\circ$  之间时， $\theta$  越大， $\cos\theta$  的值就越小，合力就越小，而且合力的方向也随着夹角  $\theta$  的变化而变化。”关于这一段叙述，除了从合力的计算式  $F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2 \cos\theta}$  来加以理解外，还可以用如下的模拟演示来获得感性认识。

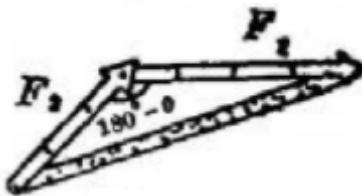


图 1.6

先让学生参阅课本图 1.23 丙用三角形法来表示共点力  $F_1$  和  $F_2$  的合力  $F$ ，然后将模拟演示仪介绍给学生，这是用五合板（或 2—2.5 毫米厚的有机玻璃）制成的两根长度不等的箭头，分别用来代表分力  $F_1$  和  $F_2$ ，并设  $F_1 > F_2$ 。根据三角形法，将  $F_1$  的始端和  $F_2$  的末端用铆钉铆合在一起（不要铆死，使它能转动），在  $F_1$  的末端和  $F_2$  的始端间固定一根橡皮条（或宽紧带）用来表示合力（图 1.6）。橡皮条的原长应为  $F_1 - F_2$ 。演示时可从  $F_1$  和  $F_2$  的夹角  $\theta = 0^\circ$  开始，逐渐增大，直到  $\theta = 180^\circ$ 。在这过程中可以看到橡皮条的长度（表示合力  $F$  的大小）从  $F = F_1 + F_2$  逐渐减小到  $F = F_1 - F_2$ ，如图 1.7 所示。因此在两个共点力大小不变的情况下，它们的合力大小是随着分力夹角的增大而变小的。

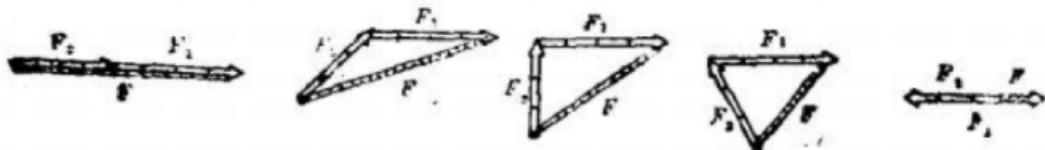


图 1.7

### (九) 力的分解

力的分解的演示实际上都是利用二力平衡的原理来显示的。

(1) 课本图 1.29，放在斜面上的物体的重力分解。在一个倾角约为  $15^\circ$  的光滑斜面上，放一辆质量约为 200 克的金属小车，小车的一端用细绳跟固定在斜面顶端的弹簧秤  $A$  相连（图 1.8）。用手托住弹簧秤外壳使它跟斜面平行，观察这时弹簧秤的示数。将斜面倾角逐渐增大，可以观察到弹簧秤示数也逐渐增大，当斜面倾角到达  $30^\circ$  时，可读得弹簧秤示数约为 100 克力。这说明放在斜面上的物体的重力所产生的一个效果是使物体沿着斜面下滑，而且斜面倾角越大，使物体沿斜面下滑的重力分力  $F_1$  也越大。

如图 1.9 所示，再用一个铁架台，在复夹上固定另一个弹簧秤  $B$ ，通过细绳钩住小车的中部，在不改变斜面倾角、使弹簧秤  $A$  的示数不变的条件下，调节铁架台的位置和复夹的高度，使弹簧秤  $B$  的拉绳方向跟斜面垂直，且使拉绳逐渐绷紧，直到使小车不对斜面

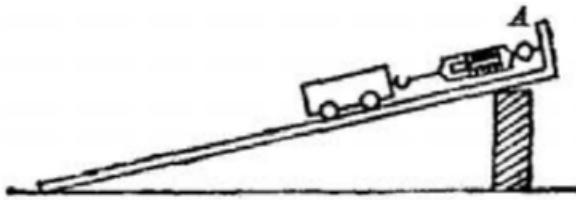


图 1.8

施加压力（即小车刚脱离斜面）。这时从弹簧秤  $B$  的示数就可以知道放在斜面上的物体的又一个效果是使物体紧压在斜面上，可读得斜面倾角为  $30^\circ$  时弹簧秤  $B$  的示数约为 170 克力。

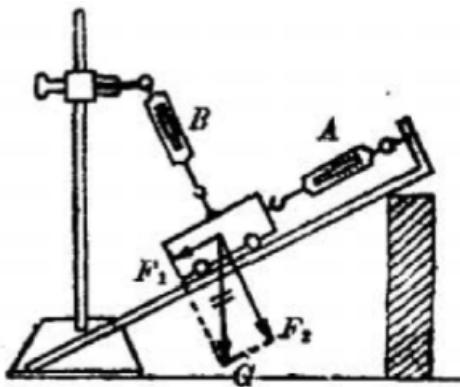


图 1.9

如果在这基础上，使斜面倾角继续增大，则可观察到弹簧秤  $A$  的示数逐渐增大，弹簧秤  $B$  的示数逐渐减小。在这过程中，需要不断调节铁架台的位置和复夹的高度，使得弹簧秤  $B$  的拉绳方向始终保持跟斜面垂直。当使斜面的倾角继续增大到  $90^\circ$  时，可观察到弹簧秤  $A$  的示数增大到等于小车重量，而弹簧秤  $B$  的示数逐渐减小到等于零。当使斜面的倾角逐渐减小到  $0^\circ$  时，弹簧秤  $A$  的示数也减小到零，而弹簧秤  $B$  的示数将增大到等于小车的重量。

从这个实验可以说明，重力  $G$  的平行于斜面方向的分力  $F_1 = G \sin \theta$ ，它的作用效果是使物体沿斜面下滑；重力  $G$  的垂直于斜面方向的分力  $F_2 = G \cos \theta$ ，它的作用效果是使物体紧压在斜面上。

(2) 课本图 1.30, 直角支架的端点所受向下作用力的分解。

如图 1.10 所示，直角支架的横梁  $OM$  是一根装有压缩弹簧测力计的金属管， $M$  端有一套环，可以套在通过复夹安装在铁架台上的固定转动轴上；斜梁  $ON$  可用细绳连接弹簧秤组成，弹簧秤的圆环钩在铁架台上侧的复夹  $N$  处，细绳的下端固定在横梁端点  $O$  处。当在  $O$  点悬挂重物  $G$  时，可观察到细绳被拉紧、横梁被压缩，从弹簧秤和测力计分别可以读出拉力和压力的数值。这个实验说明了支架  $O$  点受到一个向下的作用力  $F$  时，它对支架的两个梁产生的效果是不同的。

演示时，应先调节细绳的长度使得横梁  $OM$  稍向上倾斜。这样，当在  $O$  点挂上重物

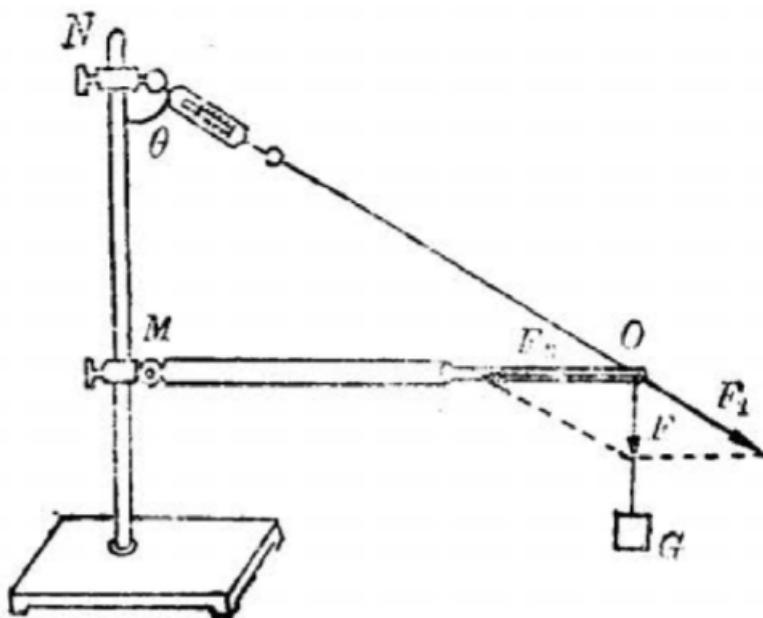


图 1.10

时，恰好使横梁保持水平，才能应用直角三角形关系来表示  $F$  的两个分力  $F_1$  和  $F_2$  的大小，即  $F_1 = \frac{F}{\cos \theta}$ （它的作用效果使斜梁  $ON$  受到拉力）， $F_2 = F \tan \theta$ （它的作用效果使横梁  $OM$  受到压力）。

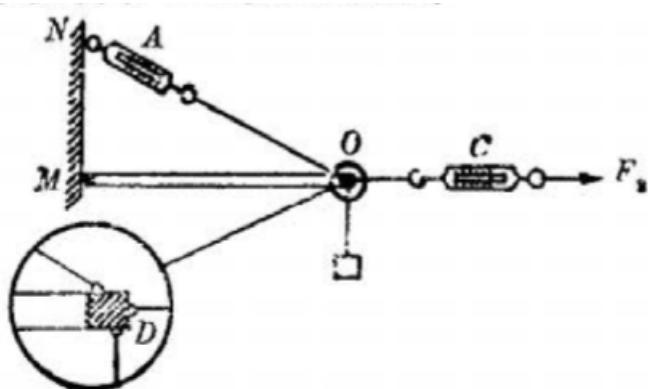


图 1.11

如果没有压缩弹簧测力计，则可以用另一根细绳在相反方向通过弹簧秤  $C$  来拉  $O$  端，使得  $OM$  恰巧不变压力，用这样的方法来进行间接测量（图 1.11）。具体做法如下：

用一小方木块  $D$ ，在它的上部、下部和右侧各装一小钩并都系上一段细线。上部的细线和弹簧秤  $A$  相连，下部的细线悬挂重物，右侧的细线可以系在弹簧秤  $C$  上。横梁  $OM$  可用一根木棒来做，横梁左端装一套环，右端锯成齿状，小木块  $D$  的左侧也锯成齿状以增大摩擦，演示时可用手捏住小木块  $D$  和横梁的右端不使松动，挂上重物后，由于摩擦，小木块不会滑动，这时可观察斜梁  $ON$  受拉力的情况（细线被拉紧），从弹簧秤  $A$  可以读出拉力的大小；至于横梁  $OM$  受压力的情况，则可间接地用弹簧秤  $C$ ，通过小木块  $D$  右

侧钩上的细绳，保持水平地慢慢地拉动，直到横梁不受压力由于自身重力作用，将会离开小木块  $D$  而转动，读得这时弹簧秤  $C$  的示数即为横梁所受的压力。这个演示同样可以证明当没有用弹簧秤  $O$  拉小木块  $D$  时，横梁  $OM$  确是受到压力作用的。

## 二、学生实验

### (一) 测量滑动摩擦系数

这个实验的目的是定量地测定两种木料之间的滑动摩擦系数。如何处理实验数据，不宜作过细的规定，可以让学生复习第一个实验（练习分析处理实验数据），由学生自行设计表格，进行数据分析和处理。

实验时必须首先利用水平仪把长木板调成水平，而且要调节滑轮的高度（或调节小木块上钩往细绳的钩子的位置），使得拉小木块的细绳和长木板保持平行。在这样的情况下，当小木块沿长木板作匀速运动时，它所受到的滑动摩擦力  $f$  的大小，才可以用挂在绳端的砝码盘和盘中砝码受到的重力之和来量度。

用弹簧秤称出小木块的重量，就求出了压力  $N$ 。要改变压力的大小，只要往小木块上加放砝码就可以了。

测得在一系列不同压力时的滑动摩擦力的大小后，如果利用画图象的方法（不一定用这种方法）来找出它们之间的定量关系，则可启发学生思考：

1. 这个实验中的压力和滑动摩擦力这两个物理量，哪个是自变量，哪一个因变量？
2. 画图象时平面直角坐标的横坐标应表示哪一个物理量，纵坐标应表示哪一个物理量？
3. 画出图象后，应怎样得出滑动摩擦系数？
4. 滑动摩擦系数是否有单位？

实验后还可思考以下问题：

1. 滑动摩擦力的大小跟压力有怎样的关系？
2. 滑动摩擦系数的大小是由什么因素决定的？是否可以说滑动摩擦系数跟摩擦力成正比，跟压力成反比？压力发生了变化，滑动摩擦系数是否会有相应的变化？
3. 我国东北农村的一些地区，在冬季里人们乘坐的爬犁，用几匹狗就可以拉着在雪地里奔驰，如果到了夏季把爬犁放在泥地上拉动就很困难，这是为什么？

### (二) 互成角度的两个力的合成

这是一个验证性的实验，在已知两个互成角度的共点力的情况下，先用力的平行四边形法则求出它们的合力，然后再用弹簧秤来进行验证。

在实验前可以先把所用的两个弹簧秤的钩子互相钩住，平放在桌上向相反方向拉动，看看它们的示数在拉力的大小改变时是否总是相同的。如果是相同的，在实验时就可以同时使用这两个弹簧秤进行读数。如果不相同，则可以只用其中一个弹簧秤进行读数（每一个分力或两个分力的合力，都用这同一个弹簧秤来读数）。

用两个弹簧秤同时拉动一端固定的橡皮条时（要注意不使伸长量太大，以免用一个弹簧秤测合力时由于超出它的测量范围而无法读数），要使两个弹簧秤贴着方木板平拉，弹簧秤互成的角度可以是任意的。但为了便于作图，可以使两个弹簧秤拉着的细绳沿着一块

三角板的任一特殊角（如 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 或 $60^\circ$ 等）拉动，使橡皮条的另一端伸长到某一位置 $O$ 。用细铅笔描下两条细绳的方向，记下两条细绳端点的位置 $O$ 以及两个弹簧秤的读数 $F_1$ 和 $F_2$ ，按相同比例（所选定的标度要在记录纸上明确画出）作出这两个互成角度的共点力 $F_1$ 和 $F_2$ 的图示，它们的共同作用点也就是绳子的结点位置 $O$ 。

作平行四边形求出 $F_1$ 和 $F_2$ 的合力 $F$ 时，要求学生认真地用三角板来作平行线，然后用同一标度量出合力 $F$ 的大小。

只用一个弹簧秤来拉橡皮条时，可启发学生思考为什么要使细绳结点拉到同一位置 $O$ ，这时弹簧秤的读数 $F'$ 和用两个弹簧秤拉橡皮条时的合力 $F$ 应该有怎样的关系？

用细铅笔描下这时细绳的方向，记下 $F'$ ，并按相同的标度在同一力图上画出 $F'$ 的图示。

对有兴趣的学生可以让他们按课本342页最后一段的叙述进行实验，此外还可指导他们对刚才实验中的误差进行分析。

比较 $F'$ 和 $F$ 就可以知道误差的大小，如图1.12所示，线段 $CC'$ 就是合力 $F'$ 和 $F$ 之间的误差，线段 $CC'$ 越长，表示误差越大。



图 1.12

### 三、课外实验活动

#### (一) 测量尼龙丝的抗断拉力

这个课外实验是利用最简单的仪器，根据学生所学过的力的合成和分解的知识，来测量尼龙丝的抗断拉力。

要使学生知道什么是抗断拉力。一段材料发生拉伸形变对物体产生的弹力是随形变的增大而增大，但是任何材料对物体产生的弹力都有一个最大值，当材料将被拉断时对物体产生的最大弹力就是材料的抗断拉力。各种不同材料的抗断拉力是不同的。

##### 实验的原理

从课本362页图10.22可知，在尼龙丝的中点悬挂了质量为1千克的重物，使中点 $O$ 受到向下的力 $F = C$ ，根据力的平行四边形法则可知，力 $F$ 跟 $F$ 沿着被拉紧的尼龙丝方向的分力 $F_1$ 间存在这样的关系： $F = 2F_1 \cos \frac{\alpha}{2}$ （图1.13），因此将绳子的另一端沿箭头 $\alpha$ 所示的方向，保持水平地缓慢拉动，随着角的逐渐增大，分力 $F_1$ 也逐渐增大，用量

角器量出尼龙丝刚被拉断时的  $\alpha$  角，就可计算出分力  $F$ ，而这时的大小也就等于尼龙丝对  $O$  点的弹力，于是便可测得尼龙丝的抗断拉力.

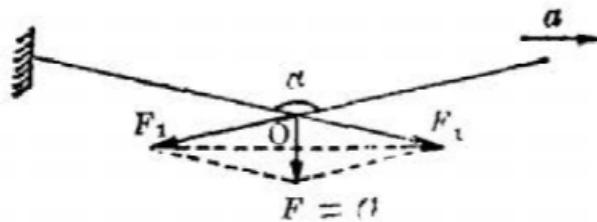


图 1.13

#### 实验时的注意事项

1. 尼龙丝要用很细的一种，不然不易拉断.
2. 将重物悬挂在尼龙丝的中点时，可以通过一个拉窗帘用的小环来悬挂，即不要把悬挂重物的细绳在尼龙丝的中点  $O$  处打结（打结后就变成两段尼龙丝了）。这样，即使将尼龙丝的另一端拉动时不在水平方向，由于小环可以滑动，使得力的合成的平行四边形始终是一个菱形，尼龙丝中的拉力和向下力的关系仍可满足上述关系式
3. 在拉尼龙丝时可在手指上缠一些布条以免拉紧尼龙丝时会把手指捋破。另一只手可拿着量角器，并使量角器的圆心始终位于尼龙丝的中点，而且量角器的零刻度始终跟右侧的尼龙丝重合，如图 1.14 所示。这样，当尼龙丝被拉断时就可以方便地读出  $\alpha$  角的大小。



图 1.14

4. 参考数据：如果尼龙丝的直径为 0.125 毫米，在它的中点所挂重物的重量为 1 千克力，当  $\alpha = 130^\circ$  时，尼龙丝将被拉断，则测得抗断拉力

$$F_1 = \frac{F}{2 \cos \frac{\alpha}{2}} = \frac{1}{2 \times \cos 65^\circ} = 1.18 \text{ 千克力}$$

如果找不到尼龙丝，也可以用缝纫机上使用的细线进行测量。

在实验室中测量尼龙丝的抗断拉力，所用的最方便而且直接的方法是：把尼龙丝的一端固定，另一端套在一个大量程的测力计的钩环上，然后将尼龙丝水平地拉紧，并逐渐增大所施加的拉力，同时观察测力计示数的变化，直到尼龙丝被拉断，记下这时测力计的读数，就等于尼龙丝的抗断拉力。

也可采用这样的方法：将尼龙丝的上端固定，在其下端悬挂砝码，并且逐渐增大所加砝码的重量，直到尼龙丝被拉断，记下这时所加砝码的总重量，就等于尼龙丝的抗断拉力。

## 第四节 习题解答

### 一、练习一

- 举出几个实例来说明力是物体对物体的作用。

**解答：**这样的例子可以举出很多。用铁锤钉钉子，铁锤对锤子施了力；用手推墙壁，人手对墙壁施了力；跳水运动员用力蹬跳板，运动员的脚对跳板施了力；汽车停在路面上，车轮对路面施了力，等等。

- 放在水平面上的物体（课本图 1.8 甲）受到几个力的作用？各是什么物体对它的作用，是哪种力？画出物体受力的示意图。

**解答：**放在水平面上的物体受到两个力的作用，如图 1.15 所示，一个是地球对它作用的重力  $G$ ，方向竖直向下；一个是水平面对它作用的支持力  $N$ ，方向竖直向上，支持力是弹力。

- 用一根绳子把小球挂在天花板上（课本图 1.9 甲），小球受到几个力的作用？各是什么物体对它的作用，是哪种力？画出小球受力的示意图。

**解答：**用一根绳子把小球挂在天花板上，小球受到两个力的作用，如图 1.16 所示，一个是地球对它作用的重力  $G$ ，方向竖直向下；一个是绳子对它的拉力  $F$ ，方向竖直向上，拉力是弹力。

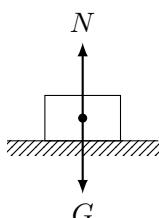


图 1.15

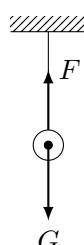


图 1.16

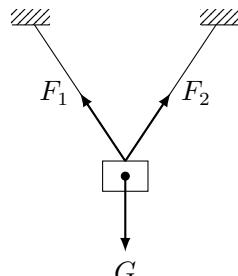


图 1.17

- 用两根绳子把物体挂在天花板上（课本图 1.9 乙），这个物体受到几个力的作用？各是什么物体对它的作用，是哪种力？画出物体受力的示意图。

**解答：**用两根绳子把物体挂在天花板上，这个物体受到三个力的作用，如图 1.17 所示。一个是地球对它作用的重力  $G$ ，方向竖直向下；一个是左边绳子对它的拉力  $F_1$ ，方向沿着左边的绳子斜向上；另一个是右边绳子对它的拉力  $F_2$ ，方向沿着右边的绳子斜向上。两根绳子的拉力都是弹力。

- 找一个薄板状的物体，用书中所讲的悬挂方法求出这个物体的重心。

**解答：**（略）说明：本题是实验题，应该要求学生动手去做。

- 放在水平桌面上的两个小球，它们靠在一起但不互相挤压，它们之间有弹力作用吗？为什么？

**解答：**它们之间没有弹力作用，因为它们没有互相挤压就不发生形变，也就不会产生使它们恢复原状的弹力。

7. 用下面的简单装置也可以显示微小形变。找一个大玻璃瓶，装满水，塞上中间插有细管的瓶塞。用手按压玻璃瓶，细管中的水面就上升；松开手，水面又降回原处。这说明玻璃瓶遇到按压时发生弹性形变。实际做一下这个实验。

**解答：**提示：应先将玻璃瓶盛满水，再塞上中间插有一根开口细玻璃管的瓶塞，玻璃瓶内不应留有气泡。

## 二、练习二

1. 把一个重量为 2 牛的物体挂在弹簧上，物体静止时受到的弹簧的弹力有多大？为什么？

**解答：**弹簧的弹力也是 2 牛。因为物体静止时，它受到的重力和弹簧的弹力是一对平衡力，大小相等。

2. 把重量相同的两个物体分别挂在两根不同的弹簧上，一根弹簧伸长的长度小，另一根伸长的长度大，哪根弹簧的倔强系数大？

**解答：**由公式  $f = kx$  可以看出，当  $f$  一定时， $x$  小的  $k$  大， $x$  大的  $k$  小，所以，伸长长度小的弹簧倔强系数大。

3. 一根弹簧的倔强系数是 100 牛/米，伸长的长度为 2 厘米时，弹簧的弹力有多大？另一根弹簧的倔强系数是 2000 牛/米，缩短的长度为 3 厘米时，弹簧的弹力有多大？

**解答：**

$$f_1 = k_1 x_1 = 100 \text{ N/m} \times 0.02 \text{ m} = 2 \text{ N}$$

$$f_2 = k_2 x_2 = 2000 \text{ N/m} \times 0.03 \text{ m} = 60 \text{ N}$$

两根弹簧的弹力分别为 2 牛和 60 牛。

4. 一根弹簧，不挂物体时长 15 厘米，挂上 0.5 千克的物体时长 18 厘米。这根弹簧的倔强系数有多大？

**解答：**物体所受的重力  $G = 0.5 \text{ kg} \times 9.8 \text{ N/kg} = 4.9 \text{ N}$ ，伸长  $x = 0.18 - 0.15 = 0.03 \text{ m}$ ，弹力  $f = G = 4.9 \text{ N}$ 。由  $f = kx$ ，得弹簧倔强系数

$$k = \frac{f}{x} = \frac{4.9 \text{ N}}{0.03 \text{ m}} = 163 \text{ N/m}$$

## 三、练习三

1. 在东北的冬季伐木工作中，许多伐下的木料被装在雪橇上，用马拉着在冰道上运出去。一个有钢制滑板的雪橇，上面装着木料，共重  $4.9 \times 10^4$  牛。在水平的冰道上，马要在水平方向用多大的力才能够拉着雪橇匀速前进？

**解答：**匀速前进时，拉力  $F$  等于摩擦力  $f$ ，所以拉力

$$f = \mu N = 0.02 \times 4.9 \times 10^4 \text{ N} = 9.8 \times 10^2 \text{ N}$$

2. 用 20 牛的水平的力拉着一块重量是 40 牛的砖，可以使砖在水平地面上匀速滑动。求砖和地面之间的滑动摩擦系数。

**解答：**砖与地面之间的滑动摩擦系数

$$\mu = \frac{f}{N} = \frac{20\text{N}}{40\text{N}} = 0.5$$

3. 要使重量是 400 牛的桌子从原地移动，必须最小用 200 牛的水平推力。桌子从原地移动以后，为了使它继续做匀速运动，只要 160 牛的水平推力就行了。求最大静摩擦力和滑动摩擦系数。如果用 100 牛的水平推力推桌子，这时静摩擦力有多大？

**解答：**使桌子移动必须用的最小水平推力就是最大静摩擦力  $f_n = 200$  牛。

由于匀速前进时，推力  $F = f$ ，而  $f = \mu N$ 。所以滑动摩擦系数

$$\mu = \frac{f}{N} = \frac{160\text{N}}{400\text{N}} = 0.4$$

静止时，静摩擦力等于推力， $\therefore f = F = 100\text{N}$

4. 做下面的实验：用一根橡皮绳把书吊起来，当书静止不动的时候，测出橡皮绳伸长的长度。把书放在桌子上，水平拉橡皮绳，使书做匀速运动，再测出橡皮绳伸长的长度。设橡皮绳伸长的长度跟外力成正比，根据测出的数据粗略地算出书和桌面之间的滑动摩擦系数。

**解答：**在实验基础上解题步骤：设被吊起的书静止不动时，橡皮绳伸长的长度为  $x_1$ ，此时，橡皮绳的弹力  $F_1$  等于书所受的重力  $G$ ，即

$$F_1 = kx_1, \quad F_1 = G$$

因此：

$$G = kx_1 \tag{1.1}$$

拉着书在桌面上作匀速运动时，橡皮绳伸长的长度为  $x_2$  此时，橡皮绳的弹力  $F_2$  等于书受到的摩擦力  $\mu N$ ，即

$$F_2 = kx_2, \quad F_2 = \mu N = \mu G$$

因此：

$$G = \frac{kx_2}{\mu} \tag{1.2}$$

由 (1.1)(1.2) 式，得滑动摩擦系数

$$\mu = \frac{x_2}{x_1}$$

#### 四、练习四

1. 有人说“施力物体同时也一定是受力物体”，这句话正确吗？用两三个实例来说明。

**解答：**正确。

例如，吊绳吊灯，绳对灯来说是施力物体，对灯施一个拉力；但同时它又是受力物体，受到灯拉它的力。

又如，把物体放在桌面上，物体是施力物体，给桌面一个压力；同时它又是受力物体，受到桌面给予它的支持力（弹力）。

2. 地球的质量大约是  $6 \times 10^{24}$  千克。地球对地面上质量是 1 千克的石块的引力跟这个石块对地球的引力相比较，哪个力大？根据牛顿第三定律，正确的答案是什么？

**解答：**两个引力一样大。因为根据牛顿第三定律，地球对石块的引力和石块对地球的引力，是一对作用力和反作用力，所以一样大。

3. 用牛顿第三定律判断下列说法是否正确。

- (a) 只有你站在地上完全不动，你和地球之间的相互作用力才是一对大小相等方向相反的力。
- (b) 物体 A 静止在物体 B 上，A 的质量是 B 的质量的 100 倍，因此，A 作用于 B 的力大于 B 作用于 A 的力。

**解答：**

- (a) 不正确，你和地球之间的相互作用力是作用力和反作用力，因此大小相等方向相反，与物体之间有无相对运动无关。
- (b) 不正确。因为 A 作用于 B 的力和 B 作用于 A 的力是一对作用力和反作用力。它们的大小总是相等的。

4. 放在水平面上的物体（课本图 1.8 甲）受到两个力的作用。这两个力的反作用力各作用在什么物体上？在这四个力中，哪两对力是作用力和反作用力？哪两个力是相互平衡的力？

**解答：**在课本图 1.8 甲中，物体所受重力的反作用力（引力）作用于地球；支持力的反作用力（压力）作用于水平面，重力和物体对地球的引力，支持力和压力是两对作用力和反作用力。重力和支持力是相互平衡的力。

5. 挂在绳子（或弹簧）上的物体（课本图 1.9 甲）受到两个力的作用。这两个力的反作用力各作用在什么物体上？在这四个力中，哪两对力是作用力和反作用力？哪两个力是相互平衡的力？

**解答：**在课本图 1.9 甲中，物体所受重力的反作用力（引力）作用于地球，物体所受拉力的反作用力（拉力）作用于绳子。物体所受的重力和物体对地球的引力，物体所受拉力和绳子所受拉力，是两对作用力和反作用力。物体所受的拉力和物体所受的重力是相互平衡的力。

6. 从上述两题的解答中，试找出一对作用力和反作用力跟两个相互平衡的力之间的区别。

**解答：**作用力和反作用力分别作用于相互作用的两个物体上，相互平衡的力作用于同一物体上。

## 五、练习五

在下面各题中，在画受力图的时候，如果已知力的大小和方向，要按照一定的标度做力的图示；如果未给出力的大小，可以只画出力的方向。

1. 竖直向上抛出的石块受到几个力的作用？水平抛出的石块受到几个力的作用？竖直向下抛出的石块受到几个力的作用？放开手，让石块自由下落，石块受到几个力的作用？分别画出石块的受力图。不考虑空气阻力。

**解答：**所述的四种情况，石块都只受到竖直向下的重力作用，如图 1.18 所示是它们的受力图。



图 1.18

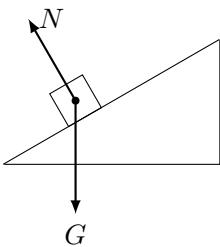


图 1.19

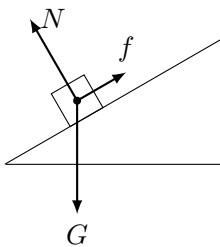


图 1.20

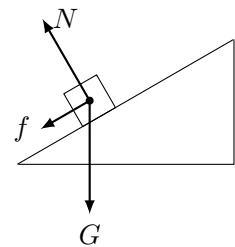


图 1.21

2. 一个物体沿着光滑的斜面滑下来，物体受到几个力的作用？物体原来具有某一速度，它沿着光滑的斜面滑上去的时候受到几个力的作用？分别画出物体的受力图。

如果物体和斜面之间有滑动摩擦，受力情况又怎样？再分别画出物体的受力图。

**解答：**沿光滑斜面上滑或下滑都只受到重力和支持力这两个力的作用（图 1.19）。如果物体和斜面之间有滑动摩擦，物体和斜面间就会有滑动摩擦力，斜面上的物体将受到重力、支持力和滑动摩擦力这三个力的作用。下滑时，滑动摩擦力沿斜面向上（图 1.20），上滑时，滑动摩擦力沿斜面向下（图 1.21）。

3. 雨滴下落的速度较大，空气阻力不能忽略不计。无风的时候雨滴匀速竖直下落，雨滴受到几个力的作用？设雨滴的重量是 0.001 牛，画出雨滴的受力图。

**解答：**雨滴受到重力和空气阻力的作用，由于雨滴匀速竖直下落，这两个力平衡，大小相等，方向相反。雨滴的受力图如图 1.22 所示。

4. 用水平绳拉着木块在水平面上运动，木块的重量是 5 牛，绳的拉力是 10 牛，滑动摩擦系数是 0.3。画出木块的受力图。

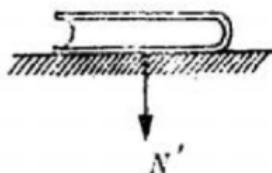
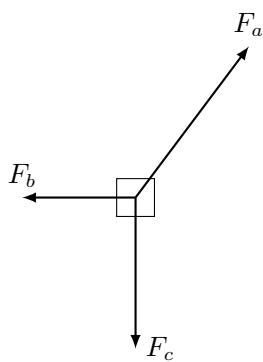
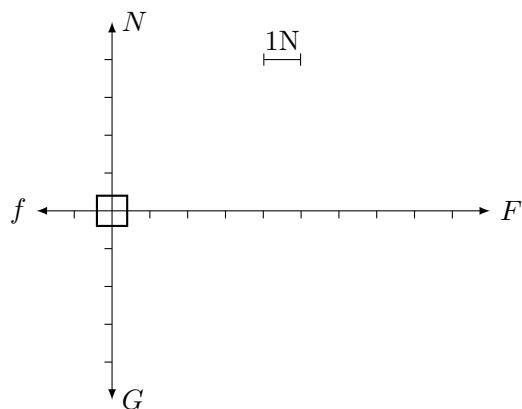
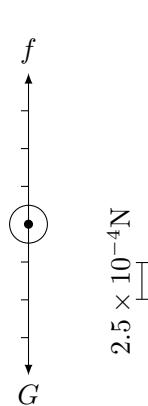
**解答：**木块共受四个力：重力  $G = 5$  牛，竖直向下；水平面的支持力  $N = 5$  牛，竖直向上；拉力  $F = 10$  牛，方向水平；摩擦力  $f = 0.3 \times 5 = 1.5$  牛，方向与  $F$  相反，受力图如图 1.23 所示。

5. 如课本图 1.21 那样用一根绳子  $a$  把物体挂起来，再用另一根水平的绳子  $b$  把物体拉向一旁固定起来。这个物体受到几个力的作用？画出物体的受力图。

**解答：**物体受到重力，绳子  $a$  和  $b$  对它的拉力三个力的作用。受力图如图 1.24 所示。

6. 在课本图 1.16 中没有画出书对桌面的压力  $N'$ ，把这个力画出来，并回答下面的问题：

- 压力  $N'$  是什么性质的力？
- 压力  $N'$  跟哪个力是一对作用力和反作用力？
- 压力  $N'$  和重力  $G$  是不是作用在同一个物体上的力？
- 在书静止地压在桌面上的情况下，压力  $N'$  和重力  $G$  的大小有什么关系？



解答：书对桌面的压力  $N'$  如图 1.25 所示。

- 压力  $N'$  是弹力；
- 压力  $N'$  跟桌面对书的支持力  $N$  是作用力和反作用力；
- 压力  $N'$  和重力  $G$  不是作用在同一物体上的力， $N'$  作用在桌面上， $G$  作用在书上；
- 书静止在桌面上时，压力  $N'$  和重力  $G$  大小相等。

## 六、练习六

- 两个力的合力总大于原来的每一个力，这话对吗？为什么？

解答：根据力的平行四边形法则，合力的大小由平行四边形的对角线表示，原来两个力的大小由平行四边形的两个邻边表示；而平行四边形的对角线并不总是大于其邻边的。所以，“两个力的合力总大于原来的每一个力”的说法是不对的。

- 有两个力  $F_1$  和  $F_2$ ，用作图法求出当它们之间的夹角  $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$  时的合力。研究你所作的图，能不能得到结论：夹角  $\theta$  在  $0^\circ$  到  $180^\circ$  之间时， $\theta$  越大，合力就越小。

解答：按照题中给出的各个夹角，用同一标度分别做出两个力  $F_1$  和  $F_2$  的合力  $R$ ，如下列各图所示，测量  $R$  的大小，可以得到结论：在  $0^\circ$  到  $180^\circ$  之间，夹角越大，合力就越小。

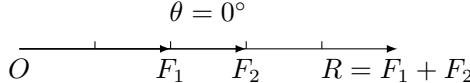


图 1.26

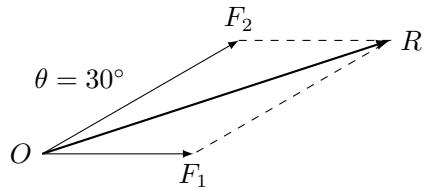


图 1.27

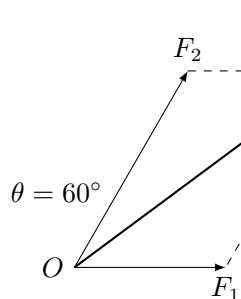


图 1.28

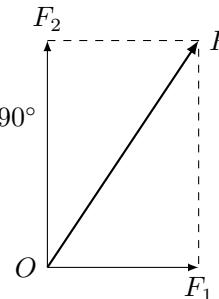


图 1.29

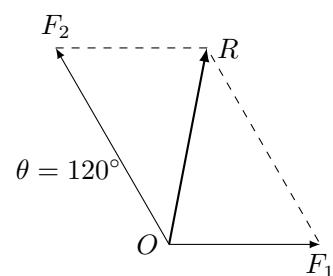


图 1.30

3. 两个力的合力什么情况下最大，什么情况下最小？设有两个力，一个是 20 牛，一个 5 牛。合力的最大值是多大，最小值是多大？

**解答：**当两个力间夹角  $\theta = 0^\circ$  时合力最大， $\theta = 180^\circ$  时，合力最小。合力的最大值  $R_{\text{最大}} = 20 + 5 = 25$  牛；合力的最小值  $R_{\text{最小}} = 20 - 5 = 15$  牛。

4. 2 牛和 10 牛的两个力，它们的合力能够等于 5 牛、10 牛、15 牛吗？

**解答：**2 牛和 10 牛的两力，合力的最小值为  $10 - 2 = 8$  牛，合力的最大值为  $10 + 2 = 12$  牛。所以这两个力的合力不能等于 5 牛和 15 牛，可以等于 10 牛。

5. 两个力互成  $30^\circ$  角，大小分别是 90 牛和 120 牛。用作图法求出合力的大小和方向，然后再用公式来求。

**解答：**利用平行四边形法则作图得合力  $R$  如图 1.33 所示。按照标度测量  $R$  的长度，得合力的大小为 204 牛。用量角器测得合力与 90 牛的力的夹角为  $17^\circ$ 。

利用公式，合力的大小

$$R = \sqrt{90^2 + 120^2 + 2 \times 90 \times 120 \cos 30^\circ} = 203\text{N}$$

合力与 90 牛的力的夹角的正切

$$\tan \phi = \frac{120 \sin 30^\circ}{90 + 120 \cos 30^\circ} = 0.31$$

查表得  $\phi = 17^\circ$ 。

## 七、练习七

1. 一个物体的重量是 20 牛，把它放在一个斜面上，斜面长  $AB$  与斜面高  $BC$  之比是 5 : 3。把重力分解，求出平行于斜面使物体下滑的力和垂直于斜面使物体压紧斜面的力。

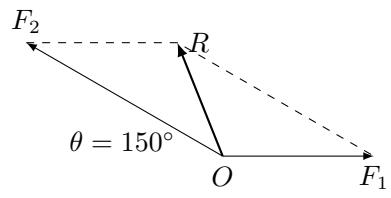


图 1.31

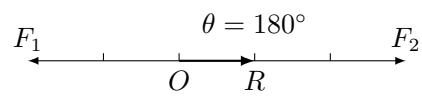


图 1.32

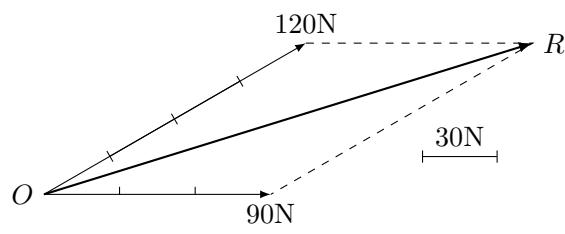


图 1.33

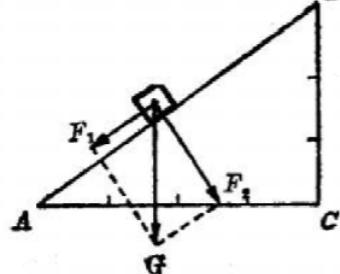


图 1.34

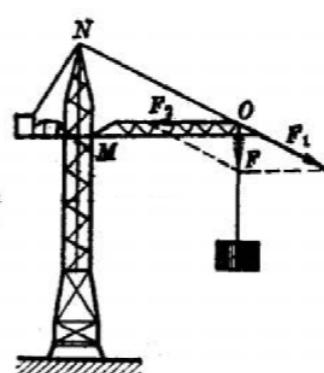


图 1.35

解答：根据题意作图 1.34. 平行于斜面使物体下滑的力

$$F_1 = \frac{BC}{AB}G = \frac{3}{5} \times 20N = 12N$$

垂直于斜面使物体压紧斜面的力

$$F_2 = \frac{AC}{AB}G = \frac{4}{5} \times 20N = 16N$$

2. 图 1.35 是塔式起重机，钢索  $NO$  与水平悬臂  $MO$  成  $30^\circ$  角，当起重机吊着  $4.0 \times 10^4$  牛的货物时，钢索和悬臂分别受多大的力？

解答：根据题意得知  $F = 4.0 \times 10^4$  牛。从图得钢索受的力

$$F_1 = \frac{F}{\sin 30^\circ} = \frac{4.0 \times 10^4}{0.50} = 8.0 \times 10^4 N$$

悬臂受的力

$$F_2 = \frac{F}{\tan 30^\circ} = \frac{4.0 \times 10^4}{0.577} = 6.9 \times 10^4 N$$

3. 如图 1.36 所示，垂直作用在帆上的风力  $F = 1.0 \times 10^4$  牛。沿着船身方向的分力  $F_1$  使帆船前进，垂直于船身方向的分力  $F_2$  使船身侧倾。设  $F$  与船身方向成  $45^\circ$  角，求力  $F_1$  是多大。

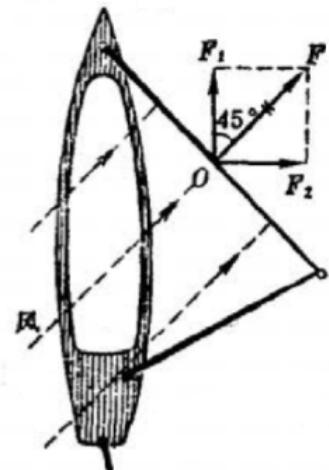


图 1.36

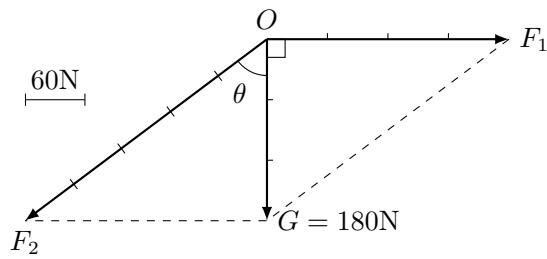


图 1.37

解答：由图可以看出沿着船身方向的分力

$$F_1 = F \cos 45^\circ = 1.0 \times 10^4 \times \frac{\sqrt{2}}{2} = 7.1 \times 10^3 N$$

4. 把竖直向下的 180 牛的力分解为两个分力，一个分力在水平方向上并等于 240 牛，求另一个分力的大小和方向。

解答：根据题意作图，如图 1.37 所示， $G = 180$  牛， $F_1 = 240$  牛，则另一个分力的大小

$$F_2 = \sqrt{G^2 + F_1^2} = \sqrt{180^2 + 240^2} = 300N$$

$F_2$  和  $G$  夹角的余弦

$$\cos \theta = \frac{G}{F_2} = \frac{180\text{N}}{300\text{N}} = 0.6$$

所以夹角  $\theta = 53^\circ 8'$ , 即  $F_2$  的方向和竖直向下的方向成  $53^\circ 8'$  的角.

5. 一个小同学跟一个大同学拔河, 小同学拉不动大同学, 可是用下述办法, 小同学就可以拉动大同学. 在树干上拴一条绳子, 大同学拿着绳子的另一端, 沿水平方向把绳子拉紧. 小同学用力推绳子的中点, 就可以拉动大同学了. 实际做一做, 并解释所发生的现象.

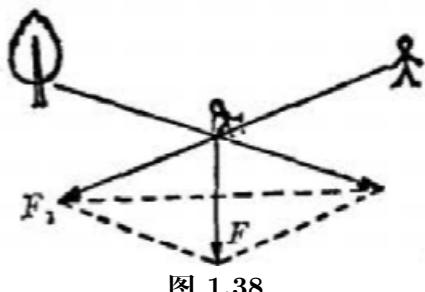


图 1.38

解答: 图 1.38 是根据题意画的示意图. 小同学推绳子的力为  $F$ , 大同学受到的拉力是  $F$  的一个分力  $F_1$

$$F_1 = \frac{F}{2 \cos \frac{\theta}{2}}$$

$\theta$  是两段绳子间的夹角. 当角  $\theta$  接近  $180^\circ$  时,  $\cos \frac{\theta}{2}$  接近于零, 分力  $F_1$  比小同学用力  $F$  大得多, 所以能拉动大同学.

## 八、习题

1. 如图 1.39 所示, 为了防止电线杆倾倒, 常在两侧对称地拉上钢绳. 如果两条钢绳间的夹角是  $60^\circ$ , 每条钢绳的拉力都是 300 牛, 求两条钢绳作用在电线杆上的合力.

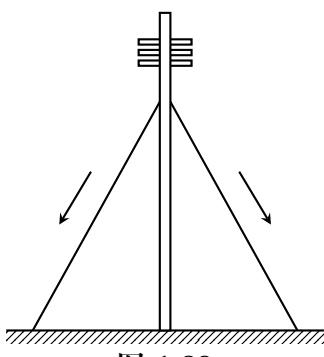


图 1.39

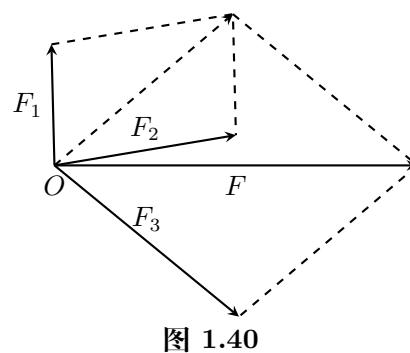


图 1.40

解答: 解法一: 根据力的平行四边形法则

$$\begin{aligned} F &= \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2 \cos \theta} \\ &= \sqrt{300^2 + 300^2 + 2 \times 300 \times 300 \cos 60^\circ} \\ &= 300\sqrt{3} = 519\text{N} \end{aligned}$$

方向竖直向下.

解法二：由于  $F_1 = F_2$ , 这一平行四边形是一个菱形

$$F = 2F_1 \cos \frac{\theta}{2} = 2 \times 300 \times \cos \frac{60^\circ}{2} = 300\sqrt{3} = 519\text{N}$$

方向竖直向下.

2. 图 1.40 表示用平行四边形法则求三个共点力  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  的合力  $F$ . 先求出  $F_1$  和  $F_2$  的合力, 再求出这个合力与  $F_3$  的合力  $F$ . 改用三角形法求出这三个力的合力. 改变求和的顺序, 再分别用平行四边形法则和三角形法求出这三个力的合力.

解答：用三角形法求  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  的合力  $F$  如图 1.41 所示. 图中  $F'$  是  $F_1$ 、 $F_2$  的合力.

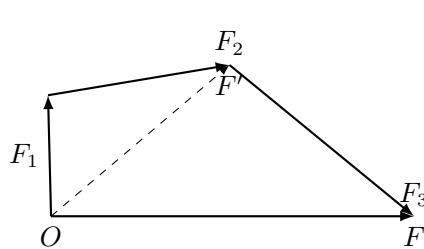


图 1.41

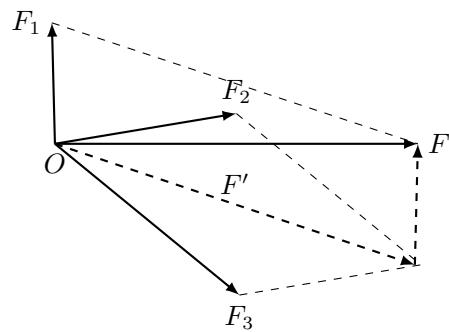


图 1.42

改变求和的顺序, 用平行四边形法则求这三个力的合力, 如图 1.42 所示, 即先求  $F_2$ 、 $F_3$  的合力  $F'$ , 再求  $F'$ 、 $F_1$  的合力, 即三个力的合力  $F$ .

改变求和的顺序, 用三角形法求这三个力的合力, 如图 1.43 所示, 即先求  $F_2$ 、 $F_3$  的合力  $F'$ , 再求  $F'$ 、 $F_1$  的合力, 即三个力的合力  $F$ .

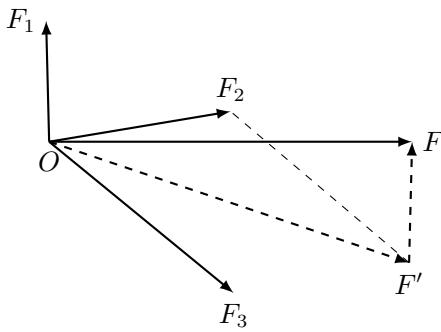


图 1.43

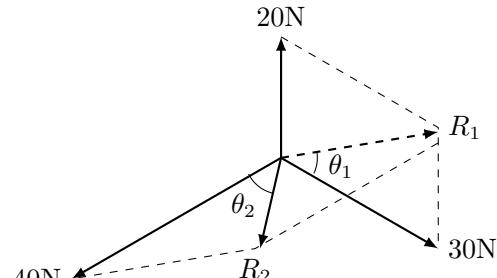


图 1.44

3. 20 牛、30 牛和 40 牛的三个力作用于物体的一点, 它们之间的夹角都是  $120^\circ$ . 求合力的大小和方向.

解答：根据题意画出受力图, 如图 1.44 所示. 先合成 20 牛和 30 牛二力得  $R_1$ , 再将  $R_1$  和 40 牛合成得  $R_2$

$$R_1 = \sqrt{20^2 + 30^2 + 2 \times 20 \times 30 \cos 120^\circ} = 10\sqrt{7} = 26.5\text{N}$$

$$\tan \theta_1 = \frac{20 \sin 120^\circ}{30 + 20 \cos 120^\circ} = 0.866, \quad \theta_1 = 41^\circ$$

$$R_2 = \sqrt{40^2 + (10\sqrt{7})^2 + 2 \times 40 \times 10\sqrt{7} \cos(120^\circ + \theta_1)} = 17.3\text{N}$$

$$\tan \theta_2 = \frac{26.5 \sin 161^\circ}{40 + 26.5 \cos 161^\circ} = 0.577, \quad \theta_2 = 30^\circ$$

4. 如图 1.45 所示, 把一个重量为 10 牛的物体挂在绳子上, 已知  $AC = BC = 3$  米,  $CD = 1$  米. 求绳  $AC$  和  $BC$  所受的拉力.

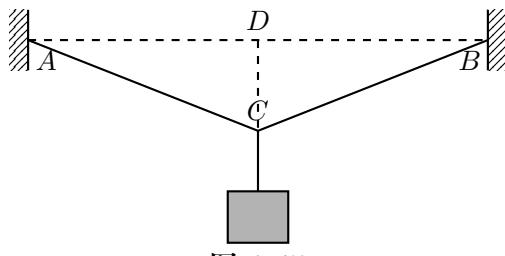


图 1.45

解答: 根据题意画受力图, 如图 1.46 所示, 由图得

$$\frac{AC}{DC} = \frac{F_{AC}}{\frac{1}{2}G}$$

所以绳  $AC$  所受的拉力

$$F_{AC} = \frac{G}{2} \cdot \frac{AC}{DC} = \frac{10}{2} \times 3 = 15\text{N}$$

绳  $BC$  所受的拉力

$$F_{BC} = F_{AC} = 15\text{N}$$

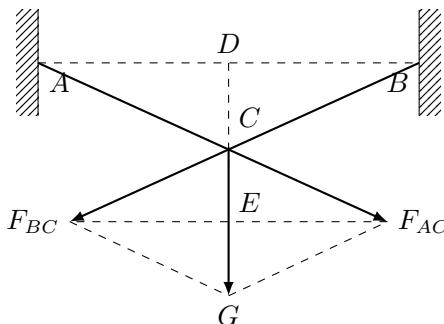


图 1.46

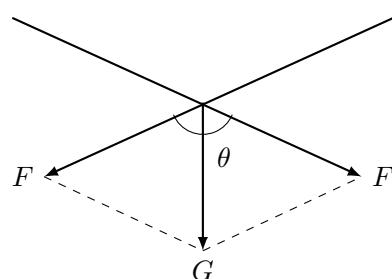


图 1.47

5. 用手握着橡皮绳的两端, 在橡皮绳的中间挂一个重物, 当两手之间的距离增大或减小的时候, 物体对橡皮绳的拉力是否改变? 怎样改变? 实际做一下, 并说明道理.

解答: 要改变, 道理如下: 如图 1.47 所示, 重物  $G$  挂在绳中间, 可看成在绳中间加一拉力, 拉力的大小等于重物所受的重力, 这个拉力可按平行四边形法则分解成两个分力  $F$ , 当两手拉开时, 两个分力的夹角  $\theta$  增大, 两个分力也随之增大.

说明：这个问题还可以做一些定量分析。由于

$$G^2 = F^2 + F^2 + 2F \cdot F \cos \theta$$

因此：

$$F = \sqrt{\frac{1}{2(1 + \cos \theta)}} \cdot G$$

当  $90^\circ < \theta < 180^\circ$  时， $\cos \theta$  为负值， $\theta$  越大， $|\cos \theta|$  越大， $F$  也随之增大。

6. 刀、斧、凿、刨等切削工具的刃部叫做劈，劈的纵截面是一个三角形，如图 1.48 所示。使用劈的时候，在劈背上加力  $F$ ，这个力产生两个效果，这就是使劈的两个侧面推压物体，把物体劈开。设劈的纵截面是一个等腰三角形，劈背的宽度是  $d$ ，劈的侧面的长度是  $\ell$ ，可以证明：

$$f_1 = f_2 = \frac{\ell}{d} F$$

从上式可知，当  $F$  一定的时候，劈的两个侧面之间的夹角越小， $\ell/d$  就越大， $f_1$  和  $f_2$  就越大。这说明了为什么越锋利的切削工具越容易劈开物体。试证明上式。

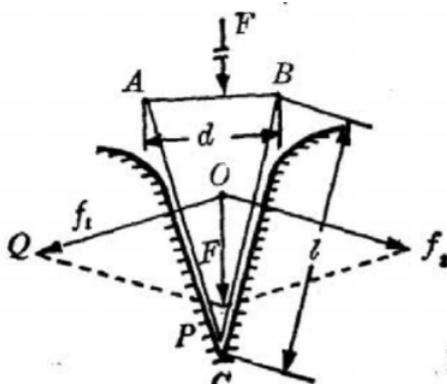


图 1.48

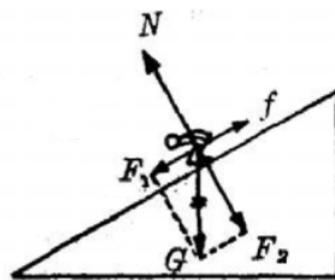


图 1.49

解答：如图 1.48 所示， $f_1$ 、 $f_2$  是  $F$  的两个分力，由于三角形  $ABC$  与三角形  $OPQ$  相似，则有

$$\frac{f_1}{F} = \frac{\ell}{d}$$

因此：

$$f_1 = f_2 = \frac{\ell}{d} F$$

7. 一个物体放在倾角为  $\theta$  的光滑斜面上，求物体受到的合力。

解答：略（课本已作解答）。

8. 一个滑雪人沿着山坡滑下。滑雪人的重量是 700 牛，山坡的倾角是  $30^\circ$ ，滑雪板和雪地的滑动摩擦系数是 0.04。求滑雪人所受的合力。

解答：如图 1.49 所示，滑雪人所受的重力  $G$  分解为平行于山坡的分力  $F_1$  和垂直于山坡的分力  $F_2$ 。

在垂直于山坡方向上，滑雪人受到的重力的分力  $F_2$  和山坡的支持力，两者大小相等，方向相反，合力为零。

在平行于山坡方向上，滑雪人受到重力的分力  $F_1$  和相反方向的摩擦力  $f$ 。

$$F_1 = G \sin 30^\circ = 700 \times \frac{1}{2} = 350\text{N}$$

$$f = \mu N = \mu F_2 = \mu G \cos 30^\circ = 0.04 \times 700 \times \frac{\sqrt{3}}{2} = 24\text{N}$$

所以滑雪人受到的合力  $F = F_1 - f = 350 - 24 = 326$  牛。方向平行于山坡、向下。

## 第五节 参考资料

### 一、四种基本的力

按照现代物理学的观点，自然界存在四种基本的相互作用：万有引力（简称引力）、电磁力、强相互作用力和弱相互作用力，在宏观世界里能显示其作用的只有两种，即引力和电磁力。这两种力是长程力，它们的作用范围从理论上说是无限的。强相互作用和弱相互作用则是短程力，强作用力只在  $10^{-15}$  米范围内才有显著作用；弱作用的力程更短，不超过  $10^{-16}$  米，这两种力只有在原子核内部和基本粒子的相互作用中才显示出来，在宏观世界里不能察觉它们的存在。

四种相互作用，按其作用的强弱次序排列，依次为：强相互作用、电磁相互作用、弱相互作用、引力相互作用。一对质子在相距  $10^{-15}$  米时，各种相互作用的相对强度为

强相互作用	1
电磁相互作用	$10^{-2}$
弱相互作用	$10^{-14}$
引力相互作用	$10^{-40}$

尽管四种相互作用的差别如此巨大，仍然有一些物理学家致力于寻求各种相互作用的统一理论，近年来，在弱作用和电磁作用的统一方面，已取得成功，实验已经证明，正如电和磁是电磁作用的两种不同表现一样，弱作用和电磁作用也只不过是统一的弱电相互作用的两种不同表现而已。

值得注意的是自然界中是否还有新的未被发现的基本作用力呢？这个问题也有人在研究。最近发表的研究报告表明，可能有第五种力存在。这种力在影响落体的加速度方面起着跟引力相反的作用。它的相对强度可能只有引力作用的百分之一，作用范围只有几百米，是一种中程力。

### 二、力的等效移动

作用在物体上的力，可以用有向线段来表示，有向线段应当从力的作用点画起。但实际上，在对物体进行受力分析时，常常把力的作用点沿着力的作用线移动或者把力在物体上平移，而不改变力的作用效果。

在外力作用下，形状和体积都不起变化的物体叫刚体。作用在刚体上的可以沿着力的作用线的方向移到任意一点而不改变力的效果。力的这种性质，叫做刚体内的力的可传性。

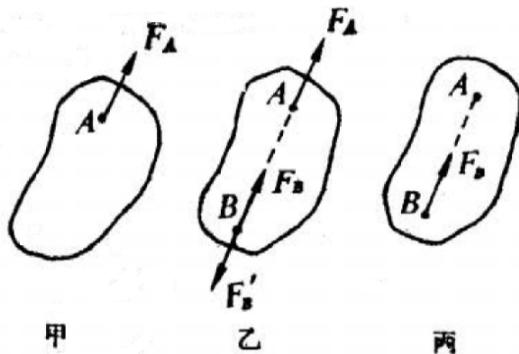


图 1.50

这一性质可以用图 1.50 来说明，甲图表示刚体的  $A$  点受一外力  $F_A$ 。乙图表示再在  $F$  的作用线上任意一点  $B$  附加一对平衡力  $F_B$  和  $F_{B'}$ ，这样并不会改变刚体的运动状态。如：果使附加的平衡力  $F_B$ 、 $F_{B'}$  的大小和  $F_A$  的大小相等，这时  $F_{B'}$  和  $F_A$  也是一对平衡力；于是，去掉这对平衡力对刚体的运动状态也没有影响，如图丙所示。可见，作用在刚体  $A$  点的力  $F_A$  被作用在  $B$  点的力  $F_B$  等效代替，这样的效果就相当于  $F_A$  沿其作用线从  $A$  点移到了  $B$  点。

一切实际物体都不是刚体，但是一般固体在外力作用下发生的形变并不显著，可以近似看成刚体。中学研究物体受力时，实际上是把物体看成是质点或近似看成刚体来做受力图的。

这里再说明一下力的平移。研究平面上的物体在重力  $G$ 、支持力  $N$ 、拉力  $F$  和摩擦力  $f$  作用下保持平衡时，受力图常使  $G$ 、 $N$ 、 $F$ 、 $f$  交于一点，如图 1.51 所示。

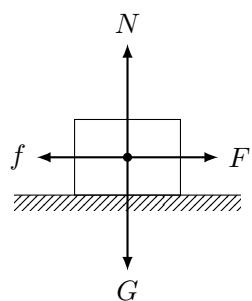


图 1.51

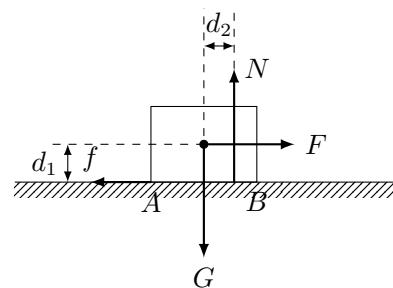


图 1.52

这样做在许多情况下是把物体看成质点来研究的。而实际的物体受力图应如图 1.52 所示。这时，拉力  $F$  和摩擦力  $f$  是一对力偶，力偶矩  $M_1 = fd_1$ ，这个力偶矩使物体沿顺时针方向转动；重力  $G$  和支持力  $N$  是另一对力偶，其力偶矩  $M_2 = Nd_2$ ，这个力偶矩使物体沿逆时针方向转动。物体之所以没有转动，是因为这两对力偶矩相互平衡，即  $fd_1 = Nd_2$ 。这是物体在  $G$ 、 $N$ 、 $F$ 、 $f$  四个力作用下保持平衡的一个条件。另一个条件是： $F = f$ ,  $G = N$ 。从  $fd_1 = Nd_2$  这一平衡条件可以看出，当静摩擦力  $f$  随外力增大时， $d_2$  也相应地增大才能保持平衡。若  $d_2$  已增大到无法再增大时，如图中  $d_2 = AB/2$  时，就能使  $fd_1 > Nd_2$ ，这时物体将以  $B$  为轴沿顺时针方向转动。当然静摩擦力  $f$  的增大也有个

最大限度  $f_m = \mu_0 N$ . 当  $f$  增大到  $f_m$  仍然不能使  $f_m d_1 > N d_2$  时, 物体就不会转动.

在图 1.52 的分析中考虑到物体受力时可能产生的转动. 如果实际问题表明, 物体受力后不会有转动, 则把图 1.52 简化为图 1.51 并不影响力的作用效果. 这就是我们在研究物体受力平衡时, 可以用图 1.51 来代替图 1.52 的原因.

上面是就物体受到几个力保持平衡状态的情况而说的. 事实上, 只要物体受力后会有转动, 都可以将受力图简化, 把几个力绘成于一点, 而不改变原来力的作用效果.

更一般的情况而言, 力也可以平移, 但要满足力的平移原理, 即把作用在物体上的力平行于它的作用线移到物体上任意一点而不改变原来力对物体的作用效果, 则必须附加一个力偶, 这个力偶产生的力偶矩等于原来的力对这一点的力矩.

### 三、关于塔式起重机的简单说明

课本图 1.31 是塔式起重机. 图中钢索  $NO$  是用来改变起重臂 (悬臂) 仰角的, 它属于起重机的变幅机构, 由装在平衡臂上的电动卷扬机牵引, 图中悬挂重物的钢索是用来起重的, 它属于起重机的起升机构, 由装在塔身中部的电动卷扬机牵引. 钢索  $NO$  的拉力和起重钢索的拉力大小是不同的. 起重机悬臂 (起重臂)  $MO$  与塔身是铰链连接, 悬臂仰角可以改变. 而不是固接在塔身上不能动的.

# 第二章 直线运动

---

<b>第一节 教学要求</b>	<b>34</b>
<b>第二节 教学建议</b>	<b>36</b>
一、第一单元	36
(一)运动的相对性	36
(二)位置和位移	37
二、第二单元	37
(一)匀速运动的速度	37
(二)匀速运动的图象	38
三、第三单元	38
(一)即时速度	38
(二)加速度	39
(三)速度公式和速度图象	39
(四)位移公式	39
四、第四单元	40
(一)自由落体运动	40
(二)竖直上抛运动	40
<b>第三节 实验指导</b>	<b>41</b>
一、演示实验	41
(一)观察匀速直线运动和匀变速直线运动	41
(二)测量匀变速直线运动的即时速度	42
(三)测量匀变速直线运动的加速度	43
(四)空气阻力对落体运动的影响	43
(五)在空气阻力很小时, 不同物体同时落下	43
(六)研究自由落体的闪光照片	44
(七)利用打点计时器来研究自由落体运动	44
二、学生实验	44
(一)练习使用打点计时器	44
(二)研究匀变速直线运动	44
三、课外实验活动	46
(一)滴水法测重力加速度	46
(二)用秒表测量玩具手枪子弹射出的速度	47
<b>第四节 习题解答</b>	<b>47</b>
一、练习一	47

二、练习二 . . . . .	48
三、练习三 . . . . .	48
四、练习四 . . . . .	48
五、练习五 . . . . .	50
六、练习六 . . . . .	51
七、练习七 . . . . .	52
八、练习八 . . . . .	52
九、练习九 . . . . .	54
十、练习十 . . . . .	55
十一、练习十一 . . . . .	56
十二、习题 . . . . .	57
<b>第五节 参考资料 . . . . .</b>	<b>61</b>
一、伽利略的比萨斜塔实验 . . . . .	61
二、用逐差法求加速度值 . . . . .	62
三、物理学中的理想化方法、理想化模型和理想实验 . . . . .	63

---

## 第一节 教学要求

这一章讲授的运动学知识，跟第一章一样，都是基础性的，是后面学习动力学所必需的预备知识.

为了减少学生学习的困难，适应学生的知识水平和接受能力，本章只讲直线运动，而把运动的合成和分解以及平抛和斜抛的知识移到第四章的曲线运动中去讲.

通过这一章的教学，应该使学生了解一些描述物体运动的基本概念和方法，掌握匀速直线运动和匀变速直线运动的规律，会用这些规律来分析解决一些比较简单的实际问题.

这一章的教学要求是：

1. 了解参照物的概念，知道研究物体的运动要选择合适的参照物，了解质点的概念，知道在什么情况可以把物体看成质点. 了解位移的概念，知道位移和路程的区别.
2. 明确什么是匀速直线运动，掌握匀速直线运动的公，理解匀速直线运动的图象的物理意义.
3. 明确什么是匀变速直线运动，理解平均速度、即时速，加速度等概念，明确知道速度和加速度的区别，掌握匀变直线运动的公式，理解匀变速直线运动的图象的物理意义.
4. 认识自由落体运动和竖直上抛运动的特点和规律.

下面对这一章的教学内容作些具体说明.

第一节开始先复习初中学过的机械运动和参照物的概念，以加强与初中知识的联系，同时强调参照物的重要性，使学生初步了解怎样选择参照物. 第一节还简单介绍了平动和转动，目的是使学生对物体运动的这两种基本形式有所认识，后面用到时方便. 教材没有给平动和转动下严格的定义，也不要求补充讲解，只要求学生知道平动和转动的特点和区别.

质点是力学中的一个重要概念，它是通过科学抽象得出的理想化模型，运用理想化模型来研究问题，是物理学经常用的方法。学生在这里初次接触这个问题，需要引起他们注意，因此把质点单独作为一节来讲述。关于质点的定义，教材采用了有质量的点这种说法，目的在于强调质点是物理学上的点，不同于几何学中所说的点，在“质点”这节的最后，给出了研究质点运动的基本线索——确定质点在任一时刻的位置和速度，是为了使学生明确讲解本章知识的思路。

描述物体的运动，首先要懂得如何描述物体的位置和位置变化，为要讲解位置的坐标表示和位移的概念。对位移的坐标表示，只要求学生知道位移的数值可以用初末位置的坐标来表示；在后面计算位移的公式中，除了平抛和斜抛外，都不要求写出位移的坐标表示，而只写出位移本身。

匀速直线运动的知识，学生在初中已学过。这里要在复习的基础上予以扩展和提高，为讲授匀变速直线运动作好准备。用比值来定义物理量是物理学中常用的方法，这里用位移和时间的比值重新定义了速度。在用比值给出速度的定义之后，说明速度在数值上等于单位时间内位移的大小，使学生既懂得可以用比值来定义速度，又能跟初中学过的知识联系起来，理解其意义。

从速度的定义式  $v = s/t$ ，可以直接写出匀速运动的位移公式  $s = vt$ 。根据这个公式就可以确定做匀速运动的物体在任意时间内的位移，从而确定物体在任意时刻的位置。指出这一点，可以使学生和前面提出的研究物体运动的总线索联系起来，认识这一公式表示出了匀速运动的规律。

关于匀速直线运动的定义，教材没有明确“相等的时间”是“任意”的。这样做是为了把问题叙述得简明一些，减少一些过细的分析和冗长的论述。

第五节讲解匀速直线运动的图象，主要要求学生会认识图象，知道图象的物理意义，会画简单的图象。学生刚开始学习图象，不要求他们用图象去解决比较复杂的问题，以免增加教学上的难度和学生的负担。教学中，应注意引导学生把数学中学过的函数及其图象的知识运用到物理中来。这一节讲述了用速度图象求位移，为后面用面积法推导匀变速运动的位移公式做准备。

关于即时速度的概念，着重讲述它的物理意义。教材中写了用数学语言可以精确地表达即时速度，只是让学生知道个意思，不要求细讲。

为了减少学生学习加速度的概念时的困难，本章只讲匀变速运动的加速度，不讨论一般变加速运动的情况，不引入平均加速度和即时加速度的概念，以后各章中再逐步扩大对加速度的认识，例如讲牛顿第二定律时，提到加速度可以改变，即外力随时间改变，加速度就随时间而改变，讲圆周运动时进一步认识加速度的方向的改变。

关于匀变速直线运动位移公式，教材采用了求面积的方法推导，比较直观形象。这种通过计算面积来求物理量的方法在物理学中经常用到，需要学生熟悉。但是，对于什么是无限分割，限于学生的数学知识水平，不能细讲，只要求他们能体会其意思就行了。

教材没有把匀加速运动和匀减速运动分开来讲，而是把它统一看作匀变速运动，用统一的位移公式和速度公式来处理。这样便于后面用统一的方法来处理竖直上抛等问题，有

有助于培养学生的概括能力.

匀变速直线运动的两个基本公式反映了匀变速直线运动的规律并包括了前面讲过的匀速直线运动. 要使学生清楚这一点, 提高他们对两个基本公式认识. 这里提到初速不为零的匀变速直线运动, 可以看作是速度为 0. 的匀速直线运动和初速为零的匀变速直线运动的合运动, 为了使学生理解这几种运动之间的关系, 加深对匀变速直线运动公式的认识. 关于运动合成的知识这里不宜多讲, 到第四章再具体讲解. 教材通过对自由落体闪光照片的分析, 得出自由落体运动是匀变速直线运动, 利用闪光照片来研究物体的运动情况, 这种方法以后还要用到.

对竖直上抛运动, 教材是把它作为统一的匀变速运动来处理的, 以提高学生的理解能力和运用知识的能力. 如果这样处理有困难, 也可以先把上升过程和下降过程分开来计算, 再用统一的运动来处理. 讨论竖直上抛物体的上升时间、上升的最大高度、下落时间、落地速度等, 是为了使学生练习运用匀变速运动的一般规律来分析具体问题, 而不是单纯地记住几个计算公式.

## 第二节 教学建议

这一章的内容可以分为四个单元:

第一单元 (第 1 节——第 3 节) 讲授描述物体运动的一些预备知识.

第二单元 (第 4 节——第 5 节) 讲述匀速直线运动.

第三单元 (第 6 节——第 10 节) 讲述匀变速直线运动.

第四单元 (第 11 节——第 12 节) 讲述自由落体运动和竖直上抛运动.

这一章的重点是第三单元, 并通过第四单元两种常见的实例来巩固和加深对于匀变速直线运动的认识.

### 一、第一单元

这一单元是在复习初中学过的机械运动有关知识的基础上讲述参照物、质点、平动与转动、位置和位移等基本概念, 内容比较简单, 但对以后的学习是重要的.

#### (一) 运动的相对性

使学生从理性上接受“在自然界中没有不运动的物体”并且跟“总有许多物体停在原地不动”这种日常经验统一起来, 逻辑上自然要求提出参照物和运动的相对性问题. 为了避免引伸出去讲得很多, 可以不提出“运动的相对性”这个概念, 要通过实例使学生清楚地知道:

1. 一个物体对某个参照物来说是运动还是静止, 要看这个物体对参照物来说位置是否变化;
2. 对于相同的运动, 由于选取的参照物不同, 观测得出的结果可以是不同的;
3. 虽然参照物的选取是人为的, 但是在实际选参照物时, 总是要使观测方便和使运动的描述尽可能简单, 例如, 在研究地面上物体的运动时, 一般总是选取地面作参照物.

质点是力学中的一个重要概念。在讲这个概念时，首先要抓住“物体都具有大小和形状，在运动中物体中各点的位置变化一般说来是各不相同的，所以要详细描述物体的运动，并不是一件简单的事情”这一段叙述作为出发点，结合实例（例如，改变桌子的方位）先讨论在运动中物体中各点的位置变化各不相同的问题，然后再结合另外一些实例（远途行驶的汽车、公转轨道上的地球，等等）讨论物体的大小和形状可以忽略的问题，使学生知道在什么情况下可以只考虑问题的主要方面、忽略次要因素的影响，使本来并不简单的事情得到简化，从而便于找出它的规律来。这种使事物或问题简化、理想化、抽象化、模型化的思想方法和研究方法，在“自由落体运动”中以及后面还有很多内容都要接触到。

在讲质点的概念时，另一种情况，即平动的物体可以看成质点，也要讲到，不可忽略。它也是科学的抽象。

## （二）位置和位移

这一节一开始就提出，研究物体（质点）的运动，首先要确定物体（质点）的位置，并可选取建立坐标系的方法来确定。在教学中要向学生指出，这里可以把所选定的参照物，作为坐标系的原点以确定运动物体（质点）的位置，并按上一章一维矢量的运算方法，来确定质点的位移。但是，为了计算的方便，更常见的是取质点的初位置作为坐标的原点。

这一节，要重点讲清楚“位移”这个新概念。主要是要讲清位移是表示质点在运动过程中位置变化的物理量，它只与运动的起点（初位置）和终点（末位置）有关，而与物体运动的路径无关。要通过实际例子讲清楚位移不但有大小，而且有方向，是个矢量，并把它跟初中学过的路程的概念进行对比和区别。在讲位移和路程的区别时，要着重提醒学生，只有质点始终向着同一个方向作直线运动时，位移的大小才等于路程。在直线运动中，对位移的坐标表示，学生只要知道用初、末位置的坐标来得出位移的数值，其方向则可按规定的坐标轴的正方向依一维矢量的运算方法得知。

## 二、第二单元

这一单元就它的内容 - 匀速直线运动来说，是学生所熟知的，但是其中速度的概念和匀速直线运动的图象，比初中的要求高得多，而且在方法上又要为以后学习其他内容作准备，教学时要予以重视。

### （一）匀速运动的速度

这一节的教学在讲了什么是匀速直线运动之后，重点应放在速度的定义、意义和矢量性上。对中学生来说，用比值的形式来定义一个物理量，也是他们所不熟悉的。关键在于使同学们认识位移跟时间的比值表示的就是他们在日常生活中很熟悉的物体运动的快慢，应该从匀速直线运动的定义出发，即物体在相等时间内的位移相等，推出匀速运动的位移和时间的比值是一个不随时间而改变的恒量，这个比值越大，表示物体在相同时间里的位移越大，即运动得越快。

用位移跟时间的比值来定义速度，突出了速度概念的矢量性。速度矢量的方向，就是物体位移的方向，根据一维矢量的运算法则，由于匀速直线运动是沿着同一方向运动的，只要取位移的方向为正方向，它的位移和速度就都是正值。

了解时间和时刻的区别，对于初学者来说也是很必要的。这里，不需要在形式上给时间下什么定义，可以通过具体的例子说明两者的区别。如通常所说的“几秒内”、“第几秒内”都是表示一段时间，而“第几秒末”表示的就是一个时刻。物体在运动过程中，每一时刻都有一定的对应位置，而一定的时间，则对应于一段位移。

## (二) 匀速运动的图象

物体运动的规律不仅可以用数学公式去描述它，还可用图象的方法去描述它，而且用图象的方法，有时更形象直观一些。这一节教学就是要引导学生把函数图象的知识运用到物理中来。

讲解匀速直线运动的图象，主要是让学生学会认识图象，理解图象的物理意义，会画简单的图象，学习怎样用图象来求位移和速度。在图象的绘制上，一开始就要培养学生严肃的科学态度，一定要用直角或三角尺作图，标明横轴和纵轴所代表的物理量及其单位，并选择适宜的标度。要让学生理解，在匀速直线运动的速度图象中，可以用长方形“面积”的数值来表示位移的大小，是因为长方形的一条边长在数值上等于物体运动时间  $t$  的长短，另一条边长在数值上等于物体速度  $v$  的大小，因此长方形的面积在数上恰好等于物体在时间内的位移  $s = vt$  的大小；它的单位是“ $\text{m}/\text{s} \times \text{s} = \text{m}$ ”，而不是“ $\text{m}^2$ ”。弄清楚这些知识，一方面有利于理解图象所表示的物理意义，另一方面也有利于培养学生灵活运用数学知识解决物理问题的能力。学生刚开始学习图象，要从数与形的关系以及函数图象与物理量的关系，着重引导学生理解和领会图象的物理意义及其应用，而不要补充利用图象去解两个物体相向运动或同向运动、速度不同，何时相遇，或要求解释图线相交点及负斜率的意义等比较复杂的问题。

## 三、第三单元

第一单元是本章的重点。教好这一章的关键，在于讲好即时速度和加速度这两个重要的物理概念。从平均速度引入即时速度，从即时速度的变化引入加速度，从加速度的定义式引入匀变速直线运动的速度公式并进一步得出速度图象，从匀变速直线运动的速度图象，引入匀变速运动的位移公式，再从匀变速运动的速度公式和位移公式，得出两个有用的推论，是这一单元教学的主要线索。

### (一) 即时速度

讲述即时速度的概念，可以先让学生粗略地了解运动物体在某一时刻（或某一位置）都有一定的速度，这个速度就是物体的即时速度。然后再进一步讲述它的物理意义。

运动物体在每一时刻（或每一位置）都有一定的速度这一点，结合日常生活经验，学生是不难理解的。例如自行车和汽车，在你面前驶过的瞬间，它们的快慢是不同的；百米赛跑，运动员们在到达终点时的冲刺速度也各不相同，等等。这些事例都可以说运动物体在每一时刻（或每一位置）都有一定的速度。学生难以理解的是即时速度的物理意义，这里主要应该让学生理解即时速度也就是在足够短的时间里（或位移上）运动物体的平均速度，因为在足够短的时间里，物体速度的变化很小，已不能为测量仪器所分辨。在这样的条件下，物体的运动在测量误差允许的范围内，可以认为是匀速的。

### (二) 加速度

匀变速运动的加速度是本单元另一个重要的物理概念，教材在讲清楚什么是匀变速直线运动的基础上，仿照匀速运动中定义速度的方法，用速度的变化和所用的时间的比值来定义加速度，并说明了它的矢量性。教学中要强调：

1. 匀变速直线运动的速度在不断改变，而加速度是保持不变的；
2. 加速度既是矢量，就要遵循一维矢量的运算方法，根据事先选定的运动的正方向，用带有正负号的数值来表示它，一般取初速度  $v_0$  的方向为正方向。

因此，当  $v_t > v_0$  时  $a = \frac{v_t - v_0}{t}$  一定是正值，表示  $a$  与  $v_0$  的方向相同；当  $v_t < v_0$  时， $a$  一定是负值，表示  $a$  与  $v_0$  的方向相反。

学生初学时对速度、速度的变化和加速度这几个物理量在概念上往往混淆不清，教学中应该注意澄清。《速度和加速度的区别》这段阅读材料，有助于弄清这些问题，应该引导学生认真阅读，并提出问题来了解、检查学生阅读后理解的情况。例如可以提出：在平直路面上行驶的汽车，在离开车站和即将靠站时，汽车的加速度的方向是相同的吗？速度的方向是相同的吗？汽车在匀加速行驶时，速度对时间的变化率以及位移对时间的变化率都是不变的吗？等等。教师还应该引导学生通过一些具体问题的讨论，认识加速度是表示速度变化快慢的物理量，跟速度的大小没有直接关系。速度大的物体，加速度不一定大；速度小的物体加速度不一定小。另外，速度变化的大小，不仅与加速度的大小有关，还跟加速的时间长短有关。速度变化大的物体，加速度也不一定大，速度变化小的物体，加速度也不一定小。

### (三) 速度公式和速度图象

在导出匀变速运动的速度公式时，可先从加速度  $a = \frac{v_t - v_0}{t}$ ，过渡到速度的变化  $v_t - v_0 = at$ ，然后得出速度公式  $v_t = v_0 + at$ ，这样既可分步分别阐明和强调公式的物理意义，并可引导学生在理解概念区别的基础上，进一步认识匀变速运动的速度和加速度的联系。课本中不把匀加速运动跟匀减速运动分开来处理，而统一为匀变速运动，只是做匀减速运动时，加速度为负值，这样可以避免把公式搞得太多，把问题看得太绝对，造成机械的记忆和硬套公式，加速度的方向也似乎可以不考虑了。

根据速度公式  $v_t = v_0 + at$ ，可以画出匀变速运动的速度图象，要引导学生弄清楚：图线通过原点和不通过原点的物理意义，纵轴上的截距和图线的斜率的物理意义，以及斜率的大小和正负的物理意义等。把这些基本内容掌握了，便有利于学生的认图、用图与作图。概括地说，这一节教学中，对公式的导出，不要简单地处理为数学公式的变换，对图象教学不要单纯地处理成数学上数与形的关系，仅仅作出公式的函数图象。要强调公式，图象的特点及其变化所表示的物理意义。

### (四) 位移公式

在引用匀速运动的速度图线和横轴之间的面积表示位移这种方法来求匀变速运动的位移时，要讲一讲为什么将时间轴尽量加以分割，使折线下的面积，尽量逼近速度图线和横轴之间的面积，从而可以用它来表示匀变速运动的位移。让学生熟悉和体会这种方法，

对于培养学生的科学思维能力是有好处的。但是限于学生的数学水平，也不宜做过细的分析。得出位移公式以后，应通过例题说明加速度矢量的方向如何根据一维矢的规定来表示，这也是要求学生熟悉的。

为了使学生学会用不同的方法来解题，并在此基础上选择简便的方法来求解，可举一些已知条件不同的题目，由同学讨论、分析、判断、比，让他们自己去体会，不宜由教师归纳为几条，以免代替和抑制学生的思维。但教师还应该做必要的指导，例如为了培养良好的习惯，解题时要先弄清楚题目中所描述的整个运动过程；对复杂的问题，要分步考虑，一步步地分析出所求的未知量和已知量之间的关系，而这个“关系”从数学上说是公式，从物理上说就是运动规律。在运用时要思考它是否符合这个规律，在熟悉分步运算的同时，要引导学生逐步学会列出方程，利用文字运算来解题，有的题目，要注意一题多解，以提高学生掌握物理规律和分析物理问题的能力。

## 四、第四单元

这一单元是用匀变速运动的知识来研究自由落体和竖直上抛这两种常见的运动，认识这两种运动的特点和规律。这也是对匀变速直线运动基本规律的应用和巩固。

### (一) 自由落体运动

这一节教学应依次掌握好下列各个环节：

1. 做好课本图 2.20 毛钱管演示实验，以表明在管中空气被抽出后，重量不同的物体下落的快慢相同。
2. 把管中空气抽出后，如果忽略余下的稀薄气体的作用，就可以近似地看成是没有空气的空间；在没有空气的空间里，物体下落时才是“只受重力的作用”；因此，自由落体运动是理想化的运动模型。
3. 让同学实际测量课本图 2.21 频闪照片中小球在各个相等时间里的位移，以鉴别小球自由落下时是做什么运动。有频闪设备的学校，可以根据自己实际拍摄的频闪照片分组测量数据；没有频闪设备的学校，也可用其他实验来代替。在得出：“自由落体运动是初速度为零的匀变速运动”的结论以后，紧接着要做出的第二个结论便是：不同的自由落体，它们的运动情况相同，也就是在同一地点，一切物体在自由落体运动中的加速度（重力加速度  $g$ ）都相同，
4. 既然一切物体在自由落体运动中的加速度都相同，它必然是一定值，我们可通过实验来测定它，接着就让学生根据课本 88 页给出的数据表去计算  $\Delta s$  和  $\Delta t$  的平均值，逐步引导学生重视数据处理，培养这方面的能力。
5. 引导学生认真阅读《伽利略对自由落体运动的研究》，以培养自学阅读能力和逻辑思维能力，从中学习用外推法研究物理现象和规律的思路和方法，并且还可以使学生获得一些物理学史的知识。

### (二) 竖直上抛运动

竖直上抛运动一直有这样两种处理方法：一是把运动分为匀减速上升和自由下落两个过程，分开来进行计算；另一种是把它看成是向上的匀速运动和向下的自由落体运动这两

个分运动的合成运动，前一种方法比较直观，但是在运算时比较繁也容易错；后一种方法比较抽象，如果不进一步具体分析，就只能从运动公式的形式上来说明两项分别表示两个分运动，学生也不容易体会。

课本在这一章不过分强调运动的合成，也避免学生不容易理解的运动的独立性，把整个上抛运动看成是一个统一的匀变速直线运动，这样既体现了课本中不把匀加速运动和匀减速运动分开来的处理方法，在理解上也并不困难。而另一种方法，把上升运动和下降运动分为两步来计算，留给同学自己去尝试，也是可取的，在这方面的要求，对程度不同的学生可以因材施教。

上抛运动的位移和速度的方向，仍应强调按一维矢量的统一规定：对速度矢量来说，是以上抛运动初速度  $v_0$  的方向为正方向；位移矢量是以初位置（抛出点）为原点，以初速度的方向为正方向，物体位于抛出点下方时，位移方向向下，位移是负值；加速度矢量也是以初速度的方向为正方向，而由于重力加速度的方向跟初速度的方向相反，因此重力加速度  $g$  总是取负值。当  $g$  取绝对值时，上抛运动的公式即可写成：

$$v_t = v_0 - gt, \quad s = v_0 t - \frac{1}{2}gt^2$$

这样把各矢量的方向规定一并弄清楚，就不致于混淆。

在应用上抛运动的公式讨论几个具体问题时，要引导学生掌握它们的特征，例如物体上升到最大高度时，特征是到达最高点时即时速度为零，据此可以很容易算出物体上升的时间和上升的最大高度；物体落回到初位置时的特征是位移为零，据此可以很容易得出落回原地的时间和物体着地时的速度。引导同学理解和掌握这些特征，并不是要同学记忆几条，而是要通过分析和练习让同学去领会。

在解题计算的过程中，还要引导同学理解方程同时有两个解的物理意义。

### 第三节 实验指导

#### 一、演示实验

##### (一) 观察匀速直线运动和匀变速直线运动

利用节拍器、斜面（长约 1.50 米）和小车观察匀速直线运动和匀变速直线运动的实验装置如图 2.1 所示。事先调节好斜面的倾斜程度，使得小车恰能沿斜面匀速下滑，做好垫木位置的记号，然后再将垫木移右些，使小车下滑时做加速运动。

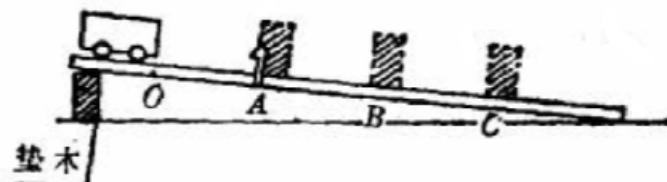


图 2.1

打开节拍器，当听到节拍器发出一个信号时，立即释放小车，使它自某一固定位置  $O$

下滑。用一木块阻挡小车，调整阻挡木块的位置，重复几次实验，使得小车撞击木块时发出的声音恰巧和节拍器发出的第二个信号（以小车开始释放时的信号作为第一个信号）重合。在阻挡木块的这一位置（A）上，用事先准备好的箭头标出（用胶纸把箭头贴在斜面的侧边）。用同样的方法来确定小车和木块的撞击声恰和节拍器发出的第三个信号、第四个信号重合时的木块位置B和C，并分别用箭头标出。用米尺量度OA、AB和BC的长度，发现 $OA < AB < BC$ ，然后将垫木移到事先准备好的位置，重做实验，直到测得 $OA = AB = BC$ 。这表明小车在相等时间里的位移都相等，所以小车的运动是匀速运动。

在演示匀变速直线运动时，则可以将垫木放在事先调整好的另一位置上，用上述方法观察小车在相等时间内经过了不相等的距离。通过调节节拍器的频率，使得小车从静止开始释放在各相等时间里发生的位移之比 $OA : AB : BC = 1 : 3 : 5$ （譬如可调节到使 $OA = 16\text{cm}$ ,  $AB = 48\text{cm}$ ,  $BC = 90\text{cm}$ ），在这基础上还可进一步得出 $AB - OA = BC - AB$ ，即匀变速直线运动中，在连续相等时间内的位移差是一常数。

## （二）测量匀变速直线运动的即时速度

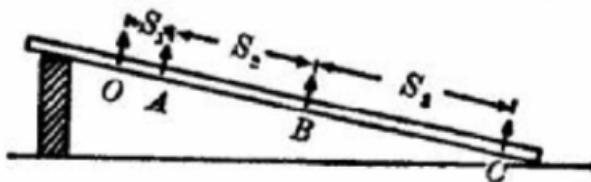


图 2.2

可利用斜面、小车和节拍器采用上述的实验方法，测出小车在各连续相等时间内的位移 $OA = s_1$ ,  $AB = s_2$ ,  $BC = s_3$ （图 2.2）。节拍器发出信号的时间间隔为 $T$ ，根据匀变速直线运动公式可知：

$$s_1 = \frac{1}{2}aT^2 \quad (2.1)$$

$$s_2 = v_A T + \frac{1}{2}aT^2 \quad (2.2)$$

将(2.1)、(2.2)式相加， $s_1 + s_2 = v_A T + aT^2$ 。

$$\therefore v_A = aT$$

$$\therefore s_1 + s_2 = v_A T + v_A T = 2v_A T, \quad v_A = \frac{s_1 + s_2}{2T}$$

也 $\frac{s_1 + s_2}{2T}$ 就等于小车开始运动 $2T$ 时间内的平均速度，所以匀变速直线运动中某一段时间的中间时刻的即时速度就等于在这一段时间内的平均速度。

同理，可以测出当小车经过位置B时的即时速度 $v_B = \frac{s_2 + s_3}{2T}$

利用打点计时器来测量。如图 2.3 所示，在一端装有定滑轮的长木板上，放一条有细绳的小车，通过定滑轮在细绳的另一端挂有几个钩码，固定在小车后面的纸带和打点计时器连在一起。接通电源待打点计时器正常工作后，释放小车。取下纸带后请一位学生选定连续的几个计数点（可用每打五次点的时间作为时间的单位），并要求学生毫米刻度尺测量出各相邻计数点间的距离 $s_1, s_2, s_3, s_4, \dots$ ，教师可将纸带以及选定的计数点放大后画在

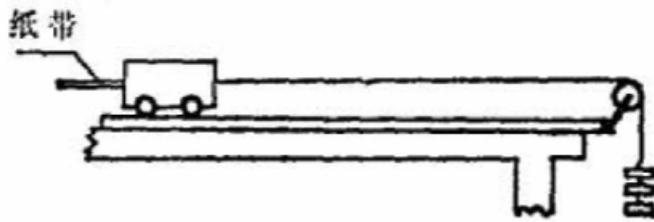


图 2.3

黑板上，并将学生实际测得的数据标出，用跟前述相同的方法来处理数据，求出打点计时器打下各计数点时小车的即时速度。

### (三) 测量匀变速直线运动的加速度

可采用测量匀变速直线运动的即时速度时相同的实验装置，取得数据，然后根据匀变速直线运动  $\Delta s = aT^2$  来求加速度。 $a = \frac{\Delta s}{T^2}$

用上述装置取得数据，算出打点计时器在打下各计数点时小车的即时速度后，然后用画  $v-t$  图象的方法求出图线的斜率，从而得出加速度  $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$

算出打点计时器在打下各计数点时小车的即时速度后，可以任取几段不同的时间及其相应的初速度和末速度的数据，根据加速度的定义式  $a = \frac{v_t - v_0}{t}$ ，来分别求出这几段时间内的加速度  $a_1, a_2, a_3, \dots$ ，然后再求这些加速度的平均值。

### (四) 空气阻力对落体运动的影响

准备一架调节好的托盘天平，先将一个乒乓球和一个小铁球放在托盘天平上比较它们的重量，可看到小铁球比较重。把这两个球放在同一高度上同时下落，则铁球先落地。又把乒乓球和一块较大的泡沫塑料平板放在天平上比较它们的重量，可看到泡沫塑料板较重，把它们放在同一高度上同时下落，则乒乓球先落地。再把一张纸裁成两半，把其中的一半揉成纸团和另一半放在天平上称，它们是等重的，使它们从同一高度同时下落，结果揉成纸团的那一半先落地。

这个演示说明了，比较重的物体可以先落地也可以后落地，即使等重的物体落地的时间也有先后。因此使得物体落地的时间有先后的原因不是由于重力的大小而是由于空气阻力大小的影响。受到空气阻力大的物体总是后落地。

### (五) 在空气阻力很小时，不同物体同时落下

这可以用课本图 2.20 所示牛顿管（又称毛钱管）的传统实验来进行。演示时可以先不抽空气，当把管子迅速倒转来时，金属片很快下落，羽毛则下落较慢。然后抽气（抽气要用管壁很厚的橡皮管），抽气后再演示，发现羽毛和金属片同时落到管子的底部，最后再将空气放入管中，则羽毛又比金属片下落得慢。这证明了：在空气阻力很小时，一切物体在同一高度上的落地时间都是相等的。

### (六) 研究自由落体的闪光照片

课本图 2.21 自由落体的闪光照片表明了自由落体运动是初速度为零的匀变速直线运动。关于这幅照片，要求学生理解以下几点：

1. 这不是许多个小球，而是表明一个自由下落的小球在经过各个相等时间（1/30 秒）时的位置。
2. 从每隔相等时间来看，小球下落的距离越来越大，说明小球是作变速运动。
3. 照片上小球最初几个位置比较密集，因此可选择某一个间距较大的位置作为位置 1 开始测量。小球的位置都取小球球心（也可以取小球的上缘或下缘），这样来量度相邻两个位置间的距离  $s_1, s_2, s_3, \dots$ ，再算出相邻的相等时间内的距离之差  $\Delta s_1 = s_2 - s_1, \Delta s_2 = s_3 - s_2, \Delta s_3 = s_4 - s_3, \dots$  指导学生阅读课本 88 页的数据表，发现  $\Delta s$  基本上都是接近的，因此可以证明自由落体运动是初速度为零的匀变速直线运动。
4. 要注意课本数据表中的数据是根据照片中的刻度尺读取的，而不是在照片上用毫米刻度尺测量的。
5. 从数据表所列的数据可以计算出自由落体运动的加速度（即重力加速度  $g$ ）的数值。

### (七) 利用打点计时器来研究自由落体运动

可以按照课本图 10.16，利用铁架台把打点计时器固定起来，用手提住夹有重物的纸带，接通电源，当打点计时器正常工作后，松开纸带，让重物拖着纸带自由下落。对纸带上记录的点的分布情况进行分析，可以证明自由落体运动是初速度为零的匀变速直线运动，而且可以求出重力加速度  $g$  的数值。

这个实验也可以让全体学生自己做，这样可以增加练习使用打点计时器的次数，并再一次练习对实验数据的分析和处理。

## 二、学生实验

### (一) 练习使用打点计时器

实验前要首先弄清楚所使用的打点计时器需要多大的工作电压，打点的时间间隔是多少。

用手拉动纸带时，速度不要过小，要水平，直到全部把纸带拉出，这样，即可观察到纸带上被打下的一系列点。

从纸带上能看得清的某个点数起，数一数纸带上共有多少个点，计算一下在这段距离内纸带运动的时间  $t$  是多少秒？要注意如果共有几个点，已知每两个点间经过的时间是 0.02 秒，则运动的总时间  $t = (n - 1) \times 0.02$  秒。

### (二) 研究匀变速直线运动

这个实验对于数据处理的要求较高，内容较多，要用两课时完成。实验的具体要求是：

1. 从分析纸带上的点的分布来判断小车是否做匀变速直线运动。
2. 在确认小车是做匀变速直线运动的前提下，利用纸带上的数据来计算出小车在各个时刻的即时速度。

3. 通过画出速度 - 时间图象，来计算小车做匀变速直线运动的加速度.

按课本图 10.9 的装置把实验器材装好，先不要接通交流电源，用手挡住小车，在细绳的一端挂上三个 50 克的钩码。释放后，观察小车运动时拖着的纸带通过打点计时器限位孔的位置是否恰当。适当调整并重新固定打点计时器的位置使得限位孔正对着小车的运动方向，然后把纸带穿好，接通电源，待打点计时器正常工作后释放小车。

取下纸带，观察纸带上的点，会发现开始时的几个点很密集，为了减小测量误差，可从间距较大的点（譬如相距几个毫米）开始进行测量，选定连续的几个计数点（不少于五个），并要求学生参照课本图 10.10，将所选定的计数点标出  $A, B, C, D, E, \dots$ ，量出各计数点间的距离  $s_1, s_2, s_3, s_4, \dots$  也标在纸带上（图 2.4），以此作为原始数据记录。

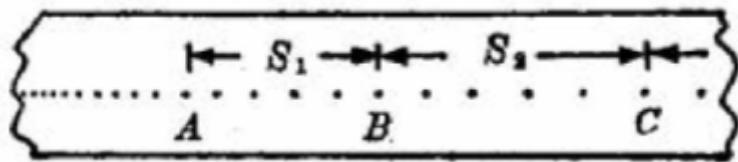


图 2.4

为了测量方便，可以用每打五次点的时间作为时间的单位，这样，在两个计数点间的时间间隔  $T = 5 \times 0.02 = 0.1$  秒。

根据课本练习九第 6 题，可得

$$\Delta s_1 = s_2 - s_1 = aT^2$$

$$\Delta s_2 = s_3 - s_2 = aT^2$$

$$\Delta s_3 = s_4 - s_3 = aT^2$$

在匀变速直线运动中，加速度  $a$  是恒量，因此通过对纸带上各个相邻计数点间距离的测量，算出各相邻计数点间的距离之差  $\Delta s$  均相等，则可证明小车的运动是匀变速直线运动。

怎样求出打点计时器在打下各计数点时小车的即时速度？

在确认小车是做匀变速直线运动的前提下，可以利用速度图象来求小车的加速度，这就首先需要求出小车从开始计时（即打点计时器打下  $A$  点时）起，经过  $T, 2T, 3T, \dots$  也就是打点计时器打下  $B, C, D, \dots$  各点时的即时速度。

$$v_1 = \frac{s_1 + s_2}{2T}, \quad v_2 = \frac{s_2 + s_3}{2T}, \quad v_3 = \frac{s_3 + s_4}{2T}$$

要注意：从课本图 10.10 所示纸带上所选定的这几个计数点，应用上述方法只能测得即时速度  $v_1, v_2$  和  $v_3$ ，若要测出打下  $E$  点时小车的即时速度，则必须在纸带上再确定经过时间为  $4T$  时的计数点  $F$ ，测出  $EF$  间的距离  $s_5$ ，则  $v_4 = \frac{s_4 + s_5}{2T}$ 。同理，若要测出打下  $A$  点时小车的即时速度，则必须在纸带上的  $A$  点之前再确定一个计数点  $O$ ，然后测量  $O$  和  $A$  点间的距离  $s_0$ ，则  $v_A = \frac{s_0 + s_1}{2T}$ 。要注意这个  $v_0$  并不等于零，它表示在实验中开始计时时刻的初速度。

求出打点计时器在打下各计数点时的即时速度后，就可设计一个能表示时间和其对应的即时速度数值的数据表格。在坐标纸上建立一个平面直角坐标系，用横坐标表示时间，用纵坐标表示速度，然后在坐标平面上标出  $(T, v_1), (2T, v_2), (3T, v_3), \dots$  各数据点，数据点不得少于五个。把这些点连结起来可以画出一条直线，画直线时应尽量使多数的点落在这条直线上，不在直线上的各点，应使它们比较均匀地分布在直线的两旁，这就是在这条直线两侧的点数以及这些点到直线的平均距离应大致相等，这就得出小车的速度图线。

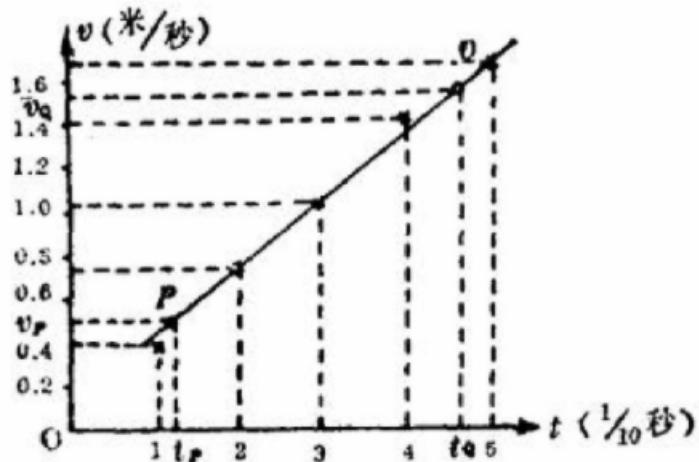


图 2.5

求出速度图线的斜率就可以得出小车的加速度。如果画出的  $v-t$  图象如图 2.5 所示，应该怎样求出这条直线的斜率呢？要从图线上选取相隔较远的两个点，如  $P$  和  $Q$ ，分别从图象上读出它们的坐标  $(t_P, v_P)$  和  $(t_Q, v_Q)$ ，即可求得加速度

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_Q - v_P}{t_Q - t_P}$$

可启发学生思考以下问题：

1. 如果不用速度图象来求小车的加速度，是否还有其他的方法？
2. 实验中为什么不直接用  $a = \frac{v_5 - v_1}{4T}$  来求加速度，而要在图线上另找  $P$ 、 $Q$  两点通过求图线的斜率来得出加速度，这样做有什么好处？

这个实验的课时安排，可以在第一课时内完成实验的准备、使用打点计时器打出纸带以及分析纸带上点的分布、确定计数点、测量数据判断小车是否做匀变速直线运动等内容。求出打点计时器在打下各计数点时小车的速度、画出  $v-t$  图象，求得小车的加速度等内容可安排在第二课时完成。

### 三、课外实验活动

#### (一) 滴水法测重力加速度

这个实验的原理是根据自由落体运动是初速度为零的匀变速直线运动，水滴下落的距离  $h$  跟运动时间  $t$  的平方成正比  $h = \frac{1}{2}gt^2$ ，则

$$g = \frac{2h}{t^2}$$

因此只要测出水滴下落的距离和下落的时间，便可测得重力加速度。

这个实验中的水滴下落距离是易于测量的，比较困难的是时间的测定。对于课本介绍的测时间的方法，要多次耐心地调整阀门（自来水笼头）的大小，才能使水滴从阀门落到盘子经过的时间正好等于阀门滴下水滴的时间间隔。为了便子调整，盘子可以倒过来放在水槽里（或者用大口瓶上的金属盖代替盘子，使盖子的顶部朝上）。由于盘子下面跟水槽间有一空腔，使得水滴在盘子上的响声比较清脆，阀门离盘子的距离不要太近，太近了不容易区别两次滴水的时间间隔。（譬如水滴下落的距离约为 0.5 米左右时，半分钟里约有 90—100 个水滴从阀门滴下，这样，水滴下落的时间就正好等于相继滴下的两个水滴之间的时间间隔）。

用这一方法测定的重力加速度的数值是近似的，但实验方法比较巧妙而且简单。

## （二）用秒表测量玩具手枪子弹射出的速度

这个实验的原理是，以初速  $v_0$ 、竖直上抛的物体，从开始抛出直到落回抛出点所经过的总时间  $t = 2v_0/g$ ，只要测出玩具手枪的子弹从发射到落回发射点的时间  $t$ ，当地的  $g$  值可以由教师给出，即可测出玩具手枪子弹射出时的初速度  $v_0 = \frac{1}{2}gt$ 。

由于实验条件的限制，所测得的子弹初速度是近似的。为了能使子弹基本上做竖直上抛运动，可以设法使玩具手枪固定起来（譬如可将手枪缚在一张方木凳的边上，使枪口和凳面相平，并使枪管竖直向上），试着先发射一发子弹调节枪管的位置，使子弹不做明显的斜抛运动就可以了。实验时可以在手枪的另一侧再放一个相同高度的木凳，从扳动手枪扳机发射子弹的同时开始计时，当子弹落到木凳时再按下秒表，测出子弹做竖直上抛运动的总时间  $t$ 。如果没有秒表，也可以用手表近似地计时。

# 第四节 习题解答

## 一、练习一

1. 两辆在公路上直线行驶的汽车，它们的距离保持不变，试说明用什么样的物体做参照物，两辆汽车都是静止的，用什么样的物体做参照物，两辆汽车都是运动的。能否找到这样一个参照物，一辆汽车对它是静止的，另一辆汽车对它是运动的？为什么？

**解答：**用其中任意一辆汽车里的座椅做参照物，两辆汽车都是静止的；用车外公路旁的树木、房屋做参照物，两辆汽车都是运动的。因为两辆车的距离不变，它们保持相对静止，所以不可能找到一个参照物，一辆车对它是静止的，而另一辆车对它却是运动的。

2. 小孩从滑梯上滑下，钢球沿斜槽滚下，石块从手中落下，这些物体中哪些是做平动的？

**解答：**根据运动过程中物体各部分的运动是否完全相同来判断：小孩从滑梯上滑下是平动，钢球沿斜槽滚下不是平动；石块从手中落下时如果没有翻转则也是平动。

3. 研究自行车轮的转动，能不能把自行车当作质点？研究在马路上行驶的自行车的度，能不能把自行车当作质点？

**解答：**研究自行车轮的转动时，不能把自行车当作质点；研究自行车的行驶速度时，可以把它当作质点。

## 二、练习二

1. 质点做什么运动，位移的大小才等于路程？

**解答：**质点始终向同一方向做直线运动时，位移的大小等于路程。

2. 课本图 2.6 表示做直线运动的质点从初位置 A 经过 B 运动到 C，然后从 C 返回，运动到末位置 B，设 AB 长 7 米，BC 长 5 米。求质点的位移的大小和路程。

**解答：**如图所示，初位置为 A，末位置为 B，所以位移的大小为 7 米 (AB 长)。

$$\text{路程} = AB + BC + CB = 7 + 5 + 5 = 17\text{m}$$

3. 在课本图 2.4 中汽车初位置的坐标是 -2 千米，末位置的坐标是 1 千米。求汽车的位移的大小和方向。

**解答：**汽车的位移  $s = 1 - (-2) = 3$  千米，由于位移为正值，方向跟坐标轴正方向一致，即由西向东。

## 三、练习三

1. 光在真空中沿直线传播的速度为  $3.0 \times 10^8\text{m/s}$ 。

(a) 一光年（光在一年中传播的距离）有多少千米？

(b) 最靠近我们的恒星（半人马座  $\alpha$  星）离我们  $4.0 \times 10^{13}$  千米，它发出的光要多长时间才到达地球？

**解答：**

$$(a) 1\text{光年} = 365 \times 24 \times 60 \times 60\text{s} \times 3.0 \times 10^8\text{m/s} = 9.5 \times 10^{12}\text{km}$$

$$(b) t = \frac{4.0 \times 10^{13}}{9.5 \times 10^{12}} = 4.2\text{年}$$

最靠近我们的恒星发出的光要 4.2 年才能到达地球。

2. 在技术上常用 km/h 作速度的单位。试求 1m/s 合多少 km/h。

**解答：**

$$\frac{1\text{m}}{1\text{s}} = \frac{1/1000\text{km}}{1/3600\text{h}} = \frac{3600}{1000}\text{km/h} = 3.6\text{km/h}$$

3. 光在空气中的速度可以认为等于光在真空中的速度。声音在空气中的速度是 340m/s。

一个人看到闪电后 5 秒听到雷声，打雷的地方离他大约多远？

**解答：**设打雷的地方跟观侧者的距离为  $s$ ，声速  $v = 340\text{m/s}$ ，由于光速很快，可以认为闪电发出后，即刻被看到，于是时间  $t = 5$  秒即是雷声传播的时间，所以  $s = vt = 340 \times 5 = 1700\text{m}$ 。即打雷的地方离他 1700 米远。

## 四、练习四

1. 图 2.6 是一架民航飞机的位移图象。从这个图象求出

(a) 飞机在 30 分钟内的位移；

(b) 飞行 700 千米所用的时间；

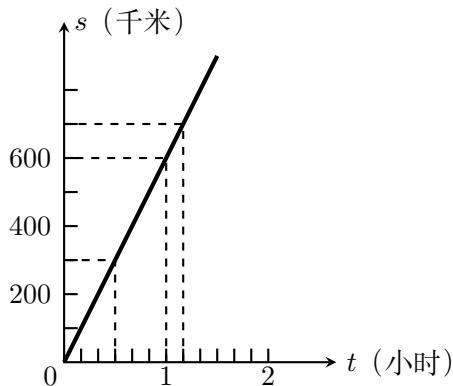


图 2.6

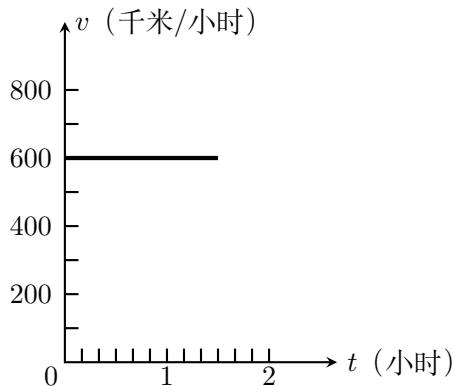


图 2.7

(c) 飞行速度并画出速度图象.

**解答：**

(a) 从位移图象上看出，时间为 30 分钟的点所对应的位移为 300 千米.

(b) 从位移图象上看出，位移为 700 千米的点所对应的时间为 70 分钟.

(c) 从位移图象上时间为 1 小时、位移为 600 千米的点，即可求得速度为 600 千米/小时. 速度图象如图 2.7 所示.

2. 图 2.8 是一辆火车运动的位移图象. 线段  $OA$  和  $BC$  所表示的运动，哪个速度大？各等于多大？线段  $AB$  与横轴平行，表示火车做什么运动？速度是多大？火车在 3 小时内的位移是多少？通过 80 千米用多长时间？画出火车的速度图象.

**解答：**由于位移图象线段  $OA$  的斜率大于线段  $BC$  的斜率，所以  $OA$  线段所表示的运动速度大；从位移图象上  $A$  点的坐标可以求得

$$v_{OA} = \frac{90}{1.5} = 60 \text{ km/h}$$

从  $B$ 、 $C$  两点的坐标可以求得

$$v_{BC} = \frac{140 - 90}{3 - 2} = 50 \text{ km/h}$$

线段  $AB$  表示火车静止，速度为零. 从  $C$  的坐标可知火车在 3 小时内的位移是 140 千米. 在图线上取位移为 80 千米的点，可以求得火车通过这段位移需用 80 分钟. 根据前述各段作出火车的速度图象如图 2.9 所示.

3. 有两个物体，从同一点开始向相同方向做匀速运动，速度分别是  $3 \text{ m/s}$  和  $5 \text{ m/s}$ ，在同一个坐标平面上画出它们的位移图象和速度图象，并根据这两种图象分别求出它们在 5 秒内的位移.

**解答：**题中所述的两个物体的位移图象如图 2.10 所示，速度图象如图 2.11 所示，从位移图象上可以看出，时间为 5 秒时，图线  $A$  上  $P_A$  点的位移为 15 米，图线  $B$  上  $P_B$  点的位移为 25 米. 从速度图象上求得图线  $A$  5 秒内的“面积”为  $3 \times 5 = 15$  米，图线  $B$  5 秒内的“面积”为  $5 \times 5 = 25$  米，于是，从位移图象和速度图象得到的结果相同，即两个物体 5 秒内的位移分别是 15 米和 25 米.

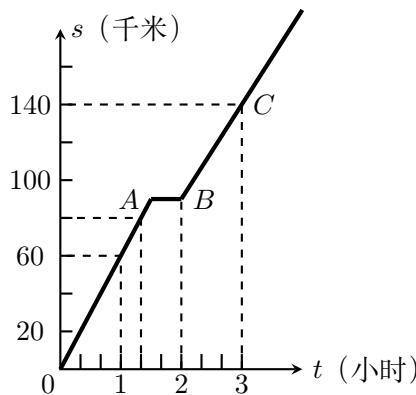


图 2.8

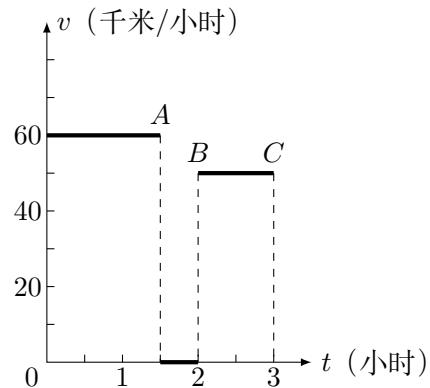


图 2.9

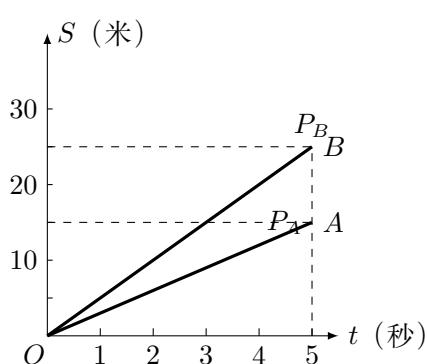


图 2.10

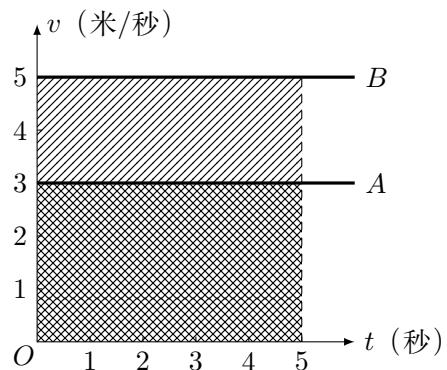


图 2.11

## 五、练习五

1. 一辆汽车，起初以 30km/h 的速度匀速行驶了 30 千米，然后又以 60km/h 的速度匀速行驶了 30 千米。一位同学认为这辆汽车在这 60 千米中的平均速度是  $1/2(30 \text{ 千米/时} + 60 \text{ km/h}) = 45 \text{ km/h}$ 。这个结果对不对？

解答：按平均速度的定义应是位移与时间的比值，所以这辆汽车的平均速度

$$\bar{v} = \frac{s_1 + s_2}{t_1 + t_2}$$

由于  $s_1 = 30$  千米， $s_2 = 30$  千米， $t_1 = 1$  小时， $t_2 = 0.5$  小时，所以

$$\bar{v} = \frac{60}{1.5} = 40 \text{ km/h}$$

因此，那位同学的看法是不对的。

2. 骑自行车的人沿着坡路下行，在第 1 秒内通过 1 米，第 2 秒内通过 3 米，在第 3 秒内通过 5 米，在第 4 秒内通过 7 米。求最初两秒内、最后两秒内以及全部运动时间内的平均速度。

解答：最初两秒：

$$\bar{v} = \frac{1+3}{2} = 2 \text{ m/s}$$

最后两秒：

$$\bar{v} = \frac{5+7}{2} = 6 \text{ m/s}$$

全部时间：

$$\bar{v} = \frac{1+3+5+7}{4} = 4 \text{ m/s}$$

3. 在一个速度是  $v$  的匀速直线运动中，各段时间内的平均速度以及整个运动的平均速度各是多大？每一时刻的即时速度是多大？

**解答：**匀速直线运动是速度不变的运动，所以各段和全部时间的平均速度以及每一时刻的即时速度都是  $v$ 。

4. 火车以 70km/h 的速度经过某一路标，子弹以 600m/s 的速度从枪筒射出。这里指的是什么速度？

**解答：**这里指的都是即时速度。

## 六、练习六

1. 加速度为零的运动是什么运动？

**解答：**是匀速直线运动。

2. 有人说：速度越大表示加速度也越大。这话对吗？为什么？

**解答：**不对，加速度是指速度变化的快慢，其大小取决于单位时间内速度变化的大小。高速运动的物体，速度虽然大，单位时间内速度的变化却不一定大，因而加速度也并不一定大。

3. 汽车的加速性能是反映汽车质量的重要标志。汽车从一定的初速度  $v_0$  加速到一定的末速度  $v_t$ ，用的时间越少，表明它的加速性能越好。下表是三种型号汽车的加速性能的实验数据，求它们的加速度。

汽车型号	初速度 $v_0$ (km/h)	末速度 $v_t$ (km/h)	时间 $t$ (s)	加速度 $a$ (m/s <sup>2</sup> )
某型号高级轿车	20	50	7	
某型号 4 吨载重汽车	20	50	38	
某型号 8 吨载重汽车	20	50	50	

**解答：**由公式  $a = \frac{v_t - v_0}{t}$  可得

(a) 高级轿车的加速度

$$a_1 = \frac{(50 - 20)\text{km/h}}{7\text{s}} = \frac{(50 - 20) \times 10^3 \text{m}}{7 \times 3600 \text{s}} = 1.19 \text{m/s}^2$$

(b) 4 吨载重汽车的加速度

$$a_2 = \frac{(50 - 20)\text{km/h}}{38\text{s}} = \frac{(50 - 20) \times 10^3 \text{m}}{38 \times 3600 \text{s}} = 0.22 \text{m/s}^2$$

(c) 8 吨载重汽车的加速度

$$a_3 = \frac{(50 - 20)\text{km/h}}{50\text{s}} = \frac{(50 - 20) \times 10^3 \text{m}}{50 \times 3600 \text{s}} = 0.17 \text{m/s}^2$$

4. 以 18m/s 的速度行驶的火车，制动后经 15 秒停止，求火车的加速度。

**解答：**

$$a = \frac{v_t - v_0}{t} = \frac{0 - 18}{15} = -1.2 \text{m/s}^2$$

## 七、练习七

1. 机车原来的速度是 36km/h，在一段下坡路上加速度为  $0.20\text{m/s}^2$ ，机车行驶到下坡末端，速度增加到 54km/h。求机车通过这段下坡路所用的时间。

解答：

$$a = \frac{v_t - v_0}{t}, \quad t = \frac{v_t - v_0}{a}$$

由于  $v_t = 54\text{km/h} = 15\text{m/s}$ ,  $v_0 = 36\text{km/h} = 10\text{m/s}$ ,  $a = 0.20\text{m/s}^2$ , 所以

$$t = \frac{15 - 10}{0.20} = 25\text{s}$$

2. 一辆做匀变速运动的汽车，初速度是 34km/h，4.0 秒末速度变为 42km/h。如果保持加速度不变，6.0 秒末、7.0 秒末的速度是多大？

解答：用  $v_0$  和  $v_4, v_6, v_7$  分别表示汽车的初速度和 4 秒末、6 秒末、7 秒末的速度，则有

$$a = \frac{v_4 - v_0}{4} = \frac{(42 - 34)\text{km/h}}{4\text{s}} = \frac{8\text{km/h}}{4\text{s}}$$

所以

$$\begin{aligned} v_6 &= v_0 + a \times 6\text{s} = 34\text{km/h} + \frac{8\text{km/h}}{4\text{s}} \times 6\text{s} = 46\text{km/h} \\ v_7 &= v_0 + a \times 7\text{s} = 34\text{km/h} + \frac{8\text{km/h}}{4\text{s}} \times 7\text{s} = 48\text{km/h} \end{aligned}$$

3. 匀变速运动的加速度是  $-4.0\text{m/s}^2$ 。在某一时刻，速度为  $20\text{m/s}^2$ 。试求这一时刻后 4.0 秒末和 5.0 秒末的速度。

解答：由  $v_t = v_0 + at$ , 得 4 秒末的速度

$$v_4 = 20\text{m/s} + (-4.0\text{m/s}^2) \times 4\text{s} = 4\text{m/s}$$

5 秒末的速度

$$v_5 = 20\text{m/s} + (-4.0\text{m/s}^2) \times 5\text{s} = 0\text{m/s}$$

## 八、练习八

1. 钢球在斜槽上做初速度为零的匀变速运动，开始运动后 0.2 秒内通过的路程是 3.0 厘米，1 秒内通过的路程是多少？如果斜面长 1.5 米，钢球由斜面顶端滚到底端需要多长时间？

解答：由公式  $s = \frac{1}{2}at^2$  得  $a = \frac{2s}{t^2}$ 。把  $t = 0.2\text{s}$ ,  $s = 3.0\text{cm} = 0.03\text{m}$  代入得

$$a = \frac{2 \times 0.03}{(0.2)^2} = 1.5\text{m/s}^2$$

由此得 1 秒内通过的路程

$$s_1 = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2} \times 1.5\text{m/s}^2 \times (1\text{s})^2 = 0.75\text{m}$$

又由公式  $s = \frac{1}{2}at^2$  得

$$t = \sqrt{\frac{2s}{a}}$$

把  $a = 1.5\text{m/s}^2$  和  $s = 1.5\text{m}$  代入可得钢球滚到斜面底端所需的时间

$$t = \sqrt{\frac{2 \times 1.5\text{m}}{1.5\text{m/s}^2}} = 1.4\text{s}$$

2. 飞机着陆后做匀变速运动，速度逐渐减小，已知初速度是  $60\text{m/s}$ ，加速度的大小是  $6.0\text{m/s}^2$ ，求飞机着陆后  $5.0$  秒内通过的路程。

解答：

$$\begin{aligned}s &= v_0 t + \frac{1}{2}at^2 \\&= 60 \times 5 + \frac{1}{2} \times (-6.0) \times 5^2 \\&= 225\text{m}\end{aligned}$$

3. 一辆汽车原来匀速行驶，然后  $1.0\text{m/s}^2$  的加速度加快行驶，经  $12$  秒行驶了  $180$  米。汽车开始加速时的速度是多大？

解答：由公式  $s = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$ ，可得  $v_0 = \frac{s}{t} - \frac{1}{2}at$ 。把  $s = 180\text{m}$ ,  $t = 12\text{s}$ ,  $a = 1.0\text{m/s}^2$  代入上式得

$$v_0 = \frac{180}{12} - \frac{1}{2} \times 1.0 \times 12 = 15 - 6 = 9\text{m/s}$$

4. 骑自行车的人以  $5.0\text{m/s}$  的初速度登上斜坡，得到  $-40\text{cm/s}^2$  的加速度，经过  $10$  秒钟，在斜坡上通过多长的距离？

解答：由公式  $s = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$ ，得：

$$s = 5 \times 10 + \frac{1}{2} \times (-0.4) \times (10)^2 = 30\text{m}$$

5. 汽车以  $36\text{km/h}$  的速度行驶。刹车后得到的加速度的大小为  $4\text{m/s}^2$ 。从刹车开始，经过  $3$  秒钟，汽车通过的距离是多少？

解答：解此题要注意两点：一是这里的加速度为负值；二是求出从刹车到车停止运动的时间  $t$ ，如果小于  $3$  秒，则求距离时用时间  $t$ ；如果大于  $3$  秒，则求距离时用的时间为  $3$  秒。

由  $a = \frac{v_t - v_0}{t}$ ，得从刹车开始到车停止的时间  $t = \frac{v_t - v_0}{a}$

把  $v_t = 0$ ,  $v_0 = 36\text{km/h} = 10\text{m/s}$  代入上式得

$$t = \frac{0 - 10}{-4} = 2.5\text{s}$$

所求的距离

$$s = 10\text{m/s} \times 2.5\text{s} + \frac{1}{2} \times (-4)\text{m/s}^2 \times (2.5\text{s})^2 = 12.5\text{m}$$

## 九、练习九

1. 一个做匀变速运动的物体，初速度为  $3.0\text{m/s}$ ，经过 10 秒钟，速度变为  $9.0\text{m/s}$ ，它在这 10 秒钟内的平均速度是多大？

**解答：**由  $\bar{v} = \frac{1}{2}(v_0 + v_t)$ ，得：

$$\bar{v} = \frac{3 + 9}{2} = 6\text{m/s}$$

2. 从长 3.0 米的斜面顶端由静止滚下来的小球，末速度是  $2.5\text{m/s}$ ，求小球滚动所用的时间。

**解答：**由公式  $s = \bar{v}t$  和  $\bar{v} = \frac{1}{2}(v_0 + v_t)$ ，得

$$s = \frac{v_0 + v_t}{2}t$$

所以

$$t = \frac{2s}{v_0 + v_t} = \frac{2 \times 3.0}{0 + 2.5} = 2.4\text{s}$$

3. 一辆汽车以  $12\text{m/s}$  的速度行驶，走到一个下坡，得到  $0.40\text{m/s}^2$  的加速度，汽车通过下坡末端的速度是  $16\text{m/s}$ ，这个下坡的长度是多长？

**解答：**由公式  $v_t^2 - v_0^2 = 2as$ ，得

$$s = \frac{v_t^2 - v_0^2}{2a} = \frac{16^2 - 12^2}{2 \times 0.4} = 140\text{m}$$

4. 子弹射中墙壁前的速度是  $400\text{m/s}$ ，射到墙壁后穿进墙壁 20 厘米，子弹在墙内的运动可以看作匀变速运动，求子弹在墙壁内的加速度和运动时间。

**解答：**由公式  $v_t^2 - v_0^2 = 2as$ ，得子弹在墙壁内的加速度

$$a = \frac{v_t^2 - v_0^2}{2s} = \frac{0 - 400^2}{2 \times 0.20} = -4 \times 10^5\text{m/s}^2$$

由  $s = \bar{v}t$ ，得子弹在墙壁内的运动时间

$$t = \frac{s}{\bar{v}} = \frac{2s}{v_0 + v_t} = \frac{2 \times 0.20}{400 + 0} = 0.001\text{s}$$

5. 试证明做匀变速运动的物体在一段时间内的平均速度等于这段时间的中间时刻的即时速度。

**证明：**方法一：由  $s = \bar{v}t$  和  $s = v_0t + \frac{1}{2}at^2$ ，可得

$$\bar{v} = \frac{s}{t} = v_0 + \frac{1}{2}at = v_0 + a\left(\frac{t}{2}\right)$$

即  $\bar{v}$  等于求平均速度这段时间的中间时刻的即时速度。

方法二：由  $v_t = v_0 + at$ ，可得中间时刻的即时速度  $v'$

$$v' = v_0 + a\left(\frac{t}{2}\right) = v_0 + \frac{1}{2}at = \frac{1}{2}(v_0 + v_0 + at) = \frac{1}{2}(v_0 + v_t) = \bar{v}$$

6. 做匀变速运动的物体，在各个连续相等时间  $t$  内的位移分别是  $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$ . 如果加速度是  $a$ , 试证明:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = s_3 - s_2 = \dots = s_n - s_{n-1} = at^2$$

**解答:** 设初速度为  $v_0$ , 由  $s = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$  和  $v_t = v_0 + at$ , 得:

$$\begin{aligned}s_1 &= v_0 t + \frac{1}{2}at^2 \\s_2 &= (v_0 + at)t + \frac{1}{2}at^2 = v_0 t + \frac{1}{2}at^2 + at^2 \\s_3 &= (v_0 + at + at)t + \frac{1}{2}at^2 = (v_0 + 2at)t + \frac{1}{2}at^2 = v_0 t + \frac{1}{2}at^2 + 2at^2 \\s_{n-1} &= [v_0 + (n-2)at]t + \frac{1}{2}at^2 = v_0 t + \frac{1}{2}at^2 + (n-2)at^2 \\s_n &= [v_0 + (n-1)at]t + \frac{1}{2}at^2 = v_0 t + \frac{1}{2}at^2 + (n-1)at^2\end{aligned}$$

$$\therefore \Delta s = s_2 - s_1 = s_3 - s_2 = \dots = s_n - s_{n-1} = at^2$$

## 十、练习十

1. 为了测出井口到井里水面的深度，让一个小石块从井口落下，经过 2.0 秒后听到石块落到水面的声音，求井口到水面的大约深度（不考虑声音传播所用的时间）。

**解答:** 由公式  $s = \frac{1}{2}gt^2$ , 得:

$$s = \frac{1}{2} \times 9.8 \times 2^2 = 19.6\text{m}$$

2. 一个自由下落的物体，到达地面的速度是 39.2m/s，这个物体是从多高落下的？落到地面用了多长时间？

**解答:** 由  $v_t^2 = 2gs$ , 得物体下落时的高度

$$s = \frac{v_t^2}{2g} = \frac{39.2^2}{2 \times 9.8} = 78.4\text{m}$$

由  $v_t = gt$ , 得物体落到地面所用的时间

$$t = \frac{v_t}{g} = \frac{39.2}{9.8} = 4\text{s}$$

3. 一个物体从 22.5 米高的地方下落，到达地面时的速度是多大？下落最后 1 秒内的位移是多大？

**解答:** 由  $v_t^2 = 2gs$ , 得物体到达地面时的速度

$$v_t = \sqrt{2gs} = \sqrt{2 \times 9.8 \times 22.5} = 21\text{m/s}$$

由  $v_t = gt$ , 得物体下落的时间

$$t = \frac{v_t}{g} = \frac{21}{9.8} = 2.14\text{s}$$

前 1.14 秒内位移:

$$s' = \frac{1}{2}gt^2 = \frac{1}{2} \times 9.8 \times 1.14^2 = 6.4\text{m}$$

最后 1 秒内位移:

$$s = 22.5 - 6.4 = 16.1\text{m}$$

## 十一、练习十一

1. 在竖直上抛运动中,  $v_t$  与  $v_0$  何时方向相同, 何时相反?  $v_t$  与  $a$  何时方向相同, 何时相反?

**解答:** 在上升运动中,  $v_t$  和  $v_0$  方向相同;  $v_t$  和  $a$  方向相反. 在下降运动中,  $v_t$  和  $v_0$  方向相反;  $v_t$  和  $a$  方向相同.

2. 竖直向上射出的箭, 初速度是 35m/s, 上升的最大高度是多大? 从射出到落回原地一共用多长时间? 落回原地的速度是多大?

**解答:** 箭上升到最大高度  $H$  时,  $v_t = 0$ , 由此得  $v_0^2 = 2gH$ , 所以

$$H = \frac{v_0^2}{2g} = \frac{35^2}{2 \times 10} = 61\text{m}$$

由于  $v_t = v_0 + gt = 0$ , 箭的上升时间

$$t = \frac{v_0}{g} = \frac{35}{10} = 3.5\text{s}$$

由射出到落回原地共用时间  $T = 2t = 2 \times 3.5 = 70\text{s}$ . 落回原地速度跟抛出的初速度大小相等即 35m/s.

说明: 为了计算的方便, 解题时取  $g = 10\text{m/s}^2$ , 以下两题同.

3. 竖直上抛的物体, 初速度是 30m/s, 经过 2.0 秒、3.0 秒、4.0 秒, 物体的位移分别是多大? 通过的路程分别是多长? 各秒末的速度分别是多大?

**解答:** 上升的最大高度

$$H = \frac{v_0^2}{g} = \frac{30^2}{2 \times 10} = 45\text{m}$$

由  $s = v_0 t - \frac{1}{2}gt^2$  得:

(a) 当  $t = 2.0\text{s}$  时, 位移

$$s = 30\text{m/s} \times 2.0\text{s} - \frac{1}{2} \times 10\text{m/s}^2 \times (2.0\text{s})^2 = 40\text{m} < H$$

∴ 路程  $s' = 40\text{m}$ .  $v_t = v_0 - gt = 30 - 10 \times 2.0 = 10\text{m/s}$ .

(b) 当  $t = 3.0\text{s}$  时, 位移

$$s = 30\text{m/s} \times 3.0\text{s} - \frac{1}{2} \times 10\text{m/s}^2 \times (3.0\text{s})^2 = 45\text{m} = H$$

∴ 路程  $s' = 45\text{m}$ .  $v_t = v_0 - gt = 30 - 10 \times 3.0 = 0$ .

(c) 当  $t = 4.0\text{s}$  时, 位移

$$s = 30\text{m/s} \times 4.0\text{s} - \frac{1}{2} \times 10\text{m/s}^2 \times (4.0\text{s})^2 = 40\text{m} < H$$

∴ 路程  $s' = 45 + (45 - 40) = 50\text{m}$ .  $v_t = v_0 - gt = 30 - 10 \times 4.0 = -10\text{m/s}$ .

4. 在课文的例题中，求经过 1 秒后石子离地面的高度以及石子这时的速度。先分上升运动和下降运动两步来计算，再用统一的公式来计算，并加以比较。

**解答：**

- (a) 石子上升时间

$$t_1 = \frac{v_0}{g} = \frac{4}{10} = 0.4\text{s}$$

1 秒内石子的下降时间

$$t_2 = 1 - 0.4 = 0.6\text{s}$$

石子上升的最大高度

$$h_1 = \frac{v_0^2}{2g} = \frac{4^2}{2 \times 10} = 0.8\text{m}$$

0.6 秒内石子下降的高度

$$h_2 = \frac{1}{2}gt^2 = \frac{1}{2} \times 10 \times 0.6^2 = 1.8\text{m}$$

石子这时的速度  $v_t = gt = 10 \times 0.6 = 6\text{m/s}$ , 方向向下。

- (b) 由  $s = v_0 t - \frac{1}{2}gt^2$ , 得石子在抛出 1 秒后的高度

$$s = 4 \times 1 - \frac{1}{2} \times 10 \times 1^2 = -1\text{m}$$

即在抛出点下方 1 米处，离地面高度为  $15 - 1 = 14\text{m}$ .

石子这时的速度  $v_t = v_0 - gt = 4 - 10 \times 1 = -6\text{m/s}$ .

比较：解 (b) 较解 (a) 简单，但求出的石子的速度和相对于抛出点的位移，都是负值，必须搞清它们的物理意义，关键在于掌握各矢量的方向。

## 十二、习题

1. 物体的加速度为零时，它的速度是否一定为零？物体的速度为零时，它的加速度是否一定为零？各举一个例子。

**解答：**物体的加速度为零时，速度不一定为零，例如火车在平直轨道上匀速行驶，物体的速度为零时，它的加速度不一定为零，例如竖直上抛运动中当物体到达最高点时速度为零，加速度为  $g = 9.8\text{m/s}^2$ 。

2. 汽车以  $26\text{km/h}$  的速度行驶了 2 小时，跟目的地还有一半路程，要想在 40 分钟内到达目的地，在后一半路程中汽车应该以多大速度行驶？

**解答：**由  $s_1 = v_1 t_1$ , 得  $s_1 = 25 \times 2 = 50\text{km}$ . 因此，汽车在 40 分钟内走完另一半路程所需的速度为

$$v_2 = \frac{s_2}{t_2} = \frac{50\text{km}}{40\text{min}} = 75\text{km/h}$$

3. 矿井里的升降机，从静止开始加速上升，经过 3 秒速度达到  $3\text{m/s}$ ，然后以这个速度匀速上升 25 秒，最后减速上升，经过 2 秒到达井口时，正好停下来，求矿井深度。

**解答：**矿井的深度等于升降机各段上升高度之和，即

$$\begin{aligned}s &= v_1 t_1 + v_2 t_2 + v_3 t_3 \\&= \frac{0+3}{2} \times 3 + 3 \times 25 + \frac{3+0}{2} \times 2 \\&= 4.5 + 75 + 3 = 82.5\text{m}\end{aligned}$$

4. 一架飞机以  $7.0\text{m/s}^2$  的加速度做匀加速飞行，计算它的速度由  $240\text{km/h}$  增加到  $600\text{km/h}$  所发生的位移和所用的时间。

**解答：**初速  $v_0 = 240\text{km/h} = \frac{200}{3}\text{m/s}$ , 末速  $v_t = 600\text{km/h} = \frac{500}{3}\text{m/s}$

由  $a = \frac{v_t - v_0}{t}$ , 得所用的时间

$$t = \frac{v_t - v_0}{a} = \frac{\frac{500}{3} - \frac{200}{3}}{7.0} = 14.3\text{s}$$

这段时间内飞机的位移

$$s = vt = \frac{1}{2} \left( \frac{200}{3} + \frac{500}{3} \right) \times 14.3 = 1.67 \times 10^3\text{m}$$

5. 火车制动后经过 20 秒停下来，在这段时间内前进 120 米。求火车开始制动时的速度和火车的加速度。

**解答：**由公式  $s = \bar{v}t$  和  $\bar{v} = \frac{v_0 + v_t}{2}$  解得开始制动时的速度

$$v_0 = \frac{2s}{t} - v_t$$

由于  $v_2 = 0$ , 所以

$$v_0 = \frac{2s}{t} = \frac{2 \times 120}{20} = 12\text{m/s}$$

火车的加速度

$$a = \frac{v_t - v_0}{t} = \frac{0 - 12}{20} = -0.6\text{m/s}^2$$

6. 汽车从静止开始做匀变速运动，通过一段距离，速度达到  $14\text{m/s}$ ，汽车通过这段距离的一半时，速度是多大？

**解答：**设汽车的加速度为  $a$ , 通过距离  $s$  获得的末速度为  $v$ , 通过的距离为  $s$  之半时，获得的速度为  $v'$ . 由于  $v_0 = 0$ , 所以有

$$\begin{aligned}v^2 &= 2as \\v'^2 &= 2a \left( \frac{s}{2} \right) = as\end{aligned}$$

$$\therefore \frac{v'^2}{v^2} = \frac{as}{2as} = \frac{1}{2}, \text{ 由此得:}$$

$$v' = \frac{\sqrt{2}}{2} v$$

$$\text{已知 } v = 14\text{m/s}, \therefore v' = \frac{\sqrt{2}}{2} \times 14 = 9.9\text{m/s}$$

7. 一个物体从塔顶上下落，在到达地面前最后一秒内通过的位移是整个位移的  $9/25$ . 求塔高.

**解答：**设塔高为  $s$  米，下落时间为  $t$  秒，因此  $s = \frac{1}{2}gt^2$ ，同理可知物体在  $(t - 1)$  秒内落下的距离为

$$s' = \frac{1}{2}g(t - 1)^2$$

由题设知

$$\frac{s'}{s} = \frac{25 - 9}{25} = \frac{16}{25}$$

所以

$$\frac{(t - 1)^2}{t^2} = \frac{16}{25}$$

即

$$\frac{t - 1}{t} = \frac{4}{5}$$

解得  $t = 5$ s.

因此塔高

$$s = \frac{1}{2}gt^2 = \frac{1}{2} \times 10 \times 25 = 125\text{m}$$

8. 自由落下的物体在某一点速度是  $19.6\text{m/s}$ ，在另一点的速度是  $39.2\text{m/s}$ . 求这两点间的距离和经过这段距离所用的时间.

**解答：**由公式  $v^2 = 2gs$ ，得物体速度为  $19.6\text{m/s}$  时下降的高度为

$$s_1 = \frac{v_1^2}{2g} = \frac{19.6^2}{2 \times 9.8} = 19.6\text{m}$$

物体速度为  $39.2$  米时下降的高度为

$$s_2 = \frac{v_2^2}{2g} = \frac{39.2^2}{2 \times 9.8} = 78.4\text{m}$$

两点之间的距离  $\Delta s = s_2 - s_1 = 78.4 - 19.6 = 58.8\text{m}$

由  $\Delta s = \frac{v_1 + v_2}{2}t$ ，可得经过这段距离所用的时间

$$t = \frac{2\Delta s}{v_1 + v_2} = \frac{2 \times 58.8}{19.6 + 39.2} = 2\text{s}$$

9. 一个竖直上抛的物体，经过  $4.0$  秒落回原地，经过  $1.0$  秒， $2.0$  秒， $3.0$  秒，物体的速度分别是多大？物体的位移分别是多大？通过的路程分别是多长？

**解答：**已知物体上抛，落回原地的时间  $T = 4\text{s}$ ，而上升时间  $t'$  等于下落时间  $t''$ ，所以  $t' = t'' = T/2 = 2\text{s}$ .

由于物体上抛到最高点的速度  $v_{t'} = 0$ ，则由公式  $v_t = v_0 - gt$ ，得上抛的初速度  $v_0 = gt' = 10 \times 2 = 20\text{m/s}$ .

由公式  $v_t = v_0 - gt$  和  $s = v_0t - \frac{1}{2}gt^2$  得：

(a) 经过 1 秒物体的速度

$$v_1 = 20 - 10 \times 1 = 10 \text{m/s}$$

物体的位移

$$s_1 = 20 \times 1 - \frac{1}{2} \times 10 \times 1^2 = 15 \text{m}$$

经过的路程也是 15m.

(b) 经过 2 秒物体的速度

$$v_2 = 20 - 10 \times 2 = 0$$

物体的位移

$$s_2 = 20 \times 2 - \frac{1}{2} \times 10 \times 2^2 = 20 \text{m}$$

经过的路程也是 20m.

(c) 经过 3 秒物体的速度

$$v_3 = 20 - 10 \times 3 = -10 \text{m/s}$$

物体的位移

$$s_3 = 20 \times 3 - \frac{1}{2} \times 10 \times 3^2 = 15 \text{m}$$

通过的路程

$$20 + (20 - 15) = 25 \text{m}$$

10. 气球以 10m/s 的速度匀速竖直上升，从气球上掉下一个物体，经 17 秒到达地面。求物体刚脱离气球时气球的高度。

解答：物体从气球上掉下后到达地面时的位移为

$$\begin{aligned} s &= v_0 t - \frac{1}{2} g t^2 \\ &= 10 \times 17 - \frac{1}{2} \times 10 \times 17^2 \\ &= -1275 \text{m} \end{aligned}$$

所以，物体刚脱离气球时气球的高度为 1275 米。

11. 初速度为零的匀变速运动，在第 1 秒内、第 2 秒内、第 3 秒内……的位移分别是  $s_I, s_{II}, s_{III}, \dots$  试证明： $s_I, s_{II}, s_{III}, \dots$  之比等于从 1 开始的连续奇数之比，即：

$$s_I : s_{II} : s_{III} \dots = 1 : 3 : 5 \dots$$

提示：设物体在 1 秒内、2 秒内、3 秒内……发生的位移是  $s_1, s_2, s_3, \dots$ ，那么

$$s_I = s_1, s_{II} = s_2 - s_1, s_{III} = s_3 - s_2, \dots$$

解答：

$$1 \text{ 秒内位移: } s_1 = \frac{1}{2}at_1^2, \quad t_1 = 1$$

$$2 \text{ 秒内位移: } s_2 = \frac{1}{2}at_2^2 = \frac{1}{2}a(2t_1)^2$$

$$3 \text{ 秒内位移: } s_3 = \frac{1}{2}at_3^2 = \frac{1}{2}a(3t_1)^2$$

$$\vdots \quad \vdots$$

$$\text{第 1 秒内位移: } s_I = s_1 = \frac{1}{2}at_1^2 = 1 \left( \frac{1}{2}at_1^2 \right)$$

$$\text{第 2 秒内位移: } s_{II} = s_2 - s_1 = \frac{1}{2}a[(2t_1)^2 - t_1^2] = 3 \left( \frac{1}{2}at_1^2 \right)$$

$$\text{第 3 秒内位移: } s_{III} = s_3 - s_2 = \frac{1}{2}a[(3t_1)^2 - (2t_1)^2] = 5 \left( \frac{1}{2}at_1^2 \right)$$

$$\vdots \quad \vdots$$

$$\therefore s_I : s_{II} : s_{III} \cdots = 1 : 3 : 5 \cdots$$

12. 从楼顶上落下一个铅球，通过 1 米高的窗子用了 0.1 秒的时间。楼顶比窗台高多少米？

解答：设从楼顶到窗台的距离为  $H$ . 铅球从下落到通过窗子上沿和窗台所用的时间为  $t_1$  和  $t_2$ , 即时速度分别为  $v_1$  和  $v_2$ .

从自由落体速度公式可得  $v_1 = gt_1$ ,  $v_2 = gt_2$ , 设窗高为  $h$  ( $= 1$  米), 铅球通过  $h$  的平均速度

$$\bar{v} = \frac{v_1 + v_2}{2} = \frac{g(t_1 + t_2)}{2}$$

从题设条件可知

$$\bar{v} = \frac{1}{0.1} = 10 \text{ m/s}$$

所以

$$\frac{g}{2}(t_1 + t_2) = 10 \text{ m/s}$$

$$t_1 + t_2 = \frac{10 \times 2}{g} = \frac{20}{10} = 2 \text{ s}$$

由题设条件还可知道  $t_2 - t_1 = 0.1 \text{ s}$ , 所以  $t_2 = 1.05 \text{ s}$ .

因此, 从楼顶到窗台的距离

$$H = \frac{1}{2}gt^2 = \frac{1}{2} \times 10 \times 1.05^2 = 5.5 \text{ m}$$

## 第五节 参考资料

### 一、伽利略的比萨斜塔实验

许多著作记述了伽利略曾经做过比萨斜塔实验.

比萨是位于意大利半岛北部地区的一座古城。在流过这座古城的阿诺河畔矗立着高 56 米的比萨斜塔。始建于 1174 年，14 世纪竣工。由于塔基问题，塔身发生了倾斜。据说，年青的伽利略为了证明自己的论断，邀请了许多人到斜塔旁观看他的实验。伽利略在塔上拿着两个质量相差很大而体积相同的硬木球和铁球，让它们同时从手中自由下落，结果两个球同时触地。于是，两千年人们一直信奉的亚里士多德的观点：重的物体落得快，轻的物体落得慢，终于被事实否定了，比萨斜塔实验广为流传，比萨斜塔也随着伽利略在科学上的成就而闻名于世。

但是，科学史家对伽利略是否在比萨斜塔上做过落体实验持有不同的看法。从上世纪后期一直在争论着，至今仍是悬而未决的疑案。

认为伽利略做过比萨斜塔实验的根据是维维安尼所写的《伽利略传》（1654 年出版）。维维安尼是和伽利略晚年一起生活的学生，他手中有伽利略的许多笔记和书信。另外，在伽利略的著作中几处都提到由高塔上坠落重物的事。因此，有人推测伽利略有可能做过比萨斜塔实验。

认为伽利略没有做过比萨斜塔实验的理由是伽利略无须通过落体实验，只要采用逻辑推理的方法就可以否定亚里士多德的观点。而且在伽利略的著作中找不到这个实验的记载。在跟维维安尼同时代的其他历史资料中也没有这个实验材料。因此，有人怀疑维维安尼有可能把别人的实验误记到伽利略的名下，如说伽利略实验用的两个球，其中一个比另一个重 10 倍，这跟比利时物理学家斯台文所做的落体实验情况相同。

这两种看法都还缺乏充分的证据。在没有发现新的历史资料的情况下，是难于统一认识的。

## 二、用逐差法求加速度值

课本练习九第 6 题已经证明：

$$\Delta s = s_2 - s_1 = s_3 - s_2 = \cdots = s_n - s_{n-1} = at^2$$

这样，在做学生实验研究匀变速直线运动的时候，是否可以根据相邻的距离之差  $\Delta s_1, \Delta s_2, \Delta s_3, \dots, \Delta s_{n-1}$ ，分别除以  $T^2$ ，再取其平均值，从而得出加速度  $a$  的值呢？下面看一下这个求解过程。

$$\begin{aligned} a &= \frac{\Delta s_1 + \Delta s_2 + \Delta s_3 + \cdots + \Delta s_{n-1}}{T^2(n-1)} \\ &= \frac{(s_2 - s_1) + (s_3 - s_2) + (s_4 - s_3) + \cdots + (s_n - s_{n-1})}{T^2(n-1)} \\ &= \frac{s_n - s_1}{T^2(n-1)} \end{aligned}$$

可以看出，中间的各数值  $s_2, s_3, \dots, s_{n-1}$  在平均过程中都已消去，不起作用，只有首尾两个数值  $s_1$  和  $s_n$  才起作用。这样，也就不能起到利用多个数据来减少偶然误差的作用。如果  $s_1$  和  $s_n$  的误差很大，则求出的  $a$  误差也就很大了。

实际处理数据是用逐差法，把连续的数据前后对半分成两组，将后一半的第一个数据与前一半的第一个数据相减，后一半的第二个数据与前一半的第二个数据相减……下面我

们看一下这个求解过程.

把  $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$  对半分为两组, 每组有  $m = n/2$  个数据, 前一半为  $s_1, s_2, \dots, s_m$ , 后一半为  $s_{m+1}, s_{m+2}, \dots, s_n$ , 相应的差值是  $\Delta s_1 = s_{m+1} - s_1, \Delta s_2 = s_{m+2} - s_2, \dots, \Delta s_m = s_n - s_m$ . 由这些差值求得的加速度值分别是:

$$a_1 = \frac{\Delta s_1}{mT^2}, \quad a_2 = \frac{\Delta s_2}{mT^2}, \dots, a_m = \frac{\Delta s_m}{mT^2}$$

因此, 取其平均值求得的加速度

$$\begin{aligned} a &= \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_m}{m} = \frac{\Delta s_1 + \Delta s_2 + \dots + \Delta s_m}{m^2 T^2} \\ &= \frac{(s_{m+1} - s_1) + (s_{m+2} - s_2) + \dots + (s_n - s_m)}{m^2 T^2} \\ &= \frac{(s_{m+1} + s_{m+2} + \dots + s_n) - (s_1 + s_2 + \dots + s_m)}{m^2 T^2} \end{aligned}$$

可以看出, 所有数据  $s_1, s_2, \dots, s_n$  都得到了利用, 因而减少了偶然误差.

### 三、物理学中的理想化方法、理想化模型和理想实验

物理学研究对象受许多因素影响, 但在一定条件下可以抓住其主要因素和本质, 将其他因素撇开, 在此基础上进行抽象概括, 把错综复杂的问题归结为比较简单的问题进行研究, 这就是物理学研究中的理想化方法, 用这种方法把研究对象简化成的抽象模型就是物理学中的理想模型. 用这种方法进行的假想实验就是理想实验.

理想化模型在物理学研究中被广泛应用, 常见的理想化模型有: 质点、刚体、弹性体、塑性体、理想气体、理想流体、弹簧振子、单摆、点电荷、试探电荷、无限长直导线、无限大平板、点磁荷、纯电阻(纯电感、纯电容)、光线、薄透镜、点光源等, 在各类物理书籍里, 有时清楚地说明所讨论的是哪一种理想模型(如点电荷、光线等)或者对实物附加某些说明(如“两球作完全弹性碰撞”等). 但在大多数场合, 都不加说明, 要我们自己判定. 不过在大多数情况下还是有一定规律可循的, 如质点力学中列举的粒子、小球、子弹、汽车、火箭、地球以至太阳, 应看作质点. 在刚体力学中提到的杠杆、飞轮、圆板、皮带轮, 都看作是刚体. 在流体力学中研究的空气和水, 看作是理想流体.

在用理想化方法处理问题时, 考虑什么因素, 舍去什么因素不是固定不变的, 随之研究对象的实际情况、研究范围和条件的变动而变动. 因此同一个物体(研究对象)可以看成不同的理想模型, 从而也会得出不同的结论. 例如一个物体在不同情况下可分别视为质点、刚体或弹性体. 我们求一根搁在墙角上的均匀铁棒里的应力时, 必须先把铁棒看成是一个质量集中于重心  $O$  的质点, 求出重力, 然后把铁棒看成刚体, 利用力的平衡条件求出各个未知力, 再把铁棒看成弹性体, 用材料力学的方法求出应力. 假如不这样逐步选取不同的理想模型, 这个问题是解不出的.

理想实验在物理学发展中具有极其重要的地位和意义. 这是因为日常的具体事物虽然直观, 但各种现象、因素、过程交织在一起, 往往掩盖事物本质的一面. 运用理想实验进行研究所揭示的特性和规律, 只能以抽象的形式出现, 虽然它与具体现象远了, 但离真理近了. 普朗克曾说过“物理世界观之愈益远离感性世界, 无非就是与现实世界愈益接近”.

例如经典物理的鼻祖伽利略就是通过理想斜面实验揭示了惯性定律的物理本质（课本图3.1）。而爱因斯坦提出狭义相对论的基础，同时性的相对性就是通过理想实验形象地加以说明的，此外海森堡提出的“测不准原理”也运用了理想化实验。

# 第三章 运动定律

---

<b>第一节 教学要求</b> . . . . .	<b>66</b>
<b>第二节 教学建议</b> . . . . .	<b>67</b>
一、第一单元 . . . . .	67
(一)力不是维持运动的原因 . . . . .	67
(二)惯性和牛顿第一定律 . . . . .	68
(三)牛顿第一定律描述的是一种理想化的状态 . . . . .	68
二、第二单元 . . . . .	68
(一)物体运动状态的改变 . . . . .	68
(二)牛顿第二定律 . . . . .	68
(三)力、加速度、速度以及速度改变的关系 . . . . .	69
(四)关于质量和重量的区别与联系 . . . . .	70
三、第三单元 . . . . .	70
(一)牛顿运动定律的应用 . . . . .	70
(二)物体受力分析 . . . . .	70
(三)超重和失重 . . . . .	71
(四)牛顿运动定律的适用范围 . . . . .	72
<b>第三节 实验指导</b> . . . . .	<b>72</b>
一、演示实验 . . . . .	72
(一)阻力是使物体运动变慢的原因 . . . . .	72
(二)用气垫导轨观察骑块的运动 . . . . .	72
(三)惯性现象 . . . . .	73
(四)物体运动状态的改需要力的作用 . . . . .	73
(五)加速度和力的关系以及加速度和质量的关系 . . . . .	74
(六)牛顿第二定律的应用 . . . . .	74
(七)超重和失重现象 . . . . .	74
二、学生实验 . . . . .	75
(一)研究加速度和力的关系 . . . . .	75
(二)研究加速度和质量的关系 . . . . .	75
<b>第四节 习题解答</b> . . . . .	<b>76</b>
一、练习一 . . . . .	76
二、练习二 . . . . .	76
三、练习三 . . . . .	77
四、练习四 . . . . .	77

五、练习五 . . . . .	79
六、练习六 . . . . .	80
七、练习七 . . . . .	81
八、练习八 . . . . .	83
九、练习九 . . . . .	84
十、习题 . . . . .	86
<b>第五节 参考资料 . . . . .</b>	<b>92</b>
一、研究加速度和力以及质量关系的实验中的误差分析 . . . . .	92
二、惯性质量和引力质量 . . . . .	93
三、狭义相对论和经典力学 . . . . .	94

---

## 第一节 教学要求

这一章学习动力学，讨论运动和力的关系。牛顿运动定律是动力学的基础，这一章学习的中心内容就是牛顿运动定律。

这一章的教学要求是：

1. 掌握牛顿第一定律，明确力、惯性等概念的物理意义。
2. 正确理解和掌握牛顿第二定律；掌握力学单位制；了解超重和失重。
3. 会运用运动学公式、力的合成和分解以及牛顿运动定律分析解决综合性问题。

下面对这一章的教学内容作些具体说明。

运动和力的关系问题是动力学的基本问题，要建立正确的认识又是颇不容易的，学生从日常经验出发，往往产生错误认识，有的认识同历史上前人产生过的错误有类似之处。在讲述牛顿第一定律之前，介绍人类对这个问题的认识过程，可以帮助学生理解和掌握运动和力的关系。课本里介绍了伽利略的理想实验，使学生知道伽利略是怎样得出正确结论的，并了解在实验事实的基础上进行科学思维的研究方法，以培养他们的思维能力。

为了使教学从牛顿第一定律比较自然地过渡到牛顿第二定律，在讲过牛顿第一定律之后，用一节教材讲述怎样使物体的运动状态发生改变。这里，把力和运动联系起来，指出力是使物体产生加速度的原因，加深学生对力这个概念的理解。这一节，还讲述了质量与运动状态改变的关系，明确质量在动力学中的意义，从而为讲述牛顿第二定律做好准备。

牛顿第二定律是这一章的重点内容。采用在教师指导下由学生自己动手做实验，最后得出结论的做法来讲述牛顿第二定律，可以调动学生的学习积极性和主动性，培养学生通过实验研究问题的能力，并使学生对牛顿第二定律有深刻的印象。

在讲述加速度和力的关系时，不可忽略它们的方向总是一致的，这对后面研究曲线运动很重要。

以后学习匀速圆周运动、简谐振动等部分时，要学到变力和变加速度的概念。有必要指出牛顿第二定律不仅适用于恒力作用下的运动，而且适用于变力作用下的运动；外力随时间改变时，加速度也随时间改变。但不要求讲述即时加速度这个概念。

讲述力的独立作用原理，可以使学生进一步掌握在有几个力作用时如何应用牛顿第二定律。这里，要紧的是懂得加速度的大小和方向是由合外力决定的。

牛顿第二定律的应用有两个方面：一是已知物体的受力情况，确定物体的运动情况；二是已知物体的运动情况，确定物体的受力情况。利用动力学知识，知道了力和加速度，也可以确定物体的质量。习题中带解的题目，可以使学生对用动力学方法确定质量有所了解。

在演示实验的基础上讲述超重和失重时，涉及到弹簧秤和被测物体组成的一个连接体。这里，只要明确研究对象是被测物体，分析这个物体的受力情况，列出方程，再应用牛顿第三定律，问题也就解决了。在这里既不必分别列出弹簧秤和被测物体的动力学方程，更不要系统地讲解连解体问题。通过超重和失重这一节的学习，还应使学生知道，某些动力学问题常常需要综合运用牛顿第二定律和牛顿第三定律才能解决。

关于牛顿运动定律的适用范围，应要求学生有初步的了解。限于学生的水平，这个问题不可能作深入的讨论，对于刚体、相对论、量子力学等名词，可以只稍加说明，也不要求学生记住这些名词。

这一章的练习和习题是按照循序渐进的原则，由浅入深，由易到难来安排的。具体的安排是：在得出  $a \propto F$  和  $a \propto \frac{1}{m}$  两个公式后，安排了仅限于应用上述正比、反比关系的题目；在得出牛顿第二定律的公式  $F_{合} = ma$  之后，安排了由几个力的作用使物体产生加速度的题目；在“力学单位制”一节后面，安排了物体受一个力作用时用动力学和运动学的知识求解的题目；在讲完全章内容后，安排了在多个力作用下用动力学和运动学知识求解的较复杂的综合性题目。

## 第二节 教学建议

这一章可分三个单元进行教学。第一单元包括引言和第一节《牛顿第一定律》；第二单元从第二节《物体运动状态的改变》到第七节《力学单位制》；第三单元从第八节《牛顿运动定律的应用（一）》到第十一节《牛顿运动定律的适用范围》。

### 一、第一单元

在这一单元的教学中，首先可以指导学生认真阅读“历史的回顾”这段课文，认识牛顿第一定律是怎样在伽利略理想实验的基础上总结出来的。

#### （一）力不是维持运动的原因

这一内容的教学，可以从学生的生活经验提出所要研究的问题。譬如为了使足球不致停下来，运动员带球前进时必须不断用脚轻轻地拨动球；又如为了自行车不致减慢速度，总要不断地用力蹬脚踏板。让学生带着这些问题来阅读“历史的回顾”这一段课文，然后演示教材上图 3.1 的斜面对接实验（可用粗铁丝弯制成导轨来代替对接的斜面）。在演示图 3.1 丙的实验时，也可以使一辆小车从斜面的一定高度上下滑后，在水平面上运动，让学生观察在阻力比较大的水平面上，小车速度减慢得比较快，在阻力不很大的平面上，小车速度减慢得比较慢，从而认识小车在平面上运动所以会减慢速度，恰是由于阻力的作用，阻力的大小不同使小车速度变慢的快慢程度也不同。同样，足球在草地上滚动速度所以会变慢，不用力蹬脚踏板自行车所以会减慢速度，也说明有阻力的作用，因此力不是维持运

动的原因，而是改变物体运动状态的原因。

讲清这个问题，还可以使学生体会到生活经验的直观感觉不一定都是正确的，要学会用科学的思想方法去分析现象，掌握事物发展变化的规律。

在教学中要引导学生认识伽利略的理想实验是以可靠事实为基础的科学推论。可引导学生思考，刚才所做的演示实验中如果水平面是光滑的，那么小车在水平面上运动时，它的运动状态是否还会发生变化呢？小车将做什么运动？接着可以进一步演示，使小车从斜面上滑下后在一块玻璃板上运动，可以观察到小车运动的速度几乎没有变化，以加深对伽利略理想实验的事实依据的认识。

### **(二) 惯性和牛顿第一定律**

要引导学生对惯性的概念有正确的理解。有的学生认为只有运动的物体才具有惯性；也有的学生认为只有静止的物体才具有惯性，这些看法都是不正确的。要使他们认识惯性是物体的固有属性，它和物体的运动状态无关；但在力的作用下，物体运动状态改变的快慢程度却与惯性有着直接的关系（牛顿第二定律所要研究的内容）。而牛顿第一定律则阐明了物体的匀速直线运动状态或静止状态都不需要力来维持，外力的作用只是改变物体的运动状态，并不能改变物体的惯性。

### **(三) 牛顿第一定律描述的是一种理想化的状态**

不受外力作用的物体是不存在的。要使学生认识，即使前面所做的演示实验中，当小车在光滑的水平面上运动时，不受任何阻力，小车做匀速直线运动，仍然不属于牛顿第一定律所描述的理想化状态。因为小车在水平面上运动时还受到重力和水平面的支持力的作用，只是在水平方向上不受力，所以小车在水平方向上的运动状态并不发生改变，牛顿第一定律所描述的是一种理想化的状态，不同于可以用实验直接验证的牛顿第二定律。

## **二、第二单元**

这一单元以讲解牛顿第二定律为中心，是本章的重点。

### **(一) 物体运动状态的改变**

教学中应该让学生认识，物体的运动状态决定于物体的速度，根据牛顿第一定律可知，物体运动状态发生改变，必定是外力作用的结果，为了帮助学生加深理解，可以举这样的例子：要使静止在粗糙水平面上的物体开始运动，必须有外力的作用，而且这个外力必须等于、大于物体与水平面间的最大静摩擦力，物体才能改变它的运动状态，从静止开始运动；接着，如果将所加的外力撤去，则物体只受到跟运动方向相反的滑动摩擦力的作用，所以立即又改变它的运动状态，使运动速度逐渐减小直到停止运动。

### **(二) 牛顿第二定律**

为了加深对这一重要定律的理解，培养学生用实验手段研究问题的能力，教材安排先由学生进行实验，再由实验结果得出牛顿第二定律，在这个基础上，应使学生认识以下几点：

1. 力是使物体产生加速度的原因. 加速度和力存在着这样的关系: 有力作用就有加速度产生, 恒定的力产生恒定的加速度, 力发生变化, 加速度随即发生相应的变化, 力停止作用, 加速度立即等于零, 而且不论在哪种情况下, 加速度和产生它的力的方向始终是一致的.
2. 物体运动的加速度不仅决定于外力, 还同时跟物体的质量有关, 在这里, 质量的大小对运动状态改变的快慢程度起了一种制约作用, 所以说质量是物体惯性大小的量度.
3. 把牛顿第二定律的实验结论  $a \propto \frac{F}{m}$  改写成等式  $F = kma$  时, 式中的比例常数  $k$  的取值跟式中其他物理量所用的单位有关. 在国际单位制中, 质量  $m$  的单位是 kg, 加速度  $a$  的单位是  $\text{m/s}^2$ , 力  $F$  的单位是 N, 于是:

$$k = \frac{F}{ma} = \frac{1\text{N}}{1\text{kg} \times 1\text{m/s}^2} = 1$$

这样, 就可以使牛顿第二定律的公式简化为

$$F = ma$$

因此在应用牛顿第二定律公式解题时, 必须使  $m$ 、 $a$ 、 $F$  三个量都选用国际单位制单位.

4. 力的独立作用原理进一步阐明了加速度对力的依存关系. 不论物体是否还受有其他力的作用, 也不论物体的初始运动状态如何, 一个力总是独立地使物体产生一个加速度. 譬如在落体运动或抛体运动中, 不论是否存在空气阻力, 重力产生的加速度总是等于  $g$ . 也正因为这样, 才能应用力的矢量合成法则, 把牛顿第二定律推广为  $F_{\text{合}} = ma$ , 力的独立作用原理也为以后学习运动合成、波的叠加等知识准备了基础.

### (三) 力、加速度、速度以及速度改变的关系

加速度和力有着直接的关系, 但是物体运动的速度跟力并没有直接的关系. 学生常有如下的错误看法:

1. 认为作用力大, 则速度一定大, 作用力小, 速度就不可能大;
2. 认为作用力如果减小, 则物体的速度也将逐渐减小.

这两种错误都要进行纠正. 作用力大产生的加速度大, 速度是否大还要取决于初速度和加速的时间. 这可以匀变速直线运动为例来加以说明: 即使加速度  $a = F/m$  很大, 但初速度  $v_0$  和加速时间  $t$  如果很小, 则  $v_t = v_0 + at$  也不会很大; 另一种情况,  $a = F/m$  并不大, 但只要初速度  $v_0$  或加速的时间  $t$  很大, 则  $v_t$  也不一定小. 后一种错误看法可以结合课本练习四第 3 题进行讨论, 指出: 只要力  $F$  的方向和物体的初速度方向相同, 即使力  $F$  在逐渐减小, 产生的加速度  $a$  也逐渐减小, 但是, 物体的速度还是增的, 只是每隔单位时间增加的速度  $\Delta v$  在逐渐减小; 直到当  $F = 0, a = 0$  时, 物体的速度就不再增大, 物体将以做变速运动时最大的末速度为速度做匀速直线运动. 关于这道题目还可用一个比喻来加以说明: 如果往银行存钱, 每个月存入的钱数在逐渐减少, 但存款数还是在增加的.

#### (四) 关于质量和重量的区别与联系

在物理学的传统讲法中，质量和重量是两个不同的概念，质量就其本身的含义来说，就是组成物体的物质多少；从动力学的观点来看，是物体惯性大小的量度。质量是标量，物体的重量则是指物体所受到的地球的重力，是矢量。

课文中先后出现的两个式子  $G = mg$  和  $\frac{G_1}{G_2} = \frac{m_1}{m_2}$  表明了质量和重量的联系。教学时对这两个式子的意义可掌握以下的分寸：

1.  $G = mg$  这一关系式，在初中把比值  $g$  作为一个比例常数， $g = 9.8\text{N/kg}$ 。它的意义是质量为 1 千克的物体的重量是 9.8 牛顿。而高中课本则是从牛顿第二定律  $F = ma$  推导得出的，这是指物体在重力作用下运动时，重力产生的加速度为  $g$ ，物体的质量为  $m$ ，则物体所受的重力  $G = mg$ 。两处对  $G = mg$  的讲法，着眼点不同，但含义是一致的。
2.  $\frac{G_1}{G_2} = \frac{m_1}{m_2}$  一式所表明的意义是在地球上同一地点，物体的重量正比于物体的质量。这就是说，在地球上同一地点，一切自由落体的加速度  $g$  都相等，在重力作用下， $g$  的大小和方向都是确定的。即比值  $g = G/m$  是与物体的质量  $m$  无关的一个量。
3. 由于现在已经规定重量作为质量的同意词，不再用来表示物体所受的重力。因此，今后中学物理教学中如何处理有关重量的问题，尚须进一步研究。

### 三、第三单元

这一单元主要是综合应用牛顿运动定律和运动学的知识来解决一些实际问题，并了解什么是超重和失重现象，解牛顿定律的适用范围。

#### (一) 牛顿运动定律的应用

教材的安排是先通过应用（一）讨论从物体的受力情况确定物体的运动情况；再通过应用（二）从物体的运动情况确定物体的受力情况，要引导学生认识在分析实际问题时，这两个方面常常是结合使用的，而对运动物体受力情况的分析则是解决任何力学问题的基本出发点。

#### (二) 物体受力分析

在对物体进行受力分析时，要让学生注意首先应明确研究的对象，考察研究对象和周围哪些物体有联系，并要结合物体的运动状态来分析。这是分析物体受力情况时的一条基本思路，譬如在分析课本 126 页例题 2 时，应向学生指出：题目是要求线对小球的拉力，因此小球应是研究的对象；跟小球发生联系只有地球和悬线两个物体，也就是小球只受到重力和悬线拉力这两个力的作用。既然小球跟随小车一起做匀变速运动，则小球所受的合力必然不等于零，而且小球运动的加速度必定是由重力和悬线的拉力的合力所产生，又由于小球是沿着水平方向做匀变速直线运动，所以这一合力也必定是沿着水平方向。于是就可以按课本图 3.11 所示进行力的合成。由于合力所产生的加速度已由题目给出，所以就可计算出悬线对小球的拉力。

### (三) 超重和失重

在讲解超重和失重现象时，可以让全体学生利用弹簧秤做课本图 3.12 的实验（弹簧秤可用量程为 250 克力或 400 克力的，物体可用 100 克或 200 克的钩码）。

在弹簧秤静止的情况下，观察指示器所指的读数就等于钩码的重量。使弹簧秤急剧上升，就可以看到弹簧秤指示器所指的读数突然增大，但随即又减小了，要指导学生观察开始上升时弹簧秤读数增大这一变化。为了看清楚这一点，可以让学生在弹簧秤挂了钩码静止的情况下，用一小块纸片卡在弹簧秤指示器的下面，当弹簧秤加速上升时，指示器下降将会把纸片推到下面读数较大的位置上。这样，当弹簧秤静止时就可以看出弹簧秤读数曾经增大到多大了。

同样，在观察物体的失重现象时，应指导学生观察当弹簧秤突然加速下降时读数减小的现象。为了观察读数曾经减小到什么程度，也可用一小纸片卡在弹簧秤指示器的上端，用以记录失重时的读数。

在分析超重和失重现象时，应指出：

- 挂在弹簧秤下的砝码只受重力和弹簧拉力的作用，当钩码在竖直方向上做变速运动时，重力和拉力的合力不可能等于零。这一合力就是使钩码产生加速度的力。在钩码向上做加速运动或向下做减速运动时，所需的合力方向都是向上的，而重力的方向是竖直向下的，因此只有依靠弹簧秤的拉力大于重力，才能使得合力方向向上。这样，弹簧秤的读数就会大于钩码的重量，这就是产生超重现象的原因，而当钩码向下做加速运动或者向上做减速运动时，所需的合力的方向向下，跟物体重力方向一致，因此重力中的一部分就用来产生向下的加速度。由于重力“用掉”一部分，因此钩码作用于弹簧秤的力将减小，即弹簧秤的读数将减小，这就是产生失重现象的原因。
- 如果物体向下做加速运动的加速度等于  $g$ ，则物体的重力将全部用来产生加速度，这样就没有多余的力作用于弹簧秤，弹簧秤的读数应等于零。

可以由教师做一演示，将挂有重物（钩码）的弹簧秤用线悬在高处，在弹簧秤的指示器上贴一小块白胶布以便于观察，这时弹簧秤的读数等于重物的重量。当用火柴烧断悬线后，重物和弹簧秤一起自由下落，在这过程中可以观察到弹簧秤的读数立即减小到零（演示时在落地处准备好一个网兜以承接弹簧秤使之不会摔坏）。指出这是完全失重的现象。

- 要使学生明确，不论超重还是失重现象，物体所受到的重力是没有变化的，只是在物体静止时，支撑这个物体的另一物体（如桌面、悬线等）发生形变，产生了弹力作用于物体，使物体保持平衡。当物体加速下降时，由于重力中的一部分用来产生向下的加速度，物体需要的支持力变小了。相反，物体加速上升时，物体所受的重力虽然也没有变化，但重力并不能产生向上的加速度，因此支持物提供的弹力除了克服物体的重力外还要包括使物体产生向上加速度所需的力，因而支持物的弹力将增大，所以通常用弹簧秤（测力计）来测量物体的重量时，必须使物体处于静止状态，避免失重或超重的影响。

#### (四) 牛顿运动定律的适用范围

只需简单地向学生介绍，牛顿定律只适用于解决低速运动问题，而不能适用于研究高速运动，对于微观粒子的运动，一般说来，牛顿力学也是不适用的。可指出所谓高速是指粒子的速率已高达可与光速相比拟的程度。关于爱因斯坦狭义相对论的时空观，只需大致地根据课本所叙述的内容进行介绍，不必作深入的讲解。这节教材的意图在于一方面扩大学生的知识面，更重要的是使学生认识到任何规律都有它的适用范围。

### 第三节 实验指导

#### 一、演示实验

##### (一) 阻力是使物体运动变慢的原因

小车自斜面滑下后在水平面上运动的演示实验，可用宽约 12—15 厘米、带有挡边（高约 0.8—1.0 厘米）的两段木板，分别作为斜面和水平面拼接起来，作为斜面的木板长约 60 厘米，作为水平面的木板长约 120 厘米。在水平长木板的一端装一个用扁铁作边框的网兜，如图 3.1 所示。长木板平面上贴上塑料装饰板，在上面平铺一层软棉布（灯芯绒或绒布），棉布上面再铺放两层毛巾布，以增大阻力。将作为斜面的木板的一端用木块垫起，倾角 5° 左右。要注意斜面跟长木板平面的拼接处要尽可能吻合。

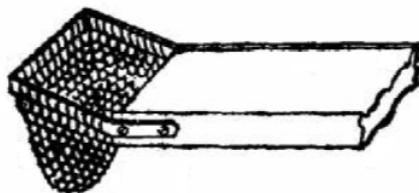


图 3.1

实验时将小车放在斜面顶端由静止开始释放。小车到达铺有毛巾布的平面上后，运动 30 厘米左右即停下来；然后把两层毛巾布取下（注意用薄木片调节拼接处的高度使之吻合），再把小车放在斜面顶端由静止开始释放，小车在铺有软棉布的平面上运动的距离将增大到 60 厘米左右。如果把棉布取下，小车在斜面的同一高度滑下后，可以沿着塑料平面一直运动下去直到落入网兜里。

##### (二) 用气垫导轨观察骑块的运动

使用前必须将导轨调节水平（沿导轨方向和垂直于导轨方向都应用水平仪进行调节）。用软布擦去骑块内侧以及导轨表面的浮灰。然后接通气泵，如发现气孔有堵塞现象，可用细铜丝（从多芯软导线中抽出一根使用，不要用钢丝，因为钢丝太硬会使气孔边缘卷口起毛，增大骑块运动时的阻力）通一下，务必使每个气孔保持畅通。

实验时应先开动气泵，待正常供气后，再将骑块放上导轨，轻轻推动一下，便可观察到骑块的运动很接近于匀速直线运动。应强调指出，所要观察和研究的是骑块已经开始运动以后的一段过程，由于摩擦阻力很小可以忽略，重力和气垫的托力相互平衡，合力为

零，因此骑块的匀速直线运动状态并不发生改变，当骑块到达导轨一端被弹簧片弹回反向运动时，可指出这时由于受到外力作用，迫使骑块改变了运动方向（也就是改变了运动状态），但在反向运动的过程中，由于骑块所受合力为零，骑块的匀速直线运动状态仍不发生改变。

### (三) 惯性现象

如图 3.2 所示，将小车（质量约为 200 克）用细线通过定滑轮和一质量较大的钩码（譬如 30 克）相连，用手挡住小车，不使它运动，将一木块（体积约为  $3 \times 6 \times 10\text{cm}^3$ ）竖起来放在车上。释放后，小车突然做加速运动，木块由于惯性将向后面倾倒。

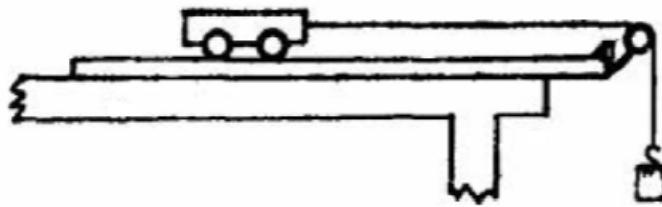


图 3.2

利用同一装置继续演示，开始时用手扶住木块同时施加适当的阻力使小车的加速度不至太大。待小车和木块一起运动后再完全放手，这时木块和小车将保持相对静止，当小车运动到平面一端受阻突然停止运动时，木块由于惯性将向前倾倒。

### (四) 物体运动状态的改变需要力的作用

物体速度大小的改变。将一辆小车放在水平的玻璃板上，使小车从静止到运动需要用手推，这就是要有力的作用（图 3.3）；在小车已经具有速度的情况下，要使它停止运动，需要用手来挡，这也就是要有力的作用，如图 3.4。

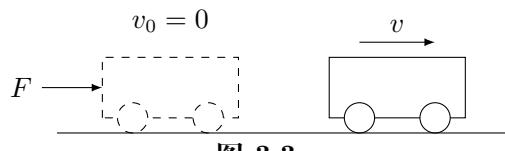


图 3.3

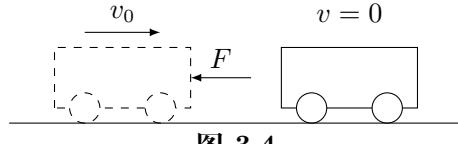


图 3.4

物体速度方向的改变。将一瓷球（白色的、半径较大，可见度较大，或者用灌水的乒乓球）系在细线一端，另一端有一金属小杯，把环套在竖直方向的固定轴上，给瓷球一个垂直于拉线方向的速度，球就在水平面上沿着一个以线长为半径的圆周运动，如图 3.5 所示（水平面可以用涂塑装饰板做）。如果水平面的阻力很小，可以认为瓷球的速率不变，但

是从拉线被绷紧的现象可以想象，线对瓷球有拉力的作用，才使瓷球的运动方向时刻发生改变。

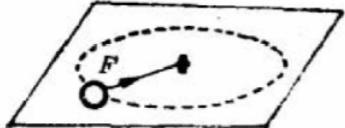


图 3.5

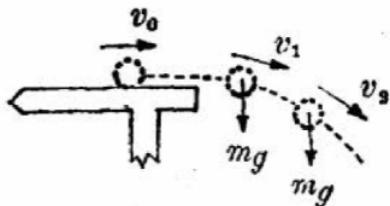


图 3.6

物体的速度大小和方向都发生改变，如图 3.6 所示，使一乒乓球沿着桌面以某一速度运动，当乒乓球离开桌子后将沿一曲线下落。可以这样设想：乒乓球离开桌子后，如果没有重力的作用，仍将沿着原来的水平方向作匀速直线运动。正是由于下落过程中只受到重力的作用，乒乓球的速度大小和方向才都发生了改变。

### (五) 加速度和力的关系以及加速度和质量的关系

(演示方法见学生实验 8 和 9)

### (六) 牛顿第二定律的应用

为结合课本 126 页例题 2 的讲解可以做如下的演示：用手提着一个挂在细绳一端的质量较大的单摆球，当球静止时，细绳在竖直方向，当提着小球突然向右侧加速跑动时，即可看到悬挂小球的线向左偏斜的现象。

### (七) 超重和失重现象

可按课本图 3.12 所示的情况进行演示，为了能把超重和失重的最大读数固定下来，可以剪两小块厚纸（如用包装牙膏等软管用纸盒），形状如图 3.7 所示。两侧狭缝的宽度相当于弹簧秤刻度板的厚度，当弹簧秤挂着 100 克钩码时，把纸片卡在弹簧秤指示器的下方和上方。卡入纸片时，先将纸片顺着刻度板中部的隙缝嵌入，然后再扭转 90°，并使它紧靠着指示器。当把弹簧秤迅速上提或迅速下降时，指示器就会把纸片推向下方或上方，并停留在那里，这样就可以看出超重和失重的最大读数。



图 3.7

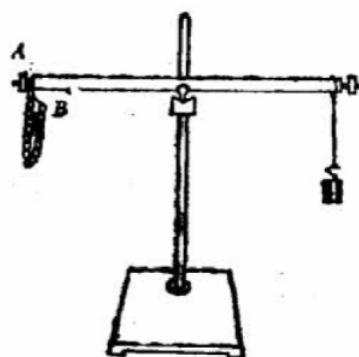


图 3.8

如图 3.8 所示，将一杠杆支放在铁架台上，在杠杆左端悬挂一根细链条，使链条的一

端  $A$  固定在杠杆上，另一端  $B$  用细线系在链条  $A$  端的一个环上，在杠杆右端挂一砝码使杠杆平衡。点燃火柴烧断系住链条  $B$  端的细线，使这一半链条下落。这时可观察到杠杆左端向上倾斜，说明杠杆左侧的一半链条下落时发生了失重现象。这是因为当这一半链条下落时，它所受的重力已用于产生向下运动的加速度，作用于杠杆上的力减小了，因此杠杆失去了平衡，但当这一半链条下落到被上一半链条拉住时，则杠杆又会恢复平衡。

## 二、学生实验

### (一) 研究加速度和力的关系

实验时要注意以下几个问题：

实验前要消除摩擦阻力的影响，将长木板不带定滑轮的一端下面垫放一木块，使木板倾斜（约  $5^\circ$  左右），将小车放在木板上，先不要拴上砂桶。在小车后面固定一条纸带，并让它穿过打点计时器的两个限位孔，将小车释放后，它可能仍保持静止，也可能沿长木板加速下滑。适当改变木块的垫放位置（即改变木板的倾斜程度），直到推动一下小车后，小车基本上能匀速下滑（纸带上打出的点子的间隔基本上是均匀的）。这时摩擦阻力和小车的重力沿斜面方向的分力相平衡，消除了摩擦的影响。

砂桶和砂的质量只有远小于小车质量 ( $m \ll M$ ) 的条件下，才可以认为它的重量 ( $mg$ ) 等于对小车的拉力（还要注意调节定滑轮的位置使得拉绳平行于斜面），一般实验用的小车质量约为 200 克，因此砂和砂桶的总质量以不超过 20 克为宜。如果砂桶和砂的质量太大将会产生明显误差（系统误差）。这个问题不要在实验时讨论，以免分散学生的注意力，可以在总结出牛顿第二定律以后再安排讨论。

这个实验中，拉力所用的单位，可以用弹簧秤直接测量砂桶和砂的重量，然后读取用牛顿做单位的读数。

每次改变拉力，打出的纸带都要进行编号，并标明所用拉力的大小，以免在处理数据时发生张冠李戴的混乱情况。

在指导写实验报告时，应要求学生把每次改变拉力时的记录纸带，作为原始资料附在实验报告中。并要写出自己设计的能够反映数据处理过程的表格，以及与之相应的、画在坐标纸上的  $a$ - $F$  图象。实验报告还应包括明确的实验结论。在最后部分还可根据课本练习二第 2 题的要求，利用实验数据来求出每次实验中，加速度  $a$  和拉力  $F$  的比值，看看它们是否大致相等，可启发学生思考这一比值跟  $a$ - $F$  图象中直线的斜率有怎样的关系？

### (二) 研究加速度和质量的关系

这个实验的注意事项和编写实验报告的要求和实验（一）相同。此外还应注意，在改变物体质量时，变化范围可适当放大一些，如可分别增加 50 克、100 克、150 克、200 克、250 克砝码。

实验后可引导学生讨论课本练习三第 2、3 题。

## 第四节 习题解答

### 一、练习一

1. 一个球以 20cm/s 的速度运动着，而且没有受到力的作用，5 秒后它的速度将是多大？

**解答：**运动着的球没有受到力的作用，它将保持匀速直线运动状态，所以 5 秒后仍以 20cm/s 的速度沿着原来运动的方向做匀速直线运动。

2. 在行驶的火车里的水平桌面上放着一个小球，当小球突然相对于车厢发生向前运动或者向后运动时，火车的运动状态分别发生了怎样的改变？

**解答：**当小球突然相对于车厢发生向前运动时，说明火车突然制动做减速运动；当小球突然相对于车厢发生向后运动时，说明火车突然加速做加速运动。

3. 地球从西向东转，为什么我们向上跳起来以后还落到原地，而不落到原地的西边？

**解答：**因为我们站在地面时具有和地面相同的自转速度，当我们向上跳起时，由于惯性，在水平方向上仍要保持原来的速度前进，因此落下时仍落在原地而不会落到原地的西边。

4. 分别举出几个利用惯性和防止惯性的不利影响的例子。

**解答：**这类例子很多。锤头和木柄间有些松动，可以把锤子竖起来使锤柄朝下，在固定物体上撞击几下，锤柄因撞击受阻而突然停止运动，锤头由于惯性要继续向下运动，结果锤头和柄就套紧了。这是利用惯性的例子。为了行车安全，规定了城市里各种车辆的最高行驶速度，这是为了在紧急制动时防止由于惯性而造成事故，这是防止惯性的不利影响的例子。

### 二、练习二

1. 根据你的记录纸带，量出有关数值，计算出每次实验的加速度，列出表格，作出  $a - F$  图象。

**解答：**说明：本题应根据每个人的实验结果，处理数据，填写表格，作出图象。

2. 利用你自己的数据算出每次实验中  $a$  和  $F$  的比值，看看这些比值是否大致相同？利用这种办法来研究  $a$  和  $F$  的关系，比起用图象来研究，哪种办法方便？

**解答：**说明：根据每次实验中  $a$  和  $F$  的对应数据计算出来的  $a$  和  $F$  的比值，大致是相同的。用这种办法虽然也可以得出加速度  $a$  和力  $F$  成正比关系的结论，但是要进行多次计算。而用画  $a - F$  图象的方法，可以看出各个点基本上分布在同一条通过坐标轴原点的直线上，这样就可以方便地得出  $a$  和  $F$  成正比关系的结论。因此采用图象来研究比较方便。

3. 5 牛的力的作用在一个物体上，能使它产生  $2\text{m/s}^2$  的加速度，要使它产生  $5\text{m/s}^2$  的加速度，需要多少牛的力？

**解答：**对于一个确定的物体来说，加速度和力成正比。

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{F_1}{F_2}$$

所以：

$$F_2 = \frac{F_1 a_2}{a_1} = \frac{5 \times 5}{2} = 12.5\text{N}$$

### 三、练习三

- 根据你的记录纸带，量出有关数值，计算出每次实验的加速度，列出表格，作出  $a-1/m$  图象。

**解答：**说明：本题应根据每个人的实验结果，处理数据，填写表格，作出图象。

- 利用你自己的数据算出每次实验中  $m$  和  $a$  的乘积，看看乘积的数值是否大致相同？你由此能得出什么结论？利用这种办法来研究  $a$  和  $m$  的关系，比起用图象来研究，哪种办法方便？

**解答：**说明：根据每次实验中  $m$  和  $a$  的乘积，可以看出它们的数值大致是相同的。这说明了在相同的力作用下，小车的加速度  $a$  和小车的质量  $m$  成反比。利用这种办法来研究  $a$  和  $m$  的关系要进行多次计算，用图象法研究，也要多次计算  $1/m$  的数值，但画出  $a-1/m$  图象后，可以直观地看出各个点基本上分布在同一条通过坐标轴原点的直线上，说明  $a$  和  $1/m$  成正比，从而得出  $a$  和  $m$  成反比关系的结论。

因此在研究加速度和质量的关系时，这两种处理数据的方法对比起来，用图象法并不显得很方便，但是作为一种数据处理方法还是应该学习的。

- 你已经用图象研究了  $a$  和  $F$ 、 $a$  和  $m$  的关系，谈谈用图象处理实验数据的好处。

**解答：**利用图象比较直观，能为我们寻求物理量之间的定量关系提供线索，譬如  $a-F$  图象是一条直线，这就直观地说明了  $a$  和  $F$  成正比关系。 $a-1/m$  图象也是一条直线，说明了  $a$  和  $1/m$  成正比即  $a$  和  $m$  成反比关系。

此外，图象法的优点还在于对测量数据的取舍比较方便。譬如在画  $a-F$  图线时，有些点并不在直线上，但只要直线能通过大多数的点，就可以得出  $a$  和  $F$  成正比的结论。而如果要计算每一次实验中  $a$  和  $F$  的比值，有的比值可能跟真实值相差较大，这样求得的平均比值的误差就会偏大。

- 一辆卡车在空载时质量是  $3.5 \times 10^3$  千克，载货时的质量是  $6.0 \times 10^3$  千克用同样大小的牵引力，如果空载时使卡车产生  $1.5\text{m/s}^2$  的加速度，载货时产生多大的加速度？（不考虑阻力）

**解答：**在不考虑阻力的情况下，对卡车的牵引力就是使卡车产生加速度的力，在同样大小的牵引力作用下，卡车的加速度跟它的质量成反比。

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}$$

所以：

$$a_2 = \frac{m_1 a_1}{m_2} = \frac{3.5 \times 10^3 \times 1.5}{6.0 \times 10^3} = 0.88\text{m/s}^2$$

### 四、练习四

- 从牛顿第二定律知道，无论怎样小的力都可以使物体产生加速度，可是我们用力提一个很重的物体时，却提不动它。这跟牛顿第二定律有无矛盾，为什么？

**解答：**没有矛盾。在用力提一个很重的物体时，没有提起来，这是因为所用的力小于物体所受的重力。用力的结果只能减小重物对支持物的压力，重物虽然受到向下的重力，向上的支持力以及手提重物时的作用力，但它所受的合力还是等于零，因此重物不会产生加速度，自然就继续保持静止状态不动。

2. 要把一个箱子在地板上从这一端推到另一端，我们在全部时间内都必须用力推它，停止用力，箱子就会停下来。马必须用力拉车，车子才前进，停止用力，车子就会停下来。亚里士多德怎样解释上述现象？根据牛顿运动定律应该怎样解释？

**解答：**亚里士多德认为，力是维持物体运动的原因。必须有力作用在物体上，物体才能运动，没有力的作用，物体就要静止下来，根据这种观点，人必须用力推箱子，箱子才能运动，停止对它用力，它就停下来；马必须用力拉车，车才能运动，停止对它用力，它就停下来。

根据牛顿运动定律，力不是维持运动的原因，而是改变物体运动状态的原因。当人的推力大于箱子和地板间的摩擦力时，箱子就会在合外力的作用下产生加速度改变原来的静止状态开始运动；当人停止用力时，箱子又会在摩擦阻力的作用下产生跟原来的运动方向相反的加速度，使它做减速运动，很快地停了下来，马拉车，车子会前进，停止用力，车子就会停下来的原因，也是如此。

3. 一个物体受到一个逐渐减小的力的作用，力的方向跟速度的方向相同，物体的速度怎样改变？

**解答：**物体的速度将逐渐增大，直到这个力减小到零为止。这是因为虽然力在逐渐减小，只是使物体产生的加速度逐渐减小，但由于力的方向跟速度的方向相同，它的速度还是不断增大的。

4. (a) 质量是 0.5 千克的物体在一个恒力的作用下得到  $0.1\text{m/s}^2$  的加速度，这个恒力是多大？  
 (b) 10 牛的力使一个物体得到  $2.0\text{m/s}^2$  的加速度，这个物体的质量是多大？  
 (c) 质量是 0.1 千克的物体，在 5 牛的恒力作用下，得到多大的加速度？

**解答：**根据牛顿第二定律

$$\begin{aligned} \text{(a)} \quad F &= ma = 0.5 \times 0.1 = 0.05\text{N} \\ \text{(b)} \quad F &= ma, \quad m = \frac{F}{a} = \frac{10}{2.0} = 5\text{kg} \\ \text{(c)} \quad F &= ma, \quad a = \frac{F}{m} = \frac{5}{0.1} = 50\text{m/s}^2 \end{aligned}$$

5. 质量是 1.0 千克的物体受到互成  $30^\circ$  角的两个力的作用，这两个力都是 10 牛，这个物体产生的加速度是多大？

**解答：**这个物体所受到的合力

$$F_{\text{合}} = 2F \cos \frac{\alpha}{2} = 2 \times 10 \times \cos 15^\circ = 2 \times 10 \times 0.966 = 19.3\text{N}$$

根据牛顿第二定律合力产生的加速度

$$a = \frac{F_{\text{合}}}{m} = \frac{19.3}{1.0} = 19.3\text{m/s}^2$$

6. 下列说法是否正确：

- (a) 物体的速度越大，表明物体所受的合外力越大.
- (b) 根据  $F_{\text{合}} = ma$ , 得到  $m = F_{\text{合}}/a$ , 所以物体的质量跟物体所受的合外力成正比.
- (c) 物体所受合外力越大，速度变化越大.

**解答：**

- (a) 不正确. 因为物体的速度大小和合外力的大小并无直接关系，合外力只决定了物体的加速度.
- (b) 不正确. 因为质量是物体惯性大小的量度，是物体固有的属性，跟物体是否受力无关.
- (c) 不一定正确. 因为速度变化  $\Delta v$  的大小不仅跟合外力产生的加速度  $a$  有关，还跟速度发生变化的时间  $\Delta t$  有关，即  $\Delta v = a\Delta t$ . 即使物体所受的合外力增大了，如果作用时间  $\Delta t$  很小，速度的变化  $\Delta v$  也不一定大.

## 五、练习五

1. 先后在广州和北京用天平来称量同一个物体，得到的结果是否相同？如果先后用弹簧秤来称量，得到的结果是否相同？说明理由.

**解答：**天平是利用杠杆（并且是等臂杠杆）平衡原理来称量物体质量的，设被测物体的质量为  $m_x$ , 砝码质量为  $m$ , 力臂为  $L$ , 当天平平衡时，应有  $m_xgL = mgL$  的关系. 消去力臂  $L$  和重力加速度  $g$ , 则  $m_x = m$ . 因此先后在广州和北京用天平来称量同一个物体，得到的结果是相同的.

而弹簧秤是根据在弹性限度内，弹簧的形变跟弹力成正比的原理制成的. 作用的力越大，则弹簧的形变量也越大，弹簧秤的示数也越大. 用弹簧秤来测量物体的重量  $G = mg$  时，由于广州的重力加速度小于北京的重力加速度，所以如果先后用弹簧秤来称量，得到的结果是不相同的，在广州称量时弹簧秤的示数要小些.

2. 一个学生认为半块砖的重力加速度是整块砖的重力加速度的两倍，因为半块砖的质量是整块砖的质量的一半. 另一个学生认为半块砖的重力加速度是整块砖的重力加速度的一半，因为半块砖的重量是整块砖的重量的一半. 他们的说法对不对？为什么？

**解答：**他们的说法都不对，这是因为半块砖整块砖的重力加速度  $g$  在同一地区是不变的. 第一个学生的错误在于认为半块砖和整块砖受到的重力是相等的；另一个学生的错误在于认为半块砖和整块砖的质量是相等的，而他们发生错误的共同原因还在于都认为重力加速度对于不同的物体可以是不同的.

3. 北京的重力加速度为  $980.1 \text{ cm/s}^2$ . 质量是 1 千克的物体在北京的重量是多少牛？

**解答：**根据重量和质量的关系，

$$G = mg = 1 \times 9.801 = 9.801 \text{ N}$$

4. 有一架仪器，质量是 3.0 千克，把它射到月球上，这架仪器的质量是否改变？它在月球上的重量是多少牛？月球表面的  $g$  取  $1.6 \text{ m/s}^2$ .

解答：

$$G_{\text{月}} = mg_{\text{月}} = 3.0 \times 1.6 = 4.8\text{N}$$

5. 仔细看看课文中重力加速度的数值表，从中你可以得到什么结论？

**解答：**重力加速度的数值随纬度的增加而增大，赤道地区的  $g$  值最小、北极地区的  $g$  值最大，但相差不很大。

6. 据说以前有个商人，从荷兰那里把 5000 吨的货物运往非洲靠近赤道的某个港口，发现货物少了 19 吨。在荷兰和非洲，都是用托盘弹簧秤来称量货物的，你根据书中所列  $g$  的数值和荷兰的地理纬度，大致估算一下货物的重量是否会差这么多。

**解答：**荷兰的地理纬度可取北纬  $55^{\circ}$ ，重力加速度的数值可取  $9.816\text{m/s}^2$ 。靠近赤道的某个港口的重力加速度可取  $9.780\text{m/s}^2$ 。

在荷兰，货物的重量为  $G = mg$ ,  $g = 9.816\text{m/s}^2$ 。

在赤道，货物的重量为  $G' = mg'$ ,  $g' = 9.780\text{m/s}^2$ 。

重量的变化

$$\Delta G = G' - G = m(g' - g) = 5000 \times 10^3 \times (9.780 - 9.816) = -0.18 \times 10^6\text{N}$$

因为质量为 1 吨的物体的重量为  $9.8 \times 10^3$  牛，所以

$$\Delta G = \frac{0.18 \times 10^6}{9.8 \times 10^3} = -18.4\text{吨力}$$

可见，题中所说货物少了 19 吨是可能的。

## 六、练习六

1. 在厘米·克·秒制中，力的单位达因是这样定义的：使质量是 1 克的物体产生  $1\text{cm/s}^2$  的加速度的力，叫做 1 达因。试证明： $1\text{N} = 10^5\text{dyn}$ 。

**解答：**力的国际制单位

$$\begin{aligned} 1\text{N} &= 1\text{kg} \times 1\text{m/s}^2 \\ &= 1000\text{g} \times 100\text{cm/s}^2 = 10^5\text{g} \cdot \text{cm/s}^2 \end{aligned}$$

在厘米·克·秒制中定义力的单位

$$1\text{dyn} = 1\text{g} \cdot 1\text{cm/s}^2 = 1\text{g} \cdot \text{cm/s}^2$$

可见  $1\text{N} = 10^5\text{g} \cdot \text{cm/s}^2 = 10^5\text{dyn}$ 。

2. 有两个力，一个是 100 达因，一个是 20 牛，哪个力大？大的是小的多少倍？

**解答：**设  $F_1 = 10^6\text{dyn} = \frac{10^6}{10^5} = 10\text{N}$ 。而  $F_2 = 20\text{N}$ ，所以  $F_2 > F_1$ ，即 20 牛的力大。

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{20}{10} = 2$$

即  $F_2$  是  $F_1$  的 2 倍。

3. 一个原来静止的物体，质量是 600 克，受到 0.2 牛的力的作用，求物体在 3.0 秒末的速度。先用国际单位制计算，再用厘米·克·秒制计算。

**解答：**

$$(a) a = \frac{F}{m} = \frac{0.2}{0.6} = \frac{1}{3} \text{ m/s}^2, \quad v = at = \frac{1}{3} \times 3.0 = 1 \text{ m/s}$$

$$(b) a = \frac{F}{m} = \frac{0.2 \times 10^5}{600} = \frac{1}{3} \times 10^2 \text{ cm/s}^2, \quad v = at = \frac{1}{3} \times 10^2 \times 3.0 = 100 \text{ cm/s}$$

4. 从炮筒射出的炮弹，质量是 10 千克，速度是  $1.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，炮弹在炮筒内运动的时间是  $4.0 \times 10^{-8}$  秒。求火药爆炸所生气体对炮弹的平均压力。

**解答：**炮弹在发射前原是静止的，假设炮弹在火药爆炸所生气体的压力作用下做匀加速直线运动。

$$v = at, \quad a = \frac{v}{t} = \frac{1.0 \times 10^8}{4.0 \times 10^{-8}} \text{ m/s}^2 = \frac{1}{4} \times 10^6 \text{ m/s}^2$$

气体对炮弹的平均压力

$$F = ma = 10 \times \frac{1}{4} \times 10^6 = 2.5 \times 10^6 \text{ N}$$

## 七、练习七

1. 一个质量是 100 克的运动物体，初速度是  $0.5 \text{ m/s}$ ，受到的力是 2.0 牛，力的方向跟速度方向相同。求 3.0 秒末的速度。

**解答：**由于力的方向跟物体运动的初速度方向相同，在力的作用下物体将做匀加速直线运动。根据牛顿第二定律，加速度

$$a = \frac{F}{m} = \frac{2.0}{0.1} = 20 \text{ m/s}^2$$

在 3.0 秒末的速度

$$v_t = v_0 + at = 0.5 + 20 \times 3.0 = 60.5 \text{ m/s}$$

速度的方向和初速度相同。

2. 一个原来静止的物体受到互成  $60^\circ$  角的两个力的作用，这两个力的大小都是 50 牛，物体的质量是 2.0 千克，求 3.0 秒内物体发生的位移。

**解答：**物体受到的合力

$$F_{\text{合}} = 2F \cos \frac{\alpha}{2} = 2 \times 50 \times \cos 30^\circ = 50\sqrt{3} \text{ N}$$

加速度

$$a = \frac{F_{\text{合}}}{m} = \frac{50\sqrt{3}}{2.0} = 25\sqrt{3} \text{ m/s}^2$$

3.0 秒内物体发生的位移大小

$$s = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2} \times 25\sqrt{3} \times 9.0 = 195 \text{ m}$$

方向跟合力方向一致，即跟两个力都成  $30^\circ$  角。

3. 一个放在桌面上的木块，质量是 0.10 千克，在水平方向受到 0.06 牛的力，木块和桌面的滑动摩擦力是 0.02 牛。求木块通过 1.8 米所用的时间。

解答：物体所受的合力

$$F_{\text{合}} = F - f = 0.06 - 0.02 = 0.04 \text{ N}$$

加速度

$$a = \frac{F_{\text{合}}}{m} = \frac{0.04}{0.10} = 0.4 \text{ m/s}^2$$

由于物体做初速度等于零的匀变速直线运动，根据公式  $s = \frac{1}{2}at^2$ ，得通过 1.8 米所用的时间

$$t = \sqrt{\frac{2s}{a}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.8}{0.4}} = 3 \text{ s}$$

4. 一物体的质量是 10 千克，在 40 牛的水平拉力作用下沿桌面从静止开始运动，物体和桌面的滑动摩擦系数为 0.20。如果在物体运动后的第 5 秒末把水平拉力撤除，算一算，一直到运动停止，物体一共走多远。

解答：由题意可知，在整个过程中，物体的运动分两个阶段，第一阶段物体在合力的作用下从静止开始做匀加速直线运动，第二阶段即在第 5 秒末把水平拉力撤除后，物体将在滑动摩擦力作用下做匀减速直线运动，直到停止运动。

第一阶段的加速度

$$a_1 = \frac{F_{\text{合}}}{m} = \frac{F - f}{m} = \frac{F - \mu mg}{m} = \frac{40 - 0.20 \times 10 \times 9.8}{10} = 2.04 \text{ m/s}^2$$

位移

$$s_1 = \frac{1}{2}a_1 t_1^2 = \frac{1}{2} \times 2.04 \times 5^2 = 25.5 \text{ m}$$

第二阶段的加速度

$$a_2 = \frac{f}{m} = \frac{\mu mg}{m} = \mu g = 0.20 \times 9.8 = 1.96 \text{ m/s}^2$$

由于  $a_2$  的方向跟物体的运动方向相反，因此在代入匀变速直线运动公式时， $a_2$  应取负值，即

$$v_1^2 - v_0^2 = 2(-a_2)s_2$$

式中  $v_1 = 0$ ,  $v_0 = a_1 t_1$ , 于是第二阶段的位移

$$s_2 = \frac{v_0^2}{2a_2} = \frac{(a_1 t_1)^2}{2a_2} = \frac{(2.04 \times 5)^2}{2 \times 1.96} = 26.5 \text{ m}$$

总位移

$$s = s_1 + s_2 = 25.5 + 26.5 = 52.0 \text{ m}$$

5. 质量为 10 千克的物体沿长 5 米、高 2.5 米的斜面由静止匀变速下滑，物体和斜面间的滑动摩擦系数为 0.30。物体的加速度多大？物体从斜面顶端下滑到底端需要多长时间？

**解答：**物体沿斜面下滑的过程中，共受到重力  $mg$ 、斜面的弹力  $N = mg \cos \theta$  以及滑动摩擦力  $f = \mu N = \mu mg \cos \theta$  三个力的作用，垂直于斜面方向的合力为零，平行于斜面向下的合力

$$\begin{aligned} F &= mg \sin \theta - f = mg \sin \theta - \mu mg \cos \theta \\ &= mg(\sin \theta - \mu \cos \theta) \\ &= 10 \times 9.8 \left( \frac{2.5}{5} - 0.30 \times \frac{\sqrt{5^2 - 2.5^2}}{5} \right) \\ &= 10 \times 9.8(0.5 - 0.26) = 23.5\text{N} \end{aligned}$$

沿斜面下滑时物体的加速度

$$a = \frac{F_{合}}{m} = \frac{23.5}{10} = 2.35\text{m/s}^2$$

根据  $s = \frac{1}{2}at^2$ , 物体从斜面顶端下滑到底端需要的时间

$$t = \sqrt{\frac{2s}{a}} = \sqrt{\frac{2 \times 5}{2.35}} = 2.06\text{s}$$

## 八、练习八

1. 质量是 20 吨的车厢以  $0.2\text{m/s}^2$  的加速度前进，运动的阻力是它的重量的 0.02 倍，牵引力是多少牛？

**解答：**设牵引力为  $F$ , 阻力为  $f$ , 则车厢在运动方向上所受的合力  $F_{合} = F - f$ .

根据牛顿第二定律  $F_{合} = ma$ , 于是  $F - f = ma$ , 则牵引力

$$\begin{aligned} F &= ma + f = 20 \times 10^3 \times 0.2 + 0.02 \times 20 \times 10^3 \times 9.8 \\ &= 7.9 \times 10^3\text{N} \end{aligned}$$

2. 列车在水平铁路上行驶，在 60 秒内速度由  $82\text{km/h}$  增加到  $54\text{km/h}$ , 列车的质量是  $1.0 \times 10^8$  吨，机车对列车的牵引力是  $1.5 \times 10^5$  牛。求列车在运动中所受的阻力。

**解答：**根据题意列车的初速度

$$v_0 = 32\text{km/h} = \frac{32 \times 10^3}{3600}\text{m/s} = 8.9\text{m/s}$$

运动 50 秒时的末速度

$$v_t = 54\text{km/h} = \frac{54 \times 10^3}{3600}\text{m/s} = 15\text{m/s}$$

于是加速度

$$a = \frac{v_t - v_0}{t} = \frac{15 - 8.9}{50} = 0.12\text{m/s}^2$$

由于列车运动的加速度是由合力所产生的，即  $F - f = ma$ , 所以阻力

$$\begin{aligned} f &= F - ma = 1.5 \times 10^5 - 1.0 \times 10^3 \times 10^3 \times 0.12 \\ &= 1.5 \times 10^5 - 1.2 \times 10^5 = 3 \times 10^4\text{N} \end{aligned}$$

3. 以  $1\text{m/s}$  行驶的无轨电车，在关闭电动机以后经过  $10$  秒停下来。电车的质量是  $4.0 \times 10^3$  千克。求电车所受的阻力。

**解答：**行驶着的电车关闭电动机后，在运动方向上只受到阻力作用，因此电车是做匀减速直线运动。

根据  $v_t = v_0 + at$ , 其中  $v_t = 0$ , 则加速度

$$a = \frac{-v_0}{t} = -\frac{15}{10} = -1.5\text{m/s}^2$$

负号意义表示加速度的方向跟初速度  $v_0$  的方向相反。

由于这一加速度是由阻力所产生，根据牛顿第二定律，阻力

$$f = ma = 4.0 \times 10^3 \times 1.5 = 6.0 \times 10^3\text{N}$$

阻力的方向跟电车行驶的方向相反。

4. 用弹簧秤拉着一个物体在水平面上做匀速运动，弹簧秤的读数是  $0.40$  牛。然后用弹簧秤拉着这个物体在这个水平面上做匀变速运动，测得加速度是  $0.85\text{m/s}^2$ ，弹簧秤的读数是  $2.10$  牛。这个物体的质量是多大？

**解答：**由题意可知，物体与水平面间的滑动摩擦力  $f = 0.40$  牛。当物体作匀变速直线运动时，设摩擦力保持不变，物体的加速度是由弹簧秤的拉力  $F$  和摩擦力  $f$  的合力所产生，于是， $F - f = ma$ . 则物体质量

$$m = \frac{F - f}{a} = \frac{2.10 - 0.40}{0.85} = 2.0\text{kg}$$

## 九、练习九

1. 某钢绳所能承受的最大拉力是  $4.0$  吨，如果用这条钢绳使  $3.5$  吨的货物匀加速上升，在  $0.50$  秒内发生的速度改变不能超过多大？

**解答：**货物在竖直向上做匀变速直线运动的过程中，货物受到钢绳拉力和重力的作用，这两个力的合力方向是竖直向上的，即

$$F - mg = ma = m \frac{v_t - v_0}{t}$$

由于钢绳所能承受的拉力  $F$  有一个最大值，所以在一定时间  $t = 0.50$  秒内，货物的速度改变  $v_t - v_0$  也就受到限制，

$$\begin{aligned} v_t - v_0 &= \frac{(F - mg)t}{m} \\ &= \frac{(4.0 \times 10^3 \times 9.8 - 3.5 \times 10^3 \times 9.8) \times 0.50}{3.5 \times 10^3} \\ &= \frac{0.5 \times 10^3 \times 9.8 \times 0.50}{3.5 \times 10^2} = 0.7\text{m/s} \end{aligned}$$

即在  $0.50$  秒内货物的速度变化不能超过  $0.7\text{m/s}$ 。

2. 升降机以  $0.30\text{m/s}^2$  的加速度竖直减速下降，站在升降机里  $60$  千克的人，对升降机地板的压力是多大？他站在升降机中的体重计上，体重计表示的他的体重是多大？如

果升降机以相同的加速度竖直减速上升，情况又怎样？在什么情况下人对地板的压力是零？

**解答：**当人跟随升降机一起减速下降时，人受到重力和地板的支持力  $N$  的作用，这两个力的合力方向竖直向上，即

$$N - mg = ma$$

$$N = mg + ma = m(g + a) = 60(9.8 + 0.30) = 606\text{N}$$

地板所受的压力  $F = -N = -606$  牛。负号表示地板所受到的压力方向和人所受到的地板弹力方向相反。

如果人是站立在体重计上，则体重计所受的压力的大小也等于 606 牛，它比人所受的重力  $60 \times 9.8 = 588$  牛大，出现超重现象。

当人跟随升降机一起减速上升时，人所受的合力方向竖直向下。即

$$mg - N' = ma$$

$$N' = mg - ma = m(g - a) = 60(9.8 - 0.30) = 570\text{N}$$

地板所受的压力  $F' = -N' = -570$  牛。

如果人是站立在体重计上，则体重计所受的压力的大小也等于 570 牛。它比人所受的重力 588 牛小，出现失重现象。

如果人对地板的压力  $F = 0$ （地板对人的支持力  $N = 0$ ）时，根据上式可知这时，

$$mg - 0 = ma \Rightarrow a = g$$

可见当  $a = g$  时，即当升降机以  $a = g$  的加速度竖直向上做匀减速直线运动或者说当升降机以  $a = g$  的加速度竖直向下做匀加速直线运动时，人对地板的压力为零。

3. 弹簧秤上挂一个 14 千克的物体，在下列各种情况下，弹簧秤的读数是多大？

- (a) 以  $28\text{cm/s}^2$  的加速度竖直加速上升；
- (b) 以  $10\text{cm/s}^2$  的加速度竖直减速上升；
- (c) 以  $10\text{cm/s}^2$  的加速度竖直加速下降；
- (d) 以  $28\text{cm/s}^2$  的加速度竖直减速下降。

**解答：**物体在这四种情况下，都受到向下的重力  $mg$  和向上的弹簧拉力  $F$  的作用。

- (a) 物体的加速度  $a = 28\text{cm/s}^2 = 0.28\text{m/s}^2$ ，方向向上， $F - mg = ma$ ，所以弹簧秤读数

$$F = mg + ma = m(g + a) = 14 \times (9.8 + 0.28) = 141\text{N}$$

- (b) 物体加速度  $a = 10\text{cm/s}^2 = 0.10\text{m/s}^2$ ，方向向下， $mg - F = ma$ ，所以弹簧秤读数

$$F = mg - ma = m(g - a) = 14 \times (9.8 - 0.10) = 136\text{N}$$

- (c) 物体的加速度  $a = 10\text{cm/s}^2 = 0.10\text{m/s}^2$ , 方向向下,  $mg - F = ma$ . 所以弹簧秤读数

$$F = mg - ma = m(g - a) = 14 \times (9.8 - 0.10) = 136\text{N}$$

- (d) 物体的加速度  $a = 28\text{cm/s}^2 = 0.28\text{m/s}^2$ , 方向上,  $F - mg = ma$ , 所以弹簧秤读数

$$F = mg + ma = m(g + a) = 14 \times (9.8 + 0.28) = 141\text{N}$$

## 十、习题

1. 一个小金属车可以和另外两个相同的小木车在天平上平衡. 用一个力作用在小金属车上, 得到  $2\text{m/s}^2$  的加速度, 如果用相同的力作用在一个静止的小木车上, 经过 2 秒, 小木车的速度是多大?

**解答:** 设小木车的质量为  $m_1$ , 则小金属车的质量  $m_2 = 2m_1$ . 根据在相同的力作用下, 物体的加速度跟质量成反比的关系:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}$$

则小木车的加速度

$$a_1 = \frac{m_2}{m_1} a_2 = \frac{2m_1}{m_1} \times 2 = 4\text{m/s}^2$$

根据  $v = at$ , 经过 2 秒小木车的速度

$$v_t = a_1 t = 4 \times 2 = 8\text{m/s}$$

2. 一个质量是  $m$  克的物体沿着光滑的斜面下滑 (不计滑动摩擦), 斜面的倾角是  $\theta$ . 试证明这个物体下滑的加速度  $a = g \sin \theta$ .

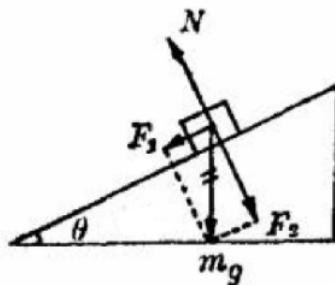


图 3.9

**解答:** 如图 3.9 所示, 物体在光滑斜面上下滑的过程中, 受到重力  $mg$  和斜面对物体的支持力  $N$  的作用.

把重力分解成平行于斜面方向和垂直于斜面方向的两个分力  $F_1$  和  $F_2$ , 则  $F_1 = mg \sin \theta$ ,  $F_2 = mg \cos \theta$ . 由于物体在垂直于斜面方向上没有分运动, 它在这个方向上的合力等于零, 即  $N - F_2 = 0$ ,  $N = F_2 = mg \cos \theta$ . 所以物体只受到平行于斜面方向的分力  $F_1$  的作用, 因此合力  $F_{合} = F_1 = mg \sin \theta$ . 所以物体沿斜面下滑的加速度

$$a = \frac{F_{合}}{m} = \frac{mg \sin \theta}{m} = g \sin \theta$$

3. 一个质量是 10 克的物体沿着光滑的斜面从静止开始滑下（不计摩擦），开始滑下时的竖直高度是 10 厘米，斜面的倾角是  $30^\circ$ ，这个物体滑到斜面末端时的速度是多大？另一个质量是 20 克的物体也沿着光滑的斜面从静止开始滑下，开始滑下时的竖直高度相同，斜面的倾角是  $45^\circ$ ，这个物体滑到斜面末端时的速度是多大？写出速度  $v$  的表达式，并说明物体滑到斜面末端时的速度  $v$  只跟开始滑下时竖直高度  $h$ 、重力加速度  $g$  有关，跟物体的质量  $m$ 、斜面的倾角  $\theta$  无关。

**解答：**质量是 10 克的物体沿倾角是  $30^\circ$  的光滑斜面下滑时的加速度

$$a_1 = g \sin \theta_1 = 9.8 \times \sin 30^\circ = 9.8 \times \frac{1}{2} = 4.9 \text{ m/s}^2$$

已知斜面高度  $h = 10$  厘米，则斜面长

$$\ell_1 = \frac{h}{\sin 30^\circ} = 2h = 2 \times 10 \text{ cm} = 0.20 \text{ m}$$

物体滑到斜面末端时的速度

$$v_1 = \sqrt{2a_1 \ell_1} = \sqrt{2 \times 4.9 \times 0.20} = 1.4 \text{ m/s}$$

质量是 20 克的物体沿倾角是  $45^\circ$  的光滑斜面滑下时的加速度

$$a_2 = g \sin \theta_2 = 9.8 \times \sin 45^\circ = 4.9\sqrt{2} \text{ m/s}^2$$

已知这一斜面高度  $h = 10$  厘米，则这个斜面的长

$$\ell_2 = \frac{h}{\sin 45^\circ} = \frac{2h}{\sqrt{2}} = \frac{0.20}{\sqrt{2}} \text{ m}$$

物体滑到斜面末端时的速度

$$v_2 = \sqrt{2a_2 \ell_2} = \sqrt{2 \times 4.9\sqrt{2} \times \frac{0.20}{\sqrt{2}}} = 1.4 \text{ m/s}$$

在初速度等于零的匀变速直线运动中，即时速度  $v$  跟加速度  $a$  以及发生的位移  $s$  有如下关系， $v^2 = 2as$ 。物体从斜面上下滑时，由于  $a = g \sin \theta$ ,  $s = \ell = \frac{h}{\sin \theta}$ ，所以

$$v = \sqrt{2a\ell} = \sqrt{2 \times g \sin \theta \times \frac{h}{\sin \theta}} = \sqrt{2gh}$$

可见物体沿光滑斜面滑下，滑到斜面末端时的速度，只跟开始滑下时的竖直高度  $h$ ，重力加速度  $g$  有关，而跟物体的质量  $m$  以及斜面的倾角  $\theta$  无关。

4. 一个放在水平面上的物体，质量是 0.50 千克，在水平方向受到 6.0 牛的拉力，得到  $10 \text{ m/s}^2$  的加速度，求这个物体和平面间的滑动摩擦系数。

**解答：**物体在水平面上运动时的加速度是由水平拉力  $F$  和滑动摩擦力  $f$  的合力所产生的，即

$$F - f = ma$$

摩擦力

$$f = F - ma = 6.0 - 0.50 \times 10 = 1.0 \text{ N}$$

滑动摩擦系数

$$\mu = \frac{f}{N} = \frac{f}{mg} = \frac{1.0}{0.5 \times 9.8} = 0.20$$

5. 质量是 2.75 吨的载重卡车，在 2900 牛的牵引力作用下开上一个山坡，沿山坡每前进 1 米升高 0.05 米。卡车由静止开始前进 100 米时速度达到 36km/h。求卡车在前进中所受的摩擦阻力。

**解答：**设卡车沿山坡向上做匀变速直线运动，已知卡车由静止开始前进  $s = 100$  米时速度  $v = 36\text{km}/\text{h} = 10\text{m}/\text{s}$ 。根据  $v^2 = 2as$ ，则加速度

$$a = \frac{v^2}{2s} = \frac{10^2}{2 \times 100} = 0.5\text{m}/\text{s}^2$$

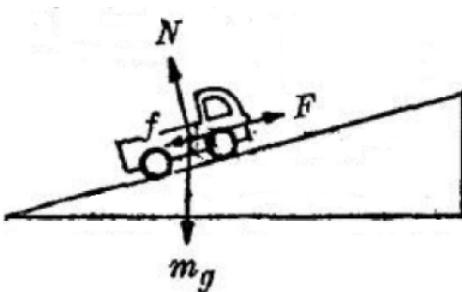


图 3.10

在运动过程中，卡车受到重力  $mg$ 、山坡的支持力  $N$ 、牵引力  $F$  以及摩擦阻力  $f$  的作用（图 3.10），这四个力的合力使卡车产生沿着地面向上的加速度，因此有

$$F - mg \sin \theta - f = ma$$

所以摩擦阻力

$$f = F - mg \sin \theta - ma = 2900 - 2.75 \times 10^3 \times 9.8 \times \frac{0.05}{1} - 2.75 \times 10^3 \times 0.5 = 178\text{N}$$

6. 汽车开上一段坡路。汽车的质量是 1500 千克，发动机的牵引力是 3000 牛，摩擦阻力是 900 牛顿。沿坡路每前进 10 米升高 2 米，坡长 282 米。汽车用 20 秒走完这段坡路。求上坡前的速度和到达坡顶的速度。

**解答：**汽车在坡路上行驶时，共受到重力  $mg$ 、坡路的支持力  $N$ 、牵引力  $F$  和摩擦阻力  $f$  的作用，它们的合力使汽车产生加速度，因此有

$$F - mg \sin \theta - f = ma$$

所以汽车的加速度

$$a = \frac{F - mg \sin \theta - f}{m} = \frac{3000 - 1500 \times 9.8 \times \frac{2}{10} - 900}{1500} = -0.56\text{m}/\text{s}^2$$

负号表示加速度的方向和初速度方向相反，说明汽车在坡路上行驶时做匀减速运动。

根据  $s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ , 汽车在上坡前的速度

$$v_0 = \frac{s - \frac{1}{2} a t^2}{t} = \frac{282 - \frac{1}{2}(-0.56) \times 20^2}{20} = 19.7 \text{m/s}$$

汽车到达坡顶的速度

$$v_t = v_0 + at = 19.7 + (-0.56) \times 20 = 8.5 \text{m/s}$$

7. 有一个质量是 3.0 千克的木块以速度  $v_0$  沿光滑的水平面移动. 一个与  $v_0$  方向相反的 18 牛的力作用在木块上, 经过一段时间, 木块的速度减小到原有速度  $v_0$  的一半, 木块移动了 9.0 米的路程. 这段时间有多长?  $v_0$  是多大?

解答: 根据牛顿第二定律, 物体的加速度

$$a = \frac{F}{m} = \frac{18}{3.0} = 6.0 \text{m/s}^2$$

由于力  $F$  和物体初速  $v_0$  的方向相反, 所以加速度为负值, 移动了  $s = 9.0$  米后末速为  $\frac{v_0}{2}$ , 则有

$$\begin{aligned} \left(\frac{v_0}{2}\right)^2 - v_0^2 &= 2(-a)s \\ -3v_0^2 &= -8as \end{aligned}$$

所以

$$v_0 = \sqrt{\frac{8}{3}as} = \sqrt{\frac{8}{3} \times 6.0 \times 9.0} = 12 \text{m/s}$$

木块在这段运动中经历的时间

$$t = \frac{v_t - v_0}{a} = \frac{\frac{v_0}{2} - v_0}{a} = \frac{6 - 12}{-6.0} = 1 \text{s}$$

8. 一个物体在两个彼此平衡的力作用下处于静止状态. 现在把其中某一个力逐渐减小到零, 这个物体的加速度和速度的绝对值怎样变化? 如果再逐渐把这个力恢复, 这个物体的加速度和速度的绝对值又将怎样变化?

解答: 当把两个彼此平衡着的力中的一个力逐渐减小到零的过程中, 物体所受的合力的大小将从零逐渐增大到等于这一个力, 这样, 物体的加速度将从零逐渐增大到某一个最大值, 物体运动的速度也将逐渐增大, 而且速度增大得越来越快, 加速度达到最大值后, 速度均匀增加, 物体做匀加速运动.

如果再逐渐把这个力恢复, 则物体运动的合力将逐渐减小, 加速度也将逐渐减小, 但速度仍将继续增大, 不过增大得越来越慢了, 当这个力恢复到原来的大小时, 合力将等于零, 加速度也将等于零, 这时的速度将达到某一个最大值, 并且不再发生改变. 物体将做匀速直线运动.

9. 一个放在水平面上的质量是 5.0 千克的物体, 受到与水平方向成  $30^\circ$  角的斜向上方的拉力作用, 物体产生沿水平方向的加速度是  $2 \text{m/s}^2$ . 物体跟平面的滑动摩擦系数是 0.1. 求拉力是多大?

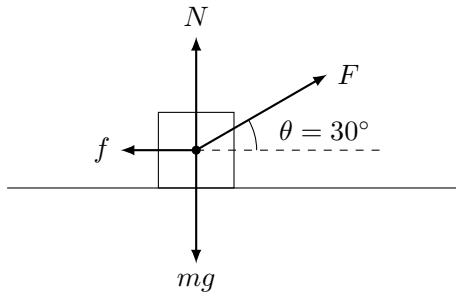


图 3.11

**解答：**设物体所受到的拉力为  $F$ , 摩擦力为  $f$ , 水平面对物体的支持力为  $N$ , 重力为  $mg$ , 如图 3.11 所示. 物体在这四个力的作用下, 沿着水平面做匀变速直线运动. 拉力  $F$  在垂直于水平面方向的分力是  $F \sin \theta$ , 在平行于水平面方向的分力是  $F \cos \theta$ . 由于物体在垂直于水平面方向的加速度为零,

$$N + F \sin \theta - mg = 0, \quad N = mg - F \sin \theta$$

所以摩擦力

$$f = \mu N = \mu(mg - F \sin \theta)$$

在水平方向,  $F \cos \theta - f = ma$ . 将  $f$  的表达式代入此式得

$$F \cos \theta - \mu mg + \mu F \sin \theta = ma$$

所以拉力

$$F = \frac{ma + \mu mg}{\cos \theta + \mu \sin \theta} = \frac{5.0 \times 2 + 0.1 \times 5.0 \times 9.8}{\frac{\sqrt{3}}{2} + 0.1 \times \frac{1}{2}} = 16.3 \text{N}$$

10. 略 (课本已作解答).

11. 文艺复兴时代意大利的著名画家和学者达·芬奇提出了如下的原理: 如果力  $F$  在时间  $t$  内使质量是  $m$  的物体移动一段距离  $s$ , 那么:

- (a) 相同的力在相同的时间内使质量是一半的物体移动  $2s$  的距离;
- (b) 或者相同的力在一半的时间内使质量是一半的物体移动相同的距离;
- (c) 或者相同的力在两倍的时间内使质量是两倍的物体移动相同的距离;
- (d) 或者一半的力在相同的时间内使质量是一半的物体移动相同的距离;
- (e) 或者一半的力在相同的时间内使质量相同的物体移动一半的距离.

这些原理正确不正确? 为什么?

**解答:** 可根据牛顿第二定律和运动学公式来判断达·芬奇所提出的原理是否正确.

设讨论的前提为物体原来是静止的, 则

$$s = \frac{1}{2}at^2, \quad F = ma$$

于是

$$s = \frac{1}{2} \frac{F}{m} t^2$$

(a) 设  $F_1 = F$ ,  $m_1 = \frac{m}{2}$ ,  $t_1 = t$ , 则

$$s_1 = \frac{1}{2}a_1 t_1^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{F_1}{m_1} t_1^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{F}{m/2} t^2 = 2 \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{F}{m} t^2 \right) = 2s$$

可见原理 (a) 是正确的.

(b) 设  $F_2 = F$ ,  $m_2 = \frac{m}{2}$ ,  $t_1 = \frac{t}{2}$ , 则

$$s_2 = \frac{1}{2}a_2 t_2^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{F_2}{m_2} t_2^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{F}{m/2} \left( \frac{t}{2} \right)^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{F}{m} t^2 \right) = \frac{1}{2}s$$

可见原理 (b) 是不正确的.

(c) 设  $F_3 = F$ ,  $m_3 = 2m$ ,  $t_3 = 2t$ , 则

$$s_3 = \frac{1}{2}a_3 t_3^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{F_3}{m_3} t_3^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{F}{2m} (2t)^2 = 2 \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{F}{m} t^2 \right) = 2s$$

可见原理 (c) 是不正确的.

(d) 设  $F_4 = F/2$ ,  $m = \frac{1}{2}m$ ,  $t_4 = t$ , 则

$$s_4 = \frac{1}{2}a_4 t_4^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{F_4}{m_4} t_4^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{F/2}{m/2} t^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{F}{m} t^2 = s$$

可见原理 (d) 是正确的.

(e) 设  $F_5 = F/2$ ,  $m_5 = m$ ,  $t_5 = t$ , 则

$$s_5 = \frac{1}{2}a_5 t_5^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{F_5}{m_5} t_5^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{F/2}{m} t^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{F}{m} t^2 \right) = \frac{1}{2}s$$

可见原理 (e) 是正确的.

12. 有两个物体, 质量为  $m_1$  和  $m_2$ ,  $m_1$  原来静止,  $m_2$  以速度  $v_0$  向右运动 (图 3.16).

它们同时开始受到大小相等、方向与  $v_0$  相同的恒力  $F$  的作用, 它们能不能在某一时刻达到相同的速度? 分  $m_1 < m_2$ ,  $m_1 = m_2$ ,  $m_1 > m_2$  三种情况来讨论.

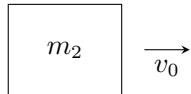
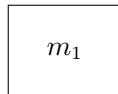


图 3.12

**解答:** 质量为  $m_1$  的物体甲做初速度等于零的匀变速直线运动, 经过时间  $t$  的速度  $v_1 = \frac{F}{m_1}t$ .

质量为  $m_2$  的物体乙做初速度为  $v_0$  的匀变速直线运动. 经过时间  $t$  的速度  $v_2 = v_0 + \frac{F}{m_2}t$ , 由此得

$$v_2 - v_1 = v_0 + \left( \frac{F}{m_2} - \frac{F}{m_1} \right) t = v_0 + \frac{m_1 - m_2}{m_1 m_2} F t$$

当  $m_1 \geq m_2$  时,  $m_1 - m_2 \geq 0$ , 有  $v_2 - v_1 \geq v_0 > 0$ . 即  $v_1$  和  $v_2$  永远不会相等.

当  $m_1 < m_2$  时, 有

$$v_2 - v_1 = v_0 - \frac{m_2 - m_1}{m_1 m_2} F t$$

令  $v_2 - v_1 = 0$ , 得

$$t = \frac{m_1 m_2 v_0}{(m_2 - m_1) F}$$

这时有  $v_1 = v_2$ , 即甲乙两物体的速度相等.

说明: 由于物体的初速度 (等于零) 比乙物体的初速度 ( $v_0$ ) 小, 显然, 只有甲的加速度比乙的加速度大, 即

$$\frac{F}{m_1} > \frac{F}{m_2}, \quad m_1 < m_2$$

时, 两个物体才能达到相同的速度, 这一点, 不用公式也可以得出, 借助于公式则可以更明显地看出定量的关系.

## 第五节 参考资料

### 一、研究加速度和力以及质量关系的实验中的误差分析

在课本实验八和实验九中把砂桶和砂的重量看作使小车产生加速度的力的条件是: 砂桶和砂的质量  $m$ . 必须远小于小车的质量  $M$ . 小车和砂桶应具有相等的加速度,

$$a = \frac{mg}{M + m}$$

式中的  $mg$  是砂桶和砂的重量, 也是作用于由小车和砂桶及砂组成的物体系的合外力. 实验时为了使计算简化, 取  $a \approx \frac{m}{M} g$ . 这样就产生了误差, 这一误差是由于实验原理的不完善而带来的, 属于系统误差.

下面用具体数字计算一下这一误差的大小. 如果实验时所用小车的质量为 200 克, 砂桶和砂的质量不超过 20 克, 则加速度的最大值

$$a = \frac{mg}{M + m} = \frac{0.02 \times 9.8}{0.2 + 0.02} = 0.89 \text{ m/s}^2$$

若忽略砂桶和砂的质量  $m$ , 则

$$a' = \frac{mg}{M} = \frac{0.02 \times 9.8}{0.2} = 0.98 \text{ m/s}^2$$

$a'$  与  $a$  相差 (即绝对误差)

$$E_a = a' - a = 0.98 - 0.89 = 0.09 \text{ m/s}^2$$

相对误差 (即百分误差)

$$E_r = \frac{E_a}{a} \times 100\% = \frac{0.09}{0.89} \times 100\% = 10.1\%$$

相对误差在 10% 左右, 这在中学物理实验中是许可的. 当砂桶和砂的质量小于 20 克, 或在小车上加砝码以增大小车质量时, 相对误差均小于 10%, 因此课上忽略砂桶和砂的

质量来计算加速度的方法是允许的。但是如果砂桶和砂的质量增大为 50 克，而小车质量仍为 200 克，则

$$a = \frac{mg}{M+m} = \frac{0.05 \times 9.8}{0.2 + 0.05} = 1.96 \text{m/s}^2$$

若忽略  $m$ , 则

$$a' = \frac{mg}{M} = \frac{0.05 \times 9.8}{0.2} = 2.45 \text{m/s}^2$$

则绝对误差

$$E_a = a' - a = 2.45 - 1.96 = 0.49 \text{m/s}^2$$

相对误差

$$E_r = \frac{E_a}{a} \times 100\% = \frac{0.49}{1.96} \times 100\% = 25\%$$

这样的误差就太大了，所以在实验时所用砂桶和砂的质量以不超过小车质量的 1/10 为宜。

## 二、惯性质量和引力质量

使物体改变运动状态，需要力的作用，在相同的力作用下，质量越大的物体的加速度越小。这表明了质量是表示物体所具有的阻碍运动状态改变的一种属性，质量越大，物体越不容易改变其运动状态，所以质量是物体惯性大小的量度，物体的这一性质跟物体是否受有重力作用完全无关（譬如放在水平的气垫导轨上的滑块，或物体在完全失重的情况下）。因此，牛顿第二定律的公式  $F = ma$  中所出现的质量  $m$ , 叫做惯性质量。

根据万有引力定律可知，物体受到的地球引力的大小和物体的质量成正比，为了使物体不致由于受到地球引力而掉向地面，可将物体用绳子悬挂起来（或用支持物支承住）。这样，绳子（或支持物）就发生形变，物体的质量越大，需要绳子（或支持物）发生更大程度的形变才能产生足够大的弹力来跟物体所受到的地球引力相平衡。因此，在这里质量的概念反映了物体所包含的物质的多少，质量越大，物体所含的物质越多，受到的地球引力就越大。因此，万有引力定律公式  $F = G \frac{Mm}{R^2}$  中所出现的物体质量  $m$ , 叫做引力质量。

惯性质量和引力质量是从不同的侧面来描述了物质的属性，它们之间存在着怎样的关系呢？

设有  $A, B$  两个物体，它们的惯性质量分别为  $m_A, m_B$ , 引力质量分别为  $m'_A, m'_B$ 。把  $A, B$  这两个物体放在地球上的同一地点，则它们所受到的地球引力分别为：

$$F_A = G \frac{Mm'_A}{R^2} = G_A, \quad F_B = G \frac{Mm'_B}{R^2} = G_B$$

若将以上两式相比，则得：

$$\frac{G_A}{G_B} = \frac{m'_A}{m'_B} \tag{3.1}$$

这表明了  $A, B$  物体所受重力的比等于它们的引力质量的比。

如果使  $A, B$  物体在重力的作用下自由下落，则根据牛顿第二定律可知， $G_A = m_A g_A$ ;  $G_B = m_B g_B$ .

由于在同一地点，重力加速度都相等，即  $g_A = g_B = g$ . 于是：

$$\frac{G_A}{G_B} = \frac{m_A}{m_B} \tag{3.2}$$

这表明了在地球上同一地点，物体的重量的比等于它们的惯性质量的比。

比较 (3.1) 式和 (3.2) 式，可见物体的惯性质量  $m$  和引力质量  $m'$  是一致的。

对单摆的振动加以讨论，也可以得出惯性质量和引力质量是等效的结论。单摆振动在偏角很小的情况下，可看作是有简谐振动，对于简谐振动来说，它的周期  $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ ，式中  $m$  是振动系统的惯性质量， $k$  是决定于振动系统的一个常数。在单摆这一振动系统中， $k = \frac{m'}{\ell}g$ ，式中  $m'$  是摆球的引力质量。代入周期公式，得单摆振动的周期公式

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m\ell}{m'g}}$$

从实验证明，在摆角很小时，单摆的振动周期跟摆长  $\ell$  的平方根成正比，跟所在地点的重力加速度  $g$  的平方根成反比，而与物体质量无关，即

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$$

这只有认为  $m' = m$  的情况下才是可能的，因此物体的惯性质量和引力质量是等效的。

因此，在中学物理教学中，不必区分惯性质量和引力质量。

### 三、狭义相对论和经典力学

以牛顿定律为基础的经典力学认为，物体的长度和时间间隔跟物体运动的速度没有关系，即把空间和时间看成是绝对的。经典力学还认为物体的质量跟物体运动的速度大小也是无关的。这些结论对于研究宏观物体的运动无疑是正确的，跟人们的日常经验也是一致的。

但在研究微观粒子的高速运动时，发现了用经典力学无法解释的矛盾。爱因斯坦在 1905 年发表了《论运动物体的电动力学》的著名论文，提出狭义相对性原理（即第一个假设：在所有惯性系中物理定律具有相同的形式，没有一个惯性系比别的惯性系更优越）和光速不变原理（即第二个假设：在所有惯性系中光速都是相同的），创立了狭义相对论，可以用来处理微观粒子的高速运动的问题。

狭义相对论指出：有两个惯性系  $s$  和  $s'$ ，它们具有互相平行的坐标轴  $(x, y, z)$ ，并且  $x-x'$  轴是公共的。若  $s'$  相对于  $s$  以速率  $v$  运动，在这两个不同的惯性系中的观察者，对于同一地点发生的两个事件之间的时间间隔的测量结果是不同的。在  $s'$  中的观察者测得的时间间隔为  $\Delta t'$ ，而由于  $s$  中的观察者认为  $s'$  是在运动着的，他所测得的时间间隔  $\Delta t$  由下式给出：

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

可见  $\Delta t > \Delta t'$ 。即时间发生了“膨胀”，运动的钟变慢了——通常叫做钟慢效应。

如果有一根相对于  $s'$  是静止的尺，平行于  $x'$  轴放置，在  $s'$  中测得尺的长度为  $\Delta x'$ ，而在  $s$  中的观察者看来，这把尺是运动的，他测得的尺的长度  $\Delta x$  由下式给出：

$$\Delta x = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \Delta x'$$

可见  $\Delta x < \Delta x'$ , 即长度发生了“收缩”, 运动的尺变短了——通常叫做尺缩效应.

狭义相对论还导出, 跟对时间间隔和长度的测量一样, 质量  $m$  也是速率  $v$  的函数. 如果质点静止时的质量为  $m_0$ , 则质点相对于观察者以速率  $v$  运动时, 它的相对论质量  $m$  将由下式给出:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

可见  $m > m_0$ , 即质量随着速率的增大而变大, 通常叫做质-速关系.

以上三个关系式表明了狭义相对论提出的一种新的时空观. 而当速率  $v \ll c$  时, 则  $\Delta t \approx \Delta t'$ ,  $\Delta x \approx \Delta x'$ ,  $m \approx m_0$ . 这表明经典力学所描述的运动规律是狭义相对论的特殊情况. 因而处理宏观物体的低速运动时使用牛顿力学是足够准确的.

此外, 从狭义相对论的结论中, 还导出了质量和能量的等效原理.

$$E = mc^2$$

这表明了总能量守恒和相对论质量守恒是等效的, 这一原理是研究原子核反应及其应用的一个重要理论依据.

# 第四章 曲线运动

---

<b>第一节 教学要求</b>	<b>97</b>
<b>第二节 教学建议</b>	<b>98</b>
一、第一单元	98
(一)曲线运动的速度方向	99
(二)物体做曲线运动的条件	99
二、第二单元	99
(一)运动的合成和分解	99
(二)平抛物体的运动	100
(三)斜抛物体的运动	101
三、第三单元	101
(一)描述匀速圆周运动快慢的几个物理量	101
(二)匀速圆周运动是变速运动	101
(三)匀速圆周运动中的向心加速度	101
(四)向心力	102
(五)做匀速圆周运动物体的受力分析	102
(六)离心现象	102
<b>第三节 实验指导</b>	<b>103</b>
一、演示实验	103
(一)物体做曲线运动的条件	103
(二)运动的合成	104
(三)自由落体和平抛物体同时落地	104
(四)斜抛物体的射程跟初速度和抛射角有关	105
(五)向心力跟哪些因素有关	105
(六)配合课本习题的演示	105
二、学生实验	106
(一)研究平抛物体的运动	106
(二)验证向心力公式	107
三、课外实验活动	107
(一)用尺测量玩具手枪子弹射出的速度	107
(二)估测自行车受到的阻力	108
(三)验证向心力公式	109
<b>第四节 习题解答</b>	<b>109</b>
一、练习一	109

二、练习二 . . . . .	110
三、练习三 . . . . .	111
四、练习四 . . . . .	113
五、练习五 . . . . .	114
六、练习六 . . . . .	115
七、练习七 . . . . .	117
八、练习八 . . . . .	118
九、习题 . . . . .	119
<b>第五节 参考资料 . . . . .</b>	<b>123</b>
一、对课本 170 页习题第 6 题提示的讨论 . . . . .	123
二、关于竖直平面内的圆周运动 . . . . .	124

---

## 第一节 教学要求

这一章讲授平抛、斜抛和匀速圆周运动，是牛顿运动定律在“新”的领域的具体运用，速度和加速度的方向性，在曲线运动显得非常重要，通过本章的学习，学生对这两个概念的矢量性将得到进一步的领会。

这一章的教学要求是：

1. 了解曲线运动的特点和物体做曲线运动的条件，掌握运动的合成与分解的方法.
2. 理解平抛运动和斜抛运动的规律，会用运动的合成与分解的方法分析这两种运动.
3. 理解匀速圆周运动的角速度、线速度和周期的概念，掌握它们之间的关系  $v = r\omega = \frac{2\pi r}{T}$
4. 掌握向心加速度的概念，会用向心加速度的公式. 掌握向心力的概念，会分析做匀速圆周运动的物体的受力情况，找出向心力的来源.
5. 了解离心现象及其应用.

下面对这一章的教学内容作些具体说明。

关于曲线运动的一般特点，主要说明曲线运动中速度的方向是时刻变化的，因此，曲线运动都是变速运动，对于曲线运动的速度方向，教材是通过分析现象得出的，没有从数学上进行论证，这是考虑到这种讲法比较简单易懂，便于学生接受。关于物体做曲线运动的条件，要求学生知道，但不要求进一步分析合外力对速度的大小和方向的影响。程度好一些的学生，可以在学完第七节后，通过阅读材料“力的分解与曲线运动”，来加深对这个问题的理解。

运动的合成和分解是作为研究平抛和斜抛的方法来讲解的。因为是准备性知识，所以讲得比较简要。要求学生掌握运动的合成和分解的方法，但不要求进行论证。教材是对同一参照物来讲解运动的合成和分解的，不涉及相对速度、牵连速度等概念。课本里提到的运动都是相对于地面来说的，不会误解，所以没有把参照物写出来。

关于平抛和斜抛运动，主要是要使学生认识抛体运动可以看作是竖直方向和水平方向两个直线运动的合运动。对于计算飞行时间、射程和射高的公式，主要要求学生知道它们

是怎样推导出来的，掌握推导方法，而不要死记硬背。平抛和斜抛运动的轨迹曲线，教材是用描点法画出的，不要求由已给出的时间参数方程推导出用  $x$  和  $y$  表示的抛物线方程。

角速度和周期这两个描述匀速圆周运动快慢的物理量，学生初次接触，应使学生理解它们的物理意义。同时还应要求学生搞清楚线速度、角速度、周期这三个量是从不同角度来描述匀速圆周运动快慢的，并掌握它们之间的关系。匀速圆周运动的线速度的大小虽然不变，但方向却时刻在改变，因而匀速圆周运动是变速运动，认识这一点是后面讲解向心加速度的前提。

关于向心加速度，教材是用矢量方法讲的。这种讲法能突出向心加速度的方向，有利于学生正确理解向心加速度，对向心加速度的推导学生只要能听懂就行，并不要求学生自己会推导。由于全书都不写矢量式，这里也没有用矢量式。为了避免用矢量差，采用学生学过的矢量合成的三角形法，用  $v_B$  等于  $v_A$  与  $\Delta v$  之和的提法代替了  $\Delta \vec{v} = \vec{v}_B - \vec{v}_A$ ，不同的教师可能爱好的推导方法不一样，在教学中可以不必拘泥于课本中的方法，根据自己的爱好选用其他的推导方法。

导出向心加速度的公式后，应使学生知道匀速圆周运动是变加速运动，对于不同形式的向心加速度公式： $a_n = \frac{v^2}{r}$  和  $a_n = \omega^2 r$ ，应使学生了解它们的物理意义，知道在什么条件下  $a_n$  与  $r$  成反比，在什么条件下  $a_n$  与  $r$  成正比；并能利用  $v$ 、 $\omega$ 、 $r$  之间关系，从一种形式推导出另一种形式，以备后面学习中应用。

讲解向心力时，应突出牛顿运动定律的应用。向心力的大小可由牛顿第二定律算出，向心力的方向跟加速度的方向时刻都是一致的，总是指向圆心，在分析向心力问题时，也应注意强调从牛顿运动定律出发进行研究。

分析向心力的来源是一个难点，又是理解和掌握向心力的关键。为此教材写了“匀速圆周运动的实例分析”一节，就一些实际的例子分析了向心力的来源，以及向心力的大小跟物体做匀速圆周运动情况的关系。并且，使学生进一步明确：使物体做匀速圆周运动的向心力就是物体受到的合外力。

“离心现象”一节主要是使学生了解物体做离心运动的原因和离心机械的原理。

## 第二节 教学建议

本章可分为三个单元进行教学，第一单元是第一节《曲线运动》，第二单元从第二节《运动的合成和分解》到第四节《斜抛物体的运动》，第三单元从第五节《匀速圆周运动》到第九节《离心现象》。

### 一、第一单元

这一单元是整章的讨论前提与研究曲线运动的基础，主要使学生认识曲线运动中的速度方向是时刻改变的，获得曲线运动是变速运动的印象以及正确理解物体做曲线运动的条件。

### (一) 曲线运动的速度方向

关于曲线运动的速度方向，课本是通过图 4.2 所示的现象得出结论的。在分析这个现象时要使学生认识，即使刀具不跟砂轮接触，砂粒没有落下，也没有火星飞出，砂轮边缘上各点做圆周运动的速度方向，仍然是在圆周各点的切线方向上。认清了这一点之后，再进一步引导学生明确曲线运动是一种变速运动，为进一步学习物体做曲线运动的条件做好准备。

### (二) 物体做曲线运动的条件

讲这部分内容时先明确一下，曲线运动既然是变速运动，运动物体所受的力一定是不平衡的。然后做一个演示实验（图 4.1）：一个乒乓球在水平桌面上沿着一条直线滚动到桌子边缘的 B 点。当乒乓球离开桌边后，由于在竖直方向上受到重力的作用，就改变了原来的直线运动状态，沿着曲线 BCD 运动了，再分析乒乓球的受力情况，使学生认识物体做曲线运动的条件是：物体具有初速度，并且受到跟初速度方向成一角度（不包括  $0^\circ$  和  $180^\circ$  这两种特殊情况）的合外力的作用。

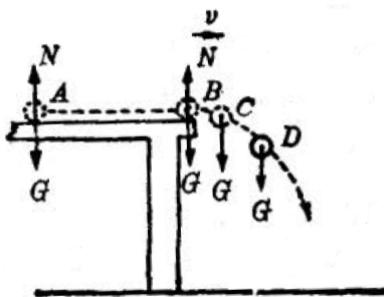


图 4.1

## 二、第二单元

这一单元学习运动的合成和分解以及平抛和斜抛物体的运动。把复杂的运动看成由两个或几个比较简单的分运动所组成，是这一单元中要学习的一种重要的分析研究问题的方法。

### (一) 运动的合成和分解

学生对轮船渡河的现象可能缺乏感性认识，可以先做一个简单的演示（详见本章实验指导）加以说明，然后再分析课本所讲的例子。

在讲解运动的合成和分解时，可以向学生说明分运动的性质决定了合运动的性质与合运动的轨迹。如果物体的两个分运动都是匀速直线运动，则合运动必定也是匀速直线运动，合运动的位移和分运动位移间的关系符合平行四边形法则。而且合运动的位移等于合运动的路程。如果物体的两个分运动，互成一定角度，其中一个是匀速直线运动，另一个是变速运动，则合运动是变速运动，而且运动轨迹必定是曲线。合运动的位移仍能用平行四边形法则进行计算，但是合运动位移并不等于合运动轨迹的长度——路程。

## (二) 平抛物体的运动

讲解平抛运动时，在演示实验（详见本章实验指导）和对课本图 4.10 的闪光照片进行分析的基础上，应使学生认识以下几点。

平抛运动是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。根据课本图 4.9 的实验，两个小球同时落地的事实，得出平抛运动在竖直方向上的分运动是自由落体运动的结论，而对课本图 4.10 的闪光照片进行分析的结果可以证明做平抛运动的小球在水平方向上的分运动是匀速直线运动。

为了加深学生对平抛运动的这两个分运动的认识，也可以再从理论上进行分析：如果小球在做平抛运动之前是在一个光滑的水平面上运动，则根据牛顿第一定律可知，小球将保持它的匀速直线运动状态不变，而当小球离开光滑水平面后，在水平方向上没有受到任何力（忽略空气阻力）的作用，于是它将继续保持做匀速直线运动。而在竖直方向上，由于小球不再受到水平面支持力的支托，它将在重力作用下产生加速度，做初速度等于零、加速度等于  $g$  的匀变速直线运动。

平抛运动的飞行时间和水平距离。在讨论平抛运动的公式时，应使学生注意，平抛物体的飞行时间  $t$  受到下降距离  $y$  的限制， $t = \sqrt{\frac{2y}{g}}$  譬如让两个身高不同的同学推铅球，假定他们推出的铅球初速度都在水平方向上，而且大小相等，显然他们能使铅球做平抛运动的时间是不相等的，高个同学推出的铅球做平抛运动的时间长些，推出的铅球飞行的水平距离也将大些。所以说，平抛运动的时间  $t$  决定于自由下落的距离  $y$ ，而水平距离  $x$  则跟平抛初速  $v_0$  和飞行的时间  $t$  都有关系。

平抛物体的落地速度。在讨论平抛物体的落地速度时，要让学生了解，落地速度是水平方向分速度和竖直方向分速度的合速度，这一速度的方向应在其运动轨迹这一点的切线方向上，如图 4.2 所示。因此是不可能垂直于地面的。如果落地速度  $v$  和水平方向夹角为  $\theta$ ，则

$$\tan \theta = \frac{v_y}{v_x} = \frac{\sqrt{2gy}}{v_0}$$

在求矢量的运算中，有的同学往往只注意求出矢量的大小，忘记了求出矢量的方向。这是初学者易犯的通病，可以结合平抛物体落地速度的计算，提醒他们注意这个问题。

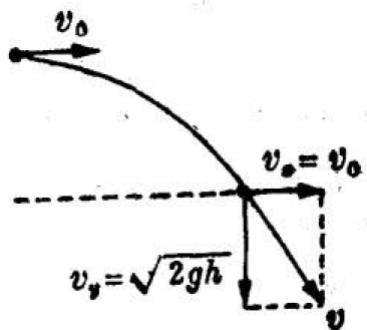


图 4.2

还应该使同学们了解，对于落地点的即时速度的讨论同样适用于平抛运动轨迹上的任

一点.

### (三) 斜抛物体的运动

在做好课本图 4.14 演示实验的基础上，使学生认识以下几点：

- 可以把斜抛运动看成是水平方向的匀速直线运动和竖直方向的上抛运动的合运动。
- 斜抛运动具有一定的对称性，这包括物体到达最高点的时间与从最高点落回到地面的时间相等，初速度的大小与落地时的末速度的大小相等，抛射角与到达落地点时末速度与水平面间的夹角相等。
- 做斜抛运动的物体在到达最高点以后的运动是平抛运动，因此平抛运动可以看成是斜抛运动的一部分。
- 不论是平抛运动还是斜抛运动，物体都具有跟重力方向成一角度的初速，并且是只在重力作用下的运动。因此它们的共同点表现为运动的加速度都等于重力加速度  $g$ ，运动中的速度变化，都发生在竖直方向上。

## 三、第三单元

这一单元主要讲匀速圆周运动，是本章的教学重点。

### (一) 描述匀速圆周运动快慢的几个物理量

要使学生认识用线速度来比较质点做匀速圆周运动的快慢时，质点运动的圆周半径必须相同的。而用周期和角速度来描述匀速圆周运动的快慢程度时，则不必考虑圆周的半径。这两种不同的描述方法，各有它们的长处，在以后的学习中将根据讨论问题的方便选用不同的描述方法。

课本练习五第 4 题提到的“每分钟的转数  $n$ ”同样可以描述匀速圆周运动的快慢程度。为了使学生更具体地理解这一点，可以比较指针式手表上三个指针的运动，秒针的转数最大， $n_1 = 1$  转/分，分针的转数  $n_2 = \frac{1}{60}$  转/分，而时针的转数最小， $n_3 = \frac{1}{720}$  转/分。因此秒针上的质点（除转轴外）做匀速圆周运动转动最快，而不论这些质点离开转轴距离的大小如何。

### (二) 匀速圆周运动是变速运动

在匀速圆周运动中，周期和角速度这两个量是不随时间而改变的。线速度则是随时间变化的。这一点有的同学不易接受，关键在于忽略了速度是个矢量。线速度的大小虽然不变，但它的方向却是时刻改变的。匀速圆周运动中的“匀速”，是指线速度的大小不变而言的。

### (三) 匀速圆周运动中的向心加速度

要使学生正确认识向心加速度公式的两种表达式  $a_n = v^2/r$  和  $a_n = \omega^2 r$  的物理意义，在利用这两个公式来比较两个做匀速圆周运动的质点的向心加速度的大小时，能搞清当线速度  $v$  相等时，向心加速度  $a_n$  跟运动半径  $r$  成反比；当角速度  $\omega$  相等时，向心加速度  $a_n$  跟运动半径  $r$  成正比。这一点可以结合自行车的传动装置来说明：跟踏脚板连在一起的链轮边缘质点的线速度  $v$  和飞轮边缘质点的线速度  $v$  是相等的，由于链轮的半径

大于飞轮的半径，因此链轮边缘质点的向心加速度小于飞轮边缘质点的向心加速度。而飞轮和自行车后轮是同轴装置的，它们的角速度  $\omega$  相等，所以后轮边缘质点的向心加速度大于飞轮边缘质点的向心加速度。

#### (四) 向心力

向心力的教学，要使学生认识如下几个问题：

- 在匀速圆周运动中必定有产生向心加速度的向心力。要强调指出，向心力是根据力的效果来命名的，而不是根据力的性质来命名的，因此，它不是重力、弹力、摩擦力等以外的特殊的力，而是做匀速圆周运动的质点受到的合外力，沿着半径指向圆心，它的方向时刻改变，因此产生向心加速度的力——向心力也是始终沿着半径指向圆心的，它是一个变力。
- 质点做匀速圆周运动的条件是：质点具有初速度  $v$ ，并且始终受到跟线速度方向垂直，大小等于  $mv^2/r$  的合外力（即向心力）的作用。

#### (五) 做匀速圆周运动物体的受力分析

确定物体所需的向心力的来源，是研究匀速圆周运动的关键。课本图 4.20、4.21、4.22、4.24 和 4.27 所分析的五个例子都是物体在水平面上做匀速圆周运动的情况，因此它们受力情况的共同点是：不论物体受几个力的作用，合力一定是在水平方向，沿着半径指向圆心的，这一合力就是使物体做圆周运动所需的向心力。在进行具体例子的分析时，要引导学生注意如下两点：

- 要判断圆心的位置和质点做圆周运动的半径，例如在北京的物体随地球自转做匀速圆周运动的圆心位置并不是地球的中心，而是从北京的纬度处作地轴的垂线的垂足  $O$ （图 4.3）。而这一垂线的长度就是在北京的物体做圆周运动的半径  $r = R \cos 40^\circ$ 。又如在圆锥摆的运动中（图 4.24），小球做匀速圆周运动的圆心位置在圆锥底面的中心，而不是悬绳上端的固定点，小球的运动半径是圆锥底面的半径，而不是悬绳的长度。
- 对物体进行受力情况分析时，要求作出受力图，然后根据牛顿第二定律来确定加速度和力的关系。

#### (六) 离心现象

在讲解离心运动时，要注意明确两点：

- 离心运动不是由于受到“离心力”的作用，离心运动是惯性的表现。
- 做匀速圆周运动的物体在合外力突然消失后，不是沿着半径方向“离心”而去的，而是沿着失去向心力的这一位置时的切线方向飞出。

因此对于课本图 4.28 应有如下的理解：

- 这是一个示意图，为了便于比较，把三种情况画在同一个图中。
- 图中离开圆心  $O$  距离最近的一个小球，是能够沿着原来的圆弧做匀速圆周运动的，所需的向心力能够得到满足，这是正常的情况。

离开圆心  $O$  距离稍远的一个小球，是表示由于向心力不足，这一比较小的向心力将不能使小球沿着原来的半径继续做圆周运动，在认为线速度  $v$  不变（由于惯性）的条件下

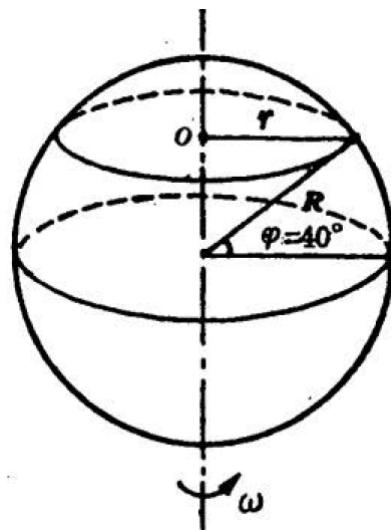


图 4.3

下，向心力  $F = mv^2/r$  减小后，从这一即时的情况来看，小球只能在曲率半径  $r$  较大的一小段圆弧上运动。这样，对原来的圆心位置来说，距离就远了。

离开圆心  $O$  最远的一个小球，是表示向心力突然消失，消失的位置是在圆心  $O$  的正上方，因此小球将沿着切线方向飞出。

后面的两种情况都是小球的离心运动。

### 第三节 实验指导

#### 一、演示实验

##### (一) 物体做曲线运动的条件

如图 4.4 所示，利用投影仪观察，使一小铁球从斜槽上滚下，小球将沿直线  $OO'$  运动，然后在垂直于  $OO'$  的方向上放一块条形磁铁，使小球再次从斜槽上滚下后，它将偏离原来的运动方向做曲线运动（演示时磁铁不要离  $OO'$  线太近，以免小铁球被磁铁吸住）。

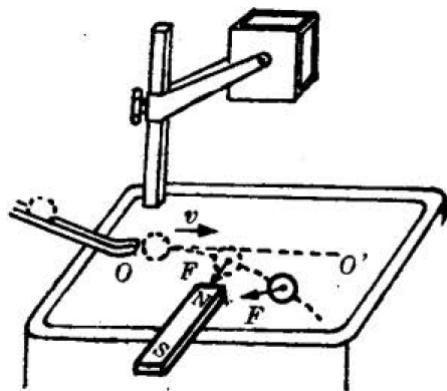


图 4.4

## (二) 运动的合成

把一个注满水的乒乓球用细线系住，细线的另一端用图钉固定在小黑板左侧的  $B$  点。放松细线，乒乓球静止在  $A$  点，如图 4.5 甲所示，在小黑板上经过  $B$  点斜向上（方向任意）画一直线  $BB'$ （注意使  $BB'$  的长度约等于  $AB$  间的距离）如图 4.5 乙所示。

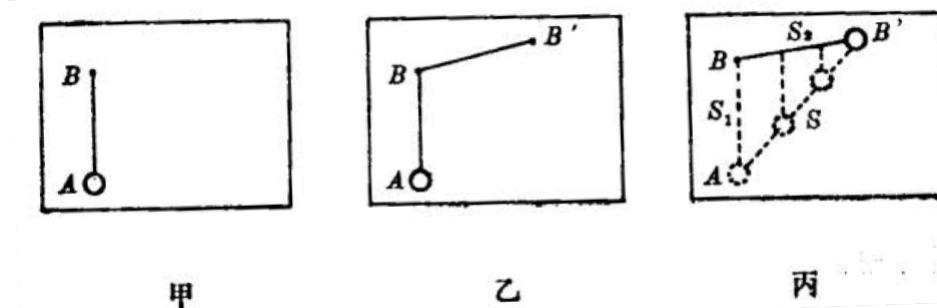


图 4.5

如果将食指勾在悬线的左侧，使手指沿着直线  $BB'$  移动，便可观察到乒乓球同时参与从  $A \rightarrow B$  以及从  $B \rightarrow B'$  两个不同方向的运动，而其实际运动轨迹的是沿着  $A$  点和  $B'$  点的连线方向，如图 4.5 丙所示，从而说明两个匀速直线运动的合运动仍是一个匀速直线运动，合运动位移和分运动位移的关系符合平行四边形法则。

## (三) 自由落体和平抛物体同时落地

课本图 4.9 的演示，为了使效果更好，可以使  $B$  球略小于  $A$  球，或者设法将  $B$  球下方的圆孔用锉刀略为锉大些，这样，当小锤打击弹性金属片把  $A$  球抛出的同时， $B$  球就立即自由下落，不致因碰到圆孔边缘而受到阻碍。

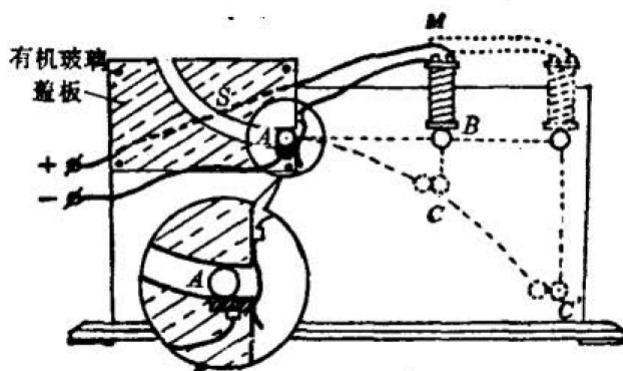


图 4.6

图 4.6 的装置可用来验证平抛运动在竖直方向的分运动是自由落体运动。图中  $M$  是电磁铁，调节它的位置，使得接通电路时被吸住的小铁球  $B$  的高度和由斜槽  $S$  上滚下做平抛运动的小球  $A$  离开槽口时的高度相同，在斜槽的槽口用弹簧铜丝做一个触断开关，利用铜丝的弹性使开关常闭，当小球  $A$  从槽口滚出时，使电路断开，因此原来被电磁铁  $M$  吸住的小球  $B$  同时被释放做自由落体运动，可以观察到  $A$ 、 $B$  两球在  $C$  处相碰。

如果将电磁铁  $M$  向右移过一小段距离，把  $B$  球仍吸住，重复实验，则  $A$ 、 $B$  两球相碰点  $C'$  在原来相碰点  $C$  的右下方。

如果使  $A$  球在斜槽上较高的位置释放（可用一块条形磁铁隔着有机玻璃盖板吸引  $A$  球进行控制），使它做平抛运动的水平初速增大，则可观察到  $A$ 、 $B$  两球的相遇点在  $C$  点的正上方，若使  $A$  球在斜槽上较低的位置释放，使它的水平初速减小，则两球的相遇点在  $C$  点的正下方。由此可表明平抛运动在竖直方向上的分运动是自由落体运动。

#### （四）斜抛物体的射程跟初速度和抛射角有关

在课本图 4.13 和图 4.14 的演示中要注意：

1. 喷水管的管口位置要和桌上的接水槽在同一水平面上。特别在改变喷射角时，要注意保持管口的水平高度不变。
2. 可以在喷水管的后面放置一块演示用的大量角器，并在水流溅落处立一个标记，以便用来观察当抛射角为  $45^\circ$  时射程最大以及证实抛射角互为余角时射程相等的结论。
3. 为了使水流初速度保持不变，有条件的情况下也可以把喷水管直接接在自来水龙头上。

#### （五）向心力跟哪些因素有关

课本图 4.20 的实验，可以用一  $k$  值较小的弹簧来代替弹簧秤。将弹簧的一端固定，另一端和尼龙线拴在一起，当橡皮塞做圆周运动时，可以看到弹簧的明显伸长，这样可以避免用弹簧秤时由于弹簧秤的转动而看不清示数的变化，但是，当转速增大、弹簧明显伸长时会使转动半径变大，因此在操作时要注意在增大转速的同时，握住笔杆的手必须适当地抬高，使半径基本上保持不变。这个演示只能粗略地定性说明向心力和角速度以及半径的关系。

课本图 4.21 的演示可用一个拴在绳端的小球（当作质点）来代替滑块，绳的另一端用一光滑的小环套在转轴上，给小球一个垂直于绳子方向的初速就可以观察到小球在水平面上做圆周运动。

如果用弹簧代替上述演示中的绳子，则可观察到当转速较大时，弹簧伸长较明显，当转速较小时，弹簧伸长得较少。

#### （六）配合课本习题的演示

课本 172 页第 10、11 题。如图 4.7 所示，将一圆弧形轨道固定在弹簧磅秤（或圆盘测力计）上面，将一铁球放在轨道底部，当球静止时，观察秤指针所指的位置为  $A$ （做出标记），使球从轨道的一侧滚下，以某一速度经最低点时，可观察到指针所指的位置将移到  $A'$ 。结合分析铁球在竖直平面内做圆周运动所需向心力的来源，说明滑雪者经过凹形坡底时，雪地对滑雪者的支持力将大于滑雪者的重量。

如图 4.8 所示，将上面实验的圆弧形轨道换成中部凸起的轨道，比较当球静止在坡顶时以及当它以某一速度经过坡顶时，指针偏转角度的变化。结合分析铁球在竖直平面内做圆周运动所需向心力的来源，说明汽车经过坡顶时，对路面的压力小于汽车的重量。

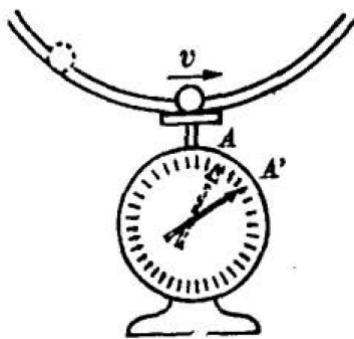


图 4.7

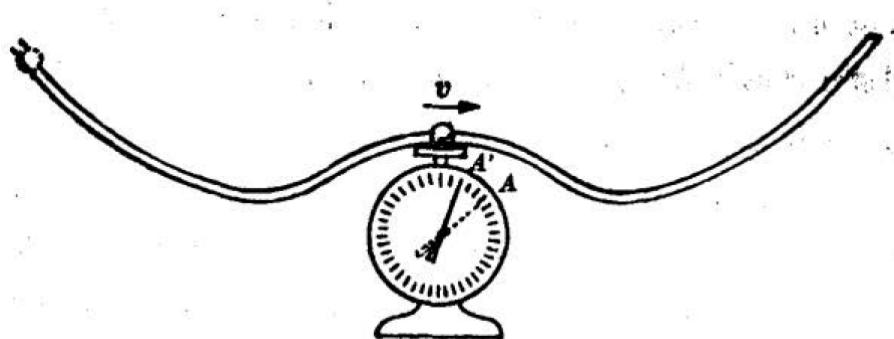


图 4.8

## 二、学生实验

### (一) 研究平抛物体的运动

做好这个实验的关键在于尽可能准确地描绘出平抛运动轨迹，为此要注意以下几点。

1. 课本图 10.12 中的斜槽应用水平仪进行调整，使得斜槽的下端平直部分保持水平。
2. 斜槽用夹具固定。小球滚下时不致碰到木板平面，但也不宜离木板过远，并且要使木板平面和小球下落的竖直面平行。在重复实验的过程中，要使木板跟斜槽的相对位置保持不变。
3. 把小球放在槽口，在钉在木板的白纸上确定好相当于小球球心的位置，这就是平抛运动轨迹的起点。这一点的确定对于整个平抛运动轨迹的描绘具有关键的意义。
4. 利用有孔的纸卡片确定小球的运动轨迹时，要先使小球从斜槽的不同位置处滚下，以选择一个适当的释放位置，使得小球运动的轨迹大致经过白纸的右下角，而不要偏在左侧或偏向上端，然后使小球在斜槽的这一位置处重复滚下几次，目测小球的运动轨迹的形状。实验时可把有孔的纸卡片放在目测的轨迹上，进行调整，以便比较顺利地描出轨迹。

在读取和处理实验数据时，要求取三位有效数字，并应给出当地的重力加速度的数值。在写实验报告时应附上小球的原始轨迹描绘图，并用跟数据表中相同的符号编号标出各点及其坐标。

在测出小球的初速度后，还可以让学生讨论以下问题：

在所描出的平抛运动轨迹上，截取一段包括抛出点  $O$  在内的轨迹，把这段轨迹在  $x$  轴上的投影分成四个等分，从分点  $x_1, x_2, x_3, x_4$  分别作  $x$  轴的垂线与轨迹交于  $a, b, c, d$  四点（图 4.9），经过这四点再分别作  $y$  轴的垂线.

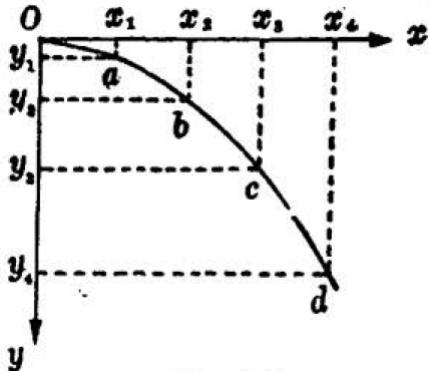


图 4.9

它们的垂足  $y_1, y_2, y_3, y_4$  在  $y$  轴上的截距之比应符合什么规律？实际测量一下看看是否符合这一规律？如果存在误差，试分析产生误差的主要原因是什么？

## （二）验证向心力公式

实验前先要让学生观察实验装置，要明确装置中的重锤  $A$  是研究对象，重锤是在水平面内做圆周运动，圆心在转轴上，圆半径就是横杆上从转轴到悬挂重锤的细绳之间的距离.

这个实验所用的器材虽然并不复杂，但是操作时需要一定的技巧. 因此要先指导学生练习用手指搓动转轴，掌握适当的快慢程度，使得重锤基本上能保持做匀速圆周运动，并且每转一周重锤  $A$  大致都能从指示器  $P$  的正上方通过. 然后再开始测量时间计算角速度.

分别改变重锤的质量  $m$ 、半径  $r$  和换用倔强系数不同的弹簧重复做上述实验时，还可以让学生思考以下几个问题：

1. 只改变重锤的质量  $m$  而使它做圆周运动的半径保持不变，实验时搓动转轴转动的快慢程度是否要改变？
2. 如果只要求改变运动半径  $r$ ，应该调节什么距离？实验时搓动转轴转动的快慢程度是否也需要改变？
3. 如果只换用原长相等而倔强系数不同的弹簧，而保持重锤质量和运动半径不变，实验时搓动转轴转动的快慢程度是否要改变？

## 三、课外实验活动

### （一）用尺测量玩具手枪子弹射出的速度

这个实验所用的测量工具只有一把尺（米尺），要求注意培养学生运用物理知识来解决实际问题的能力，可以先让他们思考应怎样进行测量，而不要先急于去看课本上介绍的原理.

在实际操作时应注意：

1. 用尺测量离地高度  $h$  时，应从枪口量到地面.
2. 发射子弹时枪管应保持水平，如果手头没有水准仪，可以先把玩具手枪大致固定起来，用细线挂一串钥匙作为重垂线挂在管口旁侧，再用三角板测量枪管和重垂线是否成  $90^\circ$  角.
3. 调节好枪管水平后，应把玩具手枪固定好，然后把重锤线移到枪口附近，把枪口（作为抛出点）在地面上的投影位置做下标记.
4. 怎样来找到子弹的落地点？可先试射一下，看看子弹大概的落地位置，然后在这里垫放一块深色的布（或深色的纸），在子弹上沾上一些白粉，再发射.

### （二）估测自行车受到的阻力

这是一个设计性的实验. 首先要求学生认真阅读课本 364 页这段文字，领会实验的目的要求，可由几个同学一起讨论研究，确定测量平均阻力的原理以及所用的方法和步骤，在确认原理是合理的，方法是可行的前提下，再进行实际测量.

实验方法如果把自行车从滑行到停止的过程看成是匀变速（匀减速）直线运动，设法测出加速度  $a$ ，又知道自行车和人的质量  $m$ ，则平均阻力  $f = ma$  就可以计算. 根据  $v_t = v_0 + at$ ，末速度  $v_t = 0$ ，时间  $t$  可以用手表测量，如果知道初速度  $v_0$ ，就可以求出加速度  $a$ .

怎样来确定自行车的初速度呢？车轮轮缘的线速度的大小是和车辆行驶速度相等的，而要知道轮缘的线速度  $v = \omega r$ ，则必须知道角速度  $\omega$  和车轮半径  $r$ . 车轮半径  $r$  可以用米尺测量，角速度  $= 2\pi/T = 2\pi n/60$ . 式中  $n$  是每分钟转数，可由每分钟内蹬踏车板的次数算出. 设用手表估测出每分钟蹬踏车板的次数为  $n_1$ （它跟链轮的转数相同），且设后轮每分钟的转数为  $n_2$ （它跟飞轮的转数相同）. 由于链条传动装置中轮缘的线速度相等，链轮和飞轮的每分钟转数和它们的半径成反比. 因此只要知道链轮的半径  $r_1$  和飞轮的半径  $r_2$ ，就有

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{r_2}{r_1}$$

由于在链条传动中，链轮和飞轮缘上齿的大小间距相等，因此轮缘上的齿数是跟半径成正比的，因此上式中半径的比可以用齿数的比来代替，而且数齿数比量半径更为简便也比较准确. 设链轮和飞轮的齿数分别为  $Z_1$  和  $Z_2$ ，则

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{Z_2}{Z_1}, \quad n_2 = \frac{Z_1}{Z_2} n_1$$

因此后轮轮缘的线速度为  $v = \omega r = 2\pi n_2 r / 60$ ，它也就是自行车的行驶速度.

可采用如下的步骤进行：

1. 先匀速地骑行自行车，用手表测出链轮每分钟的转数  $n_1$ .
2. 然后停止用力蹬踏脚板，同时看手表开始计时，尽量保持自行车在水平路面平直滑行，直到完全停止运动. 测出所经过的时间  $t$ .
3. 把自行车架好，数一下链轮的齿数  $Z_1$  和飞轮的齿数  $Z_2$ ，再用尺量一下后轮的半径  $r$ （用米做单位），再用大磅秤称一下自行车和你自己的质量，加在一起记作  $m$ （用千克做单位）. 根据前述原理和测得的就可算出自行车所受的平均阻力.

由于用力蹬踏脚板时所测量的链轮每分钟的转数  $n$  以及自行车停止运动所用的时间  $t$  都不可能十分精确，测得的平均阻力只是一个估测值，所以应引导学生把这个实验的重点放在如何综合应用所学过的力学知识来设计好这个实验上，上面所介绍的实验方法不是唯一的，可以让学生提出多种设计方案，进行实验试测。考虑到有些学生可能不会骑自行车，实际测量不一定要求每个学生都必须进行。

### (三) 验证向心力公式

这个实验是课本图 4.20 演示实验的继续，目的在于让学生自己动手粗略地验证向心力公式。

实验时可以先练习一下，使得基本上能掌握住使小石块在水平面内做匀速圆周运动的技巧，然后再进行计时，为了便于控制小石块的转动半径，可以事先在笔杆以下的尼龙线上裹上三小块胶布，每一块胶布间相距 2—3 厘米，在使小石块转动时，可以同时注意观察胶布的位置，如果使第一块胶布接近笔杆的下端，这表示转动半径较小，增大转速使得第二块胶布接近笔杆下端时，这表明转动半径已比原来的增加 2—3 厘米，而当进一步增大转速，使第三块胶布接近笔杆的下端时，表示转动半径最大，用这一方法也便于控制小石块以一选定的半径运动。

## 第四节 习题解答

### 一、练习一

- 汽车以恒定的速率 2 分钟绕广场行驶一周，汽车每行驶半周速度方向改变多少度？汽车每行驶 10 秒钟速度改变多少度？画出汽车在相隔 10 秒钟的两个位置处的速度矢量。

**解答：**如图 4.10 所示，汽车绕圆形广场每行驶半圈（例如由  $A$  驶到  $C$ ），速度方向的改变为  $180^\circ$ 。

匀速行驶的汽车 2 分钟绕广场一周，速度的方向改变  $360^\circ$ ，行驶 10 秒钟转过的角度为

$$\phi = \frac{10}{2 \times 60} \times 360^\circ = 30^\circ$$

如果汽车的初始位置为  $A$ ，10 秒后的位置为  $B$ ，它在  $A$ 、 $B$  两点的速度矢量图如图 4.11 所示。

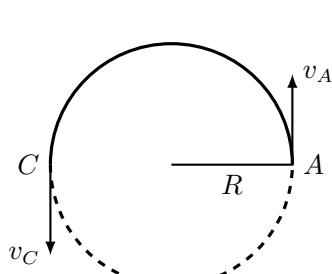


图 4.10

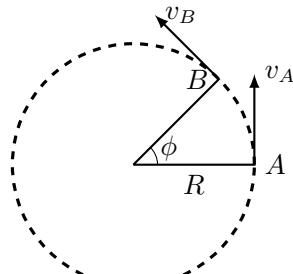


图 4.11

2. 举出两个实例，说明物体做曲线运动的条件。

**解答：**如图 4.12 所示，一个在水平面上运动着的小球，如果受到一个弧形挡板的阻挡，由于挡板对小球作用的弹力  $F$  的方向和小球的速度不在同一条直线上，所以小球将沿着弧形板做曲线运动。在水平桌面上做直线运动的钢珠，如果在它的运动路线旁边放上一根条形磁铁，钢珠就会在跟它的运动方向不在同一直线上的磁力作用下，做曲线运动。可见物体做曲线运动的条件是：物体具有初速度，同时受到一个跟速度方向成角度的合外力的作用。

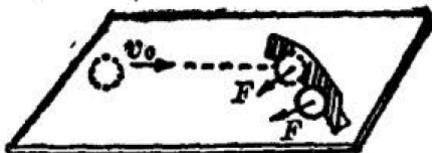


图 4.12

3. 某人骑着自行车以恒定的速率驶过一段弯路，自行车进行的是匀速运动还是变速运动？为什么？

**解答：**是变速运动。因为速度是矢量，匀速运动是指物体速度的大小和方向都不变的运动。而这一辆自行车虽然以恒定的速率行驶，但在弯路上速度的方向不断改变，所以自行车在弯路上行驶时不是匀速运动，而是变速运动。

## 二、练习二

1. 降落伞在下落一定时间以后的运动是匀速的，没风的时候某跳伞员着地的速度是 5.6m/s，现庄有风，风使他以 4.0m/s 的速度沿水平方向向东移动，他将以多大的速度着地？这个速度的方向怎样？

**解答：**设无风时跳伞员的着地速度为  $v_1$ ，风的作用使他获得向东移动的速度为  $v_2$ ，则跳伞员的着地速度  $v$  是  $v_1$  和  $v_2$  这两个速度的合速度，如图 4.13 所示。

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} = \sqrt{5.6^2 + 4.0^2} = 6.9 \text{ m/s}$$

设跳伞员着地时的合速度方向偏离竖直方向的角度为  $\alpha$ ，则

$$\tan \alpha = \frac{v_2}{v_1} = \frac{4.0}{5.6} = 0.7143 \quad \alpha = 35^\circ 32'$$

2. 炮筒与水平方向成  $60^\circ$  角，炮弹从炮口射出时的速度是 800m/s。这个速度在竖直方向和水平方向的分速度各是多大？

**解答：**如图 4.14 所示，炮弹速度的竖直分速度

$$v_y = v \sin 60^\circ = 800 \times \frac{\sqrt{3}}{2} = 693 \text{ m/s}$$

炮弹速度的水平分速度

$$v_x = v \cos 60^\circ = 800 \times \frac{1}{2} = 400 \text{ m/s}$$

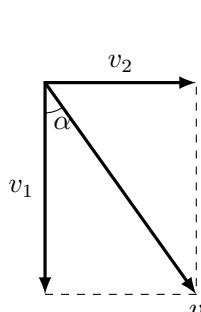


图 4.13

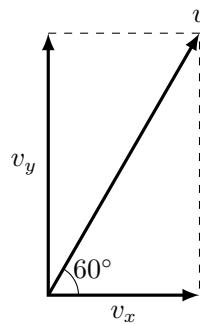


图 4.14

3. 小汽艇在静水中的速度是 12km/h, 河水的流速是 6.0km/h. 如果驾驶员向着垂直于河岸的方向驾驶, 小汽艇在河水中实际行驶的速度是多大? 方向怎样?

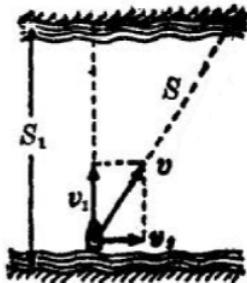


图 4.15

**解答:** 如图 4.15 所示, 设小汽艇在静水中的速度  $v_1 = 12\text{km/h}$ , 由于河水的流动使小汽艇获得沿河流方向的速度  $v_2 = 6.0\text{km/h}$ , 小汽艇在河水中实际行驶的速度  $v$  是  $v_1$  和  $v_2$  这两个速度的合速度.

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} = \sqrt{12^2 + 6^2} = 13.4\text{km/h}$$

设合速度  $v$  和河水流动方向所成角度为  $\alpha$ , 则

$$\tan \alpha = \frac{v_1}{v_2} = \frac{12}{6.0} = 2, \quad \alpha = 63^\circ 26'$$

### 三、练习三

下面各题都不考虑空气阻力.

1. 从一定高度水平抛出去的物体, 它在空中飞行的时间是由什么决定的? 抛射的水平距离又是由什么决定的?

**解答:** 由于平抛物体的运动是由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, 则所以它在空中飞行的时间是由下落的距离所决定, 抛射的水平距离由水平初速度和下落的距离决定.

2. 从同一高度以不同的速度水平抛出两个质量不同的石子, 下面的说法哪个对?

(a) 速度大的先着地;

- (b) 质量大的先着地；  
(c) 两个物体同时着地.

实际做一做，看你的判断是否正确.

**解答：**由于平抛物体的飞行时间只决定于下降的高度，而与物体抛出的初速度和质量的大小无关. 因此只有 (c) 说法是对的，即两个物体同时着地.

3. 从 1.6 米高的地方水平射出一颗子弹，初速度是 700m/s，求这颗子弹飞行的水平距离.

**解答：**由于下降的高度  $y = \frac{1}{2}gt^2$ . 所以飞行时间  $t = \sqrt{\frac{2y}{g}}$ . 子弹飞行的水平距离

$$x = v_0 t = v_0 \sqrt{\frac{2y}{g}} = 700 \times \sqrt{\frac{2 \times 1.6}{9.8}} = 400\text{m}$$

4. 一个小球从 1.0 米高的桌面上水平抛出，落到地面的位置离开桌子的边缘 2.4 米，小球离开桌子边缘时的初速度多大?

**解答：**小球做平抛运动的时间  $t$  可由公式  $y = \frac{1}{2}gt^2$  求出.

$$t = \sqrt{\frac{2y}{g}}$$

已知小球飞行的水平距离  $x = 2.4$  米. 所以小球的平抛初速度

$$v_0 = \frac{x}{t} = x \cdot \sqrt{\frac{g}{2y}} = 2.4 \times \sqrt{\frac{9.8}{2 \times 1.0}} = 5.3\text{m/s}$$

5. 从 15 米高的楼上以 1.0m/s 的速度水平扔出一物体，此物体落地时的速度多大？方向是否与地面垂直?

**解答：**物体做平抛运动落地时的速度  $v$  是平抛初速  $v_0$  和在竖直方向由于重力作用下落 15 米高度时所具有的竖直分速度  $v_y$  的合速度 (图 4.16).

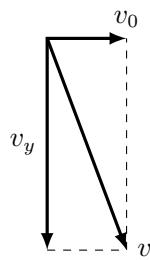


图 4.16

由于  $v_y^2 = 2gy$ ，所以物体落地时的合速度

$$v = \sqrt{v_0^2 + v_y^2} = \sqrt{v_0^2 + 2gy} = \sqrt{1.0^2 + 2 \times 9.8 \times 15} = 17.2\text{m/s}$$

方向不跟地面垂直，因为它具有水平分量.

## 四、练习四

下面各题都不考虑空气阻力.

- 在斜抛运动中, 射高  $Y$  和飞行时间  $T$  是由哪个分运动决定的?

**解答:** 斜抛运动可以看成是水平方向的匀速直线运动和竖直方向的上抛运动的合运动. 它的飞行时间  $T = 2v_y/g$ , 射高  $Y = \frac{v_y^2}{2g}$ . 所以射高和飞行时间都是由斜抛运动的竖直上抛分运动所决定.

- 在地面上以  $100\text{m/s}$  的初速度与水平面成  $60^\circ$  角向斜上方扔出一石子. 求石子在水平和竖直两个方向上的分速度、石子能够到达的高度、到达这一高度所用的时间和石子落地处到抛出处的距离.

**解答:** 石子做斜抛运动. 水平分速度

$$v_x = v_0 \cos \theta = 100 \times \frac{1}{2} = 50\text{m/s}$$

竖直分速度

$$v_y = v_0 \sin \theta = 100 \times 0.866 = 87\text{m/s}$$

石子能到达的高度

$$Y = \frac{v_0^2 \sin^2 \theta}{2g} = \frac{100^2 \times \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2}{2 \times 9.8} = 383\text{m}$$

石子到达最大高度所用时间

$$t = \frac{v_y}{g} = \frac{v_0 \sin \theta}{g} = \frac{100 \times \frac{\sqrt{3}}{2}}{9.8} = 8.84\text{s}$$

石子的飞行距离

$$X = v_0 \cos \theta \cdot 2t = 100 \times \frac{1}{2} \times 2 \times 8.84 = 884\text{m}$$

- 炮弹从炮筒中射出时的速度是  $1000\text{m/s}$ . 比较炮筒的仰角是  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  时, 炮弹的射高和射程有何不同.

**解答:** 炮弹作斜抛运动.

当仰角是  $\theta_1 = 30^\circ$  时,

$$\text{射高 } Y_1 = \frac{v_0^2 \sin^2 \theta_1}{2g} = \frac{(1000)^2 \times \left(\frac{1}{2}\right)^2}{2 \times 9.8} = 1.28 \times 10^4\text{m}$$

$$\text{射程 } X_1 = \frac{v_0^2 \sin 2\theta_1}{g} = \frac{(1000)^2 \times \frac{\sqrt{3}}{2}}{9.8} = 8.84 \times 10^4\text{m}$$

当仰角是  $\theta_2 = 45^\circ$  时,

$$\text{射高 } Y_2 = \frac{v_0^2 \sin^2 \theta_2}{2g} = \frac{(1000)^2 \times \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2}{2 \times 9.8} = 2.55 \times 10^4\text{m}$$

$$\text{射程 } X_2 = \frac{v_0^2 \sin 2\theta_2}{g} = \frac{(1000)^2 \times 1}{9.8} = 1.02 \times 10^5\text{m}$$

当仰角是  $\theta_3 = 60^\circ$  时,

$$\begin{aligned} \text{射高 } Y_3 &= \frac{v_0^2 \sin^2 \theta_3}{2g} = \frac{(1000)^2 \times \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2}{2 \times 9.8} = 3.83 \times 10^4 \text{m} \\ \text{射程 } X_3 &= \frac{v_0^2 \sin 2\theta_3}{g} = \frac{(1000)^2 \times \frac{\sqrt{3}}{2}}{9.8} = 8.84 \times 10^4 \text{m} \end{aligned}$$

由以上计算可知, 射高随仰角的增大而增大, 射程在仰角为  $45^\circ$  时有最大值, 而当仰角为  $30^\circ$  和  $60^\circ$  时, 射程是相等的.

4. 一个人向着与水平面成  $45^\circ$  角的前上方抛出一颗手榴弹. 测出手榴弹的射程是 65 米, 手榴弹抛出时的速度是多大? 射高是多高?

**解答:** 手榴弹的运动是斜抛运动, 忽略人的身长, 则

$$X = \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{g}$$

$$\begin{aligned} \text{初速 } v_0 &= \sqrt{\frac{Xg}{\sin 2\theta}} = \sqrt{\frac{65 \times 9.8}{\sin 90^\circ}} = 25.2 \text{m/s} \\ \text{射高 } Y &= \frac{v_0^2 \sin^2 \theta}{2g} = \frac{65 \times 9.8 \times \frac{1}{2}}{2 \times 9.8} = 16.3 \text{m/s} \end{aligned}$$

## 五、练习五

1. 对于做匀速圆周运动的物体, 下面的哪种说法对, 哪种说法不对?  
 (a) 速度不变;  
 (b) 速率不变;  
 (c) 角速度不变.

**解答:** (a) 不对. 因为速度是矢量. 线速度的方向时刻在改变, 始终沿着圆周的切线方向. (b)、(c) 对的.

2. 钟表上分针的周期和角速度是多大?

**解答:** 分针转一周的时间  $T = 1\text{h} = 3600\text{s}$ .

$$\text{角速度 } \omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2 \times 3.14}{3600} = 1.74 \times 10^{-3} \text{rad/s}$$

3. 半径 10 厘米的砂轮, 每 0.2 秒转一圈, 砂轮旋转的角速度是多大? 砂轮上离转轴不同距离的点, 其角速度是否相等? 线速度是否相等? 试求离转轴最远处的线速度.

**解答:** 由题意可知, 砂轮转动周期  $T = 0.2$  秒, 则砂轮旋转的角速度

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2 \times 3.14}{0.2} = 31.4 \text{rad/s}$$

砂轮上离轴不同距离的点的角速度是相等的, 线速度则不相等, 离转轴最远处, 即砂轮边缘的点的线速度为最大,

$$v = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2 \times 3.14 \times 0.10}{0.2} = 3.14 \text{m/s}$$

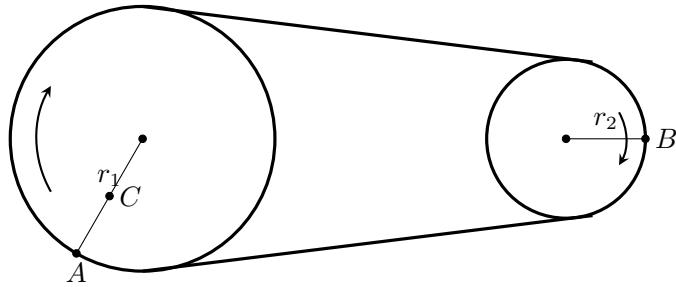


图 4.17

4. 在皮带传动（图 4.17）中，两皮带轮轮缘上的线速度是相等的。如果大轮的半径是  $r_1$ ，小轮的半径是  $r_2$ ，求大轮和小轮的角速度之比。如果大轮每分钟的转数为  $n_1$ ，小轮每分钟的转数  $n_2$  是多少？

解答：由于大、小两轮轮缘上的点的线速度相等， $v_1 = v_2$ ，即：

$$\omega_1 r_1 = \omega_2 r_2$$

大轮和小轮的角速度之比：

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_2}{r_1}$$

$$\because \omega = 2\pi n$$

$$\therefore \frac{n_1}{n_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_2}{r_1}$$

$$\text{小轮每分钟转数 } n_2 = \frac{r_1}{r_2} n_1.$$

## 六、练习六

1. 在图 4.17 所示的皮带传动装置中，两轮边缘上的  $A$  点和  $B$  点的向心加速度哪个大？为什么？大轮上  $A$  点和  $C$  点的向心加速度哪个大？为什么？

解答：由于两轮边缘上的  $A$  点和  $B$  的线速度  $v$  相等，可根据  $a_n = v^2/r$  式来进行比较。因为大轮半径  $r_A$  大于小轮半径  $r_B$ ，所以向心加速度  $a_B > a_A$ 。

由于  $A$  点和  $C$  点都是同一轮子上的点，它们的角速度  $\omega$  相等，根据  $a_n = \omega^2 r$  一式可以判断，因为半径  $r_A > r_C$ ，所以向心加速度  $a_A > a_C$ 。

2. 从  $a_n = v^2/r$  看， $a_n$  跟  $r$  成反比，从  $a_n = \omega^2 r$  看， $a_n$  跟  $r$  成正比。如果有人问你：“向心加速度的大小跟半径是成正比还是成反比？”应该怎样回答？

解答：任何物理量间的定量关系总是有条件的。在线速度  $v$  相同的条件下， $a_n$  跟  $r$  成反比；而在角速度  $\omega$  相同的条件下， $a_n$  跟  $r$  成正比。

3. 由于地球的自转，地球上的物体都有向心加速度，试回答：

(a) “在地球表面各处的向心加速度的方向都是指向地心的”，这种说法正确吗？为什么？

(b) 在赤道和极地附近的向心加速度哪个大？为什么？

(c) 在北京的物体由于地球自转而产生的向心加速度是多大（北京的纬度取  $40^\circ$ ，地球的半径取  $6.4 \times 10^8$  千米）？

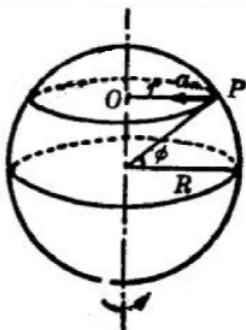


图 4.18

解答：

- (a) 不正确. 如图 4.18 所示, 在地球表面纬度为  $\phi$  的  $P$  处的物体, 它的向心加速度的方向是指向做圆周运动的圆心  $O$ , 而不是指向地心的.
- (b) 由于在赤道上的物体和极地附近的物体随地球自转做圆周运动的角速度都相等, 而做圆周运动的半径则是赤道大于极地附近, 根据  $a_n = \omega^2 r$ , 所以在赤道上的物体的向心加速度大.
- (c) 由图 4.18 可知,  $\phi = 40^\circ$ , 圆周半径  $r = R \cos \phi$ , 所以

$$a_n = \omega^2 r = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 R \cos \phi = \left(\frac{6.28}{86400}\right)^2 \times 6.4 \times 10^3 \times 10^3 \times \cos 40^\circ = 2.6 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

4. 飞机由俯冲转为拉起的一段轨迹可以看作一段圆弧 (图 4.19). 如果这段圆弧的半径  $r$  是 800 米, 飞机在圆弧最低点  $P$  的速率为 720km/h. 求飞机在  $P$  点的向心加速度是重力加速度的几倍. ( $g$  取  $10 \text{ m/s}^2$ )

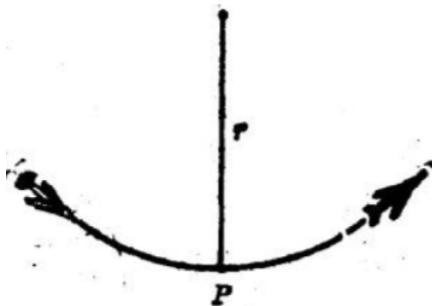


图 4.19

解答：飞机在圆弧最低点  $P$  的速率  $v = 720 \text{ km/h} = 200 \text{ m/s}$ . 则向心加速度

$$a_n = \frac{v^2}{r} = \frac{200^2}{800} = 50 \text{ m/s}^2$$

这时向心加速度是重力加速度的  $\frac{50}{10} = 5$  倍.

5. 一个物体做匀速圆周运动, 如果圆周的半径是  $r$ , 运动的周期是  $T$ , 试证明向心加速度  $a = 4\pi^2 r/T$ .

解答：向心加速度  $a = \omega^2 r$ , 而角速度  $\omega = 2\pi/T$ , 由二式中消去  $\omega$ , 即得

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

## 七、练习七

1. 下面的受力分析对吗？如果不对，说明错在哪里。
  - (a) 课本图 4.21 中做匀速圆周运动的物体受四个力的作用，这四个力是重力、支持力、绳的拉力和向心力；
  - (b) 课本图 4.22 中水平盘旋的飞机受到三个力的作用，这三个力是向心力、重力、升力。

**解答：**

- (a) 不对。课本图 4.21 中做匀速圆周运动的物体受三个力的作用，这三个力是重力、支持力和绳的拉力。其中重力和支持力大小相等，方向相反，互相抵消，使物体做匀速圆周运动所需的向心力是绳子的拉力。
  - (b) 不对。课本图 4.22 中水平盘旋的飞机只受到重力和升力这两个力的作用，这两个力不在同一直线上，它们在水平方向的合力是使飞机水平盘旋做圆周运动所需的向心力。

上面两则受力分析的共同错误是在物体所受的合外力之外又凭空增加了一个“向心力”。

2. 要使一个 3.5 千克的物体在半径是 2.0 米的圆周上以 4.0m/s 的速率运动，需要多大的向心力？

**解答：** 物体需要的向心力

$$F = m \frac{v^2}{r} = 3.5 \times \frac{4.0^2}{2.0} = 28\text{N}$$

3. 太阳的质量是  $1.98 \times 10^{30}$  千克，它离开银河系中心大约 3 万光年（1 光年 =  $9.46 \times 10^{12}$  千米），它以 250 千米/秒的速率绕着银河系中心转动，计算太阳绕银河系中心转动的向心力。

**解答：** 太阳绕银河系中心的运动可以看成是匀速圆周运动，已知圆半径  $r = 3 \times 10^4 \times 9.46 \times 10^{12} \text{ m}$ ,  $v = 250 \times 10^3 \text{ m/s}$ . 所以向心力

$$F = m \frac{v^2}{r} = 1.98 \times 10^{30} \times \frac{250^2 \times 10^6}{3 \times 10^4 \times 9.46 \times 10^{15}} = 4.36 \times 10^{20}\text{N}$$

4. 甲乙两球都做匀速圆周运动，甲球的质量是乙球的 3 倍，甲球在半径是 25 厘米的圆周上运动，乙球在半径是 16 厘米的圆周上运动，在一分钟内，甲球转了 30 次，乙球转了 75 次，试比较两球所受的向心力。

**解答：** 甲球的运动周期  $T_1 = \frac{60}{30} = 2\text{s}$ . 乙球的运动周期  $T_2 = \frac{60}{75} = \frac{4}{5}\text{s}$ . 设乙球质量为  $m_2$ , 则甲球质量  $m_1 = 3m_2$ .

根据  $F = m\omega^2 r = \frac{m4\pi^2 r}{T^2}$ ,

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{\frac{3m_2 \times 4\pi^2 \times 0.25}{2^2}}{\frac{m_2 \times 4\pi^2 \times 0.16}{(\frac{4}{5})^2}} = \frac{3}{4}$$

即甲球所受向心力是乙球的  $3/4$  倍.

5. 线的一端拴一重物，手握线的另一端使重物在水平面内做匀速圆周运动，当每分钟转数相同时，线长易断还是线短易断？为什么？线速度相同时又怎样？

**解答：**每分钟转数相同，角速度也相等，由  $F = m\omega^2 r$  可知 - 线长时  $r$  大，所需的向心力也大，所以线长容易断. 而如果线速度相同，由  $F = mv^2/r$  可知，线短时  $r$  小，所需的向心力也大，所以线短容易断.

## 八、练习八

1. 在课本图 4.24 的圆锥摆中，如果线和垂直方向成  $30^\circ$  角，小球在水平面内做每分钟 60 转的匀速圆周运动，线的长度是 0.28 米，计算重力加速度的值.

**解答：**由课本图 4.24 可知，使圆锥摆做匀速圆周运动的向心力  $F = mg \tan \theta$ ，把它代入向心力公式  $F = m\omega^2 r$ ，由于  $r = \ell \sin \theta$ ，所以  $\theta$  和  $\omega$  存在以下关系：

$$g \tan \theta = \omega^2 \ell \sin \theta$$

于是，重力加速度

$$g = \omega^2 \ell \cos \theta = \frac{4\pi^2}{T^2} \ell \cos \theta = \frac{4\pi^2 \times 0.28 \times \frac{\sqrt{3}}{2}}{1^2} = 9.56 \text{m/s}^2$$

2. 有人说：“图 4.24 中的圆锥摆少画了一个作用在小球上的力，这个力与  $F$  大小相等、方向相反，是  $F$  的平衡力，必须有这个力，小球才能处于平衡状态而不落向圆心.” 这种说法错在哪里？

**解答：**在圆锥摆中做匀速圆周运动的小球，必须受到向心力的作用. 正是在这个向心力的作用下产生的向心加速度，使速度的方向时刻发生变化，才能使小球沿着圆周运动，并不会使小球落向圆心，如果小球受的力是平衡的，它就不可能做匀速圆周运动了，物体受到的任何一个力，都不能没有施力物体. 在圆锥摆中，小球只受到两个力，一个是地球施给它的重力，另一个是悬绳施给它的拉力. 这两个力的合力，就是小球所受的向心力  $F$ . 此外，找不到任何其他物体能对小球施加一个跟  $F$  大小相等、方向相反的力.

3. 铁路转弯处圆弧的半径是 300 米，轨距是 1435 毫米，规定火车通过这里的速度是 72km/h，计算内、外铁轨的高度差.

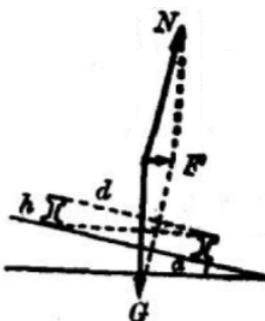


图 4.20

**解答：**如图 4.20 所示，火车在转弯时所需的向心力由火车的重力和轨道支持力的合力  $F$  所提供.

$$F = mg \tan \alpha = \frac{mv^2}{r}, \quad \tan \alpha = \frac{v^2}{gr}$$

由于轨道平面和水平面间的夹角  $\alpha$  一般较小, 可以近似地认为  $\tan \alpha \approx \sin \alpha = \frac{h}{d}$ . (式中  $b$  为内、外轨道的高度差,  $d$  为轨距) 代入上式, 得

$$\frac{h}{d} = \frac{v^2}{gr}$$

内、外轨道的高度差

$$h = \frac{dv^2}{gr} = \frac{1.435 \times \left( \frac{72 \times 10^3}{3600} \right)^2}{9.8 \times 300} = 0.195\text{m}$$

4. 一架滑翔机用  $180\text{km/h}$  的速率, 沿着半径为  $1200$  米的水平圆弧飞行, 计算机翼和水平线的夹角 (参阅课本图 4.22).

**解答：**滑翔机的速率  $v = 180\text{km/h} = 50\text{m/s}$ . 滑翔机在水平面上做圆周运动所需的向心力是由它的重力和机翼所产生的升力的合力所提供. 设机翼和水平面间的夹角为  $\theta$ , 则

$$mg \tan \theta = \frac{mv^2}{r}$$

$$\tan \theta = \frac{v^2}{gr} = \frac{50^2}{9.8 \times 1200} = 0.2126, \quad \theta = 12^\circ$$

## 九、习题

1. 汽艇在静水中的速度是  $10\text{km/h}$ , 渡河时向着垂直于河岸的方向匀速行驶. 现在河水的流速是  $3\text{km/h}$ , 河宽  $500$  米, 汽艇驶到对岸需要多长时间? 汽艇在河水中实际行驶的距离是多大?

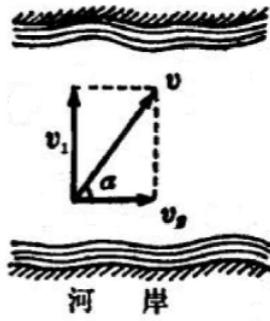


图 4.21

**解答：**如图 4.21 所示, 汽艇渡河时的运动是汽艇在静水中航行的运动和由于河水冲击使汽艇沿河水流动方向的运动的合运动, 汽艇驶到对岸需要的时间

$$t = \frac{s_1}{v_1} = \frac{0.5}{10} = 0.05\text{h} = 3\text{min}$$

在这段时间里汽艇由于河水的冲击，偏向下游的距离

$$s_2 = v_2 t = 3 \times 0.05 = 0.15 \text{ km} = 150 \text{ m}$$

汽艇在河水中实际行驶的距离

$$s = \sqrt{s_1^2 + s_2^2} = \sqrt{500^2 + 150^2} = 522 \text{ m}$$

2. 在 490 米的高空，以 240m/s 的速度水平飞行的轰炸机，追击一鱼雷艇，该艇正以 25m/s 的速度与飞机同方向行驶。试问，飞机应在鱼雷艇后面多远处投下炸弹，才能击中该艇？

**解答：**飞机上投下的炸弹可看成作平抛运动。因此炸弹飞行时间可根据公式  $h = \frac{1}{2}gt^2$  来计算。

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2 \times 490}{9.8}} = 10 \text{ s}$$

由于飞机与鱼雷艇同方向行驶，所以飞机相对于鱼雷艇的速度是  $v_1 - v_2 = 240 - 25 = 215 \text{ m/s}$ ，设飞机在鱼雷艇后面  $x$  处投弹方能击中鱼雷艇，于是

$$x = (v_1 - v_2)t = 215 \times 10 = 2.15 \times 10^3 \text{ m}$$

3. 两人传球，如果球从一个人手里到另一个人手里经过的时间是 2 秒，球到达的最高点离手有多高？（设两人的手等高）

**解答：**设两人间传球的运动是斜抛运动。由题意可知球做斜抛运动的飞行时间为 2 秒，则球从抛出到达最高点的时间为 1 秒，从最高点到达另一个人手中的时间也是 1 秒。由于球到达最高点以后的运动可看成是平抛运动，于是这一最高点离手的高度可按公式  $h = \frac{1}{2}gt^2$  计算。

$$h = \frac{1}{2}gt^2 = \frac{1}{2} \times 9.8 \times 1^2 = 4.9 \text{ m}$$

4. 从仰角是  $30^\circ$  的枪筒中射出的子弹，初速度是 600m/s。求子弹在轨迹最高点和落地点的速度各是多大。

**解答：**子弹飞行到它的轨迹最高点时，由于竖直方向的速度已减小到零，因此这时的速度就等于斜抛初速度的水平分速度

$$v_{\text{最高点}} = v_0 \cos \theta = 600 \times \frac{\sqrt{3}}{2} = 520 \text{ m/s}$$

子弹到达落地点时的速度的大小等于初速度的大小，即

$$v = v_0 = 600 \text{ m/s}$$

5. 伽利略曾说过：“仰角（即抛射角）比  $45^\circ$  增大或减小一个相等角度的抛体，其射程是相等的。”你能证明这个说法的正确性吗？

**解答：**斜抛运动的射程

$$X = v_x T = v_0 \cos \theta \times \frac{2v_0 \sin \theta}{g} = \frac{2v_0^2 \sin \theta \cos \theta}{g}$$

根据伽利略的说法，设两个斜抛运动的仰角分别为  $\alpha = 45^\circ + \theta$  和  $\beta = 45^\circ - \theta$ ，于是射程

$$X_1 = \frac{2v_0^2 \sin \alpha \cos \alpha}{g}, \quad X_2 = \frac{2v_0^2 \sin \beta \cos \beta}{g}$$

要证明  $X_1$  等于  $X_2$ ，只要证明  $\sin \alpha \cos \alpha$  等于  $\sin \beta \cos \beta$ 。由命题可知  $\alpha + \beta = 90^\circ$ ，于是：

$$\sin \alpha \cos \alpha = \sin(90^\circ - \beta) \cos(90^\circ - \beta) = \cos \beta \sin \beta$$

所以  $X_1 = X_2$ 。伽利略的说法是正确的。

6. 一个人站在地面上用枪瞄准树上的猴子（图 4.22），当子弹从枪口射出时，猴子闻声立即从树上竖直下落（初速度为零）。讨论一下，猴子能否避开子弹的射击。提示：斜

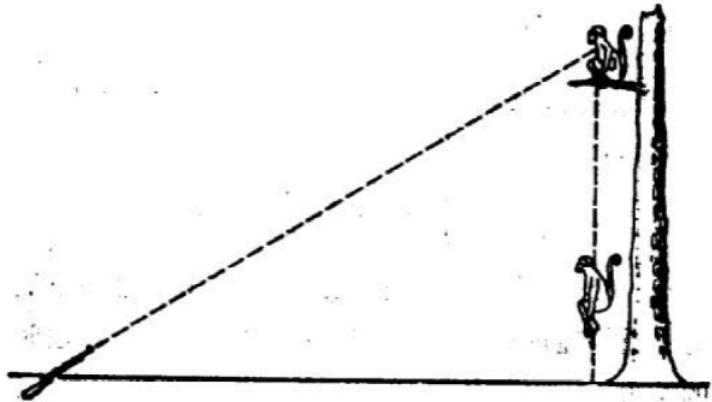


图 4.22

抛运动可以看作是物体沿初速度方向所做的匀速直线运动和在重力作用下的自由落体运动的合运动。

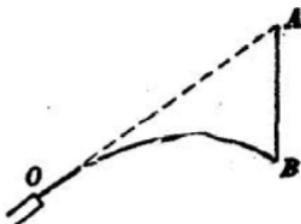


图 4.23

**解答：**如图 4.23 所示，猴子位于树上的  $A$  点，枪口  $O$  对准猴子。子弹射出后，如果不考虑重力的影响，它将沿着  $OA$  方向做匀速直线运动，命中  $A$  点。但是在重力作用下，子弹在沿  $OA$  方向作匀速直线运动的同时，还要在竖直方向上作自由落体运动。所以它在本应到达  $A$  点的这段时间里，只能到达  $A$  点正下方的  $B$  点。 $AB = s$  就是这段时间里自由落体下降的距离。由于猴子是在开枪的同时下落的，在同一时间里，它下降的距离也是  $s$ ，恰好到达  $B$  点，被子弹所击中。

7. 飞机从俯冲到拉起的一段轨迹是一段圆弧（参看图 4.19），如果飞机在这段弧上的速率是 540km/h，要使它在最低点时的向心加速度不超过  $5g$ ，圆弧的半径至少是多少米？( $g$  取  $10\text{m/s}^2$ ).

**解答：**根据向心加速度  $a_n = v^2/r$ , 飞机速率  $v = 540\text{km/h} = 150\text{m/s}$ , 则圆弧半径

$$r = \frac{v^2}{a_n} = \frac{150^2}{5g} = \frac{150^2}{5 \times 10} = 450\text{m}$$

8. 一个 35 千克的重物，系在 2.0 米长的悬绳下端，不断摆动。重物通过最低点时的速率是  $3.0\text{m/s}$ ，求这时绳对物体的拉力。

**解答：**重物的摆动可以看作是在竖直平面里的圆周运动的一部分。当重物经过圆周最低点时，受到的重力  $mg$  和绳子拉力  $T$  的合力应等于重物作圆周运动所需的向心力（图 4.24）。

$$T - mg = ma$$

于是，绳子拉力

$$T = mg + ma = m \left( g + \frac{v^2}{r} \right) = 35 \left( 9.8 + \frac{3.0^2}{2.0} \right) = 5.0 \times 10^2\text{N}$$

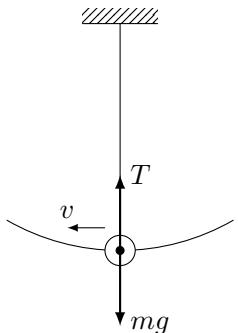


图 4.24

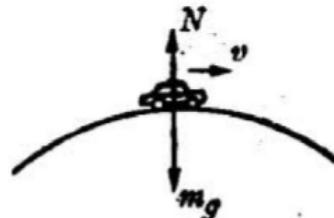


图 4.25

9. 略（课本已作解答）。

10. 一个滑雪者连同他的滑雪板质量共 70 千克，他滑到凹形的坡底时的速度是  $20\text{m/s}$ ，坡底的圆弧半径是 50 米，计算在坡底时雪地对滑雪板的支持力。

**解答：**滑雪者滑到凹形坡底时所需的向心力是由坡底对滑雪板的支持力  $N$  和滑雪者连同滑雪板的重力  $mg$  的合力所提供，

$$N - mg = ma$$

所以，坡底雪地的支持力

$$N = mg + ma = m \left( g + \frac{v^2}{r} \right) = 70 \left( 9.8 + \frac{20^2}{50} \right) = 1.2 \times 10^3\text{N}$$

11. 一辆 600 千克的汽车以  $10\text{m/s}$  的速度通过圆弧半径是 30 米的山坡顶点时，汽车受到哪几个力的作用？汽车对路面的压力是多大？

**解答：**汽车通过山坡顶点时受到重力  $mg$  和山坡顶点的支持力  $N$  的作用，这两个力的合力等于汽车在竖直平面里做圆周运动所需的向心力（图 4.25）。

$$mg - N = \frac{mv^2}{r}$$

$$N = m \left( g - \frac{v^2}{r} \right) = 600 \left( 9.8 - \frac{10^2}{30} \right) = 3.88 \times 10^3 \text{ N}$$

汽车对路面的压力也等于  $3.88 \times 10^3$  牛。

## 第五节 参考资料

### 一、对课本 170 页习题第 6 题提示的讨论

这是研究斜抛运动时常用的一种分析方法。可以这样来设想，如果不存在重力和其他任何力的作用，根据牛顿第一定律可知，物体将以斜抛时的初速度沿着抛出方向做匀速直线运动，又根据力的独立作用原理可知，对物体作用的任何一个力都要使物体产生加速度，若不计空气阻力的影响，则斜抛物体只受到重力的作用，重力使物体产生的加速度等于  $g$ ，从而使物体在竖直方向上发生速度的改变，在时间  $\Delta t$  内，物体的速度变化  $\Delta v = g\Delta t$ 。

投某一斜抛物体的初速度  $v_0 = 40 \text{ m/s}$ ，抛射角  $\theta = 30^\circ$ ， $g$  取  $10 \text{ m/s}^2$ ，则初速度的竖直分速度

$$v_y = v_0 \sin \theta = 40 \times \frac{1}{2} = 20 \text{ m/s}$$

物体上升到最大高度的时间

$$t = \frac{v_0 \sin \theta}{g} = \frac{20}{10} = 2 \text{ s}$$

飞行时间  $T = 2t = 2 \times 2 = 4 \text{ s}$ ，即物体抛出后运动 4 秒就落到地面。可以这样来想象，如果没有重力的作用，在 4 秒末物体将运动到哪里呢？从图 4.26 可以看出，物体如果以初速  $v_0$  做匀速直线运动，则 4 秒内的位移  $OD = v_0 t = 40 \times 4 = 160 \text{ m}$ 。从图中直角三角形  $ODH$  来看，对边  $DH = OD \sin \theta = 160 \times \frac{1}{2} = 80 \text{ m}$ ，即物体应在离地面 80 米高处的  $D$  点，然而事实上物体却在重力作用下落到了地面，因为根据自由落体运动可知

$$y = \frac{1}{2}gt^2 = \frac{1}{2} \times 10 \times 4^2 = 80 \text{ m}$$

这表明了在这 4 秒时间内，由于重力作用使物体下降的距离恰为 80 米，所以物体恰好落回到地面。

根据同样的道理，可以证明距离  $AE$ ， $BF$  和  $CG$  分别是在 1 秒内，2 秒内和 3 秒内由于重力的作用在竖直方向上下降的距离，显然， $AE : BF : CG : DH = 1 : 4 : 9 : 16$ ，这就说明了斜抛运动的确可以看成是物体沿初速度方向所做的匀速直线运动和在重力作用下的自由落体运动的合运动。

此外，可以算出每 1 秒内的速度改变量， $\Delta v = g\Delta t = 10 \times 1 = 10 \text{ m/s}$ ，而且  $\Delta v$  的方向都是竖直向下的。可以把从开始抛出时的初速度  $v_0$  经过 4 秒钟变化到落地点的速度  $v_H$  的过程用图 4.27 表示出来。

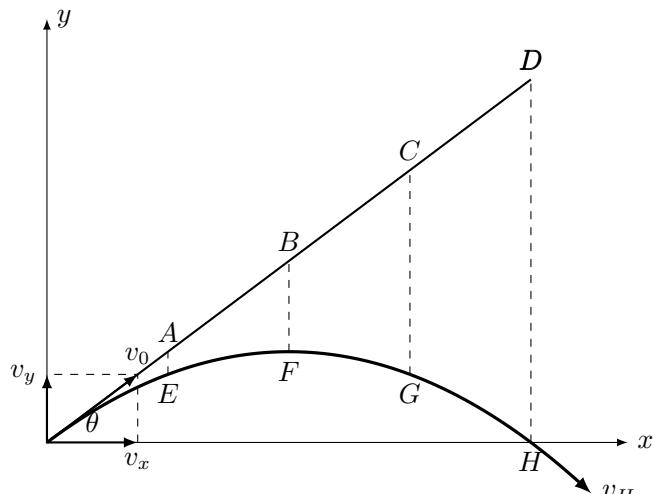


图 4.26

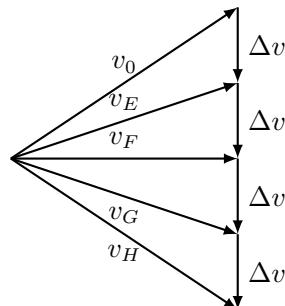


图 4.27

## 二、关于竖直平面内的圆周运动

在竖直平面内做圆周运动的物体，当一经过其轨迹的最低点时，如课本 171 页第 8 题所要讨论的情况，圆心的位置恰在物体的正上方，所以物体所需的向心力（也就是物体所受到的合外力）的方向，应是竖直向上的。但由于重力方向总是竖直向下的，在这一位置，重力不可能起向心力的作用，因此向心力必须由迫使物体做圆周运动的另一物体——悬绳来提供。如图 4.28 所示，如果物体的质量为  $m$ ，悬绳长  $\ell$ ，经过最低点时的速率为  $v$ ，则在这一瞬间，

$$T - mg = ma_n = \frac{mv^2}{\ell}$$

绳子拉力

$$T = m \left( g + \frac{v^2}{\ell} \right)$$

表明了在这一瞬间，绳子的拉力除了克服物体的重力外，还要承担由于提供物体做圆周运动所需的向心力，因此绳子的拉力必然比物体静止时要大，而且速率  $v$  越大，绳子拉力也越大。

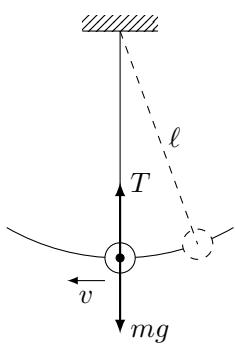


图 4.28

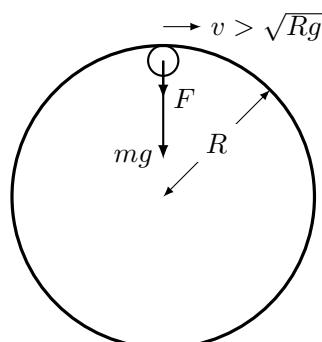


图 4.29

在铁路和公路的立体交叉口，汽车往往是由隧道通过道口，当汽车驶过隧道时，可以

看成是在竖直平面里做圆周运动。根据以上的分析，这时隧道底部路面受到的压力将大于汽车重量。

当物体经过竖直圆周的最高点时，如课本图 4.33 所讨论的情况，表明存在着一个最小速率  $v = \sqrt{Rg}$ ，式中  $R$  为圆半径。如果物体的速率  $v > \sqrt{Rg}$ ，则所需的向心力将大于物体所受的重力，这时，除了物体的重力全部用作向心力外，其不足的部分需要由圆环顶部提供，如图 4.29 所示，即，

$$\frac{mv^2}{R} = mg + F$$

于是圆环顶部所受的压力

$$F' = -F = -\left(\frac{mv^2}{R} - mg\right) = -\frac{mv^2}{R} + mg$$

式中负号表示圆环顶部所受压力的方向和  $F$  的方向相反。

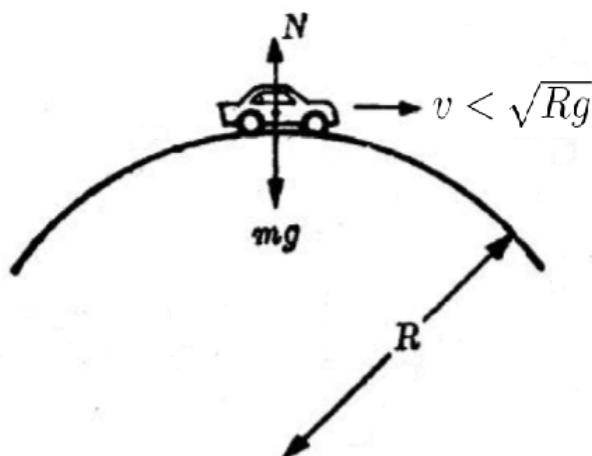


图 4.30

汽车驶过一般拱形桥的顶部时，也可以看成是在竖直平面里做圆周运动，如图 4.30 所示。在这一瞬间，圆心位置恰在汽车的正下方。汽车做圆周运动经过这一位置时所需的向心力的方向是竖直向下的，因此这一向心力就可以由汽车重力的一部分来提供，正因为重力被用去一部分产生向心加速度，因此作用于拱桥顶部的压力就减小了。即

$$mg - N = \frac{mv^2}{R}$$

桥顶所受的压力

$$F' = -N = -\left(mg - \frac{mv^2}{R}\right) = -mg + \frac{mv^2}{R}$$

式中负号表示拱桥顶所受的压力的方向和支持力  $N$  的方向相反。

在汽车的速率  $0 < v < \sqrt{Rg}$  的范围内，桥顶所受的压力将比汽车静止在桥顶时要小，随着汽车行驶速率的增大，桥顶所受的压力将减得更小，而当速率  $v = \sqrt{Rg}$  时，汽车做圆周运动所需的向心力增大到恰好等于汽车所受的重力，于是桥顶所受的压力将等于零。

如果速率  $v > \sqrt{Rg}$ , 则因为没有足够的向心力, 汽车就将飞离桥顶不再沿着拱桥做圆周运动.

可见以上讨论的虽然都是物体在竖直平面内做圆周运动经过最高点时的情况, 但还是有区别的, 课本 171 页第 9 题所讨论的是小球在圆弧的内侧运动, 因此小球的速率必须满足  $v \geq \sqrt{Rg}$  的条件, 才能使小球在竖直平面里做圆周运动, 圆环顶部只有在  $v > \sqrt{Rg}$  的情况下才会受到压力的作用, 而在汽车驶过拱形桥顶的例子中, 由于汽车在圆弧的外侧运动, 汽车的速率必须满足  $v \leq \sqrt{Rg}$  的条件, 才能使汽车沿着拱形桥面顶部的圆弧运动, 在  $0 < v < \sqrt{Rg}$  的速率范围内, 桥顶都将受到压力的作用.

竖直平面里的圆周运动一般不是匀速圆周运动. 物体在竖直平面里做圆周运动时, 由于物体所受重力的大小和方向都是恒定不变的, 因此, 当物体经过圆周上的各个不同位置时, 重力对物体做圆周运动所需的向心力是否能做出贡献、以及贡献的程度如何都是不相同的. 从课本 160 页的阅读材料的分析可知, 假定图 4.23 甲所示的曲线是竖直平面里的一段圆弧, 又假定图示中的力  $F$  就是物体所受的重力, 这样就可想象在这一位置上, 只有重力的一个垂直于圆弧切线方向的分力  $F_n$ , 才起了向心力——即产生向心加速度的作用, 而重力的另一个沿着圆弧切线方向的分力  $F_t$ , 则起了产生切向加速度的作用, 这样, 物体的线速度大小将会发生改变, 所以说一般说来, 在竖直平面里的圆周运动不是匀速圆周运动.

# 第五章 万有引力定律

---

<b>第一节 教学要求</b>	128
<b>第二节 教学建议</b>	129
一、第一单元	129
(一)开普勒定律	129
(二)万有引力定律的建立	130
(三)对万有引力定律公式的理解	131
(四)万有引力恒量	131
(五)卡文迪许实验	131
二、第二单元	132
(一)万有引力定律在天文学上的应用	132
(二)地球上物体重量的变化	132
(三)人造地球卫星	132
<b>第三节 实验指导</b>	133
一、演示实验	133
(一)天文挂图	133
(二)卡文迪许扭秤实验模型	133
(三)挂图——人造地球卫星、宇宙飞船	133
<b>第四节 习题解答</b>	134
一、练习一	134
二、练习二	135
三、练习三	136
四、练习四	137
五、习题	138
<b>第五节 参考资料</b>	141
一、太阳系中的最大和最小	141
二、开普勒定律	141
三、万有引力定律建立的历史进程	142
四、卡文迪许	142
五、三种宇宙速度	143
(一)第一宇宙速度	143
(二)第二宇宙速度	143
(三)第三宇宙速度	143
六、不同高度上卫星的环绕速度	144

七、五个国家第一颗卫星比较 . . . . .	144
八、我国发射的十七颗卫星简况 . . . . .	145

---

## 第一节 教学要求

万有引力定律的发现，是人类在认识自然规律方面取得的一个重大成果，对人类文化历史的发展有重要意义。万有引力定律在研究天体的运动和人造地球卫星等方面有着重要的应用。鉴于这一规律的重要，把它单独列为一章，使内容集中，中心突出。

这一章的教学要求是：

1. 了解开普勒三定律，掌握万有引力定律。
2. 了解万有引力定律在天文学上的应用，了解地球上物体的重量变化的原因。
3. 了解有关人造卫星的知识，会推导第一宇宙速度。

下面对这一章的教学内容作些具体说明。

为讲解万有引力定律的建立作准备，第一节先介绍行星的运动，关于人类对行星运动规律的认识过程，只要求学生了解个梗概，知道开普勒三定律是在前人长期观察研究的基础上总结出来的，这一节的重点是讲解开普勒三定律，使学生对定律的内容有所了解。学生在学习本章时，还不具备椭圆的知识，教学中需要对椭圆的焦点、半长轴作简单的介绍。

万有引力定律的教学，主要是让学生知道牛顿如何在开普勒三定律的基础上推导出万有引力定律的思路。在介绍牛顿建立万有引力定律之前，提到了胡克等人猜想到引力与距离的平方成反比，是为了说明万有引力定律的建立经历了一个过程，不是只靠个别天才人物的灵感创造的。引力与太阳质量的正比关系，可以直接给出，不要求作进一步的讨论。地球对月球的吸引力与地面物体所受的重力是同一种性质的力，让学生自己通过练习计算得出，以获得较深刻的印象。如果学生对这个题目的推理过程不很理解，也可以作些必要的引导和说明。

万有引力定律揭示了支配天体运动的规律，把地上的运动和天上的运动统一起来，打破了以往人们对天体运动的神秘感，增强了人们认识自然的信心，讲述万有引力定律，应该使学生对此有所认识。

卡文迪许实验是历史上的著名实验，它测定了万有引力恒量的值。鉴于这个实验的重要，单独作为一节来讲述。这个实验，不要求演示，通过介绍这个实验，使学生认识这个实验的重要作用，领会前人是怎样进行巧妙的设计来测出万有引力恒量值的，启发他们进一步认识培养和训练灵活运用知识能力的重要性。

列举几个物体间引力大小的例子，是为了说明一般物体间的引力非常小，而天体之间的引力非常大。正是这个巨大的引力支配着天体的运动。因而万有引力定律主要用于研究天体的运动。

天体质量的计算，说明应用万有引力定律和圆周运动的知识，可以确定无法直接测定的天体质量。在天文学上，太阳、地球等天体的质量就是根据行星或卫星的轨道半径和周期来求得的。海王星、冥王星的发现，说明万有引力定律不仅能对观察到的天体运动作出解释，而且能预言尚未观察到的天体的存在。这是理论指导实践的典型事例。

关于人造地球卫星的教学，重点是讲述发射人造卫星的原理，得出第一宇宙速度后，要指出卫星进入轨道的水平速度大于  $7.9\text{km/s}$ ，小于  $11.2\text{km/s}$  时，卫星绕地球运动的轨道将不是圆，而是椭圆，进而说明速度增大到  $11.2\text{km/s}$  后，不再绕地球运行，而成为围绕太阳运动的一颗行星。至于轨道为什么成为椭圆，限于学生的知识水平，中学阶段不能讲解。对于第二宇宙速度和第三宇宙速度，只要求简单介绍，使学生知道它们的意义就行了。

这一章的习题大多是综合性的，灵活性也有所提高，要注意向学生讲明解决这类问题的思路，以培养他们灵活运用知识，逐步提高解题能力。

## 第二节 教学建议

本章内容是按照人类对万有引力定律的认识过程，围绕运动和力的关系而逐步展开的。

学习本章内容是对前几章知识的综合和提高，在教学中应着重培养学生综合运用新旧知识对问题进行推理和分析的能力。此外，引导学生体会建立万有引力定律过程中所体现的科学方法，以及激发学生对未知世界的探索精神和科学的想象力，也是本章教学中不可忽视的方面。

本章分为两个单元，第一单元包括第一至第三节，概括地介绍了万有引力定律建立的历史进程，其中包括对引力恒量的测定。第二单元包括第四至第六节，介绍了万有引力定律的某些应用。

### 一、第一单元

万有引力定律的建立过程，对于已确立的定律、新的假说、理论推导和实验观测之间如何相互影响和补充，提供了一个很好的范例。因此本单元的教学可以按产生这一定律的历史背景、定律的建立和定律的实验验证这三个层次来展开，这样可以使学生对这一理论获得一个整体的认识，从而体会到具有突破性的重大物理理论的建立，并不是偶然的，它反映了人类对自然界的认识不断深化和完善的过程。

#### (一) 开普勒定律

第一节的重点是介绍开普勒三定律，讲述时可指出，开普勒定律是一种描述性的经验定律。开普勒定律描述了行星运动的规律，但没有提出和解决行星为什么这样运动的问题，这个重要的问题是牛顿在他的运动定律的基础上解决的。

鉴于学生在学习本节时还没学过椭圆知识，因此可结合课本图 5.2 作简单解释。教学中应当指出该图表示的行星椭圆轨道是一个十分夸张的示意图，事实上大部分行星的椭圆轨道都十分接近于圆形，因此可对开普勒第一、第二定律作近似处理，即认为行星以太阳为圆心作匀速圆周运动，而第三定律中椭圆的半长轴可以当作圆形轨道的半径  $R$ 。应使学生明确本章所有对天体运动的分析计算都是在上述近似处理的基础上用匀速圆周运动的动力学方法进行的。

在说明开普勒第三定律中  $k$  值是一个与行星无关的恒量时，可指出  $k$  值只与行星所

环绕的那个天体有关，至于为什么会这样，以后将会作进一步深入讨论。最后可将练习一的第1题作为课堂练习，让不同小组的同学分别算出各行星的 $k$ 值加以比较。通过这一练习学生对太阳系中的 $k$ 值与各行星无关便有了具体认识。对计算结果中 $k$ 值的差异可简单指出这是由于表中原始数据不太精确（仅三位有效数字），而且开普勒第三定律本身也是近似的定律。（见参考资料2）

## （二）万有引力定律的建立

第二节是全章的重点也是教学中的一个难点。通过本节学习要使学生认识牛顿所建立的万有引力定律不仅解决了行星运动的起因，而且揭示了自然界物体间普遍存在的一种基本相互作用。为此，教学中可围绕地和天统一这个中心突出点：第一，牛顿如何将天体运动规律（开普勒第三定律）和在地球上得出的力学规律联系起来，进行演绎，从而导出平方反比定律的。分析中只需指出引力还与太阳质量 $M$ 成正比这一结论，不必对常数 $k$ 和太阳质量 $M$ 的关系作进一步讨论。第二，牛顿如何推广平方反比定律，将天体间的引力和地面上的重力统一起来，使之成为一条宇宙万物间的普适物理定律。教材中对后一点的陈述较简练，并在练习二中设计了一道题，引导学生通过推导和计算来理解这段陈述。教学中可将此题（练习二4）作为课堂练习导学生边练习边分析。练习时，可根据保持月球在其轨道上运动的力也就是把地面上的物体放在那个位置所受到的重力这一思路，画出示意图来帮助学生分析。

在平方反比定律的推广中，要将 $g$ 和 $a_R$ 加以比较，把两种不同运动形式的加速度联系在一起，认为它们出自同一性质的力，学生往往感到不易理解，这主要还是由于学生仍习惯于从运动表现形式上来比较物体的受力情况，错误地认为物体运动形式不相同，它所受的力也一定不相同，而对物体运动方式是由受力和初始运动状态所共同决定的这一点，缺乏足够的认识。要让学生认识地面上的苹果和天空中的月亮虽然受到同一性质的力——地球引力的作用，但并不因此决定它们有相同的运动形式。苹果的初速度为零，它便自由下落；如果给它一个水平方向的初速度，它就作平抛运动；如果这个水平速度越来越大，苹果也有可能绕着地表作匀速圆周运动。在练习二4中适当点明这一点，不仅能帮助学生明确牛顿推广平方反比定律的合理性，而且也为后面“人造卫星”一节的教学作了一定的准备。

为了培养学生演绎推理的思维能力，进行上述课堂练习时，教师要将以下三个层次交代清楚，即：

1. 提出假设：牛顿设想使月球围绕地球运行的力和地面上的重力属于同一性质的力，都来自地球引力；
2. 根据假设进行演绎推导：练习二的1、2、3；
3. 用已知的观察数据验证推导的结论，从而证实假设是否成立：练习二的4、5。

在归纳时，教师可指出这种研究方法与第二章第十节阅读材料中所介绍的伽利略研究匀变速运动的方法是一致的，从而引导学生对这一物理学基本研究方法有更深一步的体会。

### (三) 对万有引力定律公式的理解

引入万有引力定律公式后要引导学生认识以下两点：

第一，平方反比定律公式的形式是学生在学习物理中第一次遇到，在以后的学习中还要接触，可引导学生注意这一公式在数学形式上的特点，并点明这种与距离平方成反比的数学形式反映了自然界物质相互作用所遵循的一种重要方式。此外必须明确对两个相距不太远的非球形物体，不可简单地把两物中心间距作为  $R$  代入公式来计算，这样只能作出粗略的估算。

第二，在说明引力与两个物体质量的乘积成正比时，要指出两个不接触物体间的相互引力作用也是服从牛顿第三定律的，即使很大质量和很小质量之间的相互吸引力也是大小相等的。这一点似乎与学生的普通常识相矛盾，由于学生一般遇到的都是卫星绕行星、行星绕恒星、地球表面物体自由下落之类的问题，所以往往容易产生似乎只是质量大的物体吸引质量小的物体，或者质量大的物体对质量小的物体的引力大的错误观念，为了帮助学生理解这一点，可将练习二中的 1、2 作为课堂讨论题进行分析，并且举潮汐为例说明不仅地球吸引月球，而且月球也吸引地球，潮汐就是质量小的物体也吸引质量大的物体的具体例证。

### (四) 万有引力恒量

$G$  是学生接触到的不多几个具有重要地位的物理学普适恒量之一，要向学生指出， $G$  作为万有引力定律中的比例常数，不能单纯从数学角度去理解，要充分认识它所表征的物理意义。要使学生理解比例常数是在描述某种物理规律时经常出现的，各个常数有其特定的物理意义。让学生回忆一下过去有比例常数的公式，如第一章中的胡克定律  $f = kx$  中的  $k$ ，表示某种材料在弹性限度内的力学性质，因材料而异，不带普适性。而  $G$  表征质点间引力作用的性质，它的数值等于两个质量各为 1 千克的质点相距 1 米的相互吸引力，是适用于任何物体的普适恒量。以上这些比例常数都有单位，单位由相关物理量决定。可以请学生自己确定一下  $G$  的单位。其次要注意请学生对  $G$  的数值非常小有个感性认识，防止学生产生一种错误观念：诸如认为固体之所以成形，主要是由于物质颗粒间的万有引力使它们结合在一起等，本章中许多数据用指数表示，并出现了不少指数运算，为此可简单向学生介绍一下什么是数量级和怎样进行数量级的估算。可结合本节教材中最后一段请学生自己估算一下几种不同情况下引力的数量级，从而对一般物体之间和天体之间引力大小的巨大差异有一个鲜明的认识。并建议用以下的板图（或投影片）形象化地表示，也可要求学生自己画在笔记本上，这比只用文字表示更易留下较深的印象。

### (五) 卡文迪许实验

在介绍卡文迪许实验装置时，可绘制扭秤装置俯视图，也可做一个扭秤模型，说明扭秤装置中的  $T$  形架增大了引力  $F$  的力臂，从而使石英细丝在  $m$ 、 $m'$  两球间微小的引力作用下产生一定的扭转形变，而  $T$  形架上的小镜又利用光的反射定律把这一微弱的形变效应放大，加大标尺与小镜间距离又能增大标尺上光点的偏转距离。在此可提醒学生回忆一下第 14 页阅读材料：“显示微小形变的装置”。正是这种“三次放大”的作用，扭秤才能较

准确的测定微小的作用力，例如，现代形式的卡文迪许装置能测出的引力约为  $6 \times 10^{-10}$  牛，一根人发的重量是它的一万倍。这类利用“光杠杆”作用的扭秤装置，是所有机械装置中最灵敏的装置之一。

两个物体	引 力 的 数量级	相 当 于
相距 1 米的两个 1 千克物体	$10^{-10}$ N	一粒砂子重量的 1 千万分之一或一根头发重量的十万分之一
相距 10 厘米的两个 100 克苹果	$10^{-8}$ N	一粒砂子重量的 10 万分之一
相距 1 米的两个成人	$10^{-7}$ N	一粒砂子重量的万分之一
相距 100 米的两艘万吨轮	$10^0$ N	两只鸡蛋的重量
相距 $4 \times 10^8$ 米的地球和月球	$10^{20}$ N	拉断钢索
相距 $10^{11}$ 米的太阳和地球	$10^{22}$ N	可将直径为几千米的钢柱拉断

## 二、第二单元

本单元运用的公式及相应的物理量较多，问题的综合程度和灵活性又较前一章有所提高，学生往往不注意作有条理的分析而惯于套用现成公式，单纯作公式代换，并易犯单位和运算的错误，因此在教学过程中需注意帮助学生掌握综合运用万有引力定律和匀速圆周运动的动力学方法分析具体问题的基本思路。有关单位统一、指数运算等也要注意作出示范。

### (一) 万有引力定律在天文学上的应用

在引入“天体质量算”这一课题时，可先提出能不能用简单的实验方法直接测定地球或太阳的质量的问题，启发学生思考，并引导他们自己用万有引力定律和圆周运动的知识，一步步导出计算天体质量的公式。然后指出，计算某天体质量时只需知道围绕该天体运行的行星（或卫星）的轨道半径  $R$  和周期  $T$ ，因这两个量是可以测定的。

### (二) 地球上物体重量的变化

通过本节学习应使学生了解影响地球上物体重量变化的三个因素：纬度、离地高度和地质结构，其中纬度（即地理位置）的变化是主要因素，关键是使学生明确由于地球的自转，重力仅是引力的一个分力，而且引力本身又从两极到赤道逐渐变小，此外应向学生指出课本图 5.4 仅仅是一个示意图，地球的椭球状以及向心力相对于引力的大小都是夸大的，引力和重力之间的夹角也是极小的。

本节教学中还有必要向学生指出处理某一物理量的变与不变是相对的，必须根据所研究问题的要求来决定，由于地球上的  $g$  随纬度、高度变化的相对数值很小，在一般计算中并不考虑  $g$  的变化，而将它作为常数处理。

### (三) 人造地球卫星

由于人造卫星问题的综合性较强，所涉及的概念较多，学生往往搞不清其中的关系，常犯的错误是把卫星绕地球运行的速率和第一宇宙速度（环绕速度）相混淆。应该使学生

明确：卫星绕地运行速率的表示式  $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$ ，对所有在圆形轨道上的地球卫星普遍适用， $v$  的大小随  $r$  而改变。而环绕速度表示式  $v = \sqrt{gR_{\text{地}}}$  仅适用于在近地圆形轨道上运行的卫星，式中  $g = 9.8 \text{m/s}^2$ ，环绕速度的值为  $7.9 \text{km/s}$ ，是个定值。

根据计算式  $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$ ，离地越远的卫星， $r$  越大， $v$  越小。学生往往感到这一结论与课本图 5.6 中卫星进入轨道的水平速度越大，轨道偏离地球越远的情况相矛盾，应该使学生认识，卫星在椭圆轨道上运行时，它在各点的运动速度是不同的。根据开普勒第二定律，卫星在近地点速度大，在远地点速度小，在轨道上的平均速度也比在近地点的速度小，卫星进入轨道的水平速度，只是卫星在近地点的速度，并不能反映出它在椭圆轨道上各点的实际速度。根据公式  $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$ ，可以用练习三 1 的方法，以卫星在近地点和远地点到地心距离的平均值作为平均轨道半径，近似地求出卫星在轨道上的平均运行速度。

教学中也可将练习四 3 作为课堂讨论练习题，通过对这一问题的具体分析，进一步引导学生明确以上几点，在解答该题时学生往往会将  $2\pi R$ ，除以周期 80 分钟，得出运行速率  $v \approx 8.4 \text{km/s}$ ，又根据这一速率大于  $7.9 \text{km/s}$ ，便断定可发射这样一颗卫星，学生之所以会得出这错误结论，是由于不明确卫星的  $T$ 、 $r$  和  $v$  之间有着确定的关系，因而错误地将  $R_{\text{地}}$  作为轨道半径  $r$  来求运行速率  $v$ 。其次又将运行速率错误地与进入轨道的最低水平速率混同起来。遇到这类错误，可将它写在黑板上让学生共同来分析产生错误的原因。

关于第二、第三宇宙速度，只需指出只有当卫星获得足够大的速度时它才能摆脱地球，甚至太阳的引力羁绊，而不必作其他补充。

卫星中的超重、失重问题，主要抓住加速度向上还是向下这个关键进行分析。对卫星在轨道上的失重情况，应使学生理解此处所谓向下的加速度就是指向地心的向心加速度。

### 第三节 实验指导

#### 一、演示实验

##### (一) 天文挂图

太阳系八大行星围绕太阳运动的示意图，以及八大行星大小比较示意图，使学生对太阳系的结构有定性的形象了解。

##### (二) 卡文迪许扭秤实验模型

可根据课本图 5.3 的卡文迪许扭秤实验示意图，自制模型，使学生了解扭秤装置的构造原理，以及如何利用光杠杆的放大作用，读出石英丝的微小扭转形变。同时可以画出俯视示意图（图 5.1）。模型中射到平面镜  $M$  上的光是从平行光管  $S$  射出的，反射光点投到圆弧形刻度盘上。

##### (三) 挂图——人造地球卫星、宇宙飞船

目的在于使学生了解人造地球卫星和宇宙飞船在轨道上运行的原理，以及通讯卫星为什么可以实现全球电视转播的原理。

有条件的可以播放人造地球卫星的发射、空间站、宇宙飞船的运行（包括宇航员的失

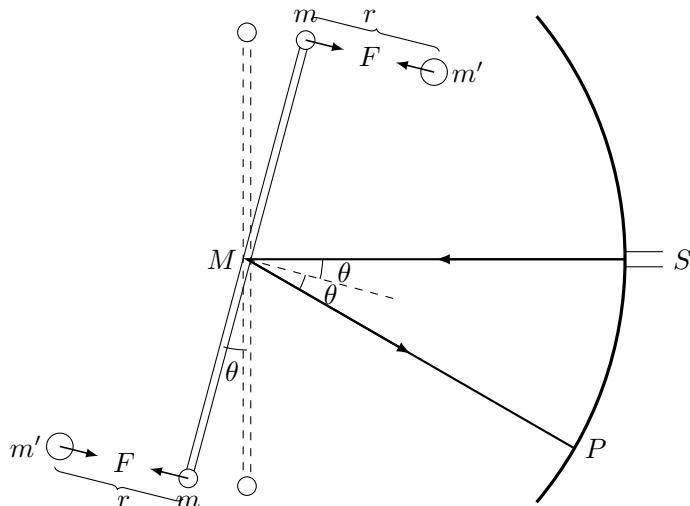


图 5.1

重状态)、航天飞机的发射与返航等资料影片或录象, 以增加感性认识, 提高学习兴趣.

## 第四节 习题解答

### 一、练习一

1. 下表给出了太阳系九大行星平均轨道半径和周期的数值. 从表中任选三个行星验证开普勒第三定律, 并计算恒量  $k = R^3/T^2$  的值.

行星	平均轨道半径 (m)	周期 (s)
水星	$5.79 \times 10^{10}$	$7.60 \times 10^8$
金星	$1.08 \times 10^{11}$	$1.94 \times 10^7$
地球	$1.49 \times 10^{11}$	$3.16 \times 10^7$
火星	$2.28 \times 10^{11}$	$5.94 \times 10^7$
木星	$7.78 \times 10^{11}$	$3.74 \times 10^8$
土星	$1.43 \times 10^{12}$	$9.30 \times 10^8$
天王星	$2.87 \times 10^{12}$	$2.66 \times 10^9$
海王星	$4.50 \times 10^{12}$	$5.20 \times 10^9$
冥王星	$5.9 \times 10^{12}$	$7.82 \times 10^9$

解答: 取地球、火星、木星为例来验证开普勒第三定律. 地球:

$$k = \frac{R^3}{T^2} = \frac{(1.49 \times 10^{11})^3}{(3.16 \times 10^7)^2} = 3.31 \times 10^{18} \text{ m}^3/\text{s}^2$$

火星:

$$k = \frac{R^3}{T^2} = \frac{(2.28 \times 10^{11})^3}{(5.97 \times 10^7)^2} = 3.36 \times 10^{18} \text{ m}^3/\text{s}^2$$

木星:

$$k = \frac{R^3}{T^2} = \frac{(7.78 \times 10^{11})^3}{(3.74 \times 10^8)^2} = 3.37 \times 10^{18} \text{ m}^3/\text{s}^2$$

故：

$$\bar{k} = \frac{(3.31 + 3.36 + 3.37) \times 10^{18}}{3} = 3.35 \times 10^{18} \text{m}^3/\text{s}^2$$

2. 有一个名叫谷神的小行星（质量  $1.00 \times 10^{21} \text{kg}$ ），它的轨道半径是地球的 2.77 倍，求出它绕太阳一周需要多少年。

解答：由开普勒第三定律  $k = \frac{R^3}{T^2}$ ，取  $k = 3.35 \times 10^{18} \text{m}^3/\text{s}^2$ ，则

$$T = \sqrt{\frac{R^3}{k}} = \sqrt{\frac{(1.49 \times 10^{11} \times 2.77)^3}{3.35 \times 10^{18}}} = 1.45 \times 10^8 \text{s}$$

说明：题中给出的谷神小行星的质量与解题无关，目的是使学生明确行星运行周期仅取决于轨道半径，同时培养学生合理利用已知数据的能力。

## 二、练习二

1. 你能说出你对地球的引力是多少吗？

解答：人对地球的引力大小等于地球对人的引力大小，也就是大的体重。

2. “我们说苹果落向地球，而不说地球向上运动碰到苹果，是因为地球的质量比苹果大得多，地球对苹果的引力比苹果对地球的引力大得多。”这种说法对吗？为什么？

解答：这种说法不对。地球对苹果的引力大小与苹果对地球的引力大小相等，是一对作用力和反作用力，因为地球质量比苹果大得多，所以它产生的加速度就比苹果产生的加速度（即重力加速度）小得多，几乎等于零，所以我们说苹果落向地球，而不说地球向上运动碰到苹果。

3. 两个质量都是 4 千克的铅球，相距 0.1 米远，它们之间的引力是多少？

解答：据万有引力公式

$$F = G \frac{Mn}{R^2} = 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{4^2}{0.1^2} = 1.07 \times 10^{-7} \text{N}$$

4. 用  $M$  表示地球的质量， $R$  表示地球的半径， $T$  表示月球到地球的距离。试证明，在地球引力作用下，

(a) 地面上物体的重力加速度  $g = \frac{GM}{R^2}$ ；

(b) 月球的加速度  $a_{\text{月}} = \frac{GM}{r_{\text{月地}}^2}$ ；

(c) 已知  $r_{\text{月地}} = 60R$ ，利用 (a)(b) 求  $a_{\text{月}}/g$ ；

(d) 已知  $r_{\text{月地}} = 3.8 \times 10^8$  米，月球绕地球运行的周期  $T = 27.3$  天，计算月球绕地球运行的向心加速度  $a_{\text{月}}$ 。

(e) 已知重力加速度  $g = 9.8 \text{m/s}^2$ 。用 (d) 中算出的  $a_{\text{月}}$ ，求  $a_{\text{月}}/g$ 。

比较 (c)(e) 中求出的  $a_{\text{月}}/g$  是否相等。如果相等，则表明地球对月球的引力和对地面物体的引力都遵守平方反比定律，因而是同一种性质的力，牛顿就是根据这一结果证明地球对月球的引力和地面上物体所受的重力是同一种力的。

**证明：**

(a) 地球表面物体的重力等于地球对物体的引力，有

$$mg = G \frac{Mm}{R^2} \Rightarrow g = G \frac{M}{R^2}$$

(b) 假设月球绕地球运行所需的向心力就是地球对月球的万有引力。 $a_{\text{月}}$  是月亮绕地球运行的向心加速度，方向指向地球。则有

$$ma_{\text{月}} = G \frac{Mm}{r_{\text{月地}}^2} \Rightarrow a_{\text{月}} = \frac{GM}{r_{\text{月地}}^2}$$

(c)

$$\frac{a_{\text{月}}}{g} = \frac{GM \cdot R^2}{r_{\text{月地}}^2 \cdot GM} = \frac{R^2}{r_{\text{月地}}^2}$$

将  $r_{\text{月地}}^2 = 60R$  代入上式，得

$$\frac{a_{\text{月}}}{g} = \frac{R^2}{(60R)^2} = \frac{1}{3600} = 2.8 \times 10^{-4}$$

(d) 由匀速圆周运动向心力公式得

$$\begin{aligned} a_{\text{月}} &= \omega^2 r_{\text{月地}} = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot r_{\text{月地}} = \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot r_{\text{月地}} \\ &= \frac{2 \times (3.14)^2}{(27.3 \times 86400)^2} \times 3.8 \times 10^8 \\ &= 2.69 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

(e)

$$\frac{a_{\text{月}}}{g} = \frac{2.69 \times 10^{-3}}{9.8} = 2.8 \times 10^{-4}$$

比较 (c)、(e) 的结果相等，说明牛顿的假说是正确的。

### 三、练习三

- 应用人造地球卫星可以测定地球的质量。我国 1970 年 4 月 24 日发射的第一颗人造地球卫星，其周期是 114 分，它的近地点是 439 千米，远地点是 2384 千米，以卫星在近地点和远地点时到地心距离的平均值作为卫星轨道的平均半径，试计算地球的质量。

**解答：**取地球半径为 6370 千米，则卫星轨道的平均半径为

$$R = \frac{439 + 2384}{2} + 6370 = 7782 \text{ km}$$

卫星绕地球运动的向心力等于地球对卫星的引力，即有

$$m\omega^2 R = G \frac{Mm}{R^2}, \quad \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 R = G \frac{Mm}{R^2}$$

则：

$$M = \frac{4\pi^2 \cdot R^3}{GT^2}$$

代入数据得

$$M = \frac{4 \times 3.14^2 \times (7.782 \times 10^6)^3}{6.67 \times 10^{-11} \times (114 \times 60)^2} = 5.96 \times 10^{24} \text{kg}$$

2. 登月密封舱在离月球表面 112 千米的空中沿圆形轨道运行，周期是 120.5 分钟，月球的半径是 1740 千米，根据这些数据计算月球的质量和平均密度。

解答：密封舱绕月球所需的向心力就是月球对密封舱的引力。

由  $m \cdot \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot R = G \frac{Mn}{R^2}$ ，得  $M = \frac{4\pi^2 R^3}{GT^2}$

密封舱轨道半径

$$R = 112 + 1740 = 1852 \text{km}$$

代入数据

$$M = \frac{4 \times 3.14^2 \times (1.852 \times 10^8)^3}{6.67 \times 10^{-11} \times (120.5 \times 60)^2} = 7.19 \times 10^{22} \text{kg}$$

平均密度

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{7.19 \times 10^{22} \times 3}{4 \times 3.14 \times (1.740 \times 10^6)^3} = 3.26 \times 10^3 \text{kg/m}^3$$

#### 四、练习四

在下列各题中，地球质量取  $M = 6.0 \times 10^{24} \text{kg}$ 。

1. 图 5.8 A、B、C 是在地球大气层外圆形轨道上运行的三颗人造卫星，A、B 的质量相同，它们的轨道速率是否也相同？B、C 的质量不同，它们的轨道速率是否也不同？

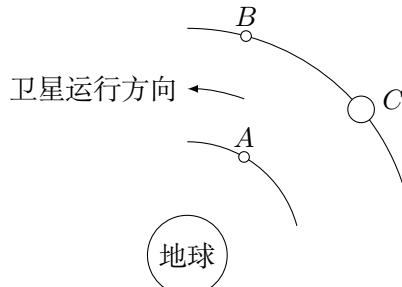


图 5.2

解答：由卫星绕地球运行所需向心力即为地球对卫星的引力，即

$$\frac{mv^2}{r} = G \frac{M_{\text{地}} m}{r^2}$$

得卫星的轨道速率

$$v = \sqrt{\frac{GM_{\text{地}}}{r}}$$

由于式中  $G$  和  $M_{\text{地}}$  为常量，所以，卫星的轨道速率只与其轨道半径的平方根成反比。

由于卫星 A 方向和 B 不在同一轨道上，即  $r_A \neq r_B$ ，即速率不等。

卫星 B 和卫星 C 同在一条轨道上运行。即  $r_B = r_C$ ，则  $v_B = v_C$ ，即速率相等，跟卫星 B、C 的质量无关。

2. 假定一颗人造地球卫星正在离地面 700 千米高空的圆周轨道上运转，计算它的速率和周期。

解答：同上题由  $\frac{mv^2}{r} = G \frac{Mm}{r^2}$ ，得速率  $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$ ，代入数据：

$$v = \sqrt{\frac{6.67 \times 10^{-11} \times 6.0 \times 10^{24}}{(6400 + 700) \times 10^3}} = 7.5 \text{ km/s}$$

周期

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2 \times 3.14 \times (6400 + 700) \times 10^3}{7.5 \times 10^3} = 5.95 \times 10^3 \text{ s} \approx 99 \text{ min}$$

3. 能否发射一颗周期是 80 分钟的人造地球卫星？说明你的理由。

解答：解法 1：若卫星的周期为 80 分钟，则

$$\frac{m \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2}{R} = G \frac{Mm}{R^2}, \quad \frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{GM}{R^3}$$

因此：

$$R^3 = \frac{GMT^2}{4\pi^2} = \frac{6.67 \times 10^{-11} \times 6.0 \times 10^{24} \times (80 \times 60)^2}{4 \times 3.14^2} = 2.34 \times 10^{20} \text{ m}^3$$

$$R \approx 6.2 \times 10^6 \text{ m}$$

取地球半径为  $6.4 \times 10^6 \text{ m}$ ，则  $R < R_{\text{地}}$ 。

由于卫星飞行的圆周半径不可能小于地球半径，故不可能发射这样一颗卫星。

解法 2：根据  $T^2 = \frac{4\pi^2 R^3}{GM}$ ，卫星轨道半径  $R$  越大，周期  $T$  越长。

靠近地球表面以第一宇宙速度运行卫星的周期最短，为

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2 \times 3.14 \times 6.4 \times 10^6}{7.9 \times 10^3} = 5.1 \times 10^3 \text{ s} = 85 \text{ min}$$

而题中卫星周期为 80 分钟，所以不可能发射一颗运行周期比以第一宇宙速度运行的卫星还短的地球卫星。

## 五、习题

1. 在一次测定引力恒量的实验里，已知一个质量是 0.80 千克的球，以  $1.0 \times 10^{-10}$  牛的力吸引另一个质量是  $4.0 \times 10^{-3}$  千克的球。这两个球相距  $4.0 \times 10^{-2}$  米。地球表面的重力加速度是  $9.8 \text{ m/s}^2$ ，地球的半径是 6400 千米。根据这些数据计算地球的质量。  
解答：因为地球对物体的引力就是物体所受的重力，所以  $mg = G \frac{Mm}{R^2}$ ，由此得：

$$M = \frac{gR_{\text{地}}^2}{G}$$

先根据  $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ ，求出  $G = \frac{Fr^2}{m_1 m_2}$ ，代入上式得：

$$M = \frac{gR_{\text{地}}^2 m_1 m_2}{Fr^2} = \frac{9.8 \times (6.4 \times 10^6)^2 \times 0.80 \times 4.0 \times 10^{-3}}{1.3 \times 10^{-10} \times (4.0 \times 10^{-2})^2} = 6.2 \times 10^{24} \text{ kg}$$

2. 行星的质量为  $M$ , 一个围绕它作匀速圆周运动的卫星的轨道半径是  $R$ , 周期是  $T$ . 试用两种方法求出卫星轨道上的向心加速度.

**解答:** 解法 1: 根据向心加速度的公式有

$$a_n = \omega^2 R = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot R = \frac{4\pi^2 R}{T^2}$$

解法 2: 根据卫星所需向心力等于行星对它的引力有

$$ma_n = G \frac{Mm}{R^2}$$

$$\text{所以: } a_n = \frac{GM}{R^2}$$

3. 应用通讯卫星可以实现全地球的电视转播, 这种卫星位于赤道的上方, 相对于地面静止不动, 犹如悬在空中一样, 叫做同步卫星. 同步卫星的周期是多大? 计算它的高度和速率.

**解答:** 同步卫星的周期与地球自转的周期相同.

$$T = 24 \times 3600 = 86400 \text{ s}$$

根据  $m \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot r = G \frac{Mm}{r^2}$ , 得:

$$r^3 = \frac{GM}{4\pi^2} \cdot T^2$$

故卫星轨道半径为

$$r = \left( \frac{GMT^2}{4\pi^2} \right)^{1/3} = \left( \frac{6.67 \times 10^{-11} \times 6.0 \times 10^{24} \times 86400^2}{4 \times 3.14^2} \right)^{1/3} = 4.23 \times 10^7 \text{ m}$$

上式也可由下式得出:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}, \quad \frac{2\pi r}{T} = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

卫星高度

$$h = r - R_{\text{地}} = 4.23 \times 10^7 - 6.4 \times 10^6 = 3.59 \times 10^7 \text{ m}$$

卫星运行速率

$$v = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2 \times 3.14 \times 4.23 \times 10^7}{86400} = 3.07 \times 10^3 \text{ m/s}$$

或者:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}} = \sqrt{\frac{6.67 \times 10^{-11} \times 6.0 \times 10^{24}}{4.23 \times 10^7}} = 3.07 \times 10^3 \text{ m/s}$$

说明: 此题说明卫星的轨道半径  $r$ 、运行周期  $T$  和速率  $v$  之间存在着确定的关系. 对同步地球卫星讲,  $T$  是确定的, 因此所有的同步卫星均在赤道平面的同一轨道上, 以相同速率运行.

4. 试用万有引力定律证明: 对于某个行星的所有卫星来说,  $R^3/T^2$  是一个恒量. 其中  $R$  是卫星的轨道半径,  $T$  是卫星的运行周期.

**证明：**卫星围绕行星运行所需的向心力就是它们之间的万有引力. 即有

$$G \frac{Mm}{R^2} = m\omega^2 R, \quad G \frac{M}{R^2} = \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot R, \quad \frac{GM}{R^3} = \frac{4\pi^2}{T^2}$$

由此得

$$\frac{R^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2}$$

对某个行星的所有卫星来说,  $M$  恒定, 是该行星的质量,  $\frac{GM}{4\pi^2}$  是恒量, 所以  $R^3/T^2$  也是一个恒量.

5. 行星的密度是  $\rho$ , 靠近行星表面的卫星运行周期是  $T$ . 试证明  $\rho T^2$  是一个普遍适用的恒量, 即它对任何行星都相同.

**证明：**球体积  $V = \frac{4}{3}\pi R^3$ , 所以行星的密度

$$\rho = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3}$$

由  $m\omega^2 R = G \frac{Mm}{R^2}$  得

$$\frac{M}{R^3} = \frac{4\pi^2}{GT^2}$$

将上式变形得

$$\frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{3\pi}{GT^2}$$

即

$$\rho T^2 = \frac{3\pi}{GT^2}$$

由此得

$$\rho T^2 = \frac{3\pi}{G}$$

由于  $G$  是普适恒量, 所以  $\rho T^2$  对于任何一个行星都相同.

6. 一艘宇宙飞船飞近某一个不知名的行星, 并进入靠近该行星表面的圆形轨道, 宇航员着手进行预定的考察工作. 宇航员能不能仅仅用一只表通过测定时间来测定该行星的密度? 说明理由.

**解答：**根据题意, 宇航员可用表测定该飞船在行星表面附近绕行星运行一周所需要的时间  $T$ , 利用第 5 题的公式

$$\rho = \frac{3\pi}{GT^2}$$

将  $T$  值代入, 即可算出密度.

7. 不考虑地球的自转, 求出用地球半径  $R$ 、地面重力加速度  $g$  和引力恒量  $G$  表示的地球密度的公式.

**解答：**不考虑地球的自转, 可认为物体重量就是地球对它的引力, 即

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

将  $M = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho$  代入上式得

$$g = \frac{4}{3}\pi \rho G R$$

则地球的密度

$$\rho = \frac{3g}{4\pi G R}$$

8. 用火箭把宇航员送到月球上，如果他已知月球的半径，那么他用一个弹簧秤和一个已知质量的砝码，能否测出月球的质量？应该怎样测定？

**解答：**只要已知月球半径，便可测出月球质量。具体步骤如下：

- (a) 可以先将质量已知的砝码挂在弹簧秤上，测出读数  $W$ ，由  $W = mg_{\text{月}}$ ，可求出  $g_{\text{月}} = W/m$ ；  
(b) 然后由砝码重量等于月球对它的引力得

$$mg_{\text{月}} = G \frac{M_{\text{月}} m}{R_{\text{月}}^2}, \quad g_{\text{月}} = \frac{GM_{\text{月}}}{R_{\text{月}}^2}$$

故

$$M_{\text{月}} = \frac{g_{\text{月}} R_{\text{月}}^2}{G} = \frac{WR_{\text{月}}^2}{G_m}$$

月球半径  $R_{\text{月}}$  已知， $W$  由弹簧测出， $G$  是普适恒量， $m$  已知，因此可以计算出月球质量  $M$ .

## 第五节 参考资料

### 一、太阳系中的最大和最小

太的体积约是地球体积的 130 万倍，地球的体积约是月球体积的 50 倍。太阳的质量约是地球质量的 33 万倍，地球质量约是月球质量的 81 倍。下表列出了太阳系八大行星及冥王星距太阳的平均距离、体积、质量、表面平均重力加速度、平均密度、自转周期最大和最小的星球。

	最小	最大
距太阳平均距离（以地球与太阳平均距离为单位）	水星（约为 0.4）	冥王星（约 39.5）
体积（以地球体积为单位）	水星（约为 0.056）	木星（约 1316）
质量（以地球质量为单位）	水星（约为 0.055）	木星（约 318）
表面平均重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ )	水星 (3.6)	木星 (约 26)
平均密度 (克 / 厘米)	土星 (0.7)	地球 (5.5)
自转周期	木星 (9 时 50 分)	金星 (244.3 日)

### 二、开普勒定律

开普勒研究所根据的资料都是凭肉眼观测的。随着望远镜等精密仪器的出现，发现开普勒定律只是近似的，行星实际运行的情况与开普勒定律有少许偏离。造成这种情况的有

以下两个原因：由于太阳也受到行星的吸引，它也有加速度，并不是静止不动的，实际上太阳和行星都绕它们的质心各自沿椭圆轨道运动，此时行星椭圆轨道半长轴（平均半径）立方与运行周期平方之比已不再是常数，而应修正为

$$\frac{R_1^3}{T_1^2} \cdot \frac{R_2^3}{T_2^2} = \frac{M + m_1}{M + m_2} = \frac{1 + \frac{m_1}{M}}{1 + \frac{m_2}{M}}$$

式中的  $R_1$  和  $R_2$  分别是质量为  $m_1$  和  $m_2$  的行星轨道半长轴， $T_1$  和  $T_2$  分别是它们的运行周期， $M$  是太阳的质量，实际上太阳系中质量最大的行星是木星，它的质量是太阳质量的  $1/1047$ ，上式之比与 1 相差极微。所以开普勒第三定律虽然只是近似的，但近似程度是相当高的。以上结论只考虑了行星与太阳间的相互吸引，在理论力学中称为二体问题，如果要考虑任一行星还受到其他行星的吸引，则成为多体问题，此时只能用微扰法来近似求解。

### 三、万有引力定律建立的历史进程

在古代和中世纪，引力被认为是位置的一种性质。亚里士多德认为“宇宙中的万物都有它的指定位置，一旦脱离原位，就要回复回去”以此来解释石头落地的问题。哥白尼设想太阳、月球和各个行星都有自己的引力体系，地球上空的石头会落向最近的引力体系，即落向地面。伽利略提出惯性概念时虽已意识到约束行星沿闭合轨道需要力的作用，但没指出这力的性质。开普勒在探索行星运动的规律时，也产生了寻求行星运动原因的思路，他认为是太阳发出的磁力推动着行星的公转。

英国物理学家胡克提出了一切天体都具有倾向于其中心的吸引力，它不但吸引其本身的各个部分，还吸引其作用范围的其他天体。这就是行星绕太阳作椭圆运动的原因，他还提出了这个引力反比于距离的平方，但他一直未能从理论上证明这一点。

牛顿在 1665—1666 年间想到“把推动月球在轨道上运行的力和地面上的重力加以比较”，可是由于在计算上遇到的困难，他的研究迟迟没有进展。

1685 年，牛顿从理论上解决了把太阳、月球、地球都当成一个个质点的问题，采用了地球半径的新数据，证明地面上物体坠落和月球沿闭合轨道运行是出于同一原因，并把这一结论推广到所有的行星运动中去，从而提出了著名的万有引力定律。

### 四、卡文迪许

亨利·卡文迪许（1731—1810）是近代著名英国科学家，他一生从事大量的化学、电学实验，不疲倦地埋头于实验研究工作达 50 年之久。大约在库仑确定著名的静电学基本定律的同时，他独自发现并测得电荷间的作用力跟距离平方成反比的规律，还独立提出了电势的概念，1798 年，已近垂暮之年的卡文迪许运用构思巧妙的精密“扭秤”实验技巧测定出地球的平均密度为  $5.481\text{g}/\text{cm}^3$ （现代公认值为  $5.517\text{g}/\text{cm}^3$ ），由此可推算出万有引力常数是  $6.754 \times 10^{11}\text{N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^3$ （现代公认值为  $6.668 \pm 0.005 \times 10^{11}\text{N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^3$ ）。他被认为是最伟大的实验科学家之一。英国科学家坡印廷盛赞他“开创了测量弱力的新时代”。

## 五、三种宇宙速度

### (一) 第一宇宙速度

课本中已经讲过了第一宇宙速度的推导过程和数值，即  $v_1 = \sqrt{Rg} = 7.9\text{km/s}$ .

### (二) 第二宇宙速度

即物体能够脱离地球引力而不再回到地球所需的最小发射速度，通常用  $v_2$  表示.

如果知道从地球上射出的物体至少需要有多大的动能，才能够克服地球的引力逃到无限远处（即脱离地球的引力范围），就可以求出  $v_2$ . 要知道这个动能就必须求出物体从地面移到无限远处反抗地球引力所做的功.

由于把物体移到无限远处的过程中，地球对物体的引力是变化的，所以不能照恒力做功那样简单地用  $W = Fs \cos \theta$  来求，而要用到积分，用  $W$  表示反抗地球引力从地面到无限远处所做的功，则

$$W = \int_R^\infty \frac{GMm}{r^2} dr = \frac{GMm}{R}$$

由于在地面上

$$G \frac{Mm}{R^2} = mg, \quad G \frac{M}{R^2} = g$$

所以

$$W = mgR$$

根据动能定理知道，物体需要具有的动能应该等于这个功，即

$$\frac{1}{2}mv_2^2 = mgR$$

所以

$$v_2 = \sqrt{2Rg}$$

由于  $\sqrt{Rg} = v_1 = 7.9\text{km/s}$ ，所以

$$v_2 = \sqrt{2}v_1 = 11.2\text{km/s}$$

### (三) 第三宇宙速度

使物体不但挣脱地球的引力，而且挣脱太阳的引力，逃到太阳系以外去，物体所需要的速度叫第三宇宙速度，通常用  $v_3$  表示.

我们知道，地球以约  $30\text{km/s}$  的速度绕太阳运动，地球上的物体也随着地球以这个速度绕太阳运动. 正象物体挣脱地球引力所需的速度等于它绕地球运动的速度的 2 倍那样，地球上的物体挣脱太阳引力所需的速度为  $30\text{km/s}$  的 2 倍，所以地球上的物体挣脱太阳引力所需的速度为  $30 \times \sqrt{2} = 42.3\text{km/s}$ .

由于地球上的物体已经具有绕太阳运动的  $30\text{km/s}$  的速度，要使它相对于太阳的速度达到  $42.3\text{km/s}$ ，只要使它在沿着地球运行方向增加  $12.3\text{km/s}$  的速度就行了，但是，- 要使物体脱离太阳，首先要使它脱离地球，因此，除了给予物体  $\frac{1}{2}mv^2$  ( $v$  代表  $12.3\text{km/s}$  的速度) 的动能以外，还必须给予物体  $\frac{1}{2}mv_2^2$  ( $v_2$  代表第二宇宙速度) 的动能. 也就是说，

必须给予物体的动能为  $\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}mv_2^2$ . 如果用  $v_3$  代表第三宇宙速度, 这个动能就等于  $\frac{1}{2}mv_3^2$ . 所以

$$\frac{1}{2}mv_3^2 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}mv_2^2$$

$$v_3 = \sqrt{v^2 + v_2^2} = \sqrt{12.3^2 + 11.2^2} = 16.7 \text{ km/s}$$

## 六、不同高度上卫星的环绕速度

高度 (km)	0	300	500	1000	3000	5000	35900	380000
环绕速度 (km/s)	7.91	7.73	7.62	7.36	6.53	5.29	2.77	0.97
周期 (min)	84.4	90.5	94.5	105	150	201	23h 56min	28d

## 七、五个国家第一颗卫星比较

	中国	苏联	美国	法国	日本
发射日期	1970.4.24	1957.10.4	1958.2.1	1965.11.26	1970.2.11
质量 (kg)	173	83.6	13.97*	40	38*

\* 包括最后一级运载火箭壳体.

## 八、我国发射的十七颗卫星简况

名称	发射时间	工作情况	其他
人造地球卫星	1970.4.24	播送《东方红》乐曲	
科学实验卫星	1971.3.3	向地面播送科学实验数据	
人造地球卫星	1975.7.26	星上各种仪器工作正常	
人造地球卫星	1975.11.26	卫星各种系统工作正常	三天后,按计划返回地面
人造地球卫星	1975.12.16	卫星工作正常	
人造地球卫星	1976.8.30	卫星工作正常	
人造地球卫星	1976.12.7	卫星工作正常	按预定计划准确返回地面
人造地球卫星	1978.1.26	卫星运行良好,完成了科学实验任务	按预定计划成功地返回地面
空间物理探测卫星	1981.9.20	各系统工作正常,不断向地面发送各种科学探测和试验数据	用一枚火箭发射三颗卫星
科学试验卫星	1982.9.20	卫星运行良好,仪器工作正常	运行五天后,按预定计划返回地面
科学试验卫星	1983.8.19	卫星运行良好,各系统工作正常	按预定计划准返回地面
试验卫星	1984.1.29	取得了重要成果	
试验通信卫星	1984.4.8	进入预定轨道,设备工作正常	
科学实验卫星	1984.9.12	卫星运行和工作正常	按预定计划准确返回地面
实用通信广播卫星	1986.2.1	进入预定轨道,设备工作正常	

# 第六章 物体的平衡

---

<b>第一节 教学要求</b> . . . . .	<b>147</b>
<b>第二节 教学建议</b> . . . . .	<b>148</b>
一、第一单元 . . . . .	148
(一)对平衡状态的理解 . . . . .	148
(二)什么是共点力 . . . . .	148
(三)三力平衡实验 . . . . .	148
(四)平衡条件的应用 . . . . .	149
(五)静力学问题宜用平衡条件解 . . . . .	149
二、第二单元 . . . . .	149
(一)物体转动与物体平动的对应关系 . . . . .	149
(二)力矩的概念和计算 . . . . .	149
(三)关于有固定转动轴物体平衡的实验和推理 . . . . .	149
(四)关于固定转动轴的理解 . . . . .	150
(五)三角支架问题在什么情况下要用力矩平衡来解 . . . . .	150
三、第三单元 . . . . .	150
(一)关于力偶的作用 . . . . .	150
(二)力偶矩也是力矩 . . . . .	151
四、第四单元 . . . . .	151
<b>第三节 实验指导</b> . . . . .	<b>151</b>
一、演示实验 . . . . .	151
(一)共点力作用下物体的平衡条件 . . . . .	151
(二)力矩的作用 . . . . .	152
(三)有固定转动轴的物体的平衡条件 . . . . .	152
(四)应用有固定转动轴的物体的平衡条件解题 . . . . .	153
(五)力偶 . . . . .	154
(六)物体平衡的种类 . . . . .	154
(七)稳度跟重心的高低和支面的大小有关 . . . . .	154
二、学生实验 . . . . .	155
(一)研究有固定转动轴物体的平衡条件 . . . . .	155
三、课外实验活动 . . . . .	155
(一)制作杆秤 . . . . .	155
<b>第四节 习题解答</b> . . . . .	<b>156</b>
一、练习一 . . . . .	156

二、练习二 . . . . .	158
三、练习三 . . . . .	160
四、练习四 . . . . .	161
五、习题 . . . . .	161
<b>第五节 参考资料 . . . . .</b>	<b>168</b>
一、静力学中物体受力的方向 . . . . .	168
(一)柔性体约束 . . . . .	168
(二)光滑接触面的约束 . . . . .	169
(三)光滑圆柱形铰链约束 . . . . .	169
二、力偶的性质 . . . . .	169

---

## 第一节 教学要求

这一章讲述静力学的基本知识，主要是讲在共点力作用下物体的平衡和有固定转动轴的物体的平衡。

这一章的教学要求是：

1. 理解平衡和平衡条件的概念，掌握在共点力作用下物体的平衡条件。
2. 理解力矩的概念，掌握有固定转动轴物体的平衡条件。
3. 了解力偶和力偶矩的概念，知道力偶的作用是使物体只发生转动。
4. 了解平衡的种类和稳度。

下面对这一章的教学内容作些具体说明。

在动力学之后讲述静力学，有可能把静力学知识当成动力学的特殊情况来理解，课本在实验的基础上得到共点力作用下物体的平衡条件后，再从牛顿第二定律推导出这个平衡分件，其目的就是要加深学生对平衡条件的理解。

讲述力对物体的转动作用，是为了讲解有固定转动轴的物体的平衡做准备，这里讲述的转动的特点、转动快慢的描述以及匀速转动和变速转动的概念，要求学生了解即可。关于力矩，重点是要求学生理解力矩的概念，至于力矩的代数和等于零或不等于零时物体怎样转动，使学生有个了解就可以了。

关于有固定转动轴的物体的平衡条件的教学，还是以实验为基础，但应注意实验与推理相配合，以加深学生的认识。

力偶是一个重要概念，而且以后讲通电线圈在磁场中运动时会用到，因此应使学生对力偶知识有所了解。这里主要是使学生明确知道力偶与一个力对物体的作用不同，一个力可以使物体同时发生转动和平动，而力偶的作用是使物体只发生转动而不发生平动。对有固定转动轴的物体来说，虽然一个力的作用和力偶的作用都可以使物体发生转动，但效果是有区别的，教材中说明这一点，是为了加强力偶的作用是使物体只发生转动的认识。

关于平衡的种类和稳度的教学，都只要求作一般的介绍，目的是扩展学生的知识面，把他们的静力学知识用来分析这一常见现象。平衡的种类的区分，要让学生知道区分的标志是以物体的平衡遭到破坏之后能否自行回到原来的平衡位置。讲解稳度，要使学生知道在必要时增大稳度的方法。

理论联系实际，是物理教学的一条重要原则，静力学知识在实际中很有意义，这一章的教学更应注意与生产和生活实际的联系，所选习题力求有实际意义，而不要补充那些过难而又缺少实际意义的题。

## 第二节 教学建议

本章教学建议分成四个单元，第一单元（全章引言和第一节）主要讲述什么是物体的平衡状态和平衡条件，并得出在共点力作用下物体的平衡条件。第二单元（第二、三节）通过力对物体的转动作用的讨论，引入力矩这个重要概念，并进一步得出具有固定转动轴的物体的平衡条件。第三单元（第四节）讲述力偶的初步知识。第四单元（第五、六节）是对物体平衡状态的进一步分析，说明物体平衡还有个稳定不稳定的问题，稳定平衡还有个稳定程度的问题。

### 一、第一单元

本单元教学应该以实验为基础，做好三个共点力平衡的演示实验。但同时要注意实验与推理相结合，这里主要是两方面的推理：一是将三个共点力的平衡条件推广到三个以上共点力作用下的平衡条件。虽然教材说“用实验还可以证明”，但教学时一般不必再做三个以上共点力平衡的实验了。另一个是从牛顿第二定律推出共点力作用下物体的平衡条件。

#### （一）对平衡状态的理解

在全章引言中，教材明确指出：“如果一个物体既不做平动，也不做转动，即保持静止，或者做匀速直线运动或匀速转动，我们就说这个物体处于平衡状态。”这是平衡状态的定义。比起以前教材中关于物体平衡的说法，含义更广了。以前所说的平衡，仅指物体处于静止或匀速直线运动状态。而这里的定义说，匀速转动状态也是平衡状态。为什么说匀速转动也是平衡状态呢？因为它与静止和匀速直线运动有共同之处，即运动状态保持不变。前者是物体的即时速度保持不变（加速度为零），后者是物体转动的角速度保持不变，这样，既使学生对平衡状态概念的理解进一步深化，而且为利用牛顿第二定律推导出共点力平衡条件，也为以后推导有固定转动轴的物体的平衡条件，作了准备，教材中把物体的平衡安排在牛顿运动定律之后讲述，也为加深对平衡这一概念的理解提供了条件。

#### （二）什么是共点力

在教学中可以提一提，所谓共点力并不一定是几个力都作用在同一点上，还应包括几个力的作用线相交于一点的情况。因为作用在物体上的力沿着力的作用线平移，其作用效果是相同的。此外还应注意，我们在这里所讨论的共点力，仅限于在同一平面上的共点力，有的书上称为共面力。如果不是共面力，情况就要复杂得多。

#### （三）三力平衡实验

证明三个共点力作用下的平衡条件是合力为零的实验并不难做，但要得出平衡条件则必须把实验做得尽量准确一点。建议在教学中注意两点：

1. 课本图 6.1 甲中的整个装置应是水平放置的。如果竖直放置，则可能因下面一个弹簧倒置而产生较大误差。

2. 如果教师演示时，不便将装置水平放置，则可以将下面那个弹簧秤牵拉的力改为挂上砝码，当然，受力物体应该选择重量很小的物体，或者就可以把绳子的结点作为受力平衡的研究对象。

#### (四) 平衡条件的应用

共点力的平衡条件  $F_{合} = 0$  原是一个矢量方程，由于教材不介绍正交分解法，所以必须设法将平衡条件简化，例如本章后习题 1 的解答中，先将  $F_1$  和  $F_2$  合成为  $F'$ ，接着就把方程  $F_{合} = 0$  简化为  $F'$  与  $F$  大小相等、方向相反的结论，再通过几何关系分别求出  $F_1$  和  $F_2$ 。如何将平衡条件  $F_{合} = 0$  简化成既符合题意，又便于研究的形式，是学生学习静力学时常常感到困难的问题，教学中要有意识加以指导。

#### (五) 静力学问题宜用平衡条件解

学生在第一章学习力的分解时，实际也解过类似本章后习题 1 的题目。所以学生可能习惯于用力的分解来解题。在比较简单的情况下，从力的作用效果出发，用力的分解来解题也是可以的，例如本章后第 1 题，但如果题目复杂一些，用力的分解来解则可能发生差错。因为有时某个力在某方向上的分力是没有实际意义的。所以学了这一单元以后，建议学生以后可尽量用平衡条件来解静力学问题。

## 二、第二单元

本单元讲述力对物体的转动作用、力矩的概念和有固定转动轴物体的平衡条件。

#### (一) 物体转动与物体平动的对应关系

物体转动与质点运动虽然是两种不同的运动，但它们的许多概念和规律都有类似的关系，可在适当的时候进行对照比较。例如课本中所说的，平动物体上各点的速度都相同，任何一点的速度可以代表整个物体的速度。同样，转动物体上各点的角速度都相同，任何一点的角速度都可以代表整个物体的角速度。这样，平动物体的速度与转动物体的角速度相对应，另外还有，平动的位移和转动时转过的角度（称为角位移）相对应，匀速直线运动与匀速转动相对应，共点力的平衡条件与力矩平衡条件相对应，等等。教学中教师可以启发学生进行这样的对比，有利于学生对转动知识的理解。

#### (二) 力矩的概念和计算

学习力矩的概念，关键在于掌握力臂的概念。关于力臂的意义和计算，虽然在初中学习杠杆平衡条件时已经反复练习过，但在高中阶段学生还是常常容易搞错。所以这里仍要多举几个例子让学生学会确定力臂的长度。在此基础上，高中还要学生掌握力矩的单位和正负。力矩的单位是  $N \cdot m$ ，不是  $J$ ，要求学生不要同功的单位混淆。力矩有正负，但在教学中不要提力矩的方向。因为力矩方向的规定涉及矢量乘法，已超出高中物理范围。

#### (三) 关于有固定转动轴物体平衡的实验和推理

通过实验和推理得出有固定转动轴物体的平衡条件是本单元的重点。课本是先通过推理得出平衡条件，然后用实验来验证的。教学中如果教师采用先实验再说理的办法也是可以的。经过实验，学生对力臂的计算和有固定转动轴物体的平衡条件将有较深刻的理解。

在将结论  $M_1 + M_2 = M_3$  改写成  $M_{合} = 0$  的过程中，教师还得作一些解释。前者等号两侧都是绝对值，等号左侧为使物体向顺时针方向转动的力矩，右侧为使物体向逆时针方向转动的力矩。后者  $M_{合}$  中包括了正负两种力矩。写成  $M_{合} = 0$  的形式便于同共点力平衡条件  $F_{合} = 0$  对照。 $F_{合} = 0$  为一矢量方程，而  $M_{合} = 0$  中的力矩不是正，就是负，是个代数方程。因此在运用上  $M_{合} = 0$  要比  $F_{合} = 0$  容易掌握一些。

#### (四) 关于固定转动轴的理解

课本在对固定转动轴的理解上作了一些扩展，即不限于研究确有实际的固定转轴的情况，而把在研究问题时该物体绕某线转动的那条线看作是固定转动轴，本章末习题第4题和第9题就是这样，解这类题可以培养学生灵活应用所学知识的能力，但课本对一般平面力作用下物体平衡问题，即须同时使用平动平衡条件和转动平衡条件的问题一概不作要求，教师应加以注意。

#### (五) 三角支架问题在什么情况下要用力矩平衡来解

在支架本身重量可以忽略不计的情况下，三角支架问题可以用共点力平衡条件来解，也可以用具有固定转动轴的物体的平衡条件来解，但当支架本身重量不能忽略时，如本章后习题第3题，则必须以横梁  $BO$  为研究对象，以  $B$  为转动轴，利用力矩平衡条件来解。如果此时我们仍以  $O$  点为研究对象， $O$  点除受钢绳  $AO$  的拉力  $T$  和重物的拉力  $F$  以外，一定还有一个  $BO$  对  $O$  点的支持力  $N$ 。 $T$ 、 $F$ 、 $N$  三个力是共点的， $O$  点又处于静止状态，因此这三个力也一定满足  $F_{合} = 0$  这个条件，但是，当  $BO$  梁的自重不能忽略时，它对  $O$  点的支撑力  $N$  不再沿着  $BO$  的方向。 $N$  的方向未定，用  $F_{合} = 0$  来解，条件就不充足了，如果我们用有固定转动轴的平衡条件先求出  $T$  的大小，然后再利用共点力平衡条件可以求得  $BO$  对  $O$  点的支持力  $N$ ，很容易看出这个力不在  $BO$  的方向上。对程度较好的学生，启发他们作以上的分析，对培养学生分析问题的能力很有好处。

### 三、第三单元

这一单元介绍力偶这个概念，教学中应突出两个主要问题：第一是使学生掌握力偶、力偶臂、力偶矩的意义，力偶矩大小的计算和正负的规定；第二是要使学生明确，力偶的作用是使物体只发生转动而不发生平动。

#### (一) 关于力偶的作用

力偶的作用是使物体只发生转动而不发生平动，这个结论是通过力偶对物体的作用和一个力对物体的作用的对比实验来使学生认识的。课本中图6.11和图6.12的实验可利用书写幻灯进行投影增大可见度，被拉动的物体可用一块圆形的有机玻璃板，上面画一些辐条，这样在书写幻灯的投影下，可以清楚地看到平动和转动。课本第三段说到用一只手板套筒容易磨损螺纹，用两只手板套筒，轴上就不会受到压力，目的也是要突出力偶只使物体发生转动。这一点，也可以利用课本图6.11和图6.12的装置加以说明。具体做法见本章实验指导。

## (二) 力偶矩也是力矩

教学中要使学生明白，力偶矩实际上就是力偶的两个力的力矩之和。力偶矩和力矩的作用都是使物体的转动状态发生变化，因此，不要把力偶矩与力矩这两个概念孤立开来。教学中，要通过力矩代数和的计算推导出力偶矩  $M = Fd$  的关系式。通过推导，还要启发学生理解力偶矩的大小不随所取的转动轴位置的改变而改变。至于在力偶的作用下物体究竟以哪一点为轴转动的问题，课本没有提，教学中也应回避。

## 四、第四单元

本单元对物体平衡的问题作进一步的分析，目的是扩展学生的知识面，把物理知识与实际联系得更紧密。教师在教学过程中，应多举些实例，多做些演示，以加深对教材的理解，培养学生观察和思考问题的能力。

本单元的重点是要学会怎样分析稳定平衡、不稳定平衡和随遇平衡，而不是光记忆这些结论，对有支点的物体来说，是根据它偏离平衡位置后，重力和支持力的合力是否能使物体回到平衡位置来判断的；对有支轴的物体来说，是根据它偏离平衡位置后，合力矩能否使物体回到平衡位置来判断的。或者两者都用重心的升高或降低来判断。教师在分析各种实例时，都要从这个角度来分析。

在所举的实例和演示中，既要注意简明了，便于分析，联系实际，也要注意生动活泼，活跃课堂气氛，例如不倒翁的例子就比较生动。此外，杂技团演员走钢丝、顶碗等实例都有个平衡和稳定问题。有条件的学校，可以放映一些科技电影，如“杂技团的秘密”等。

## 第三节 实验指导

### 一、演示实验

#### (一) 共点力作用下物体的平衡条件

课本图 6.1 所示的演示实验是在水平面上做的，可以通过投影仪显示，物体可用有机玻璃做，这样，可以看到作用点。

还可以利用两个弹簧秤和一组钩码来进行演示，如图 6.1 所示，要使学生认识这个实验中的研究对象是绳的结点  $O$ （也可以在  $O$  点固定一块用泡沫塑料锯成任意形状的薄板作为象征性的物体）， $O$  点受三个共点力的作用而保持平衡。如果调节好两个弹簧秤的位置，使得  $F_1 = 120$  克力， $F_2 = 90$  克力， $F_1$  和  $F_2$  的夹角为  $90^\circ$ ，所用的钩码的总重量为 150 克力。就可以方便地得出在共点力作用下，物体的平衡条件是合力等于零。

如图 6.2 所示，一辆小车放在光滑斜面上，小车一端通过细绳和弹簧秤相连，弹簧秤的另一端固定在斜面顶端，当小车静止时，小车受到三个力而平衡，使斜面倾角改变，可以看到弹簧秤的示数也发生相应的变化，达到某一数值时，小车又处于平衡状态。

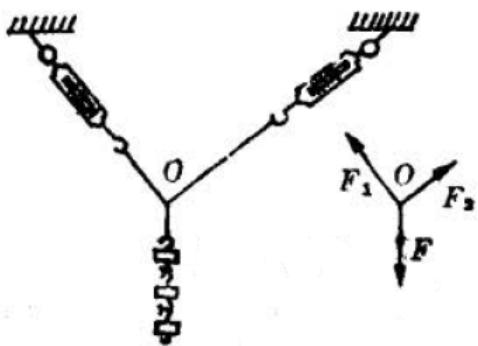


图 6.1

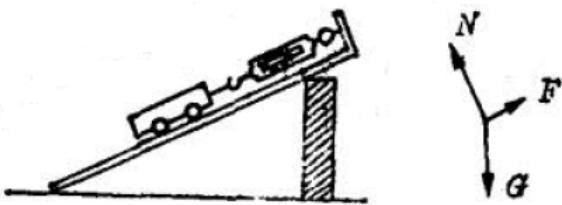


图 6.2

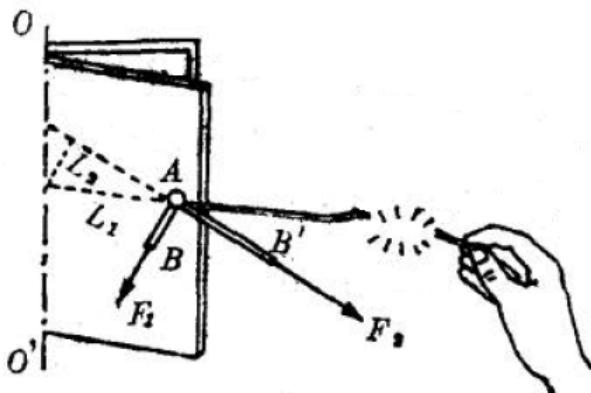


图 6.3

## (二) 力矩的作用

可以利用教室的门做如图 6.3 所示的演示，把橡皮绳的一端系在门把手上，另一端捏在手中，先将门关上，沿着垂直于门面的方向拉动橡皮绳，观察到橡皮绳稍有伸长，门就能被拉开（如图中橡皮绳的拉力为  $F_1$ ）；然后重新把门关上，改变拉橡皮绳的方向，使得拉力仍沿水平方向但不与门面垂直。这时可观察到橡皮绳必须拉得更长，才能使门拉开（如图中橡皮绳的拉力增大为  $F_2$ ）。启发学生思考，为什么会出现这种现象？说明什么问题？然后演示橡皮绳在水平方向沿着门面拉动，直到橡皮绳被拉断，还是拉不开门，让学生思考这又是为什么？

## (三) 有固定转动轴的物体的平衡条件

正力矩和负力矩的规定：根据课本图 6.8，用力矩盘进行演示，指出力  $F_1$  和  $F_2$  所产生的力矩是负的，它们的作用效果是使有固定转动轴的物体向顺时针方向转动、力  $F_3$  产生的力矩是正的，它的作用效果是使物体向反时针方向转动。

仍利用课本图 6.8 所示的力矩盘进行演示，并可改变细绳下端所挂钩码的个数，改变作用点的位置。当力矩盘平衡时，从各个力和力臂的大小可以得出：有固定转动轴的物体的平衡条件是力矩的代数和等于零。

#### (四) 应用有固定转动轴的物体的平衡条件解题

课本 213 页习题第 4 题, 可用模拟演示来加以说明, 如图 6.4 所示, 将一根粗细不均匀的木棍(如教棒), 平放在讲台上, 在棍的两端各系一个细绳套, 用弹簧秤先后勾住棍的细端和粗端的绳套, 稍稍提起, 使该端脱离桌面, 分别读得弹簧秤的示数为  $F_1$  和  $F_2$ . 再用弹簧秤勾住绳套, 把木棍整个提起来, 读出弹簧秤示数为  $F$ . 从实验结果可知:  $F = F_1 + F_2$

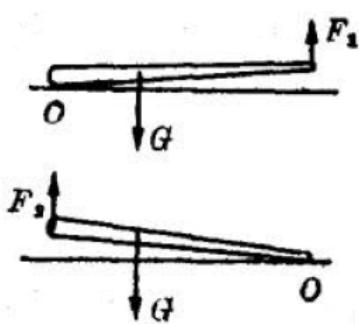


图 6.4

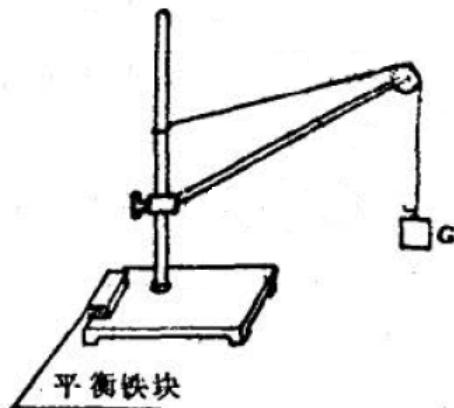


图 6.5

课本 213 页第 9 题可用铁架台及顶部装有定滑轮的木杆制成模型进行演示(图 6.5).

当在定滑轮下所挂的重物  $G$  的重量过大时, 铁架台将向右倾倒, 可以减小重物  $G$  的重量或缩短拉紧撑杆的细绳长度, 使得撑杆的倾角变大, 直到铁架台恰巧不倾倒. 应该指出, 在这个模拟演示中是将整个铁架台连同撑杆和所挂重物看成一个物体来进行研究的, 课本 213 页第 9 题的起重机也应该看作是一个整体, 各个力对前轮  $O$  所产生的力矩代数和应等于零, 来求出起重机至多能提起多重的物体.

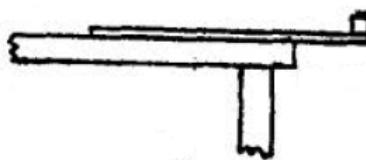


图 6.6

如图 6.6 所示, 将均匀米尺的一部分伸出水平桌面外, 在米尺伸出部分的顶端放一小砝码(10 克或 20 克), 调节米尺伸出部分的长度, 使得米尺仅对桌边有压力, 这时就可以把米尺跟桌边接触的地方看成是固定转动轴. 只要读出伸出部分的米尺长度, 计算从均米尺的重心位置到桌边的距离, 从已知砝码的重量, 根据有固定转动轴物体的平衡条件, 即可求出米尺的重量.

### (五) 力偶

课本图 6.11 和图 6.12 的演示可以通过投影仪来显示，圆盘可以用厚一些的有机玻璃板来做，在圆盘的侧边车制一凹槽，以便绕线。为了使效果明显，在有机玻璃圆盘上沿着半径方向可用透明漆画几条有色条纹。

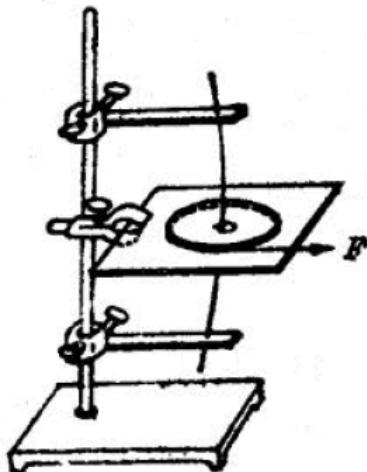


图 6.7

如图 6.7 所示，在铁架台上通过复夹和试管夹安装一块水平放置的中央有孔的有机玻璃板，在平板上放一个准备好的有机玻璃圆盘。在盘心位置开一个圆孔，将一细竹针穿过圆孔，并用复夹使竹针的两端固定。然后在圆盘的一侧通过缠绕的细线拉圆盘，可以观察到圆盘转动的同时，竹针弯曲，这说明力矩的作用可以使有固定转动轴的物体发生转动，但转动轴是受力作用的。如果不存在固定转动轴（将竹针抽去），在力矩的作用下圆盘将同时发生转动和平动。如果对圆盘作用一个力偶则可观察到圆盘转动时竹针并不弯曲，说明竹针并不受力。因此即使抽去竹针，在力偶作用下，圆盘也只发生转动，不发生平动。

### (六) 物体平衡的种类

课本图 6.16 有支点的物体的平衡的演示，可利用小球放在离心轨道（间距小于小球直径的两根平行铁丝）上来进行演示。课本图 6.17 有支轴的物体的平衡，可用一均匀薄木板（厚度约为 2—3mm）来演示，中间的小孔要开在薄木板的重心上，孔内侧要粗糙些，这样，演示随遇平衡的效果会好些。

### (七) 稳度跟重心的高低和支面的大小有关

可制成一个如图 6.8 所示的形状可变的框架（稳度演示器）来进行演示，当把它由长方体改变成斜方体时，只要系在它的中心（表示重心位置）的重垂线不出支面，则斜方体就不会倾倒。如果重垂线超出支面，斜方体就会倾倒。

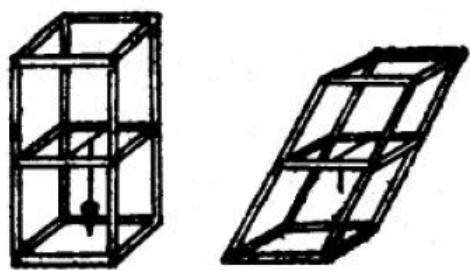


图 6.8

## 二、学生实验

### (一) 研究有固定转动轴物体的平衡条件

实验时，先用胶纸在力矩盘上粘贴一张白纸，用手指隔着白纸在转动轴部位按一下，在纸上留下转动轴的痕迹，然后按课本图 10.15 所示的装置把力矩盘装好。要注意转动轴应在水平方向，使力矩盘位于竖直平面内。在盘上任意选择四个位置，各插一根大头针（要插深些），再按课本的要求（课本图 10.15）在三根针上用细线悬挂钩码，悬挂细线时要适当靠近大头针的根部，但又不要使细线和盘面发生摩擦。在第四根针上用细线钩在弹簧秤的钩上，要注意调节固定在横杆上的弹簧秤的位置，使得力矩盘平衡时，弹簧秤的拉线不要通过转动轴。

当力矩盘在这四个力作用下处于平衡状态时，记下这四个力的大小。用削细的铅笔沿着四根细线的方向，在离开大头针较远的地方，分别画上一个“×”号，并在悬挂这些细线的大头针的针孔周围画一小圆，以便确定这四根拉力的方向。

取下钩码和弹簧秤，拔去大头针，取下白纸；用直尺将做过记号的针孔和相关的“×”号用虚线连接起来，并根据自己选定的标度（要在记录纸上明确标出），按力的图示法分别画出这四个拉力  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  和  $F_4$ 。

根据事先在白纸上所做的记号，画出固定转动轴  $O$ ，然后分别作出从  $O$  点到四个拉力作用线的垂线，并用毫米刻度尺量出这些垂线的长度，这就是力臂，在原始记录纸上标出各个力臂  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  和  $L_4$ 。

这个实验中也可以不用横杆来固定弹簧秤，而用另一个铁架台，通过复夹用试管夹把弹簧秤背面的铁壳夹紧（图 6.9），这样做好处在于可以方便地调节弹簧拉长的方向，使它跟细线的方向一致。

启发学生讨论课本最后提出的问题，认识到这是为了便于使力矩盘平衡。因为弹簧秤在它的量程范围内，拉力的大小可以连续变化，这样就可以自行改变弹簧秤拉力的大小，使得力矩盘平衡。

## 三、课外实验活动

### (一) 制作杆秤

在练习制作时，可注意并思考以下几点：

1. 制作杆秤所用的细木棍要挑比较结实一些的材料，但不要太粗，如果找不到合适的

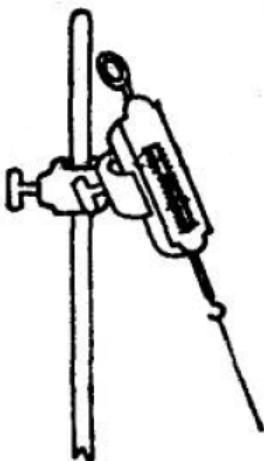


图 6.9

材料，找一根较长的竹筷或木筷也可以。提纽要用强度大一些的细绳，秤钩可以用粗铁丝制成，（也可以用几股细铁丝绞起来做），秤锤用质量小于 1 千克的物体也可以。

2. 在秤钩不挂物体的情况下，把秤锤挂在秤杆上确定秤杆的零刻度（课本图 6.26 的 A 点）时，要注意秤杆和秤钩（看成一体）的重心在提纽 O 点的那一侧？上
3. 证明秤杆上刻度间的距离为什么是均匀的。可以结合课本 214 页第 10 题的计算进行讨论。
4. 要增大杆秤的称量范围，可以再装一个提纽（称做二纽），想想看这个二纽的位置应该离秤钩远一些还是近一些？

## 第四节 习题解答

### 一、练习一

1. 在课本第一章图 1.21 所示的情形里，如果物体的重量是 40 牛，绳子 a 与竖直方向成  $30^\circ$  角，绳子 a 和 b 对物体的拉力分别是多大？

**解答：**设物体重量为  $G$ ，绳子 a、b 对物体的拉力分别是  $F_1$ 、 $F_2$ 。作物体受力图如图 6.10 所示。这是一个共点力平衡的问题。根据平衡条件可知， $F_1$ 、 $F_2$  的合力  $F$  一定与  $G$  大小相等、方向相反，在  $\triangle OFF_1$  中， $\frac{F}{F_1} = \cos 30^\circ$ ，而  $F = G$ ，所以

$$F_1 = \frac{G}{\cos 30^\circ} = \frac{40}{\sqrt{3}/2} = 46.2\text{N}$$

同理：

$$F_2 = F \tan 30^\circ = G \tan 30^\circ = 40 \times \frac{\sqrt{3}}{3} = 23.1\text{N}$$

2. 把物体放在光滑的斜面上，并用弹簧把它拉住，如图 6.11 所示。如果物体的质量为  $m$ ，斜面的倾角为  $\theta$ ，弹簧对物体的拉力是多大？

**解答：**物体受三个力：重力  $G = mg$ 、斜面支持力  $N$ 、弹簧拉力  $f$ 。根据平衡条件，

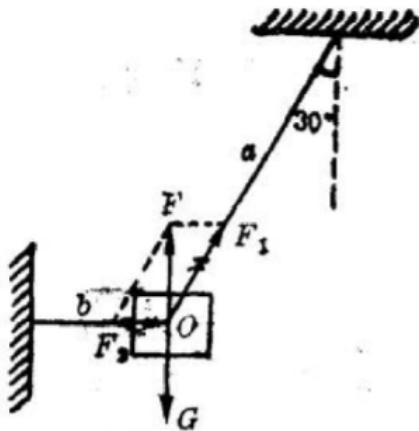


图 6.10

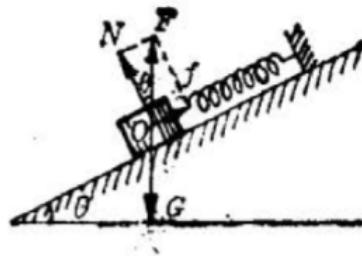


图 6.11

$N$  与  $f$  的合力  $F$  应与  $G$  的大小相同、方向相反。所以

$$f = F \sin \theta = mg \sin \theta$$

3. 图 6.12 是起重机匀速起吊重物时吊钩的受力情况。吊钩受到竖直向上的牵引力  $F_1$  和两条钢索对它斜向下的拉力  $F_2$  和  $F_3$ 。如果两条钢索的夹角为  $60^\circ$ , 力  $F_2$  和  $F_3$  大小相等, 力  $F_1$  为  $2.0 \times 10^4$  牛, 每钢索对吊钩的拉力是多大?

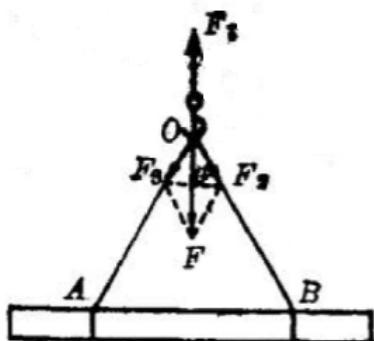


图 6.12

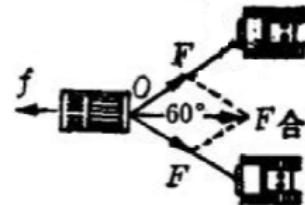


图 6.13

解答: 已知  $F_1 = 2.0 \times 10^4$  牛,  $F_2 = F_3$ , 夹角  $\angle AOB = 60^\circ$ . 因为是匀速起吊, 所以吊钩  $O$  受力平衡.  $F_2$  和  $F_3$  的合力  $F$  与  $F_1$  大小相等方向相反. 从图 6.12 中可知, 四边形  $OF_3FF_2$  是个菱形. 作菱形的对角线  $F_2F_3$ , 与  $OF$  交于  $O'$  点, 在三角形  $OO'F_2$  内:

$$F_2 = F_3 = \frac{F_1/2}{\cos 30^\circ} = \frac{2.0 \times 10^4}{\sqrt{3}} = 1.2 \times 10^4 \text{ N}$$

4. 掘沟机由两台拖拉机牵引 (图 6.13), 两条绳索对掘沟机的拉力都是  $2.5 \times 10^4$  牛, 绳索间的夹角为  $60^\circ$ , 如果拖拉机是匀速行进的, 土地的阻力有多大?

**解答：**把掘沟机作为研究对象，它的受力图如图 6.13 所示， $f$  为土地的阻力。因为掘沟机匀速行进，受力平衡，根据平衡条件，两绳拉力的合力  $F_{\text{合}}$  与  $f$  大小相等、方向相反。应用余弦定理，有

$$F_{\text{合}}^2 = F^2 + F^2 + 2F^2 \cos 60^\circ = 2F^2(1 + \cos 60^\circ)$$

所以

$$f = F_{\text{合}} = F\sqrt{2(1 + \cos 60^\circ)} = \sqrt{3}F = \sqrt{3} \times 2.5 \times 10^4 = 4.3 \times 10^4 \text{ N}$$

5. 如图 6.14 所示，物体在五个共点力的作用下保持平衡，如果撤去力  $F_5$ ，而保持其余四个力不变，这四个力的合力的大小和方向是怎样的？

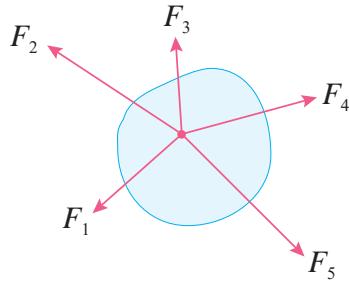


图 6.14

**解答：**根据共点力的平衡条件， $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$  的合力  $F$  必定与  $F_5$  大小相等、方向相反。

## 二、练习二

1. 当我们开关门窗时，如果力的作用线通过转轴，无论多大的力也不能把门窗打开或关上，为什么？

**解答：**力的作用线通过转轴时，力臂为零，力矩就为零，这个力对门窗不产生转动效果，所以不能把门窗打开或关上。

2. 如图 6.15 所示，如在自行车脚踏板上的向下的力是 15 牛，求这个力的力矩。

**解答：**设  $\ell$  为力  $F$  对轴  $O$  的力臂，则  $\ell = 17.5 \times \cos 30^\circ = 15.2 \text{ cm} = 0.152 \text{ m}$ ，力矩  $M = F\ell = 15 \times 0.152 = 2.28 \text{ N} \cdot \text{m}$

3. 图 6.16 是汽车制动器的路板的示意图。 $O$  是转动轴， $B$  端连接制动器。如果司机踏紧踏板的力  $F$  为 20 牛，制动器的阻力  $F'$  是多大？

**解答：**踏板是一个具有固定转动轴的物体，设  $F$  的力臂为  $\ell$ ， $F'$  的力臂为  $\ell'$ ，则根据平衡条件，有  $F\ell = F'\ell'$ ，则

$$F' = \frac{F\ell}{\ell'} = \frac{20 \times 0.21}{0.12} = 35 \text{ N}$$

此题的力矩平衡条件也可写成

$$M + M' = 0$$



图 6.15

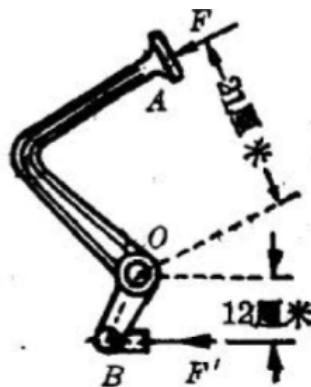


图 6.16

式中  $M = F\ell$ , 使物体作逆时针方向的转动, 为正值;  $M' = F'\ell'$ , 使物体作顺时针方向的转动, 为负值. 若  $M$ 、 $M'$  均以绝对值代入, 则  $M - M' = 0$ . 即

$$20 \times 0.21 - F' \times 0.12 = 0$$

解得  $F' = 35$  牛.

4. 试根据有固定转动轴的物体的平衡条件来证明初中学过的杠杆的平衡条件: 如果作用在杠杆上的两个力使杠杆向相反方向转动, 并且这两个力的大小跟它们的力臂长度成反比, 杠杆就平衡.

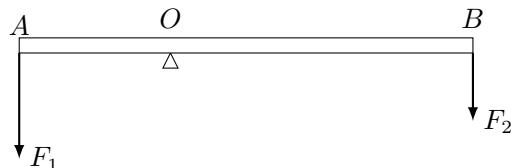


图 6.17

**解答:** 设有一杠杆如图 6.17 所示, 根据有固定转动轴物体的平衡条件, 应该有  $M_1 + M_2 = 0$ .

考虑到  $M_1 = F_1 \times OA$ , 为正值.  $M_2 = F_2 \times OB$ , 为负值. 所以式中  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $OA$ 、 $OB$  均取绝对值, 则得  $F_1 \times OA - F_2 \times OB = 0$ . 变形后得

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{OB}{OA}$$

这就是杠杆平衡条件.

5. 一个有固定转动轴的物体受到四个力的作用, 其中使物体向顺时针方向转动的两个力是 5 牛和 3 牛, 使物体向反时针方向转动的两个力是 2 牛和 6 牛. 这四个力的力臂依次是 0.50 米、0.25 米、0.05 米、0.20 米, 在这四个力的作用下, 物体能否平衡? 为了使物体平衡, 应该把一个 1 牛的力加在物体上离转动轴多远的地方? 这个力的力矩是正的还是负的?

**解答:** 根据题意, 已知  $F_1 = 5$  牛、 $F_2 = 3$  牛、 $F_3 = 2$  牛、 $F_4 = 6$  牛、 $\ell_1 = 0.50$  米、 $\ell_2 = 0.25$  米、 $\ell_3 = 0.05$  米、 $\ell_4 = 0.20$  米.

使物体顺时针转动的力矩

$$M_{\text{顺}} = M_1 + M_2 = -5 \times 0.50 - 3 \times 0.25 = -3.25 \text{ N} \cdot \text{m}$$

使物体反时针转动的力矩

$$M_{\text{反}} = M_3 + M_4 = 2 \times 0.05 + 6 \times 0.20 = 13 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$M_{\text{顺}} + M_{\text{反}} \neq 0$ , 所以不能平衡. 再加一个 1 牛的力  $F_5$ , 使  $M_5 + M_{\text{顺}} + M_{\text{反}} = 0$ , 则

$$M_5 - 3.25 + 1.3 = 0 \Rightarrow M_5 = 1.95 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\ell_s = \frac{M_s}{F_s} = \frac{1.95}{1} = 1.95 \text{ m}$$

1 牛的力应加在离轴 1.95 米的地方. 这个力矩是正的.

### 三、练习三

1. 在图 6.18 中, 汽车方向盘的半径是 0.20 米, 司机两手加在方向盘上的力都是 15 牛, 求方向盘受到的力偶矩.

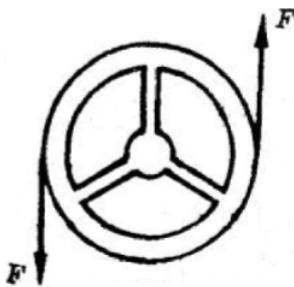


图 6.18

解答: 已知  $R = 0.20$  米,  $F = 15$  牛, 则力偶矩

$$M = F \times 2R = 15 \times 0.40 = 6.0 \text{ N} \cdot \text{m}$$

2. 一个物体受到两个力偶的作用, 力偶矩的代数和 50 牛·米, 这两个力偶的四个力的力矩的代数和是多大?

解答: 也是 50 牛·米. 因为力偶矩的大小实际上就是两个力的力矩的代数和, 而且它的大小同转动轴的位置无关. 所以两个力偶矩的代数和为 50 牛·米, 它们四个力的力矩的代数和也一定是 50 牛·米.

3. 一个物体受到三个力偶的作用, 其中两个使物体向顺时针转动的力偶的力分别是 3 牛和 4 牛, 力偶臂分别是 0.50 米和 0.25 米; 另一个使物体向反时针转动的力偶的力是 5 牛, 力偶臂是 0.50 米, 这个物体能够平衡吗?

解答: 设三个力偶的力分别为  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ , 力偶臂分别为  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ . 根据题意,  $F_1 = 3$  牛、 $F_2 = 4$  牛、 $F_3 = 5$  牛、 $d_1 = 0.50$  米、 $d_2 = 0.25$  米、 $d_3 = 0.50$  米, 它们

的力偶矩为

$$M_1 = -F_1 d_1 = -3 \times 0.50 = -15 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_2 = -F_2 d_2 = -4 \times 0.25 = -1.0 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_3 = F_3 d_3 = 5 \times 0.50 = 2.5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$M_1 + M_2 + M_3 = 0$ . 可见, 这个物体能够平衡.

#### 四、练习四

1. 背上背着重东西的人, 为什么要向前倾?

**解答:** 如果身体不向前倾, 则背上重物后人的重心要后移, 有可能使重力作用线超越支面, 使人向后跌倒. 人体向前倾, 可使重力作用线仍在支面内, 保持人体平衡.

2. 老年人扶手杖走路为什么不容易跌倒?

**解答:** 老年人扶手杖可使支面扩大, 重力作用线就不容易越出支面, 稳度增大.

3. 用载重汽车装运木箱, 一些木箱装的是铁钉, 另一些木箱装的是铝制器皿, 怎样装木箱, 汽车的稳度比较大?

**解答:** 应该将装铁钉的木箱放在下面, 装铝制器皿的木箱放在上面. 这样整个车子重心较低、稳度较大.

4. 下列情况是哪类平衡?

- (a) 体操运动员在吊环上做倒立;
- (b) 体操运动员吊在吊环上;
- (c) 杂技演员走钢丝;
- (d) 轮子套在水平轴上.

**解答:** (a)、(c) 为不稳定平衡. (b) 为稳定平衡. (d) 为随遇平衡.

5. 把一个长方体立在一块木板上, 在长方体前表面的中心点固定一个小螺钉, 在小螺钉上拴一个小铅锤. 把木块的一端慢慢抬起, 研究一下长方体在什么条件下才倾倒? 已知前表面的边长, 你能否算出木块要抬起多大角度, 长方体才倾倒? 实际算一算, 再用实验来检验.

**解答:** 这里所说的前表面是指面向读者的那一面. 当小铅锤越出长方体前表面的底边时, 长方体就要倾倒. 图 6.19 画的是临界状态, 从图上可以看出

$$\tan \theta = \frac{b}{a}, \quad \theta = \tan^{-1} \frac{b}{a}$$

式中  $a, b$  分别为前表面的两个边长, 若木板抬起的角度大于  $\theta$ , 长方体就要倾倒.

#### 五、习题

1. 略 (课本已作解答)

2. 图 6.23 中的  $AC$  和  $BC$  是固定在电线杆上的铁棍,  $AC$  长 0.9 米,  $BC$  长 1.2 米,  $AB$  之间的距离是 0.6 米, 在  $C$  处挂一盏重 20 牛的街灯, 求  $AC$  对街灯的拉力和  $BC$  对街灯的支持力.

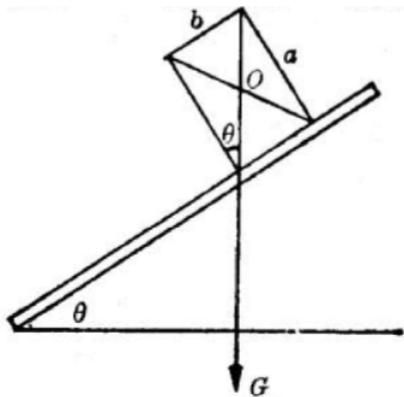


图 6.19

解答：设  $AB$  长为  $a$ ,  $BC$  长为  $b$ ,  $AC$  长为  $c$ . 则根据题意  $a = 0.6$  米、 $b = 1.2$  米,  $c = 0.9$  米, 对  $C$  点作受力分析, 如图所示.  $C$  点受  $AC$  的拉力  $F_1$ ,  $BC$  的支持力  $F_2$  和电灯的拉力  $G$  (等于电灯的重量) 而平衡. 根据共点力平衡条件,  $F_1$  和  $F_2$  的合力  $F$  应与  $G$  大小相等方向相反. 从图中知,  $\triangle FCF_2 \sim \triangle ABC$ . 所以

$$\begin{aligned}\frac{F_1}{F} &= \frac{c}{a}, & F_1 &= \frac{c}{a} \times F = \frac{0.9}{0.6} \times 20 = 30\text{N} \\ \frac{F_2}{F} &= \frac{b}{a}, & F_2 &= \frac{b}{a} \times F = \frac{1.2}{0.6} \times 20 = 40\text{N}\end{aligned}$$

所以  $AC$  对  $C$  点的拉力 (也就是  $AC$  对电灯的拉力)  $F_1$  为 30 牛,  $BC$  对电灯的支持力  $F_2$  为 40 牛, 方向如图.

3. 略 (课本已作解答)

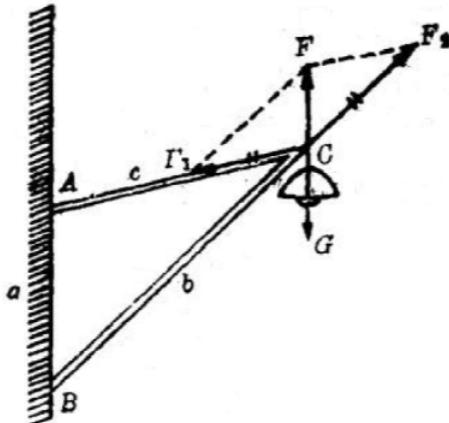


图 6.20

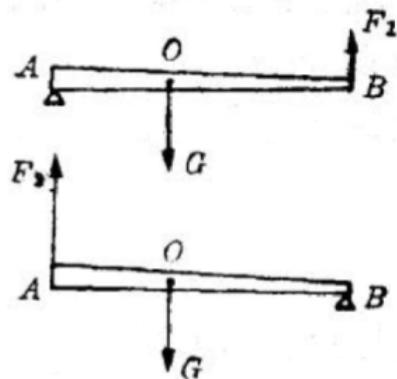


图 6.21

4. 一根木料, 抬起它的右端要用 480 牛竖直向上的力, 抬起它的左端要用 650 牛竖直向上的力, 这根木料有多重?

解答：图 6.21 反映了题意, 抬起右端时, 根据平衡条件, 有

$$F_1 \times AB - G \times AO = 0$$

抬起左端时，有

$$G \times OB - F_2 \times AB = 0$$

两式相减，得

$$F_1 \times AB + F_2 \times AB - G(AO + OB) = 0$$

$$(F_1 + F_2) \times AB = G \times AB$$

$$G = F_1 + F_2 = 480 + 650 = 1130\text{N}$$

说明：这一题中两次抬起时的支点  $A$  和  $B$  并不是实际的固定转动轴，但同学们根据生活经验可以理解，在  $F_1$ 、 $F_2$  刚刚抬起一端时，木料是不会发生平动的，一定是绕另一端为轴作转动。因此，仍可应用有固定转动轴物体的平衡条件。

5. 放在斜面上的一个物体，当斜面倾角为  $\theta$  时，它沿着斜面匀速下滑。试证明物体和斜面之间的滑动摩擦系数  $\mu = \tan \theta$ 。

解答：物体受三个力作用：重力  $G$ 、斜面支持力  $N$ 、滑动摩擦力  $f$ 。因为物体匀速下滑，所以满足共点力平衡条件。根据平衡条件， $N$  与  $f$  的合力  $F$  应与  $G$  大小相等方向相反，如图 6.22 所示。在  $\triangle OFF$  中，

$$f = F \sin \theta = G \sin \theta, \quad N = F \cos \theta = G \cos \theta$$

因为  $f = \mu N$ ，所以

$$\mu = \frac{f}{N} = \frac{G \sin \theta}{G \cos \theta} = \tan \theta$$

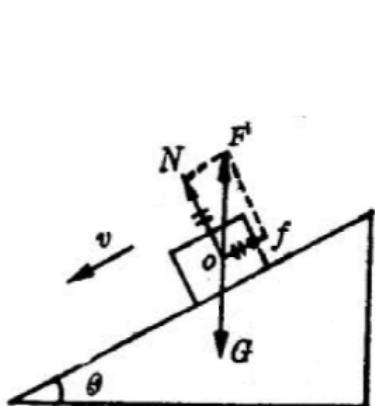


图 6.22

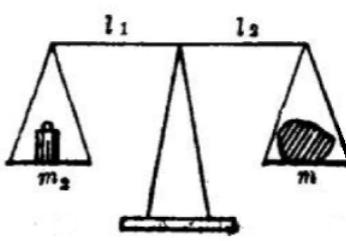
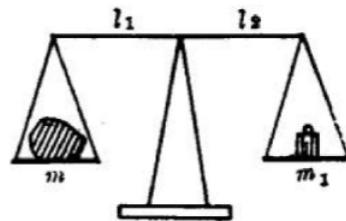


图 6.23

6. 如果天平的两臂并不完全相等，可以采取所谓复称法求得物体的真实质量  $m$ 。先把物体放在左盘，砝码放在右盘，天平平衡时砝码的质量是  $m_1$ 。然后把物体放在右盘，砝码放在左盘，天平平衡时砝码的质量是  $m_2$ 。试证明物体的真实质量  $m = \sqrt{m_1 m_2}$ 。

**解答：**复称法的原理可用图 6.23 表示，在第一种情况下，根据力矩平衡条件，得到  $m g \ell_1 = m_1 g \ell_2$ . 在第二种情况下，得到  $m_2 g \ell_1 = m g \ell_2$ . 两式相除，得

$$\frac{m}{m_2} = \frac{m_1}{m}$$

所以

$$m^2 = m_1 m_2, \quad m = \sqrt{m_1 m_2}$$

7. 无风的时候竖直下落的雨滴受到两个力的作用：重力、空气阻力。设空气阻力  $f$  与雨滴下落的速度  $v$  成正比，即  $f = kv$ . 开始下落时雨滴的速度较小，空气阻力也较小，雨滴加速下落，速度越来越大。随着速度的增大，空气阻力也增大，当空气阻力增大到与重力平衡时，雨滴就以一定的速度匀速下落。这个速度叫做极限速度或收尾速度，设雨滴的质量为  $m$ ，试证明雨滴的极限速度  $v = mg/k$ .

**解答：**当雨滴达到极限速度时，受力平衡，即  $mg = f$ . 根据题意， $f = kv$ . 所以

$$mg = kv, \quad v = \frac{mg}{k}$$

8. 用斜向上方的拉力拉着一个物体在水平面上匀速前进。已知拉力跟水平面成  $30^\circ$  角，拉力的大小是 200 牛，物体的重量是 500 牛。求物体和水平面间的滑动摩擦系数。

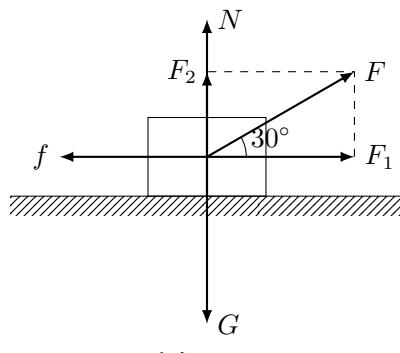


图 6.24

**解答：**根据题意画出物体的受力图如图 6.24 所示，拉力  $F = 200$  牛，与水平面成  $30^\circ$  角，物体的重量  $G = 500$  牛，则拉力  $F$  在水平方向的分力

$$F_1 = F \cos 30^\circ = 200 \times \frac{\sqrt{3}}{2} = 173\text{N}$$

由于物体在水平方向上做匀速运动，所以摩擦力  $f = F_1 = 173$  牛。

拉力  $F$  在竖直方向上的分力

$$F_2 = F \sin 30^\circ = 200 \times \frac{1}{2} = 100\text{N}$$

在竖直方向上，物体受到的水平面的支持力  $N$ 、拉力的分力  $F_2$  和重力  $G$ ，它们的合力为零，即  $N + F_2 = G$ ，所以，

$$N = G - F_2 = 500 - 100 = 400\text{N}$$

## 物体和水平面间的摩擦系数

$$\mu = \frac{f}{N} = \frac{173}{400} = 0.43$$

9. 图 6.25 是一台起重机的示意图，机身和平衡体的重量  $G_1 = 4.2 \times 10^5$  牛，起重杆的重量  $G_2 = 2.0 \times 10^4$  牛，其他数据如图中所示。起重机至多能提起多重的货物。提

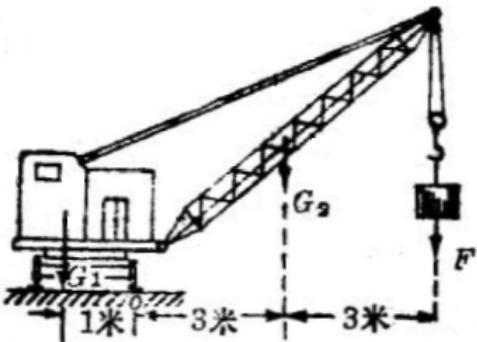


图 6.25

示：这时起重机以  $O$  为转动轴而保持平衡。

解答：起重机的受力情况比较复杂，除图 6.25 中所画的三个力外，一般说还有两轮上受到的地面支持力。但当提起最大重量的货物时，左轮已差不多与地面脱离接触，全部重量压在右轮上，所以可以看成以  $O$  点为轴恰好力矩平衡，根据平衡条件，可列出

$$G_1 \times \ell_1 - G_2 \times \ell_2 - F \times \ell = 0$$

式中  $\ell_1$ 、 $\ell_2$ 、 $\ell$  分别为  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $F$  的力臂。所以

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{\ell}(G_1 \times \ell_1 - G_2 \times \ell_2) \\ &= \frac{1}{6}(42 \times 10^4 - 6.0 \times 10^4) = 6.0 \times 10^4 \text{ N} \end{aligned}$$

10. 图 6.26 是一把杆秤，提扭和挂钩的距离  $OB$  是 6.0 厘米，秤锤的质量是 1.2 斤。不称物体时，把秤锤挂在  $A$  点，杆秤平衡， $A$  点就是刻度的起点，设  $OA$  为 1.6 厘米，杆秤的质量为 0.48 斤，求杆秤的重心。在称某一物体时，秤锤移到  $D$  点后杆秤平衡， $AD$  为 24 厘米，所称物体的质量是多少？

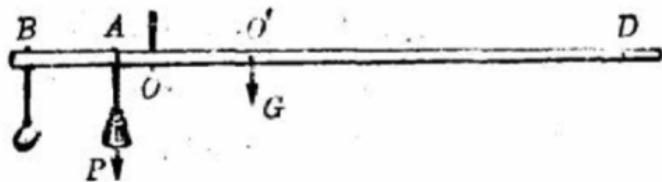


图 6.26

解答：当杆秤不称物体时，秤锤挂在  $A$  点而平衡，设  $O'$  为杆秤的重心，杆秤重量为

$G$ , 秤锤的重量为  $P$ . 则根据力矩平衡条件,

$$P \times AO - G \times OO' = 0$$

得:

$$OO' = \frac{P \times AO}{G} = \frac{1.2 \times 1.6}{0.48} = 4.0\text{cm}$$

(此处重量  $P$ 、 $G$  均以其质量的数值代入, 下同) 说明杆秤重心在  $O$  点右侧 4.0 厘米处.

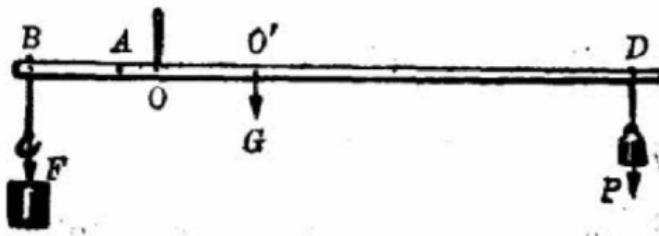


图 6.27

当杆秤称某一物体时, 设物体重  $F$ , 如图 6.27 所示. 则

$$F \times BO - G \times OO' - P \times OD = 0$$

$$\begin{aligned} F &= \frac{G \times OO' + P \times OD}{BO} \\ &= \frac{0.48 \times 4.0 + 1.2 \times (24 - 1.6)}{6.0} = 4.8\text{斤} \end{aligned}$$

被称物体的质量是 4.8 斤.

11. 天平的横梁 (连同指针) 是一个有固定转动轴的物体, 转动轴就是中央刀口  $O$  (图 6.28). 横梁的自重为  $G$ , 重心  $C$  在指针上离转动轴  $O$  为  $k$  的地方. 天平两盘中的重量相等时, 作用在横梁两端的力  $F$  相等, 横梁平衡, 指针指在标尺的中央, 即指针停在竖直方向, 天平两盘中的重量稍有不等, 横梁就要倾斜, 指针随着偏移到较轻的一方, 自重  $G$  对转动轴  $O$  的力矩将阻止横梁倾斜, 最后横梁在某一倾斜位置上达到平衡. 设指针与竖直方向成  $\theta$  角时横梁平衡, 可以证明

$$\tan \theta = \frac{L}{Gh} (F_1 - F_2)$$

从上式可以看出, 对于天平两盘中一定的重量差,  $G$  和  $h$  越小, 则  $\theta$  角越大, 这种天平越灵敏. 所以通常灵敏的天平要选用轻质材料做横梁, 并要提高重心的高度. 试应用有固定转动轴的物体的平衡条件证明上式.

**证明:** 从图 6.28 可以看出, 当  $F_1 \neq F_2$  时, 重力  $G$  对  $O$  产生力矩, 其力臂为  $h \sin \theta$ , 而  $F_1, F_2$  的力臂均为  $L \cos \theta$ . 根据有固定转动轴物体的平衡条件, 有

$$F_2 \times L \cos \theta + G \times h \sin \theta - F_1 \times L \cos \theta = 0$$

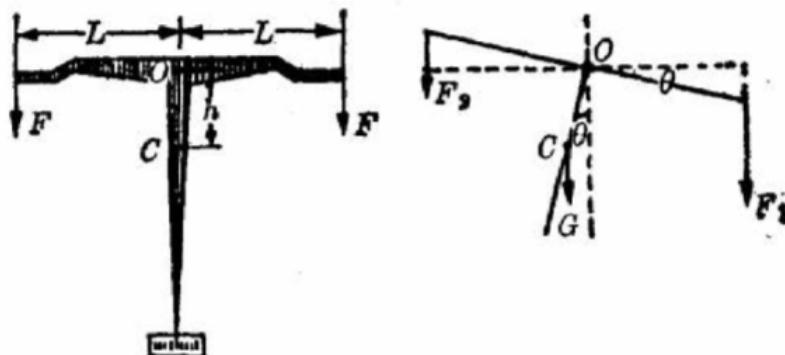


图 6.28 天平的平衡

所以,

$$\tan \theta = \frac{L}{Gh} (F_1 - F_2)$$

12. 图 6.29 表示拖拉机（或汽车）在上坡。拖拉机前后轮的轮距是  $L$ ，重心的高度是  $h$ ，重心至前轮的距离是  $\ell$ 。可以证明，上坡时不易向后翻倒，路面的最大倾角  $\theta_1$  满足条件：

$$\tan \theta_1 = \frac{L - \ell}{h}$$

拖拉机下坡时，可以证明，下坡时不易向前翻倒，路面的最大倾角  $\theta_2$  满足条件：

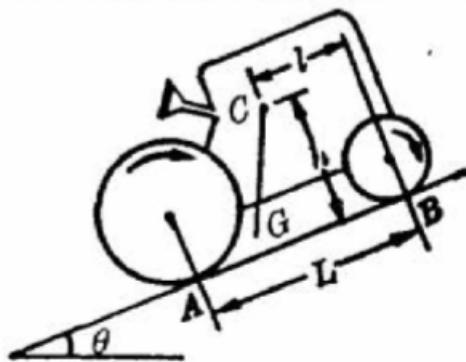


图 6.29

$$\tan \theta_2 = \frac{\ell}{h}$$

试证明上两式，并根据上两式讨论：重心太高、太靠前、太靠后有什么不好？

**证明：**在拖拉机上坡时，路面倾角  $\theta_1$  过大，会使拖拉机向后翻倒。此时，实际上就是重力作用线已超过支面的后沿，即后轮与斜坡的接触点  $B$ ，而前轮则与斜坡脱离接触。此种情况如图 6.30 所示，从重心  $C$  作一条斜面的垂线相交于  $D$  点，则从  $\triangle BCD$  中可看出，

$$\tan \theta_1 = \frac{L - \ell}{h}$$

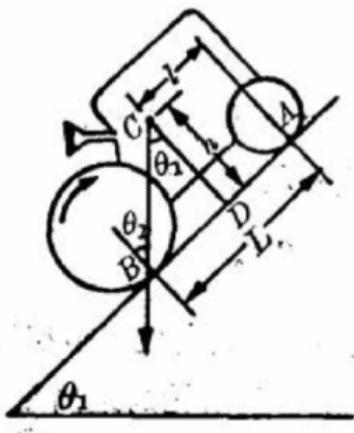


图 6.30

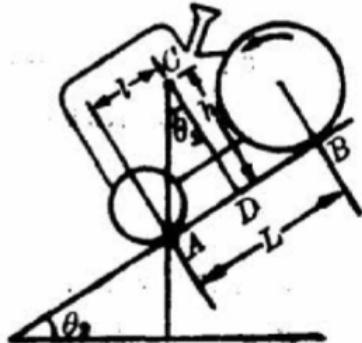


图 6.31

在拖拉机下坡时，拖拉机容易向前翻倒，其将倒未倒的极限情况如图 6.31 所示，从 C 点作斜坡的垂线 CD，在  $\triangle ACD$  中可看

$$\tan \theta_2 = \frac{\ell}{h}$$

从以上两式可以看出，如果重心太高即  $h$  太大，则  $\tan \theta_1$  和  $\tan \theta_2$  就小  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  都小，说明无论上坡或下坡，都容易翻倒。如果重心太靠前即  $\ell$  小，下坡时  $\theta_2$  就小，说明不宜在坡度较大处下坡，如果重心太靠后即  $(L - \ell)$  小， $\theta_1$  就小，说明不宜在坡度较大处上坡。

## 第五节 参考资料

### 一、静力学中物体受力的方向

可以在空间作任意运动的物体叫自由体，如飞行中的飞机，发射出去的炮弹等都是自由体。因受到周围物体阻碍、限制而不能作任意运动的物体称为非自由体，限制非自由体运动的其他物体，称为该非自由体的约束体。例如，摆动着的单摆，摆绳是摆球的约束体，它限制摆球只能在不大于绳长的范围内运动，而通常是在以绳长为半径的圆弧上运动。

促使物体运动（或有运动趋势）的力称为主动力。非自由体在主动力作用下，将向某一方向运动，此如果受到约束体的限制，非自由体将给约束体一个作用力，同时约束体给非自由体一个反作用力。这个反作用力称为约束反力。因为约束反力是限制物体运动的，所以它的作用点应在约束体与非自由体相互连接或接触处。它的方向应与约束体所限制的运动方向相反，这是确定约束反力方向和作用点的基本依据。

工程中常见的约束有以下几种基本类型，下面着重说明约束反力的方向。

#### （一）柔性体约束

由绳索、链条、胶带等形成的约束是柔性体约束，这些约束体的特点是只能承受拉力，不能承受压力和抗拒弯曲，因而只能限制物体沿着柔性体伸长的方向运动。所以柔性体的

约束反力只能是拉力，作用在连接点（或假想的截断处），方向沿着柔性体的轴线而背离物体。课本中悬挂重物的绳、牵引悬臂的钢索，对物体的作用力都属于这种情况。

### （二）光滑接触面的约束

在忽略摩擦，把接触表面作为理想的光滑面的情况下，无论支承接触表面的形状如何，约束体只能限制非自由体沿接触处公法线向接触体内的运动，不能限制非自由体向任何其他方向的运动。所以光滑接触面的约束反力只能是压力，作用在接触处，方向沿着接触表面在接触处的公法线而指向物体。

### （三）光滑圆柱形铰链约束

圆柱形铰链是连接两个构件的圆柱形零件，普通称为销钉门窗上的合页，机器上的轴承都属于圆柱形铰链。铰链约束只限制两个非自由体的相对移动，而不能限制它们的相对转动。课本中塔式起重机的悬臂与塔身的连接，三角形支架两支杆与墙壁的连接都作为铰链连接处理，属于铰链约束，这种情况下约束反力在垂直于圆柱销轴线的平面内，通过圆柱销中心，方向（是压力或拉力）视具体情况而定。

## 二、力偶的性质

力偶是两个具有特殊关系的力的组合，虽然力偶中的每个力仍具有一般的力的性质，但在作为一个整体考虑它们对刚体的作用时，则出现了与单个力不同的性质：

1. 力偶既没有合力，本身又不平衡，是一个基本的力学量。
2. 力偶对于作用面内任一点之矩与矩心位置无关，恒等于力偶矩。因此力偶对刚体的效用力偶矩量度。
3. 作用在同一平面内的两个力偶，若其力偶矩大小相等，转向相同，则该两个力偶彼此等效。这就是平面力偶的等效定理。

由等效定理可以得出两个推论：

1. 力偶可以在其作用面内任意转移，而不影响它对刚体的效应。
2. 只要力偶矩大小和转向不变，可以任意改变力偶中力的大小和相应地改变力偶臂的长短，而不影响它对刚体的效应。

# 第七章 机械能

---

第一节 教学要求 . . . . .	171
第二节 教学建议 . . . . .	172
一、第一单元 . . . . .	173
(一)功的概念的建立 . . . . .	173
(二)正功和负功 . . . . .	173
(三)汽车牵引力与速度的关系 . . . . .	174
(四)第二单元 . . . . .	174
(五)关于能量的概念 . . . . .	174
(六)动能概念和动能定理的建立 . . . . .	175
(七)“动能的增量”和“动能的增加” . . . . .	175
(八)动能定理的应用 . . . . .	175
(九)如何使学生正确理解重力势能的概念 . . . . .	176
(十)弹性势能的定性研究 . . . . .	177
(十一)机械能的转化和守恒 . . . . .	177
(十二)除重力、弹力外还有其他力做功的情况 . . . . .	178
第三节 实验指导 . . . . .	179
一、演示实验 . . . . .	179
(一)物体的动能跟它的质量和速度有关 . . . . .	179
(二)物体的重力势能跟它的质量和高度有关 . . . . .	180
(三)发生弹性形变的物体具有弹性势能 . . . . .	180
(四)动能和势能的相互转化 . . . . .	180
二、学生实验 . . . . .	181
(一)验证机械能守恒定律 . . . . .	181
三、课外实验活动 . . . . .	182
(一)研究小球滚下的位置 . . . . .	182
第四节 习题解答 . . . . .	182
一、练习一 . . . . .	182
二、练习二 . . . . .	184
三、练习三 . . . . .	184
四、练习四 . . . . .	185
五、练习五 . . . . .	187
六、练习六 . . . . .	188
七、练习七 . . . . .	190

八、习题 . . . . .	191
<b>第五节 参考资料 . . . . .</b>	<b>198</b>
一、关于系统的动能定理 . . . . .	198

---

## 第一节 教学要求

通过本章的学习，要使学生认识到：各种形式的能可以相互转化，而且在转化过程中保持守恒；功是能的转化的量度。

能的转化和守恒，是贯穿全部物理学的基本规律之一。解决力学问题，从能量的观点入手分析，往往是很方便的。因此，在本章的教学中，要特别注意培养学生从能量的观点来分析问题。

这一章的教学要求是：

1. 理解功的概念，掌握功的计算公式，了解正负功的意义。
2. 理解功率的概念，掌握功率的公式  $P = Fv$ 。
3. 理解动能的概念，掌握动能的公式，掌握动能定理，会运用动能定理解决力学问题。
4. 理解重力势能的概念，掌握重力势能的公式，掌握重力做功与重力势能变化的关系。了解重力做功与路径无关是引入重力势能的前提。
5. 了解弹性势能的概念，知道弹力做功与弹性势能无关。
6. 掌握机械能守恒定律，会运用这个定律解决力学问题。
7. 理解功和能的关系，知道功是能的转化的量度，学习用能的观点来分析解决力学问题。

下面对这一章的教学内容作些具体说明。

为了给讲解动能和重力势能做好准备，教材安排了“能量”一节，让学生对什么是能量以及功和能的关系有一个概括的了解。什么是能量？许多课本中常常引用的“能是物体做功的本领”，这个定义，严格说来有些不妥。从状态函数的角度给出能量的普遍定义，中学生又难于接受。因此，教材沿用初中物理的提法：一个物体能够做功，就说这个物体具有能量。这并不是给能量下定义，只是使学生初步认识能量。

动能的公式实际上是动能定理的特殊情形，可以把动能和动能定理合在一起来讲，直接推导出动能定理，同时给出动能的定量表示。这样的讲法看起来简洁，但对初学者来说知识太密集了。从便于接受的角度来考虑，还是把动能和动能定理分作两节来讲为宜。

严格地说，应在重力做功与路径无关的基础上得出重力势能的概念，这样讲，学生接受起来有一定的困难，因此教材的讲法是，先通过克服重力做功引入重力势能，然后说明重力做功与路径无关，正因为这样，才能引入重力势能的概念。这一点不能要求过高，使学生大体上有个印象就可以了。讲解重力势能的相对性时，要使学生明确知道，参考平面的选择可视研究问题的方便而定。重力势能的正负，使学生理解它的意义即可。负的重力势能在力学中基本不用，在电学中要讲到负的电势能。

关于势能属于系统，也不要求细讲；以后本章提到重力势能时，仍认为是物体所具有的，因为采取这样的讲法，学生容易理解，可以避免因过分严格而造成学习上的困难。但初步了解势能属于系统，对今后学习内能有好处。

机械能守恒是指机械能在转化中守恒，因此在讲守恒定律之前，应让学生对机械能的相互转化获得深刻的印象。这里，要求学生对功这个概念有进一步的理解。在本章第一节给出功的概念及其量度；第三节把功和能这两个概念联系起来，使学生知道做功的过程总伴随着能量的改变，而且做多少功，能量就改变多少，但未提及能的转化；这一节讲了机械能的相互转化，并把做功和能的转化联系起来，使学生对功的概念的理解进一步加深。

关于机械能守恒定律，在证明中，先得到结论，重力做多少功，就有多少重力势能转化成等量的动能，然后移项得出机械能守恒定律的表达式。这样处理，目的是强调等量转化，以期学生对机械能守恒的理解能够具体些；同时有助于在本章最后概括出功是能量转化的量度这一结论。教材是就自由落体这个具体例子来证明机械能守恒定律的，没有作一般性的证明。但是要求学生明确知道，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，守恒定律都成立。由于弹性势能不作定量讨量，因此在守恒定律的表达中没有提到弹力做功：而是在定律的表达之后提到在有弹性势能参加的相互转化中，如果只有弹力做功，机械能也保持守恒。

第十节通过例题讲解如何应用机械能守恒定律时，应着重说明以下几点。第一，说明用守恒定律求得的答案与用动力学和运动学求得的答案相同，使学生确信守恒定律的有效性。第二，说明运用守恒定律只涉及起始和终了状态，不涉及中间过程的细节，因此用它来处理问题相当简便。第三，说明有的问题只用守恒定律还不能完全解决，还需要用其他知识，希望学生体会这一点，培养自己综合运用知识的能力。第四，强调从能量观点分析问题的重要性，本节最后说明寻求“守恒量”是物理研究工作的一个重要方面，希望学生能对守恒定律的重要有所了解。

最后一节功和能的教学，主要是在前面的知识基础上，进一步明确其他力做机械功的过程实际上是机械能与其他形式的能相互转化的过程，而且做了多少机械功，机械能就改变多少。最后得出结论：能量在转化中保持守恒，功是能量转化的量度。

为了简明易懂，在最后一节的讲述中没有涉及弹性势能，其他力是指重力以外的其他力。用绳子拉物体，绳的拉力属于弹力，但作为外力来处理。这类问题不要引导学生去研究，它已超出了本书的要求。

## 第二节 教学建议

本章是从做功和能量变化的角度，来研究物体在力的作用下运动状态的改变的。为此，引入功、功率、动能、势能等概念，介绍了动能定理和机械能守恒定律两条规律。这些概念和规律在物理学上占有重要地位。

这一章可分两个单元。第一单元（第一、二节）讲述功和功率这两个概念，第二单元（第三至十一节）讲解能的概念以及不同情况下功和能的关系。本章教学的重点是使学生掌握动能定理和机械能守恒定律这两条重要的物理规律。

## 一、第一单元

### (一) 功的概念的建立

在物理学里，许多概念一建立起来就能体会它明确的物理意义，如速度是用来反映运动快慢的物理量，加速度是用来反映速度变化快慢的物理量等。但功这个概念不是这样教材先给功下一个明确的定义，然后要在研究功和能的关系时才能逐步体会到功是物体能量转化的量度，这一认识，要逐步渗透并贯穿于整章教学的过程中。因此，在第一单元的教学中，首先是要让学生准确掌握功的定义和计算对功的意义的理解，不要急于求成，要在整章教学中一步一步地引导，使学生逐步理解。

在介绍功的计算公式，研究力的方向与运动方向成  $\alpha$  角的情况时，教材是将力  $F$  分解成两个分力  $F_1$  和  $F_2$ ，然后计算出分力的功，从而得出  $W = F s \cos \alpha$  的。这一分析过程包含了分力所做的功的总和等于合力所做的功这一重要思路。教师在教学中可适当地启发学生思考和体会这一点，以便在以后的学习中应用。

得出公式  $W = F s \cos \alpha$  后，应该通过对不同的  $\alpha$  角度的讨论，理解什么情况下力  $F$  做功，什么情况下力  $F$  不做功，从而与前面所说的功的两个不可缺少的因素相呼应。要使学生明白，只要夹角  $\alpha$  不等于  $90^\circ$ ，力对物体就做了功。

对程度较好的学生，还可以进一步分析一下什么叫“物体在力的方向上的位移”，如图 7.1 所示， $s \cos \alpha$  就是物体在力方向上的位移，也就是位移  $s$  在力的方向上的投影，用它乘上力  $F$ ，也可以得到  $W = F s \cos \alpha$ 。

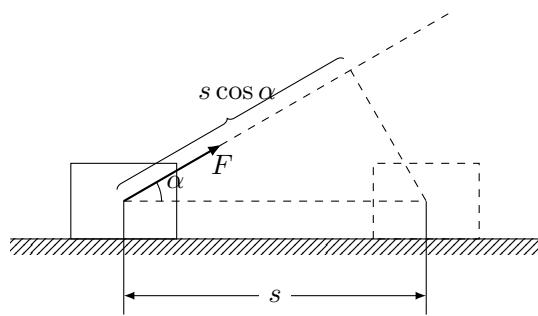


图 7.1

### (二) 正功和负功

正确地理解正功和负功对以后的学习很重要。由于公式  $W = F s \cos \alpha$  中  $F$  和  $s$  均为绝对值，所以  $W$  的正负完全决定于  $\cos \alpha$  的正负，要使学生体会到， $\cos \alpha > 0$  ( $F$  与  $s$  的夹角为锐角) 意味着力  $F$  对物体产生位移  $s$  有一定贡献，可以理解为力  $F$  对物体确实做了功。而当  $\cos \alpha < 0$  时， $F$  与  $s$  的夹角为钝角，力  $F$  对物体产生位移  $s$  实际上起了阻碍作用，所做的功是负功。这时，物体要继续产生位移，必须克服力  $F$  的阻碍，所以力  $F$  对物体做负功，又可以表达为物体克服力  $F$  做功（取正值）。学了动能定理之后，学生就能进一步从能量改变的角度体会正功和负功的意义。

### (三) 汽车牵引力与速度的关系

教材推导了公式  $P = Fv$ . 要提醒学生注意, 这是在力的方向与位移方向相同的情况下推出来的, 一般实际问题都属于这种情况.

利用公式  $P = Fv$  来讨论牵引力与速度的关系, 是以汽车的输出功率一定为前提的, 当然, 汽车开动时实际功率不一定保持不变, 驾驶员可以用控制混合气体流量的办法来控制功率, 然后再用换档的办法来调节速度, 从而改变牵引力的大小, 因此, 公式  $P = Fv$  是有实际意义的.

为了使学生熟悉公式  $P = Fv$  的应用, 课本安排了一个例题. 在讲解这个例题时, 如何分析卡车由开始到匀速行驶的过程是很重要的, 它可以培养学生养成分析物理过程的习惯, 避免简单地套用公式. 这一段分析实际上包含了三个内容, 一是在功率一定的条件下, 利用公式  $P = Fv$  讨论  $F$  与  $v$  的关系; 第二是在不同  $v$  的情况下讨论  $F$  与阻力  $f$  的合力如何变化; 第三是当  $F_{合}$  减小时, 加速度减小, 但速度继续增大, 当  $F_{合}$  减小到零时, 加速度为零, 速度不再增加. 此时的速度就是汽车在额定功率下的最大速度. 教学时把这三个内容分析清楚了, 学生就比较容易理解了, 为了教学方便起见, 在分析这一问题时, 建议教师在黑板上画出示意图, 如图 7.2 所示.

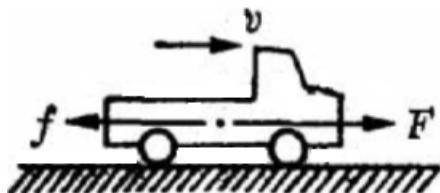


图 7.2

### (四) 第二单元

这一单元从第三节一直到第十一节, 内容很多、第三节相当于这一单元的引言. 在这一节里所说的人们对功能关系的基本认识——做功总是伴随着能量的改变, 而且做多少功, 能量就改变多少一是整个单元教学的主线. 第十一节是单元的结束语. 第三节和第十节给出了这一章的基本思路, 应予以足够的重视.

### (五) 关于能量的概念

要对能量下一个严格的定义是困难的, 因此, 在新课本中不给出能量的定义, 只沿用了初中课本中的一个粗浅的说法: 一个物体能够对外界做功, 我们就说这个物体具有能量. 为了使学生能够比初中有更进一步的理解, 教材讨论了怎样定量地确定能量的变化问题, 从而得出用做功的多少来确定能量变化的多少这样一个基本认识.

讲解这一节教材的关键是要分析好一些实例: 要分析流动的河水、举高的铁锤等物体怎样对别的物体做功, 自己的能量又怎样变化. 这样多次重复, 就能使学生对上述基本认识有深刻的印象.

这里有一个问题教学时应加以注意. 本章前两节只讲力对物体做功, 即做功的主体是力. 而这里说物体做功, 怎么理解? 实际上这就是指物体克服阻力做功 (即阻力对物体做

负功), 例如流动的河水克服水轮机的阻力而做功; 举高的铁锤克服木桩的阻力而做功, 等等, 有了这一认识, 就能对教材 224 页中说的什么时候物体能量增加, 什么时候能量减少有正确的理解. 要使学生明白, 物体克服阻力做功, 能量要减少, 外力对物体做正功, 物体的能量要增加.

### (六) 动能概念和动能定理的建立

教材分成三个层次来建立起动能这个概念, 第一步, 先说运动的物体能够做功, 因而具有能量, 称为动能. 这一点是直接根据上一节所讲的能量的概念来讲的第二步, 讨论如何通过做功来定量地确定动能的方法. 这是以上一节中所讲的功和能的关系的基本认识为依据的. 第三步, 具体推导动能的定量表达式. 前两步由于直接引用上一节关于能量的结论, 所以容易被学生所接受, 第三步的推导应用了牛顿第二定律和运动学的一些知识, 其推导方法同下一节动能定理的推导方法是一样的, 只不过情况较为简单(假设物体原来是静止的). 所以这一节教材同前后各节的联系是很紧密的. 教学中要引导学生注意这种联系, 使学生对功和能的关系的认识能一环扣一环, 逐步加深理解.

动能定理是一条适用范围很广的物理规律, 但教材在推导这条规律时是由特殊到一般逐步扩大的. 先把第四节的推导扩大到初速不为零的情况, 得到外力对物体所做的功等于物体动能的增加的结论. 然后将此结论推广到外力与运动方向相反的情况, 最后再推广到物体受到几个力作用的情况. 但是, 尽管经过几次推广, 教学中还是应该引导学生注意这条规律的适用范围. 在中学范围内, 动能定理只应用在研究对象是一个物体(质点)、作用力是恒力的情况, 对作用力是变力的情况, 动能定理也是适用的, 但学生没有学过变力作功的计算, 无法应用动能定理来解决实际问题. 对于几个物体组成的物体系, 动能定理必须改变形式, 否则不能适用(见参考资料)

### (七) “动能的增量”和“动能的增加”

课本在表述动能定理时没有用“动能的增量”这种提法, 而说“动能的增加”, 学生比较容易理解, 但对程度较好的学生也可介绍“增量”这种提法. 不管使用何种提法, 都要使学生理解, 变化后的动能与变化前的动能之差, 即

$$\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$$

可以是正的, 也可以是负的.

### (八) 动能定理的应用

讲解动能定理的例题要达到两个目: 一是学会应用动能定理解题的一般方法, 即首先要分析物体受力情况, 并研究整个过程中外力所做的总功. 然后看初末状态的动能. 最后列出方程, 解出未知量, 二是要让学生明白同一例题用牛顿第二定律和运动学知识也可以解. 但在不要求研究过程中加速度和时间的情况下, 用动能定理要比用牛顿第二定律解题方便得多.

教师在教学过程中如果感到书上例题不够, 可适当补充. 例如可以补充一道物体初速不为零的例题. 但例题和习题不必做得太多, 这不仅是因为要减轻学生的负担, 而且是对

动能定理这个教学重点的处理要适当。如果仅仅从算题的角度来理解动能定理的重要，认为用它可以计算本章的各种问题，那就必然会削弱其他知识的学习和理解。例如有的同学就认为连势能这样的概念也没有必要引入，这种看法显然对培养学生从能量角度考虑问题是不利的。

### (九) 如何使学生正确理解重力势能的概念

重力势能是一个重要的概念，对学生来说，掌握这个概念又是一个难点。为了使学生掌握好这个难点，课本先从功和能的基本认识出发引入重力势能概念，然后再讲重力做功的特点，并将重力势能的一些性质（相对性、正负的意义、属于系统共有等）分散在第六、七节中讲述。这样编排有利于学生理解重力势能的概念。教学中应按教材的顺序逐步讲解，使学生的认识步步深入。为了帮助学生正确理解重力势能的概念，再作如下几点建议：

重力势能的引入同第四节中动能的引入思路是一样的。先讲被举高的物体能够做功，所以具有能量，称为重力势能；然后从功和能的基本认识出发研究如何定量地确定势能的大小；最后通过简单的例子（匀速举高一个物体）来引入重力势能的计算式  $E_p = mgh$ 。因此讲解这部分内容时，可以与动能的引入对照起来讲，使学生觉得并不陌生。

要使学生明白，课本 231 页第二小节里说的“克服重力做多少功（即重力做负功），重力势能就增加多少；重力对物体做多少功，重力势能就减少多少”这个结论始终成立，与物体是否还有其他力做功以及物体的动能变化与否无关。

如果把这个结论同课本第三、四节中讨论功和能的关系时说的“外力对物体做多少功，物体的动能就增加多少”进行对照，会发现表述形成上不一致。为什么外力对物体做功能使物体的能量增加，而重力对物体做功会使物体能量减少呢？这是学生在学习过程中很容易混淆的一个问题。许多学生就是由于在这里产生了混淆又不能及时澄清，采取了死记硬背的学习方法，影响了整章的学习效果，其实，这两句话是不矛盾的。外力对物体做功，使物体增加的是动能；重力对物体做负功，所减少的是重力势能。此时物体动能增加与否要看合外力是否对物体做正功。例如自由落体运动，物体只受到重力作用，重力作为外力对物体做正功，物体的动能增加。但同时重力势能减少。从这里也可以看出，重力做功使物体动能增加，这是以减少重力势能为代价的，因此，重力做功的问题总是伴随着能量的转化。这就把重力势能的问题同第九节机械能守恒定律联系起来了，为学习第九节作了准备。

用这个观点再来分析课本图 7.9 的例子，可以看到，外力  $F$  对物体做功，本来应该使物体动能增加，但重力作为外力对物体做负功，能使物体动能减少，结果物体动能不变。不管动能变或不变，重力做了负功，重力势能一定增加、这一结论仍然成立。

关于重力做功的特点，教材通过物体从  $A$  点到  $C$  点的不同途径（折线、直线、曲线）的计算，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。这一结论的得来并不困难，但后面一段讨论，正因为重力做功有这样的特点，才能引出重力势能的概念，就比较难理解了，教材是用反证法来论证这一点的。教学中能使学生通过阅读和讲解对这个问题有个印象就可以了。这对今后学习静力学等知识有好处。教学中不要提保守力、耗散力的概念，但应把重力做功和摩擦力做功的情况对照起来讲。

第六、七节内容较多，在两节学完以后建议小结一下，突出两个重点。一个是重力势能的计算式  $E_p = mgh$ ；另一个是重力做功与重力势能变化的关系。至于“克服重力做多少功，重力势能就增加多少；重力对物体做多少功，重力势能就减少多少”这一结论是否要再抽象为“重力做的功等于物体重力势能增加的负值”，则要根据学生的接受能力而定。对程度较好的学生，这样做也未尝不可。

#### (十) 弹性势能的定性研究

关于弹性势能，课本没有作定量讨论，只作定性介绍。这一节包括三个方面的内容：

1. 什么是弹性势能？教学中可采取与重力势能相对照来引人的方法，并通过实例来加以解释，其中特别要注意弹性势能是属于发生弹性形变的系统的。
2. 弹力做功与弹性势能变化的关系，这是这一节教材的主要内容，要使学生明白，克服弹力做多少功，弹性势能就增加多少；弹力对其他物体做多少功，弹性势能就减少多少，这个规律与重力做功跟重力势能变化的关系是一样的，这个关系始终成立，跟物体（被弹力作用的物体）是否还受其他外力、动能增加与否无关。
3. 弹簧的弹性势能大小与形变大小和倔强系数有关，这一点不作定量计算，但定性掌握它们的关系对于学习振动的知识是很有用的。

#### (十一) 机械能的转化和守恒

要讲机械能的守恒，先要讲机械能的转化。没有动能和势能的相互转化，就无所谓机械能的守恒，因此，首先要通过一些实例的分析，研究物体的动能和势能的转化，为了使教学更充实些，除了教材所举的自由落体、光滑斜面、竖直上抛及弹簧、弓箭等例子外，还可以举出平抛、斜抛、光滑曲面等例子，来说明这些过程中机械能是如何转化的。

要启发学生注意，势能的变化是由于重力和弹力做功而引起的。但重力作为外力，又可以改变物体的动能（动能定理）。如果重力做正功，重力势能将减少，动能将增加，意味着重力势能转化为动能。反之也一样，这样不仅可以帮助学生理解为什么课本中说“机械能的相互转化是通过重力或弹力做功来实现的”，也为推导机械能守恒定律提供了思路。

在得到机械能守恒定律后，一定要强调条件。课本在表达时只说“只有重力做功”，这是因为弹性势能不作定量讨论，只限于定量研究重力势能与动能的转化问题。但在这一节的最后也提到了如只有弹力做功，机械能也是守恒的。这一点，让学生了解一下就可以了，需要强调的是，“只有重力做功”不等于“只受重力作用”。物体可以受其他外力作用，只要这些力不对物体做功，机械能就是守恒的。

应用机械能守恒定律解题时，首先要检验是否符合守恒的条件，如果符合，则明确初状态和末状态后就可以列方程解出未知量了，如果除重力和弹力外还有其他外力做功，则机械能不守恒，但这种情况仍可以应用动能定理来解题。不管用动能定理还是用机械能守恒定律解题都只涉及起始和终了状态，不涉及中间过程的细节，因此相对于用牛顿第二定律和运动学来解题要简便得多。此外，用守恒定律解题还有更深刻的意义，因为自然界的许多规律就是通过寻找“守恒量”而找到的。教学中讲一讲这个问题对开拓学生的视野是有好处的。

### (十二) 除重力、弹力外还有其他力做功的情况

教材第十一节是前几节的自然延伸，也是整章的小结。这一节的教学处理得当，能把全章知识联系起来，做到融会贯通。建议教师在教学时注意以下几点：

教材通过一系列实例来分析，除重力和弹力外如果还有其他外力做功，则物体的机械能要增加，且其他力做多少功，物体的机械能就增加多少。反之，如果物体克服其他外力做功，机械能将减少。为了使学生对这一段分析理解得更具体，可采取两种办法，对一般程度的同学，可以举一个有具体数字的例子，证明其他力（如汽车牵引力）做的功等于物体机械能的增加；对程度较好的同学，还可以从动能定理出发进行推导。推导时不要涉及弹力做功。例如对课本 245 页上所举的第二个实例（图 7.3）应用动能定理可以写出如下的式子：

$$W_{\text{牵}} + W_G = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$$

由于重力做功等于重力势能增加的负值，即  $W_G = mgh_1 - mgh_2$ ，代入上式，得

$$W_{\text{牵}} + mgh_1 - mgh_2 = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$$

整理后，可得：

$$W_{\text{牵}} = \left( \frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2 \right) - \left( \frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 \right) = E_2 - E_1$$

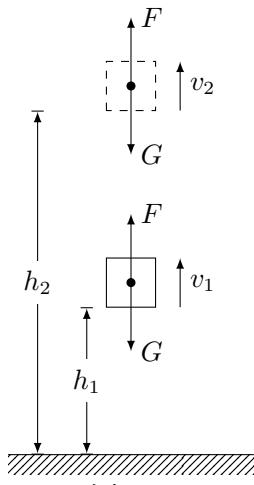


图 7.3

采用推导的方法比较简捷明了，而且有利于把其他力做功引起的机械能增加同动能定理中的外力做的总功使物体动能增加区别开来。但对基础不太好的同学，这样推导不易真正理解，因此不宜采用。

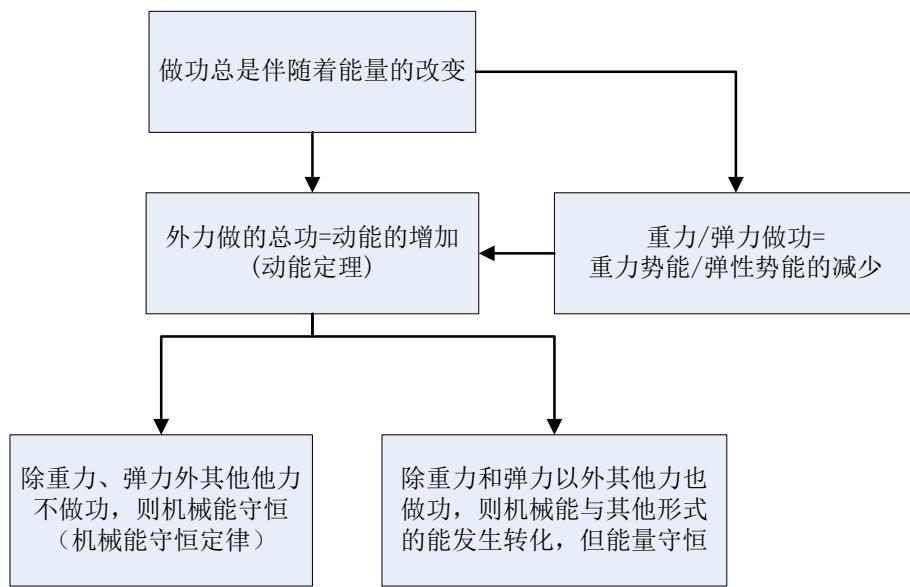
得出上述其他力做功使机械能变化的结论后，课本接着阐述了机械能的变其实是机械能同其他形式的能的转化。这部分叙述是以这样两句话为依据的：“增加了的机械能并不是凭空产生的，”“减少的机械能也不能无影无踪地消失。”这实际上就是能量的转化和守

恒的思想，由于前面已学过机械能守恒定律，又讲过寻找“守恒量”的意义，所以这里这样说学生是能够接受的。

在这一节的教学中，可以也应该将整个第二单元所讨论的功和能的关系作一次整理，这一单元讨论功和能的关系大致有这样几个层次：

1. 先定性讨论做功能量发生变化。
2. 定量研究合力做功（或外力做功的代数和）能使物体动能增加（动能定理）。
3. 在这些外力中有两个力是特殊的；重力和弹力，重力做功，重力势能减少；克服重力做功，重力势能增加。弹力做功，弹性势能减少；克服弹力做功，弹性势能增加。
4. 如果除重力和弹力外，其他力不做功，则机械能守恒。
5. 如果除重力和弹力外，还有其他力做功，则机械能与其他形式的能发生转化，但能量仍守恒。

总之，做功总是跟能量变化相联系，而且两者在数量上是相等的，也就是说，功是能量转化的量度，以上几个关系可用下面的示意图表示出来，由于课本不定量研究弹性势能，所以示意图中也可以把弹力和弹性势能略去。



## 第三节 实验指导

### 一、演示实验

#### (一) 物体的动能跟它的质量和速度有关

如图 7.4 所示，使小车沿一光滑斜面下滑。斜面倾角约  $10^{\circ}$ — $15^{\circ}$  即可，斜面底端接着一个水平木板，在水平木板上铺一层毛巾布。在斜面和平面的接合处，用毛巾布堵塞以减少小车下滑到接合处时发生撞击或弹跳。

让小车从斜面上不同位置自静止释放，观察并记下小车在平面上运动的距离。可以得到，物体的速度越大，能够做的功（克服摩擦阻力做功）越多。再在小车内加放质量较大

的砝码（如 100 克或 200 克）改变小车的质量，从小车在平面上能够运动更长的距离，说明物体的质量越大，能够做的功越多。

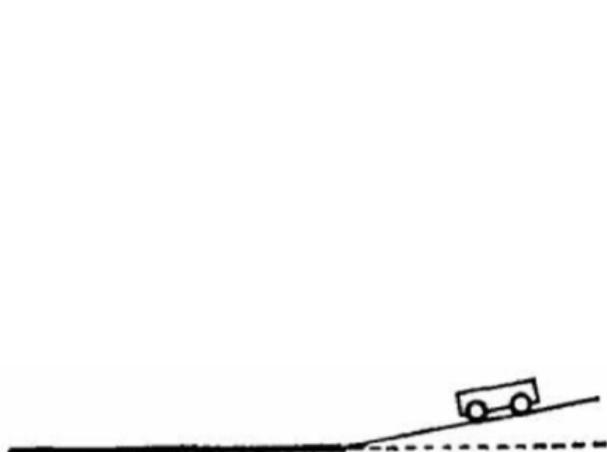


图 7.4

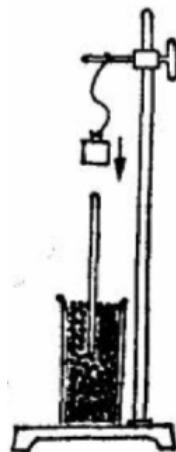


图 7.5

### (二) 物体的重力势能跟它的质量和高度有关

如图 7.5 所示，将一根细木棒（或竹筷）竖直地插在盛米的玻璃筒内，筒内的米要用手指压实。在棒的上方有一事先用绳挂在铁架台上的旧砝码。绳的长度保证能和木棒顶部相碰，但又足以限制砝码下落时不会砸到玻璃筒。

提起砝码到离木棒顶部约 5—10 厘米，观察木棒由于被撞击能插入米筒的深度，说明物体的高度越大，能够做的功（克服阻力做功）越多，换用质量大的砝码，可观察到木棒插入米筒的深度更大，这说明了，物体的质量越大，能够做的功也就越多。

### (三) 发生弹性形变的物体具有弹性势能

课本图 7.18 和图 7.19 的实验可以选用倔强系数较小的弹簧，物体可用一辆质量较大的小车代替。这样，演示弹力做功时，过程可以慢一些。桌面上可垫放一块玻璃板以减小摩擦。

### (四) 动能和势能的相互转化

#### (1) 动能和重力势能的相互转化

可观察单摆的运动和课本图 7.22 所示的现象。

#### (2) 动能和弹性势能的相互转化

课本图 7.21（丙）所示的现象可利用小车代替小球进行演示。也可以将弹簧固定在小车上，如图 7.6 所示。

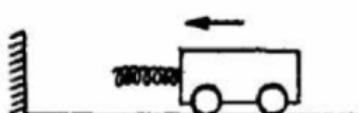


图 7.6

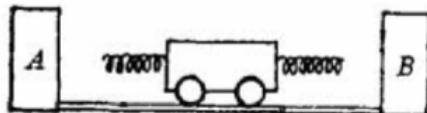


图 7.7

也可以如图 7.7 所示，在小车（总质量 400—500 克）两端安装两段可以压缩的弹簧，水平桌面上放一玻璃板以减少阻力，在玻璃板两端各放一木块 A 和 B。先将小车靠近一木块（譬如 A），然后释放小车，观察小车在 AB 间的运动情况，说明弹性势能和动能的相互转化。

这个实验中所用的弹簧可以自制，用直径为 0.3—0.35 毫米的钢丝绕成直径约为 40 毫米的弹簧，绕制时可将一根直径约为 30 毫米的金属圆棒夹紧在台虎钳上，用钢丝钳拉紧钢丝在金属圆棒上密绕。绕完后不要松手，点燃酒精喷灯（或酒精灯）对钢丝进行退火，加热时要使火焰均匀地烧到钢丝的每一部分。加热 3—4 分钟后，取走酒精灯，把事先准备好的一大杯水浇在金属棒和钢丝上，对钢丝进行淬火，再把它拉制成长度约为 8—10 厘米、共 10 圈的弹簧。

## 二、学生实验

### （一）验证机械能守恒定律

在研究物体自由下落的情况时，纸带要平整地夹紧在重物上，纸带的长度可取 30 厘米左右，不要过长。按课本图 10.16 所示用手提着纸带的上端，注意不要使手晃动。

比较几条纸带，挑选第一个点（O 点）和第二个点间的距离最长的一条纸带来进行分析，以便使这两个点之间的时间尽可能是一个完整的周期。

由于重物在自由下落时的加速度数值较大，打点计时器打下的相邻的点间距离已经足够大，因此不需要取每打几个点的时间作为时间的单位，而只需要确定第一个点的位置 O 后，顺着所打出的点的次序编出计数点 A、B、C、D、E 即可。

要提醒学生注意课本上所说的下落高度  $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$  都是指从第一个点的位置 O 算起的重物下降距离，而不是离地面的高度。

在研究物体在重力作用下沿斜面运动的情况时，由于小车在斜面上运动的加速度数值较小，纸带上点的分布较密集，因此可以采用每打五次点（或二次点）的时间作为时间的单位，以此来确定计数点 A、B、C、D、E。

要求学生将实验中的纸带标出计数点和需要测量的有关距离，作为原始数据记录附在实验报告中，实验报告还应包括数据表格，数据处理的计算过程，实验结论以及关于产生实验误差主要原因的分析。

通过实验还可让学生思考以下问题：

1. 从实验数据来看，体的重力势能的减少量和动能的增加量相比较，哪一个大些才是合理的？为什么？
2. 这个实验中为什么不需要测量重物或小车的质量？
3. 机械能守恒定律的适用条件是什么？
4. 这个实验在处理数据时，如果不从第一个位置 O（初速为零的位置）算起，而从中间相邻两点间距离较大的任一点开始算起，是否可以验证机械能守恒定律？应该怎样做？

### 三、课外实验活动

#### (一) 研究小球滚下的位置

斜面的底端应尽量靠近桌边，以减小桌面摩擦阻力的影响。桌面应水平，这样，小球到达斜面底端时的速度  $v = \sqrt{2gh}$ ，也就是小球脱离桌面后做平抛运动的初速。

实验前可以让同学思考，小球的实际落地位置和理论计算的落地位置相比较，哪一个离桌子的距离近些？为什么？

## 第四节 习题解答

### 一、练习一

- 在起重机的钢绳上挂着重物，当重物静止时，钢绳的拉力有没有做功？重力有没有做功？

在水平桌面上滚动的小球，桌面对球的支持力有没有做功？重力有没有做功？

**解答：**起重机钢绳上挂着重物，静止时没有发生位移，所以钢绳的拉力和重力都没有做功，在水平桌面上滚动的小球，虽有位移，但位移与支持力、重力都垂直，即在力的方向上没有位移，所以重力和支持力也不做功。

- 在厘米·克·秒制中，功的单位叫做尔格（erg）。1 尔格是 1 达因（dyn）的力使物体在力的方向上发生 1 厘米的位移所做的功，试证明：

$$1\text{J} = 19^7\text{erg}$$

**证明：**

$$1\text{J} = 1\text{N} \cdot \text{m} = 10^5\text{dyn} \times 10^2\text{cm} = 10^7\text{dyn} \cdot \text{cm} = 10^7\text{erg}$$

- 在水平道路上匀速前进的汽车受到哪些力的作用？其中哪些力做功，哪些力没有做功？哪个力做正功，哪个力做负功？

**解答：**汽车受到重力、支持力、牵引力和阻力的作用。其中重力和支持力都没有做功，牵引力做正功，阻力做负功。

- 在图 7.8 甲中，力  $F$  是 350 牛，在这个力的作用下，物体加速向右移动了 1.5 米，力  $F$  所做的功是多少？在图 7.8 乙中，力  $F$  是 250 牛，在这个力的作用下，物体减速向右移动了 2.5 米，力  $F$  所做的功是多少？

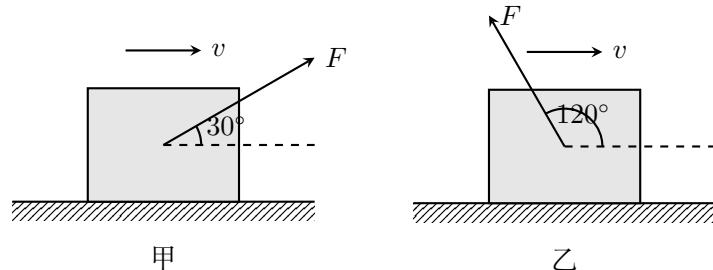


图 7.8

解答：在图 7.8 甲中，

$$V = Fs \cos \alpha = 350 \times 1.5 \times \cos 30^\circ = 455\text{J}$$

在图 7.8 乙中，

$$W = Fs \cos \alpha = 250 \times 2.5 \times \cos 120^\circ = -313\text{J}$$

5. 用起重机把重物从地面匀速地提到 5 米高的地方，重物的重量是  $2 \times 10^4$  牛，钢绳的拉力做多少功？重力做多少功？重物克服重力所做的功是多少？

解答：因为是匀速提升，所以钢绳拉力  $F = G = 2 \times 10^4$  牛。已知  $s = 5$  米。所以钢绳拉力做功

$$W_1 = Fs = 2 \times 10^4 \times 5 = 10^5\text{J}$$

重力做功

$$W_2 = Gs \cos 180^\circ = 2 \times 10^4 \times 5 \times (-1) = -10^5\text{J}$$

重物克服重力所做的功为  $10^5$  焦。

6. 一只装货的木箱，质量是 35 千克，木箱和地面之间的摩擦系数是 0.2。沿水平方向用力推木箱，使它在水平地面上匀速移动 8.0 米，推力所做的功是多少？木箱克服摩擦力所做的功是多少？

解答：已知木箱的质量  $m = 35$  千克，摩擦系数  $\mu = 0.2$ ，位移  $s = 8.0$  米。因为是匀速移动，所以推力和摩擦力相等，即  $F = f = \mu N$ 。而  $N = mg$ ，所以

$$F = f = \mu mg = 0.2 \times 35 \times 9.8 = 68.6\text{N}$$

推力所做的功

$$W = Fs = 68.6 \times 8.0 = 549\text{J}$$

摩擦力所做的功

$$W_f = fs \cos 180^\circ = 68.6 \times 8.0 \times (-1) = -549\text{J}$$

所以木箱克服摩擦力所做的功为 549 焦。

7. 一个物体，重量是 10 牛，在水平拉力的作用下，一次在光滑水平面上移动了 0.5 米的距离，另一次在粗糙水平面上移动了相同距离。粗糙面和物体间的滑动摩擦系数是 0.2。两次所受的拉力都是 15 牛。在这两种情况下，拉力所做的功是否相同？

解答：相同。因为两次拉力相同，位移也相同。所以所做的功相同，都为

$$W = Fs = 15 \times 0.5 = 7.5\text{J}$$

说明：此题可启发学生进行讨论，两种情况为什么不同？可以看到，因为受力情况不同，加速度不同，移动 0.5 米的距离所花的时间不同。参与做功的力也不同。第一次只有拉力做功，第二次除拉力做正功外，还有摩擦力做负功。

## 二、练习二

1. 一台抽水机每秒钟能把 30 千克的水抽到 10 米高的水塔上去. 抽水机的输出功率是多大? 半小时能做多少功?

**解答:** 抽水机的输出功率

$$P = \frac{W}{t} = \frac{mgh}{t} = \frac{30 \times 9.8 \times 10}{1} = 2.94 \times 10^3 \text{W}$$

半小时能做功

$$W' = Pt' = 2.94 \times 10^3 \times 1800 = 5.29 \times 10^8 \text{J}$$

2. 汽车牵引着高射炮以 36km/h 的速度匀速前进, 汽车发动机的输出功率是 80 马力, 求汽车和高射炮在前进中所受的阻力.

**解答:** 汽车发动机的输出功率  $P$  与速度的关系是  $P = Fv$ , 式中  $F$  为牵引力. 因为是匀速前进, 所以牵引力  $F$  等于阻力  $f$ . 所以  $P = fv$ .  $v = 36 \text{km/h} = 10 \text{m/s}$ . 所以

$$f = \frac{P}{v} = \frac{80 \times 735}{10} = 5.88 \times 10^3 \text{N}$$

3. 一台柴油机装在汽车上, 汽车匀速行驶的速度可达 90km/h; 装在汽船上, 汽船匀速行驶的速度可达 20km/h, 汽车和汽船哪个受的阻力大? 二者的阻力之比是多少?

**解答:** 由于车和船都是匀速行驶的, 所以牵引力等于阻力. 同一台柴油机正常工作时的输出功率是一定的, 且  $P = Fv = fv$ . 所以

$$\begin{aligned} f_{\text{车}}v_{\text{车}} &= f_{\text{船}}v_{\text{船}} \\ \frac{f_{\text{车}}}{f_{\text{船}}} &= \frac{v_{\text{船}}}{v_{\text{车}}} = \frac{20}{90} = \frac{2}{9} \end{aligned}$$

可见, 汽船所受的阻力大. 车和船的阻力之比为 2:9.

4. 一台电动机的额定功率是 10 千瓦, 用这台电动机匀速提升  $2.7 \times 10^3$  千克的货物, 最大速度是多大? 不计空气阻力.

**解答:** 因为是匀速提升, 所以牵引力等于重力. 即

$$G = F = 2.7 \times 10^3 \times 9.8 = 2.6 \times 10^4 \text{N}$$

提升速度的大小要受到电动机和额定功率的控制. 当达到额定功率时, 速度为最大. 即

$$v_m = \frac{P}{F} = \frac{10 \times 10^3}{2.6 \times 10^4} = 0.38 \text{m/s}$$

## 三、练习三

1. 1976 年 3 月 8 日在吉林市降落一场陨石雨, 其中最大的一号陨石的质量是 1770 千克, 假设它以 45m/s 的速度撞击地球, 计算它触地时的动能.

**解答:**

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \times 1770 \times 45^2 = 1.79 \times 10^6 \text{J}$$

2. 我国第一颗人造地球卫星的质量是 173 千克, 速度为 7.2km/m 时, 它的动能是多少?

**解答:**

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \times 173 \times (7.2 \times 10^3)^2 = 4.5 \times 10^9 \text{ J}$$

3. 一个电子以  $8.00 \times 10^6 \text{ m/s}$  的速度运动, 质子必须运动得多快, 才能使它具有跟电子一样的动能? 已知质子的质量是电子的 1800 倍.

**解答:** 设电子动能为  $E_e = \frac{1}{2}m_e v_e^2$ , 质子动能  $E_p = \frac{1}{2}m_p v_p^2$ . 已知  $E_e = E_p$ ,  $m_p = 1800m_e$ , 代入上式得

$$\frac{1}{2}m_e v_e^2 = \frac{1}{2}m_p v_p^2$$

所以,

$$v_p = \sqrt{\frac{m_e}{m_p}} \cdot v_e = \sqrt{\frac{1}{1800}} \times 8.00 \times 10^6 = 1.89 \times 10^5 \text{ m/s}$$

4. 有甲、乙两个物体, 除了下列每一种不同点而外, 这两个物体的其他情况都相同. 试比较下列每一种情况下它们的动能:

- (a) 物体甲的速度是物体乙的两倍.
- (b) 物体甲向北运动, 物体乙向南运动.
- (c) 物体甲做直线运动, 物体乙做曲线运动.
- (d) 物体甲的质量是物体乙的一半.

**解答:**

- (a) 因为  $v_1 = 2v_2$ . 所以

$$E_1 : E_2 = \frac{1}{2}mv_1^2 : \frac{1}{2}mv_2^2 = 4 : 1$$

- (b) 动能是标量, 跟运动方向无关, 所以  $E_1 = E_2$ .

- (c) 动能大小与运动轨迹无关, 所以  $E_1 = E_2$ .

- (d) 因为  $m_1 = \frac{1}{2}m_2$ , 所以

$$E_1 : E_2 = \frac{1}{2}m_1 v^2 : \frac{1}{2}m_2 v^2 = 1 : 2$$

#### 四、练习四

1. 使一个物体的速度从零增加  $v$ , 再从  $v$  增加到  $2v$ . 哪种情况下做的功要多些? 为什么?

**解答:** 根据动能定理, 在第一种情况下,

$$W = \frac{1}{2}mv^2 - 0 = \frac{1}{2}mv^2$$

在第二种情况下,

$$W = \frac{1}{2}m(2v)^2 - \frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}mv^2$$

显然, 后一种情况所做的功要多.

2. 在光滑平面上的物体受到沿着平面的两个力  $F_1$  和  $F_2$  的作用 (图 7.9). 在下列情况下, 从静止开始移动 2 米时, 物体获得的动能各是多大?

- (a)  $F_1 = 10$  牛,  $F_2 = 0$ ;
- (b)  $F_1 = 0$ ,  $F_2 = 10$  牛;
- (c)  $F_1 = F_2 = 5$  牛.

**解答:** 图 7.9 是个俯视图, 此题虽然没有指出位移的方向, 但可以从题目给出的条件加以判断.

- (a)  $F_1 = 10$  牛,  $F_2 = 0$ . 因为从静止开始, 所以位移一定在  $F_1$  方向上. 因此  $F_1$  所做的功  $W = F_1 s$ . 根据动能定理,

$$W = F_1 s = E_k - 0$$

$$E_k = F_1 s = 10 \times 2 = 20\text{J}$$

- (b)  $F_1 = 0$ ,  $F_2 = 10$  牛. 位移在  $F_2$  方向上, 根据动能定理,

$$W = F_2 s = E_k - 0$$

$$E_k = F_2 s = 10 \times 2 = 20\text{J}$$

- (c)  $F_1 = F_2 = 5$  牛, 合力  $F$  可按平行四边形法则合成, 如图 7.10 所示, 位移同合力  $F$  方向一致.  $F = \sqrt{2}F_1 = 5\sqrt{2}$  牛.

$$W = F s = E_k - 0$$

$$E_k = F s = 5\sqrt{2} \times 2 = 14.1\text{J}$$

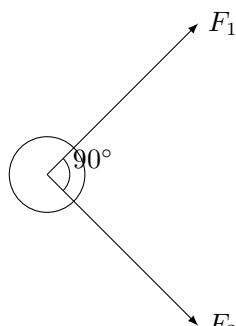


图 7.9

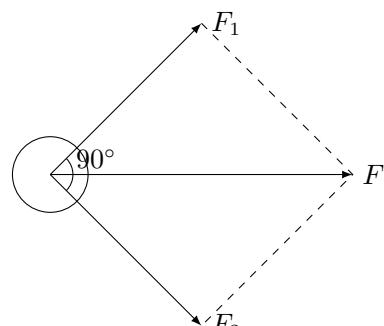


图 7.10

3. 一个 30 牛的力水平地作用在 2.0 千克的物体上, 使它在无摩擦的水平面上移动了 3.0 米的距离. 然后, 这个力变到 15 牛, 又使物体移动了 2.0 米. 物体增加的动能总共是多少?

**解答:** 根据题意,  $F_1 = 30$  牛,  $s_1 = 3.0$  米,  $F_2 = 15$  牛,  $s_2 = 2.0$  米, 则根据动能定理, 物体增加的动能为:

$$\begin{aligned} E_{k_2} - E_{k_1} &= W = W_1 + W_2 = F_1 s_1 + F_2 s_2 \\ &= 30 \times 3.0 + 15 \times 2.0 \\ &= 120\text{J} \end{aligned}$$

4. 质量是 2.0 克的子弹，以  $300\text{m/s}$  的速度水平射入厚度是 10 毫米的钢板（图 7.11），射穿后的速度是  $100\text{m/s}$ 。子弹受到的平均阻力是多大？

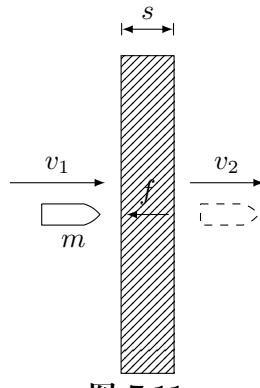


图 7.11

**解答：**已知  $v_1 = 300\text{m/s}$ ,  $v_2 = 100\text{m/s}$ ,  $m = 2.0 \times 10^{-3}\text{kg}$ ,  $s = 10^{-2}\text{m}$ , 根据动能定理（考虑到阻力  $f$  做负功），

$$-fs = E_{k_2} - E_{k_1}$$

$$f = \frac{E_{k_1} - E_{k_2}}{s} = \frac{\frac{1}{2}m(v_1^2 - v_2^2)}{s} = \frac{1.0 \times 10^{-3} \times (300^2 - 100^2)}{2 \times 10^{-2}} = 8.0 \times 10^3\text{N}$$

子弹所受阻力为  $8.0 \times 10^3$  牛，方向与速度方向相反。

5. 一架新型喷气式战斗机的质量是  $1.50 \times 10^4$  千克，发动机的推力是  $1.11 \times 10^5$  牛，起飞速度是  $88.0\text{m/s}$ ，滑跑距离是 671 米。计算飞机起飞时受到的平均阻力。

**解答：**已知飞机质量  $m = 1.50 \times 10^4$  千克，发动机推力  $F = 1.11 \times 10^5$  牛，在起飞过程中，初速度  $v_1 = 0$ ，末速度就是起飞速度  $v_2 = 88.0$  米/秒，滑跑距离  $s = 671$  米。在起飞时推力  $F$  和阻力  $f$  做功，根据动能定理，

$$Fs - fs = E_{k_2} - E_{k_1} = \frac{1}{2}mv_2^2$$

$$f = F - \frac{mv_2^2}{2s} = 1.11 \times 10^5 - \frac{1.50 \times 10^4 \times (88.0)^2}{2 \times 671} = 2.44 \times 10^4\text{N}$$

## 五、练习五

下列各题中都以地面作参考平面。

1. 体积相同的铝球和铅球，处在同一高度的地方，哪一个的重力势能较大？

**解答：**铅球的重力势能大，因为铅球的质量大。

2. 质量是 2 千克的物体位于 0.8 米高的桌面上，这个物体具有多少重力势能？

3. **解答：**

$$E_p = mgh = 2 \times 9.8 \times 0.8 = 15.7\text{J}$$

4. 图 7.15 是几个斜面，它们的高度相同，而倾角不同。让质量相同的物体沿斜面从顶端运动到底端，试根据功的公式来计算沿不同斜面重力所做的功，证明这个功跟斜面的倾角无关。

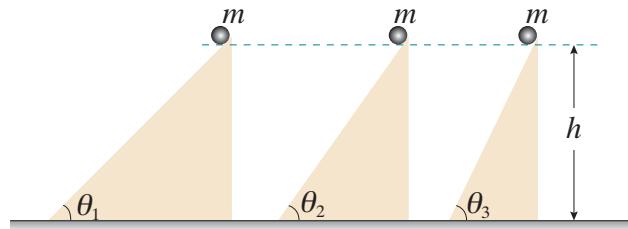


图 7.12

**解答：**设三个斜面长度分别为  $\ell_1$ 、 $\ell_2$ 、 $\ell_3$ ，则物体沿第一个斜面从顶端运动到底端时，重力所做的功为：

$$W_1 = mg\ell_1 \cos(90^\circ - \theta_1) = mg\ell_1 \sin \theta_1 = mgh$$

同理，沿第二个斜面、第三个斜面运动到底端时，重力所做的功  $W_2 = W_3 = mgh$ ，与斜面的倾角无关。

5. 图 7.13 表示一个斜抛物体的运动，当物体由抛出位置 1 运动到最高位置 2 时，重力所做的功是多少？物体克服重力所做的功是多少？由位置 2 运动到跟位置 1 在同一水平面上的位置 3 时，重力所做的功是多少？由位置 1 运动到位置 3 时，重力所做的功是多少？

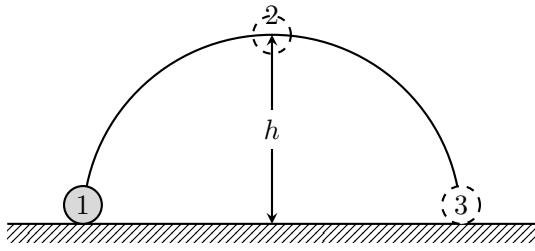


图 7.13

**解答：**从位置 1 到位置 2 时，重力所做的功

$$W_1 = -mgh$$

物体克服重力所做的功是  $mgh$ 。

从位置 2 到位置 3 时，重力所做的功  $W_2 = mgh$ 。

从位置 1 到位置 3 时，重力所做的功  $W_3 = 0$ 。

## 六、练习六

- 在下面列举的各个实例中，除 (1) 外都不计空气阻力，哪些机械能是守恒的？说明理由。
  - 跳伞员带着张开的降落伞在空气中匀速下落。
  - 抛出的手榴弹或标枪做斜抛运动。
  - 用细绳拴着一个小球，绳的一端固定，使小球在光滑的水平面上做匀速圆周运动。

- (4) 用细绳拴着一个小球，绳的一端固定，使小球在竖直平面上做圆周运动。
- (5) 物体沿着光滑的曲面滑下（图 7.14 甲）。
- (6) 拉着一个物体沿着光滑的斜面匀速上升（图 7.14 乙）。
- (7) 在光滑水平面上运动的小球，碰到弹簧上，把弹簧压缩后又被弹簧弹回来（图 7.14 丙）。

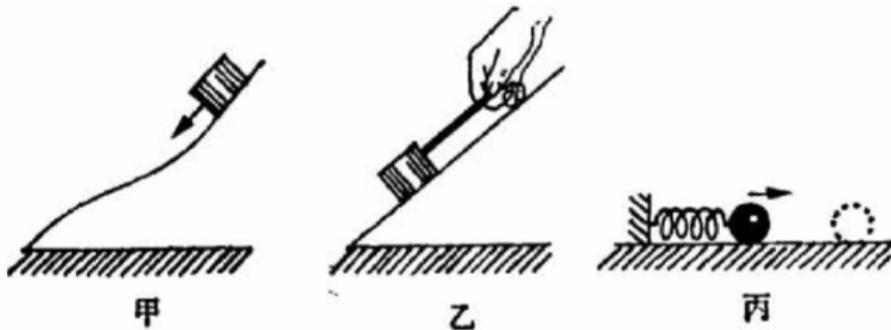


图 7.14

**解答：**

- (a) 机械能不守恒。因为除重力外，降落伞还要克服空气阻力做功。
- (b) 机械能守恒，因为除重力外，没有其他力对手榴弹或标枪做功。
- (c) 机械能守恒，因为重力和支持力均不做功，细绳的拉力与位移始终垂直，也不做功。整个过程动能保持不变。
- (d) 机械能守恒，因为除重力外，其他力（细绳拉力）不对物体做功。
- (e) 机械能守恒，因为除重力外，曲面弹力始终与位移垂直，不做功。
- (f) 机械能不守恒，因为除重力外，还有拉力对物体做功。
- (g) 机械能守恒，因为除弹簧弹力外，没有其他力对小球做功。
2. 做下面的实验，把物体拴在细线上悬挂起来，做成一个单摆（图 7.15）。把物体从平衡位置  $O$  拉到  $B$ ，放手后观察物体的来回摆动，把铅笔放在位置 1 和 2，可以看到物体仍然要升到跟  $B$  同样高的  $C_1$  和  $C_2$ 。解释这个现象。

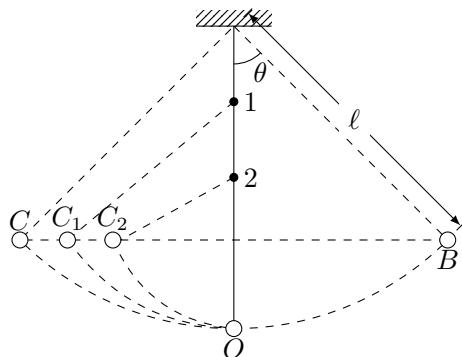


图 7.15

**解答：**在单摆摆动过程中，除重力外，细绳对小球的拉力始终跟位移垂直，不做功，所以机械能守恒。当小球从  $B$  运动到  $O$  时，重力势能转化为动能。从  $O$  运动到  $C$

时, 动能转化为重力势能, 所以  $C$  与  $B$  等高. 当铅笔在位置 1 和 2 阻挡摆线时, 铅笔作用在摆线的力对小球不做功, 单摆机械能仍然守恒, 当小球摆到最高点  $C_1$  和  $C_2$  时, 小球所具有的重力势能应与在  $B$ 、 $C$  处一样, 所以  $C_1$  和  $C_2$  的位置也应与  $B$  和  $C$  等高.

## 七、练习七

1. 滑雪运动员从 25 米高的山坡上滑下, 如果阻力忽略不计, 他滑到坡底时的速度是多大?

**解答:** 因为忽略阻力, 所以滑下时只有重力做功, 机械能守恒:

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2$$

$$v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 9.8 \times 25} = 22.1\text{m/s}$$

2. 物体从高的光滑斜面的顶端滑下, 证明物体到达斜面末端时的速度  $v = \sqrt{2gH}$ .

**证明:** 物体从光滑斜面滑下, 机械能守恒, 所以

$$mgH = \frac{1}{2}mv^2, \quad v = \sqrt{2gH}$$

3. 蒸汽打桩机的重锤的质量是 250 千克, 把它提升到离地面 25 米高处, 然后让它自由落下. 计算:

- (a) 重锤在最高点的动能、重力势能和机械能.
- (b) 重锤下落 10 米时的重力势能、动能和速度.
- (c) 重锤落到地面时的重力势能、动能和速度.

**解答:**

(a) 重锤在最高点时的动能  $E_k = 0$ , 重力势能  $E_p = mgh = 250 \times 9.8 \times 25 = 6.13 \times 10^4\text{J}$ . 机械能  $E = E_k + E_p = 6.13 \times 10^4\text{J}$ .

(b) 重锤下落 10 米时, 其高度  $h' = 15$  米, 重力势能  $E'_p = mgh' = 250 \times 9.8 \times 15 = 3.68 \times 10^4\text{J}$ . 由于机械能守恒, 则动能

$$E'_k = E - E'_p = 6.13 \times 10^4 - 3.68 \times 10^4 = 2.45 \times 10^4\text{J}$$

因为  $E'_k = \frac{1}{2}mv'^2$ , 所以

$$v' = \sqrt{\frac{2E'_k}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 2.45 \times 10^4}{250}} = 14\text{m/s}$$

(c) 重锤落到地面时,  $h'' = 0$ , 所以  $E''_p = 0$ .  $E''_k = E = 6.13 \times 10^4\text{J}$

$$v'' = \sqrt{\frac{2E''_k}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 6.13 \times 10^4}{250}} = 22.1\text{m/s}$$

4. 要使一球着地后回跳的高度超过原高 10 米, 必须以多大速度将它下抛? 不计球击地时的能量损失.

解答：设原高为  $h$ , 则根据机械能守恒定律

$$\begin{aligned} mgh + \frac{1}{2}mv^2 &= mg(h + 10m) \\ \frac{1}{2}mv^2 &= mg \times 10m \end{aligned}$$

$$v = \sqrt{2g \times 10m} = \sqrt{2 \times 9.8 \times 10}m/s = 14m/s$$

为使一球着地后回跳高度超过原高 10 米, 必须以 14m/s 的初速度下抛.

5. 一个物体从距地面 40 米的高处自由落下, 经过几秒后, 该物体的动能和重力势能相等?  $g = 10m/s^2$ .

解答：已知高度  $H = 40$  米, 设在  $h$  高度时物体的运动速度为  $v$ , 动能和势能相等, 则

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh$$

根据机械能守恒定律, 又有  $mgh + \frac{1}{2}mv^2 = mgH$  (图 7.16), 两式中消去  $\frac{1}{2}mv^2$ , 得

$$2mgh = mgH, \quad h = \frac{H}{2} = 20m$$

说明到动能和重力势能相等时, 已落下距离  $h'$  也是 20 米. 因为是自由落体, 所以

$$h' = \frac{1}{2}gt^2, \quad t = \sqrt{\frac{2h'}{g}} = \sqrt{\frac{2 \times 20}{10}} = 2s$$

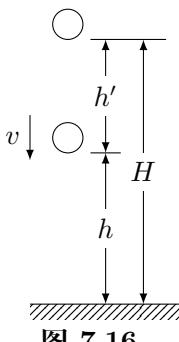


图 7.16

## 八、习题

1. 一个原来静止的物体, 在力  $F$  的作用下, 沿着力的方向移动一段距离  $s$ , 得到速度  $v$ . 如果移动的距离不变, 力  $F$  增大到  $n$  倍, 得到的速度也增大到  $n$  倍. 这话对吗? 速度应该增大到多少倍?

解答：不对, 力  $F$  增大到  $n$  倍时, 功  $W = Fs$  增大到原来的  $n$  倍, 由于物体初始是静止的, 所以根据动能定理, 物体得到的动能为原来的  $n$  倍, 即

$$E'_k = nE_k, \quad \frac{1}{2}m(v')^2 = \frac{n}{2}mv^2, \quad v' = \sqrt{n} \cdot v$$

所以速度应增大到  $\sqrt{n}$  倍, 而不是  $n$  倍.

2. 在水平面上有两个质量不同而具有相同动能的物体，它们所受的阻力相等。这两个物体停止前经过的距离是否相同？停下来所用的时间是否相同？

**解答：**由于两个物体动能相同，使物体停下来，动能变化相等。根据动能定理，

$$-fs = 0 - E_k = -E_k$$

阻力所做的功应相等。又因为阻力  $f$  相等，所以位移  $s$  也应相同。

停下来所用的时间  $t$  可用匀减速运动的速度公式来讨论：

$$0 = v_0 - at, \quad t = \frac{v_0}{a}$$

根据动能的定义式，

$$v_0 = \sqrt{\frac{2E_k}{m}}$$

根据牛顿第二定律  $a = f/m$ ，把  $v_0$  和  $a$  代入前式求  $t$ ，得

$$t = \frac{\sqrt{\frac{2E_k}{m}}}{\frac{f}{m}} = \frac{\sqrt{2E_k \cdot m}}{f}$$

因为两个物体的  $E_k$  相同， $f$  相同，而  $m$  不同，所以时间  $t$  也不相同。

3. 质量是  $m$  千克的物体自由落下，在第 1 秒内和第 2 秒内物体重力势能的减少各是多少？

**解答：**重力势能的减少等于重力所做的功  $W$ ，而  $W = mgh$ ，自由落体在第 1 秒和第 2 秒内下落的距离分别为  $h_1$  和  $h_2$

$$\begin{aligned} h_1 &= \frac{1}{2}gt_1^2 = 4.9m \\ h_2 &= \frac{1}{2}gt_2^2 - \frac{1}{2}gt_1^2 = 19.6 - 4.9 = 14.7m \end{aligned}$$

所以，物体在第 1 秒内减少的重力势能

$$W_1 = mgh_1 = m \times 9.8 \times 4.9 = 43mJ$$

物体在第 2 秒内减少的重力势能

$$W_2 = mgh_2 = m \times 9.8 \times 14.7 = 144mJ$$

4. 从地面竖直上抛一个物体，质量是 0.2 千克，经过 8 秒落回原地。物体抛出时的动能是多少？从被抛出到最高点，物体克服重力所做的功是多少？物体上升到最高点时的重力势能是多少？不计空气阻力。

**解答：**上抛物体经过 8 秒落回原地，则上抛和下落时间均为 4 秒。上抛高度

$$h = \frac{1}{2}gt^2 = \frac{1}{2} \times 9.8 \times 4^2 = 78.4m$$

根据机械能守恒定律，抛出时的动能等于最高点时的重力势能，所以

$$E_k = E_p = mgh = 0.2 \times 9.8 \times 78.4 = 154\text{J}$$

从抛出点到最高点，物体克服重力所做的功等于重力势能的增加，为 154 焦。物体上升到最高点时的重力势能也是 154 焦。

5. 一个人站在 10 米高的楼上沿斜上方抛出一个小球，初速度的大小是 10m/s，抛出角是  $30^\circ$ 。小球落地时速度是多大？如果初速度的大小不变，沿斜下方抛出小球，抛射角是  $45^\circ$ ，小球落地时速度是多大？用其他某个角度抛出，结果又怎样？不计空气阻力。

解答：小球在运动过程中，除重力以外，没有其他力做功，所以机械能守恒。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}mv_0^2 + mgh &= \frac{1}{2}mv^2 \\ v &= \sqrt{v_0^2 + 2gh} = \sqrt{10^2 + 2 \times 9.8 \times 10} = 17.2\text{m/s} \end{aligned}$$

只要抛出时的速度大小不变，高度不变，则落地时速度大小  $v = \sqrt{v_0^2 + 2gh}$  也不变，与抛出时速度的方向无关。

6. 利用机械能守恒定律，你能算出平抛和斜抛物体通过任意位置时速度的大小吗？怎样计算？

解答：设平抛和斜抛物体的抛出点离地面高  $h_0$ ，抛出时的速度大小为  $v_0$ ，则根据机械能守恒定律：

$$\frac{1}{2}mv_0^2 + mgh_0 = \frac{1}{2}mv^2 + mgh$$

式中  $v, h$  分别为任一时刻的速度大小和高度，经整理后，可得出

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2g(h_0 - h)}$$

利用这个式子可以求出物体通过任意位置（高度）的速度大小。

7. 质量是 0.25 千克的球以 2.0m/s 的速度向右运动，然后沿着图 7.17 所示的光滑的凹面滚动，这个小球在凹面的右侧能滚上多高？如果在  $P$  点把球从静止放开，它能滚上多高？

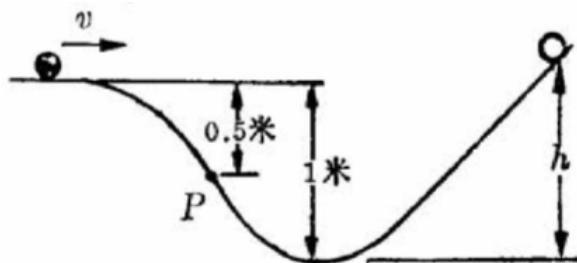


图 7.17

解答：设小球在凹面右侧能滚上的高度为  $h$ ，在小球运动过程中，除重力外，没有其他力做功，所以机械能守恒。

$$\frac{1}{2}mv_0^2 + mgh_0 = mgh$$

式中  $v_0$  为初速度,  $h_0$  为初始高度, 由上式可得

$$h = \frac{v_0^2}{2g} + h_0 = \frac{2.0^2}{2 \times 9.8} + 1 = 1.2\text{m}$$

如果小球从  $P$  点由静止开始运动, 则能滚上的高度应同  $P$  点相同, 即 0.5 米.

8. 一颗子弹以 700m/s 的速度打穿第一块木板后, 速度减低到 500m/s. 如果让它继续打穿第二块同样的木板, 它的速度将变为多大? 它能否再打穿第三块同样的木板?

**解答:** 设子弹每穿过一块木板, 克服阻力所做的功是一样的, 子弹动能的减少也是相同的. 根据题意, 子弹的初动能

$$E_{k_2} = \frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{2}m \times (700\text{m/s})^2 = 2.45 \times 10^5\text{mm}^2/\text{s}^2$$

穿过第一块木块后的动能

$$E_{k_1} = \frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{1}{2}m \times (500\text{m/s})^2 = 1.25 \times 10^5\text{mm}^2/\text{s}^2$$

子弹每穿过一块木板动能的减少为

$$\begin{aligned}\Delta E_k &= \frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \\ &= 2.45 \times 10^5\text{m} - 1.25 \times 10^5\text{m} \\ &= 1.20 \times 10^5\text{mm}^2/\text{s}^2\end{aligned}$$

子弹穿过第二块木板后的动能为

$$E_{k_2} = E_{k_1} - \Delta E_k = 1.25 \times 10^5\text{m} - 1.20 \times 10^5\text{m} = 0.5 \times 10^4\text{mm}^2/\text{s}^2$$

速度为

$$v_2 = \sqrt{\frac{2E_{k_2}}{m}} = \sqrt{2 \times 0.5 \times 10^4} = 100\text{m/s}$$

由于  $E_{k_2} < \Delta E_k$ , 所以子弹不能再穿过第三块木板.

9. 列车经过一段长 2.1 千米的平直铁路, 速度从 54km/h 增加到 72km/h, 列车重 1400 吨, 列车受到的阻是车重的  $k = 0.003$  倍. 求机车的功率.

**解答:** 已知列车的初速  $v_1 = 54\text{km/h} = 15\text{m/s}$ , 末速  $v_2 = 72\text{km/h} = 20\text{m/s}$ . 列车质量  $m = 1400\text{t} = 1.4 \times 10^6\text{kg}$ , 阻力

$$f = kmg = 0.003 \times 9.8 \times 1.4 \times 10^6 = 4.12 \times 10^4\text{N}$$

火车的位移  $s = 2.1 \times 10^3$  米.

设牵引力  $F$  对列车做功为  $W_{牵}$ . 根据动能定理,

$$W_{牵} - fs = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$$

所以

$$\begin{aligned}W_{牵} &= fs + \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \\ &= 4.12 \times 10^4 \times 2.1 \times 10^3 + \frac{1}{2} \times 1.4 \times 10^6 \times 20^2 - \frac{1}{2} \times 1.4 \times 10^6 \times 15^2 \\ &= 2.09 \times 10^8\text{J}\end{aligned}$$

整个加速过程所花的时间  $t$  可以通过匀变速运动的规律求出。由  $s = vt = \frac{v_1 + v_2}{2}t$  得

$$t = \frac{2s}{v_2 + v_1} = \frac{2 \times 2.1 \times 10^3}{20 + 15} = 120\text{s}$$

所以列车牵引力的功率

$$P = \frac{W_{牵}}{t} = \frac{2.09 \times 10^8}{120} = 1.74 \times 10^6\text{W}$$

说明：这一题还可以先通过动能定理求牵引力  $F$ ，再根据  $\bar{v} = \frac{v_1 + v_2}{2}$ 。求出列车平均速度。然后根据  $P = F\bar{v}$  求得功率。

10. 在一个农村小水电站里，上下游的水位差是 3 米，每秒钟有  $0.5\text{m}^3$  的水流过发电机的水轮机，从水轮机流出的水的速度是  $3\text{m/s}$ ，上游水的流速忽略不计。设水流能的 70% 可以转化成电能，求这个小水电站发出的电功率。

解答：算出 1 秒钟内所产生的电能，即能得到电功率。 $0.5\text{m}^3$  的水的质量

$$m = \rho V = 1 \times 10^3 \times 0.5 = 500\text{kg}$$

$$\begin{aligned} P &= \frac{E_{电}}{t} = \frac{(E_p - E_k) \times 70\%}{t} \\ &= \frac{(mgh - \frac{1}{2}mv^2) \times 70\%}{t} \\ &= \frac{(500 \times 9.8 \times 3 - \frac{1}{2} \times 500 \times 3^2) \times 70\%}{1} = 8.7\text{kW} \end{aligned}$$

11. 飞机、轮船所受的空气或水的阻力并不是固定的，它跟飞机、轮船的速度有关。当速度很大时，阻力与速度的平方成正比，试证明：这时要把飞机、轮船的最大速度增大到 2 倍，发动机的额定功率要增大到 8 倍才行。这就是在增大飞机、轮船等交通工具的速度方面，每取得一个新的成就都很不容易的原因。

解答：因为阻力  $f$  与速度的平方成正比，即  $f \propto v^2$ ，所以，当  $v$  增大为原来的 2 倍时， $f$  增为原来的 4 倍，此时，为使飞机、轮船能继续以这么大的速度前进，牵引力  $F$  至少等于  $f$ ，也应增为原来的 4 倍。由公式  $P = Fv$  可知，当  $v$  增加原来的 2 倍时， $F$  增为原来的 4 倍，则额定功率  $P$  应增为原来的 8 倍。

12. 一辆汽车沿着平直的道路行驶，遇有紧急情况而刹车，刹车后轮子只滑动不滚动，从刹车开始到汽车停下来，汽车前进 12 米。已知轮胎与路面之间的滑动摩擦系数  $\mu = 0.7$ 。求刹车前汽车的行驶速度，不计空气阻力。

解答：汽车刹车后，在水平方向上只受阻力  $f$  的作用前进  $s = 12$  米，设汽车质量为  $m$ ，则  $f = \mu N = \mu mg$ 。

根据动能定理，有

$$-fs = 0 - \frac{1}{2}mv_1^2$$

则

$$\mu mgs = \frac{1}{2}mv_1^2$$

所以

$$v_1 = \sqrt{2\mu gs} = \sqrt{2 \times 0.7 \times 9.8 \times 12} = 12.8 \text{m/s}$$

13. 一辆 5 吨的载重汽车开上一个坡路，坡路长  $s = 100$  米，坡顶和坡底的高度差  $h = 10$  米，汽车上坡前的速度是  $10 \text{m/s}$ ，上到坡顶时减为  $5.0 \text{m/s}$ 。汽车受到的摩擦阻力是车重的  $k = 0.05$  倍。求汽车的牵引力。取  $g = 10 \text{m/s}^2$ 。

**解答：**汽车在上坡过程中，牵引力做功为  $Fs$ ，克服重力做的功为  $mgh$ ，克服阻力做的功为  $kmgs$ 。根据动能定理，

$$\begin{aligned} Fs - mgh - kmgs &= \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \\ F &= \frac{mgh + kmgs + \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2}{s} \\ &= \frac{5 \times 10^3 \times 10 \times 10 + 0.05 \times 5 \times 10^3 \times 10 \times 100 + \frac{1}{2} \times 5 \times 10^3 \times 5.0^2 - \frac{1}{2} \times 5 \times 10^3 \times 10^2}{100} \\ &= 5.6 \times 10^3 \text{N} \end{aligned}$$

说明：在这个题目里，汽车牵引力做的功：

$$W_1 = Fs = 5.6 \times 10^3 \times 100 = 5.6 \times 10^5 \text{J}$$

汽车增加的机械能：

$$\begin{aligned} E_2 - E_1 &= \frac{1}{2}mv_2^2 + mgh - \frac{1}{2}mv_1^2 \\ &= \frac{1}{2} \times 5 \times 10^3 \times 5.0^2 + 5 \times 10^3 \times 10 \times 10 - \frac{1}{2} \times 5 \times 10^3 \times 10^2 \\ &= 3.1 \times 10^5 \text{J} \end{aligned}$$

其中增加的动能为

$$\begin{aligned} E_{k_2} - E_{k_1} &= \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \\ &= \frac{1}{2} \times 5 \times 10^3 \times 5.0^2 - \frac{1}{2} \times 5 \times 10^3 \times 10^2 \\ &= -1.9 \times 10^5 \text{J} \end{aligned}$$

说明动能是减少了  $1.9 \times 10^5$  焦。

增加的重力势能是

$$mgh = 5 \times 10^3 \times 10 \times 10 = 5 \times 10^5 \text{J}$$

克服摩擦力做功是：

$$fs = kmgs = 0.05 \times 5 \times 10^3 \times 10 \times 100 = 2.5 \times 10^5 \text{J}$$

这一题前面是用动能定理求解的，现在经过分项计算，可以进一步看出，汽车牵引力所做的功除一部分来克服阻力做功外，其余的全部转化为机械能。

14. 一个滑雪的人从高度为  $h$  的斜坡上由静止开始滑下，然后在水平面滑行一段距离停下来（图 7.18）。已知斜面的倾角为  $\theta$ ，滑雪板和雪之间的滑动摩擦系数为  $\mu$ ，求滑雪人在水平面上滑行的距离  $s_1$ 。你能不能求出滑雪人通过的水平距离  $s$ ？其他条件不变，只改变斜坡的倾角  $\theta$ ，水平距离  $s$  是否改变？为什么？

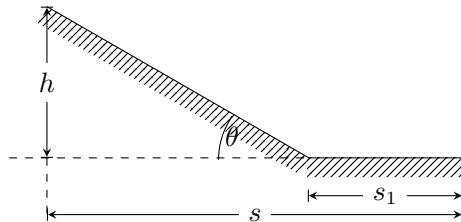


图 7.18

**解答：**设斜坡长为  $\ell$ , 人滑至斜面底端时的速度为  $v$ . 在下滑过程中, 重力做功为  $mgh$ , 摩擦力做功为

$$-\mu mg\ell \cos \theta = -\mu mg \cos \theta \cdot \frac{h}{\sin \theta} = -\mu \frac{mgh}{\tan \theta}$$

根据动能定理:

$$mgh - \frac{\mu mgh}{\tan \theta} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (7.1)$$

在水平面上滑行阶段, 只有摩擦力做功, 则根据动能定理可得.

$$-\mu mgs_1 = -\frac{1}{2}mv^2 \quad (7.2)$$

(7.1) 式和 (7.2) 式相加, 消去  $\frac{1}{2}mv^2$ , 得

$$mgh - \frac{\mu mgh}{\tan \theta} - \mu mgs_1 = 0$$

解得:

$$s_1 = \frac{h}{\mu} - \frac{h}{\tan \theta}$$

又因为  $s - s_1 = \frac{h}{\tan \theta}$ , 所以

$$s = s_1 + \frac{h}{\tan \theta} = \frac{h}{\mu} - \frac{h}{\tan \theta} + \frac{h}{\tan \theta} = \frac{h}{\mu}$$

可见,  $s$  与角度  $\theta$  无关, 所以若改变斜坡倾角  $\theta$ , 水平距离  $s$  将不改变.

**说明：**这一题如果把斜面和平面上的运动看作是一个运动过程，也可以同样应用动能定理. 但此时摩擦力做功要分两段计算后相加. 因为在这两个阶段中, 摩擦力的大小是不同的, 全过程的动能定理形式应为:

$$mgh - \frac{\mu mgh}{\tan \theta} - \mu mgs_1 = 0$$

与前一种解法中消去  $\frac{1}{2}mv^2$  后的式子一样, 但对一般同学来说, 还是分段应用动能定理为好.

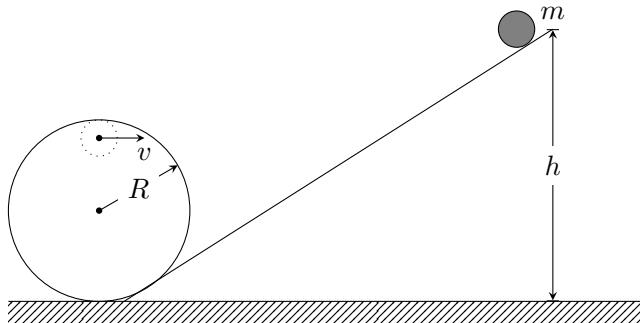


图 7.19

15. 要使小球滑到光滑的离心轨道顶端时不落下来（图 7.25），至少应使它在斜轨上多高处由静止开始下滑？

**解答：**设小球运动到圆形轨道顶端而不落下来的最小速度为  $v$ ，此时小球已不受圆形轨道的作用而仅靠重力提供向心力。因此

$$mg = \frac{mv^2}{R} \quad (7.3)$$

考虑到小球在整个运动过程中除重力外其他力均不做功，所以机械能守恒，则

$$mgh = mg(2R) + \frac{1}{2}mv^2 \quad (7.4)$$

将 (7.3) 式代入 (7.4) 式，消去  $v^2$ ，得

$$mgh = 2mgR + \frac{1}{2}mgR = \frac{5}{2}mgR$$

解得：

$$h = \frac{5}{2}R$$

## 第五节 参考资料

### 一、关于系统的动能定理

课本得到的动能定理  $W = E_{k_2} - E_{k_1}$ ，是以一个物体为研究对象的，式中  $W$  为所有外力（包括重力、弹力）所做的功。这一定理可推广到由几个物体构成的物体系中去。但定理的形式应作相应的变动。因为对一个物体系来说，在状态变化过程中，不仅有外力做功，还有可能有内力做功。内力做功也会改变整个系统的总动能，例如系统内的爆炸力做功（如手榴弹爆炸）可使整个系统的动能增加；系统内的摩擦力做功又可以使整个系统的动能减少。爆炸力和摩擦力都不是保守力，它们所做的功可以写成  $W_{\text{非保守}}$ 。此外，跟中学课本不同，在普通物理中一般把重力和弹力也看作是系统的内力（把地球和弹簧等都包括在系统之中），它们所做的功可写成  $W_{\text{保守}}$ 。这样，系统的动能定理可以写成：

$$W_{\text{外力}} + W_{\text{保守}} + W_{\text{非保守}} = E_{k_2} - E_{k_1}$$

在系统的动能定理中，因为保守内力（重力和弹力）所做的功等于相应势能增量的负值，即

$$W_{\text{保守}} = -\Delta E_p = E_{p_1} - E_{p_2}$$

代入系统的动能定理并移项，得

$$W_{\text{外力}} + W_{\text{非保守}} = E_{k_2} - E_{k_1} + E_{p_2} - E_{p_1} = (E_{k_2} + E_{p_2}) - (E_{k_1} + E_{p_1})$$

如果  $W_{\text{外力}} = 0$ ,  $W_{\text{非保守}} = 0$ , 则

$$(E_{k_2} + E_{p_2}) - (E_{k_1} + E_{p_1}) = 0$$

系统的机械能守恒，所以严格讲，机械能守恒的条件是系统外力不做功，非保守内力也不做功.

# 第八章 动量

## 第一节 教学要求

动量是力学中的重要概念，动量守恒定律是自然界最重要的普遍规律之一。因此在甲种本中单设一章来对有关知识作较深入的讨论。

这一章的教学要求是：

1. 理解冲量和动量两个概念，掌握动量定理并会用它解释一些物理现象。
2. 掌握动量守恒定律并会用它分析、计算有关的问题。
3. 理解弹性碰撞和非弹性碰撞，会计算一维弹性碰撞的有关问题。
4. 了解反冲运动的原理及其在火箭技术中的应用。

下面对这一章的教学内容作些具体说明。

冲量和动量是两个不容易理解的概念。教材在分析具体事例的基础上，引用公式进行讨论，得出这两个概念，这样做，对初学者来说，概念的物理意义可能清楚些，容易理解些。动量的矢量性在研究动量定理和动量守恒定律时都很重要。但是学生初学时往往对此认识不够，需要一开始讲解动量时，就强调它的矢量性。

第二节讲解动量定理。要使学生明确：动量定理  $Ft = mv' - mv$  表示的是力在一段时间内连续作用的累积效果与物体动量变化间的关系；在变力的情况下，公式中的  $F$  表示变力在时间  $t$  内的平均值。

动量守恒定律也可以用牛顿第二定律和第三定律推导出来。这种讲法的好处是比较简便。然而，动量守恒定律是一个独立的实验定律，而且它的适用范围比牛顿运动定律更广泛。因此，教材以实验为基础总结出动量守恒定律，然后说明这一定律与牛顿运动定律的一致性。

第三节讲述相互作用的物体的动量变化的实验，是为第四节讲动量守恒定律作准备的。在归纳出动量守恒定律时应向学生说明，这个定律是在分析研究大量实验事实的基础上建立起来的，而不是仅靠几个实验得出来的。还应使学生清楚系统动量守恒的条件，防止解题时不问条件，乱套公式的倾向。

第五节讲解动量守恒定律和牛顿运动定律的关系。应当使学生清楚地了解这两个定律在牛顿运动定律运用的范围内是一致的，这两个定律的区别在于适用范围的不同。牛顿运动定律只适用于宏观物体的低速运动情况，而动量守恒定律的适用范围更普遍，不论是宏观物体还是微观粒子，低速运动还是高速运动，相互作用是什么性质的，都遵守动量守恒定律。

第六节讲述如何运用动量守恒和动能守恒来研究碰撞问题。应该使学生明确，对于弹性碰撞需要同时运用动量守恒和动能守恒来解决。讲解弹性碰撞，要注意培养学生运用两个守恒定律分析解决问题的能力，进一步认识守恒定律的重要性，例题中得出的两个钢球发生弹性正碰后的速度表达式，应要求学生会自行推导，而不是记住它们。同时，要求学生能够利用表达式讨论一些具体情况。例如， $m_1 > m_2$ ,  $m_1 = m_2$ ,  $m_1 < m_2$  时，两钢球碰撞后的运动情况； $m_1 \ll m_2$ ,  $m_1 = m_2$ ,  $m_1 \gg m_2$  时，两钢球碰撞中能量的传递情况。并能根据讨论的结果，解释一些弹性碰撞中发生的现象。

第七节反冲运动中讲述的内容都属于常识性的介绍，目的是使学生了解物理知识在现代科学技术中的应用，介绍一些有关的科学技术常识，开阔学生的眼界。

## 第二节 教学建议

全章教学可分三个单元。第一单元（第一、二节）讲授冲量和动量的概念以及动量定理。第二单元（第三至五节）讲授动量守恒定律，这是本章的重点。第三单元（第六、七节）讲授碰撞和反冲运动，这是动量守恒定律的应用。

### 一、第一单元

#### （一）冲量和动量概念的引入

冲量和动量这两个概念也同功和能一样，不是一引入就能体会它的物理意义的。对这两个概念的理解，要通过整章的教学过程逐步加深。所以第一节的教学既要使学生初步了解冲量和动量的意义，特别是为什么要引入这两个概念以及两个物理量的定义、计算式、单位和矢量性等，又不能操之过急，要求过高。

课本在引入冲量和动量的概念时，通过日常生活中常见的事实，以开动汽车为例，说明汽车获得一定的速度不仅同它的牵引力有关，而且同力的作用时间有关。然后应用牛顿运动定律和运动学的知识，得出了速度的变化跟力和作用时间的关系  $Ft = mv$ 。再通过对这个式子的讨论给出冲量和动量的定义。这样引入，除了物理意义比较明显、较易理解外，还可以使学生从一开始就认识这两个概念之间的密切联系，了解冲量（它表现力的作用）的效果是使物体获得动量。

教学中还应该使学生了解速度和动量的联系和区别。速度和动量都可以作为运动的量变。但是速度只告诉我们物体运动的快慢和方向，没有告诉我们使物体运动或者停止运动需要多大的冲量。动量没有告诉我们物体运动速率的大小，却能告诉我们使物体运动或停止运动所需的冲量。所以速度是一个运动学的量，只能用来描述运动，而动量则是一个动力学的量，它跟冲量即物体运动变化的原因相联系。这里，可以用课本上以相同的速度运动的铅球和乒乓球的例子来说明。

#### （二）动量的变化

学生初学动量时，往往忽略动量的矢量性，只注意它的大小，不注意它的方向，以为只要物体的速度大小不变，动量也就不改变。教学时可利用课本 252 页的例题纠正这种错误认识。要想学生考虑钢球从坚硬的障碍物上弹回，动量的大小并没有变，动量的变化为

什么不等于零？原因是动量是矢量，它的方向改变了，所以动量发生了变化。

教材明确指出，所谓动量的变化就是变化后的动量减去变化前的动量，因此这里所说的动量的变化实际上就是上一章所说“增加”或“增量”。具体计算时，由于我们只研究一直线上的动量变化，所以只要先选定一个方向为正，就可以把矢量运算简化为代数运算。

### (三) 关于打击时的平均作用力

动量定理可以看作是牛顿第二定律的变形，在这里没有必要作过多的讲解，可只限于用来解释一些这个定理便于解释的现象，如为什么茶杯掉在地上要碎，而掉在软的东西上就不易摔碎等。在计算方面，只限于计算打击、碰撞等问题中的平均作用力，如课本 255 页中的例题那样。

课本 255 页例题后面有一段讨论。讨论中说“如果把铁锤的重量也考虑在内，那么，这时道钉所受的打击是上面算出的打击力加上铁锤的重量。”如果学生对此提出怀疑，教学中可加以说明。应该指出，动量定理  $Ft = mv' - mv$  中的  $F$  是物体所受的合力。所以在这个例题中应该列出如下方程：

$$F = \frac{mv' - mv}{t} = 2.5 \times 10^3 \text{ N}$$

而  $F = N - G$ ，所以

$$N = F + G = 2.5 \times 10^3 + 49 = 2549 \text{ N}$$

至于什么时候可以忽略铁锤的重量  $G$ ，这要看  $G$  与  $F$  的差别有多大。象书上例题中  $G$  为  $F$  的 2%，就可以忽略了。

## 二、第二单元

本单元是全章的重点。整个单元就是围绕一个中心——动量守恒定律展开的。

### (一) 相互作用物体的动量变化

第三节教学的关键是要做好研究相互作用物体的动量变化的演示实验。实验可分为两部分。第一部分为定性研究，如课本图 8.2 那样，目的是说明两个相互作用的物体动量会发生变化，在课堂上可用两个压紧弹簧的小车代替图 8.2 中的两个人，也可以用玩具小车在可动的平板上的运动来演示。

第二部分为定量研究，要求分析课本插页的气垫导轨上相互作用滑块的闪光照片，得出动量变化总是大小相等方向相反的结论，教学中要注意引导学生学会如何根据闪光照片计算滑块速度，并测量动量变化的方法，培养分析原始实验资料的能力。根据学校的实验设备条件，也可以在课堂上当场演示，得出同样结论。例如用光电计时器对气垫导轨上滑块的速度测定来研究共动量的变化；用打点计时器研究相互作用小车的动量变化；利用平抛原理测定相互作用小球的动量变化等，有条件的学校还可以让学生自己动手来得出这个结论。这一节的实验做得越好，对下一节动量守恒定律的学习就更有利，教学中要十分重视。

### (二) 动量守恒的语言表达

从“相互作用的物体的动量变化总是大小相等、方向相反”的结论到“系统的动量守恒”的推理过程，对语言表达的要求较高，教学中教师除应注意自己授课语言的准确外，还应注意培养学生学习物理的语言表达能力。推理过程有三个层次：第一是实验结论，“相互作用的物体的动量变化总是大小相等，方向相反的”；第二是引入系统总动量的概念，得出“系统的总动量的变化为零”；第三，再得到系统的总动量守恒，以上三个层次，用公式表达，可与语言表达对照如下（表中的 $p_1$ 、 $p'_1$ 、 $p_2$ 、 $p'_2$ 都是矢量。如果两个物体作用前后都在一直线上运动，则上述四个量均代表带正负号的动量数值。其中最后一式常常写成 $m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v'_1 + m_2v'_2$ ）。

用语言表达	用公式表达
相互作用物体的动量变化总是 大小相等，方向相反的	$p'_1 - p_1 = -(p'_2 - p_2)$
总动量的变化为零	$(p'_1 + p'_2) - (p_1 + p_2) = 0$
系统的总动量守恒	$p'_1 + p'_2 = p_1 + p_2$

### (三) 动量守恒定律的条件

课本明确指出，系统动量守恒的条件是“系统不受外力或所受外力的合力为零”。教学中要重视培养学生在应用动量守恒定律时先检验是否符合守恒定律条件的习惯，防止随意乱套公式，但是有一点应该向学生说明，在有些问题中，系统虽然受到外力作用，而且合力不为零，但合外力同内力相比非常小，可以忽略不计时，动量守恒定律仍然可以适用。例如课本 260 页例题，在列车间相互作用时，重力和轨道支持力虽然合力为零，但列车和轨道间总有摩擦力存在。由于这个摩擦力同列车间的内力相比很小，所以仍可用动量守恒定律。又如手榴弹爆炸时，虽然整个系统受到重力作用，但比起炸药的爆炸力来重力很小，可以忽略，因此还是可以用动量守恒定律来计算爆炸后碎块的速度。

### (四) 动量守恒定律是普遍适用的物理规律

动量守恒定律是自然界最重要的普遍规律之一。教材在第三节末说了相互作用物体的动量变化总是大小相等方向相反的结论不仅适用于正碰，而且适用于斜碰。在第四节第一段，教材又说到这个结论“在任何情况下”都成立，在第四节中，又特别提出三点说明，对上述“任何情况”作了具体的解释。为了使学生对动量守恒定律的普遍性有深切的了解，教学中可以多举一些实例，特别是对说明中第 1 点可多举例说明，例如，子弹射入木块、火车车厢连接在一起，课本插页图 8.6 的碰撞，属于粘合在一起的例子，炮弹和手榴弹的爆炸属于分裂成碎块的例子。此外，枪炮发射弹丸，人在船上行走等相互作用的例子，也可用动量守恒定律来研究。对第 2、3 点，由于学生知识水平有限，不可能理解得很具体，只要有一个印象就可以了。

### (五) 动量守恒定律中物体的速度

在两个物体相互作用对应用动量守恒定律可用表达式

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2$$

式中涉及四个速度，要向学生指出，这四个速度必须是相对于同一参照系的，一般都以地面为参照系。教师在引导学生解决如人在船上行走之类的问题时，也要注意不要涉及相对速度，而应把问题局限在相对于同一参照系研究其动量守恒。

### (六) 寻找“守恒量”的一个例子

教材在第四节后安排了一段阅读材料，要引导学生认真阅读，使学生了解到十六、十七世纪的哲学家如何从观察宇宙间各种物质的不断运动得出宇宙运动的总量不会减少的看法，笛卡儿和牛顿又怎样去努力寻找一个物理量来量度这种永恒的运动。把这一段阅读材料同上一章第十节所说的寻求“守恒量”的重要意义联系起来（课本244页），可以使学生体会到守恒定律在物理学里的重要地位。这一段阅读材料中关于笛卡儿寻找量度运动的合适物理量时的失误和对他的功绩的评述对学生也是有启发的。

### (七) 动量守恒定律和牛顿运动定律的关系

教材第五节主要说明两个问题，

1. 动量守恒定律和牛顿运动定律是一致的。但现在已认识到，动量守恒定律具有更大的普遍性；
2. 由于动量守恒定律不涉及相互作用的中间过程，所以在处理某些问题时会更简便。

教学中为了说明这两点，除了按教材讲述外，还可以选择一道不要求研究中间过程的例题（例如课本260页的例2，用动量守恒定律和牛顿运动定律两种方法来解，说明两者的一致性，同时又可以比较用动量守恒定律解题得更简便一些。

## 三、第三单元

### (一) 寻找“守恒量”的又一例子

教材第六节从两个质量相等的小球作弹性碰撞的演示开始，讨论只有动量守恒定律还不能解释为什么现象是唯一的。最后得出在这种碰撞中还应满足动能守恒。这是寻找“守恒量”的又一个例子。通过学习，学生可以体会到，在一个物理过程中多一个“守恒量”，就多一个制约因素，只有存在足够的制约因素，现象才能是唯一的。在哪些现象中有什么守恒量，这就是自然界的规律，学习物理学就要掌握这些规律。因此寻找“守恒量”是有重要意义的。这一段教学内容很有启发性，对培养学生分析问题的能力很有帮助。教学中首先要做好课本图8.7所示的演示实验。在分析这一实验时，要使学生弄清初末状态的情况，所谓碰撞的初末状态，指的是两球接触的短暂时间的前后，两个状态的小球位置都是在最低点，而不是在弹起的最高点。虽然初末状态的小球位置一样，但它们的速度不一样。在定义了弹性碰撞以后，教材接着介绍了非弹性碰撞和完全非弹性碰撞。教师也可在堂上利用课本图8.7的装置演示一下完全非弹性碰撞。用课本图8.7演示弹性碰撞和完全非弹性碰撞。

性碰撞只能是定性的。有条件的学校可以用气垫导轨和光电计时器演示，这样就可以作定量的测量，来验证弹性碰撞中动能守恒，而非弹性碰撞中动能有损失。

### (二) 弹性碰撞末速度公式的推导

课本第六节例题是根据动量守恒和动能守恒列出方程组解弹性碰撞问题的一个例子。例题中推导了碰撞后两钢球的速度，教学中要对推导方法作一示范，④要求学生能自行推导，而不要简单地记忆末速度公式。对例题后面的讨论，教学中也要加以重视。在讨论中，可以将练习四的第4题一起进行讨论。从方程解中讨论几种情况的物理意义，是一种重要的能力。对于弹性碰撞的讨论是培养这方面能力的好时机。

对于弹性碰撞问题，课本局限在讨论正碰，并且两球中有一球原来是静止的。对于学有余力的同学，两球初速均不为零的弹性正碰可以作为练习题让他们自己推导和讨论，只要他们掌握了推导方法，这样做是不太困难的。至于斜碰则不要让学生去做了。

### (三) 反冲运动的方程

反冲运动问题可以用动量守恒定律来解决，如果反冲运动发生前物体是静止的，则动量守恒定律可写成  $MV + mv = 0$  的形式，其中  $M$ 、 $m$  分别为向两个方向运动的物体的质量， $V$ 、 $v$  是相应的速度，其正负号由假设的正方向决定，可以让同学根据动量守恒定律自己写出这一方程。但同学在写这一方程时，常常有两个容易出错的地方。第一，如果  $M$  表示反冲运动发生前的总质量，则方程应改写为  $(M - m)V + mv = 0$ 。第二，有的同学根据反冲的两部分动量大小相等写出  $MV = mv$ ，算出答案往往也是对的。但此式中  $V$  和  $v$  均为绝对值。这种写法与本章前面的做法不一致，要特别小心。如果反冲系统原来的动量不为零，则不能用这个办法了。

### (四) 关于火箭的教学

第七节的主要篇幅是介绍反冲运动在火箭技术中的应用，主要是为了扩大知识面。教材不要求作定量计算，所以关于火箭的最终速度与喷气速度、质量比的关系不必介绍计算公式。至于火箭技术的一些原理、应用及我国火箭技术发展情况，可鼓励学生自己查阅科普小册子和杂志中的有关资料。这既可以激发学生的学习兴趣，又可以培养学生自己查阅资料的能力。

## 第三节 实验指导

### 一、演示实验

#### (一) 冲量的引入

可利用图8.1的装置来演示冲量的作用效果，使小球自静止开始从斜槽上的某一位置  $O$  滚下（在  $O$  处做一记号），斜槽的底端部分是水平的。观察小球的落地点，在落地点  $P$  处可放一塑料小桶，重复实验，使小球恰能落到桶中。使斜槽的倾角变小，即使小球所受的合力变小，如果仍在  $O$  点让小球自静止滚下，则小球将不会落在桶内。若将小球移到  $O$  点上方的  $O'$  点处开始释放，使力的作用时间增长，则小球仍能落在桶内。这说明了可

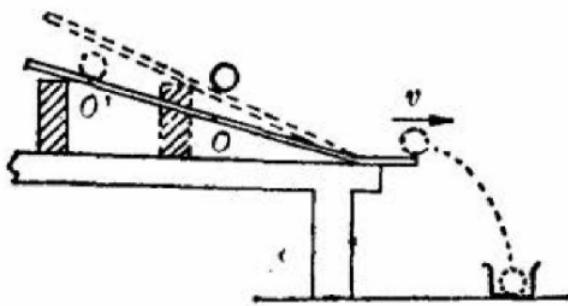


图 8.1

以用较大的力作用较短的时间，也可以用较小的力作用较长的时间，使原来静止的物体获得相同的速度。

实验所用的斜槽，可用两条平行的粗铁丝焊制而成，或利用铝材商店出售的用铝合金制成的 U 形铝材来制作（图 8.2）。

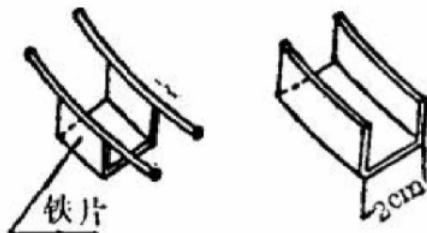


图 8.2

## (二) 动量

如图 8.3 所示，使一个乒乓球从一光滑斜槽的顶端自静止滚下，在光滑桌面上运动一段距离后，被一个固定着的装有橡皮膜（从气球上剪下，装在架子上不要绷紧）的架子 R 阻挡后，停止了运动，再用一个大小相同的金属球，把它从斜槽的同一位置上释放，当它到达桌面时具有相同的速度，但被架子 R 阻挡时，将会观察到橡皮膜被拉得很长后（阻力  $F$  和力作用的时间  $t$  都比较大）才停止运动。这说明乒乓球和金属球虽然具有相同的速度，但由于金属球的质量大，动量也大，因此要使它停下来，需要更大的冲量。

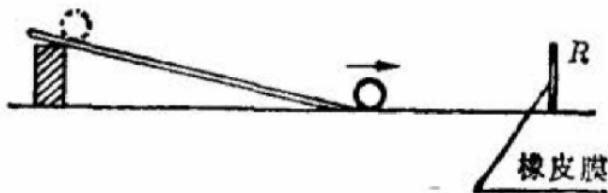


图 8.3

## (三) 动量传递和动量守恒

用气垫导轨演示课本插页图 8.3, 图 8.4 的实验时，可将一根轻质弹簧先固定在一个滑块上，然后用棉线扎紧使弹簧处于压缩状态，再把另一个滑块紧靠着这个滑块装有弹簧的

一侧。在两个滑块都静止的情况下，点燃火柴将棉线烧断，即可看到两个滑块同时分离向相反方向运动的现象。如果两滑块的质量相等，则它们分离的速度大小相等，若两个滑块的质量不相等，则质量小的滑块速度大，质量大的滑块速度小。

演示课本插页图 8.5, 图 8.6 的实验时，可在静止滑块靠近运动滑块的一端，事先粘上一块较软的橡皮泥（如橡皮泥比较干、硬，可把它切成小块后加些缝纫机油调软），这样，当运动滑块跟它碰撞时能较好地粘合在一起。

#### (四) 弹性碰撞

课本图 8.7 的演示实验，也可以用瓷球代替钢球。为了保证使两个小球在同一竖直平面内摆动，可采用双线摆的结构（图 8.4）。为了增加可见度，也可以用注满水的乒乓球来代替钢球进行演示。

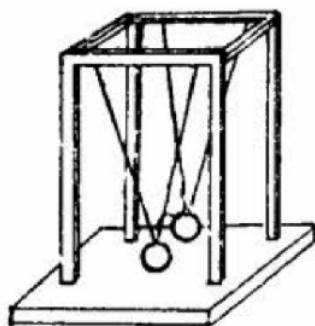


图 8.4

乒乓球中注水的方法是这样的：用注射器针头先在乒乓球上戳一小孔，再在小孔的近处插入针头，接上针筒注满水，拔去针头后可在两个针孔间用弯曲的细铜丝穿入细线，再用橡皮胶布将小孔封住。

#### (五) 反冲运动

反冲小车：如图 8.5 所示，在小车上用铝皮做一个支架，上面固定一根试管，试管略倾斜，管内盛一些水，试管口用橡皮塞（质量可比软木塞大）塞紧，试管底部安装一个盛有酒精棉花的小盘。点燃酒精棉花，待试管中的水沸腾后，产生大量蒸汽将橡皮塞冲出的同时，小车就发生后退现象。

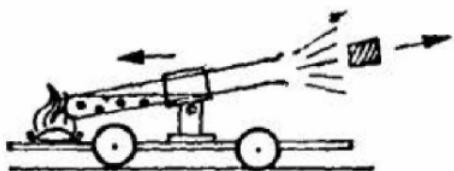


图 8.5

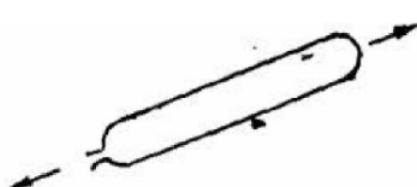


图 8.6

将一长形气球打足气后，用手指捏住打气口，放开后可观察到气球由于放出气体而发生的反冲现象（图 8.6）。

## 二、学生实验

### (一) 研究弹性碰撞

这个实验安排两课时完成. 第一课时可以结合仪器的调节与使用来熟悉处理数据的方法, 从而进一步理解实验的设计原理. 第二课时进行实际的测量与研究.

这个实验的设计原理比较复杂, 应要求学生弄明白后再行操作.

在调节仪器和实验操作时, 要注意以下几点:

1. 调节仪器的水平和支放被碰小球的小柱高度和位置. 使两球能在同一高度上发生正碰.
2. 初步调节好支放被碰小球的支柱的高度和位置后, 要进行试测, 观察时入射小球的落点位置  $P$ , 以及发生碰撞时, 入射小球的落点  $M$  和被碰小球的落点  $N$ , 看看  $P$ 、 $M$ 、 $N$  三个点是否大致在一条直线上, 如果偏离很大, 则应进一步调节支放被碰小球的小柱在水平面上的位置, 直到碰撞后,  $P$ 、 $M$ 、 $N$  三个点看起来基本上在同一直线上, 才可以正式做实验.
3. 确定斜槽底部水平部分槽口中心在水平面上的投影, 即入射小球的抛出点在水平面上的投影  $O$  点时, 重垂线的长度要恰当, 应控制在即将接触到纸面的高度上. 在这个地方不要覆盖复写纸, 实验时要使斜槽固定使重垂线始终指在  $O$  点.
4. 要使学生理解课本图 10.19 中  $O$  点的位置, 即槽口重垂线所指的位置, 而  $O'$  点的所在位置, 应在原始记录纸上沿着  $OP$  直线量度  $2r$  ( $r$  是小球半径) 的距离来确定, 如果入射小球和被碰小球的半径不相等, 则距离  $OO'$  应等于两个小球的半径之和, 小球半径可以用游标卡尺来测量.

利用等式  $m_1(OP) = m_1(OM) + m_2(O'N)$  研究动量守恒时, 对于式中相同的量取相同的单位. 譬如质量的单位都用千克 (或克), 距离单位都用米 (或厘米) 就可以了, 不一定都要用动量的单位进行计算. 因为在这个实验中, 是用距离来表示速度的, 实际上是

$$v_1 = \frac{OP}{\sqrt{2h/g}}, \quad v'_1 = \frac{OM}{\sqrt{2h/g}}, \quad v'_2 = \frac{O'N}{\sqrt{2h/g}}$$

式中的  $h$  为小球下落的高度. 只要用  $t = \sqrt{2h/g}$  来除上面的等式, 式中的各项仍具有动量的单位.

在利用等式  $m_1(OP)^2 = m_1(OM)^2 + m_2(O'N)^2$  研究能量守恒时, 同样是相同的量取相同的单位就可以了. 在这里要使学生了解, 通常我们总是用国际单位制, 但有时为了研究问题简便, 是可以更为方便的单位的. 不要把单位问题搞得那么死板.

实验后还可以让学生思考以下问题:

1. 在这个实验中为什么入射小球每次都必须从斜槽的同一高度滚下?
2. 如果入射小球的质量小于被碰小球, 将会发生什么现象? 是否同样可以进行研究?

### (二) 用冲击摆测弹丸的速度

对于这个实验的原理, 要使学生理解为什么在弹丸射入摆锤过程中动量守恒而动能不守恒; 在摆锤 (连同弹丸一起) 向上摆动的过程中机械能守恒而动量不守恒. 这是由于弹

丸进入摆锤的过程中，弹丸受到的冲力和摆锤受到的冲力，这一对相互作用力是属于系统（弹丸和摆锤所组成）的内力，而它们的重力由悬线的拉力所平衡，因此在弹丸和摆锤相互作用时，它们所受到的合外力为零，所以可用动量守恒定律来计算。在这过程中，弹丸由于克服摩擦阻力做功，一部分动能将转化为内能，所以不能用动能守恒来计算碰撞后的共同速度。

当摆锤获得速度和弹丸一起运动后，可以把弹丸和摆锤看成是一个整体，在它们高度上升的过程中，悬绳拉力不做功，只有重力做功，所以机械能守恒，因此，它们在获得速度、开始运动时的动能，在到达最高位置时将完全转化成重力势能。

在进行实验时，要注意以下几点：

1. 实验前应先将冲击摆装置调水平，要注意在调节悬挂摆锤的四根细线时，必须使它们的长度相等，这样才能使摆锤在上升时保持平动。在调节时并且要使摆锤的上沿与刻度盘上画出的水平虚线对齐，右侧边与偏转角度的零刻度线对齐，以保证弹丸能够射入摆锤孔内。
2. 应提醒学生注意，利用公式  $h = \ell(1 - \cos \theta)$  计算摆锤的上升高度时，式中的摆长  $\ell$  是摆线的长度，即悬点与摆锤上沿之间的距离，而不是悬点与摆锤中心之间的距离。对于为什么要这样计算摆长的道理，可让学生自己考虑。
3. 为减少机械能损失，调节好摆锤的起始位置后，可使用弹簧枪的第一档发射速度先试射一二次，观察指针偏转的最大角度，实验时，使指针预先停留在较小角度上（譬如最大偏角为  $40^\circ$ ，可以把指针先放在  $35^\circ$  的位置上），然后再进行发射，读出指针的最大偏角  $\theta$ 。在使用弹簧枪另外两档发射速度时也应先进行试射。

对有兴趣的学生可以启发思考下面两个问题

1. 使用弹簧枪的不同档来发射弹丸时，为什么弹丸的速度会不相同？
2. 测出弹丸的速度后，如何来计算由弹丸和摆锤组成的系统的机械能损失（用百分数表示），用测得的数据具体计算一下，把所算出的结果跟比值  $\frac{M}{M+m}$  比较一下，看看它们之间有什么联系？

### 三、课外实验活动

#### (一) 观察反冲现象

把包装香烟用的铝箔浸湿后，将它反面的一层薄纸用干布揩去，剪成宽约 5 厘米、长约 20 厘米的一块，卷在圆珠笔的笔芯上做成一个空心铝管。在封口处浆糊粘牢，用二根细线将它水平地悬挂起来，在铝管两端分别插入两根火柴（有火药的一端向里），使它们刚刚接触（图 8.7），然后点燃一根火柴，在铝管中部加热，当火柴即将燃尽时，由于铝管温度升高，管内的火柴已达燃点，燃烧产生的气体推动两根火柴向相反方向从管子两端飞出，若只有一根火柴飞出（另一根与铝管烧结在一起），则铝管将向反方向摆动。应当注意，做实验时，人要站在面对空心铝管侧面的位置。

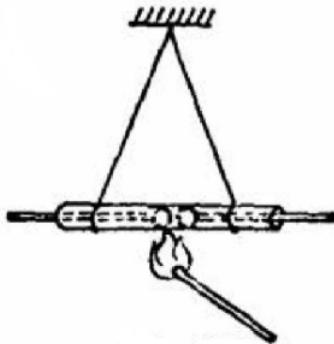


图 8.7

## 第四节 习题解答

### 一、练习一

1. 用 4 牛的力推动一个物体，力的作用时间是 0.5 秒，力的冲量是多少？

解答：冲量  $Ft = 4 \times 0.5 = 2\text{N} \cdot \text{s}$

2. 使质量为 4 吨的汽车，从静止达到  $20\text{km/h}$  的速度，需要多大的冲量？

解答：汽车动量的变化

$$p' - p = mv - 0 = 4 \times 10^3 \times \frac{20 \times 10^3}{3600} = 2.22 \times 10^4 \text{kg} \cdot \text{m/s}$$

所以根据  $Ft = mv$ , 需要的冲量为  $2.22 \times 10^4 \text{kg} \cdot \text{m/s}$ .

3. 质量是 25 千克以  $0.5\text{m/s}$  的速度步行的小孩和质量是 0.02 千克以  $800\text{m/s}$  的速度飞行的子弹，哪个动量大？

解答：小孩的动量

$$p_1 = m_1 v_1 = 25 \times 0.5 = 12.5 \text{kg} \cdot \text{m/s}$$

子弹的动量

$$p_2 = m_2 v_2 = 0.02 \times 800 = 16 \text{kg} \cdot \text{m/s}$$

所以飞行的子弹动量较大.

4. 质量为 8 克的玻璃弹球以  $3\text{m/s}$  的速度向左运动，碰到一个物体后弹回，以  $2\text{m/s}$  的速度沿同一直线向右运动，弹球的动量改变了多少？

解答：若以向右运动的方向为正，则动量的改变：

$$p' - p = mv' - mv = 8 \times 10^{-3} \times 2 - 8 \times 10^{-3} \times (-3) = 4 \times 10^{-2} \text{kg} \cdot \text{m/s}$$

$p' - p$  的值为正，说明动量的改变方向向右.

5. 以相同的速度分别向竖直和水平方向抛出两个质量相等的物体，抛出时两个物体的动能是否相等？动量是否相等？

解答：动能相等，动量不等. 因为动能是标量，与方向无关，而动量是矢量，方向不同，动量就不等.

## 二、练习二

1. 10 千克的物体以  $10\text{m/s}$  的速度作直线运动，在受到一个恒力作用 4.0 秒钟后，速度变为反向  $2.0\text{m/s}$ . 求：

- (a) 物体在受力前和受力后的动量；
- (b) 物体受到的冲量；
- (c) 力的大小和方向.

**解答：**物体原来速度  $v_1 = 10\text{m/s}$ , 则受到力  $F$  作用后, 速度变为  $v_2 = -2.0\text{m/s}$ .

- (a) 受力前物体的动量

$$p_1 = mv_1 = 10 \times 10 = 100\text{kg} \cdot \text{m/s}$$

受力后的动量

$$p_2 = mv_2 = 10 \times (-2.0) = -20\text{kg} \cdot \text{m/s}$$

- (b) 根据动量定理, 物体受到的冲量

$$Ft = p_2 - p_1 = -20 - 100 = -120\text{kg} \cdot \text{m/s} = 120\text{N} \cdot \text{s}$$

负号表示冲量的方向与原来的速度方向相反.

$$(c) F = \frac{Ft}{t} = \frac{-120}{4.0} = -30\text{N}$$

负号表示力的方向与原来的速度方向相反.

2. 列车的质量是  $2.5 \times 10^6$  千克, 受到的牵引力是  $4.0 \times 10^5$  牛, 它的速度由  $10\text{m/s}$  增加到  $24\text{m/s}$  需要用多少时间?

**解答：**根据动量定理  $Ft = mv' - mv$ ,

$$t = \frac{mv' - mv}{F} = \frac{2.5 \times 10^6 \times 24 - 2.5 \times 10^6 \times 10}{4.0 \times 10^5} = 87.5\text{s}$$

列车的速度从  $10\text{m/s}$  增加到  $24\text{m/s}$  需要 87.5 秒.

3. 一个质量是 65 千克的人从墙上跳下, 以  $7\text{m/s}$  的速度着地, 与地面接触后 0.01 秒停了下来, 地面对他的作用力是多大? 如果他着地时弯曲双腿, 用了 1 秒钟才停下来, 地面对他的作用力又是多大?

**解答：**若取向上为正方向, 则应用动量定理, 可得出

$$Ft = 0 - mv$$

式中  $v = -7\text{m/s}$ . 如果落地时力的作用时间为  $t = 0.01$  秒, 地面对人的作用力为

$$F = \frac{-mv}{t} = \frac{-65 \times (-7)}{0.01} = 4.55 \times 10^4\text{N}$$

**说明：**上述解答忽略了人所受的重力, 这是由于人所受的重力为  $mg = 65 \times 9.8 = 637\text{N}$ , 与上面算出的作用力相比, 还不到 2%, 所以是可以忽略的. 但在下面的情况下, 人所受的重力不能忽略.

当人着地时双腿弯曲，力的作用时间为  $t' = 1$  秒，此时必须考虑到是合力的冲量使动量发生变化，所以若以  $F'$  表示地面作用力，则

$$(F' - mg)t' = 0 - mv$$

$$F' = \frac{-mv}{t'} + mg = \frac{-65 \times (-7)}{1} + 65 \times 9.8 = 1.1 \times 10^3 \text{ N}$$

4. 跳远时，为什么跳在砂坑里比跳在混凝土路面上安全？钉钉子时，为什么要用铁锤而不用橡皮锤？

**解答：**跳远时，从着地到停下来所经过的时间，跳在沙坑里比跳在混凝土路面上要长，根据动量定理可知，在动量变化一定的情况下，跳在沙坑里的平均作用力就较小，比较安全。

钉钉子时，铁锤的质量较大，可以有较大的动量。又因铁锤比较坚硬，与钉子接触的时间短。根据动量定理，

$$Ft = 0 - mv, \quad F = \frac{-mv}{t}$$

因为  $mv$  较大， $t$  较小，所以  $F$  就很大，容易把钉子钉入木块等物中去。相反，若用橡皮锤，作用力就较小。

5. 质量为 4 千克的铅球和质量为 0.1 千克的皮球以相同的速度运动着，要使它们在相同的时间内停下来，作用在铅球上的力和作用在皮球上的力哪个大？为什么？

**解答：**铅球与皮球的速度相同，因为铅球的质量大，所以它的动量大。要使它停下来，动量的变化也大。根据动量定理，冲量也必须大。又由于作用时间相同，所以对铅球的作用力应该比对皮球的作用力大。

### 三、练习三

1. 两个原来静止的在水平面上挨在一起的小车，质量分别是 0.5 千克和 0.2 千克，在弹力作用下分开，较重的小车以 0.8m/s 的速度向右运动，求较轻的小车的速度。

**解答：**因为系统的合外力为零，所以动量守恒。

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = 0$$

如果以向右的方向为正方向。则根据题意， $m_1 = 0.5$  千克， $m_2 = 0.2$  千克， $v_1 = 0.8$  米/秒。代入方程，可解得，

$$v_2 = \frac{-m_1 v_1}{m_2} = \frac{-0.5 \times 0.8}{0.2} = -2 \text{ m/s}$$

负号表示较轻的小车的速度与假设的正方向相反，即向左。

2. 在气垫导轨上，一个质量为 600 克的滑块以 15cm/s 的速度赶上另一个质量为 400 克速度为 10cm/s 的滑块而发生碰撞，碰撞后两个滑块并在一起，求两个滑块碰撞后的速度。

**解答：**根据题意，滑块质量分别为  $m_1 = 600 \text{ g} = 0.6 \text{ kg}$ ， $m_2 = 400 \text{ g} = 0.4 \text{ kg}$ ， $v_1 = 15 \text{ cm/s} = 0.15 \text{ m/s}$ ， $v_2 = 10 \text{ cm/s} = 0.10 \text{ m/s}$ 。设碰撞后的共同速度为  $v$ 。则根据动量

守恒定律,

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v$$

$$v = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} = \frac{0.6 \times 0.15 + 0.4 \times 0.10}{0.6 + 0.4} = 0.13 \text{ m/s}$$

方向跟原来的方向一致.

3. 一个小孩从静止的小船上水平抛出一个球, 球的质量是 2.0 千克, 抛出的速度是 20m/s. 如果小孩和船的总质量为 100 千克, 球抛出时船得到的速度是多大?

**解答:** 设小孩和船的总质量为  $M$ , 小球的质量为  $m$ , 小球抛出的速度  $v$  即小球抛出时相对于地面的速度. 则小孩和船的速度  $V$  可由动量守恒定律求出. 设  $v$  的方向为正.

$$mv + MV = 0$$

$$V = -\frac{mv}{M} = \frac{-2.0 \times 20}{100} = -0.40 \text{ m/s}$$

负号表示  $V$  的方向与小球抛出方向相反.

4. 质量为 10 克速度为 300m/s 的子弹, 打进质量为 24 克静止在光滑水平面上的木块中, 并留在木块里, 子弹进入木块后, 木块运动的速度多大? 如果子弹把木块打穿, 穿过木块后子弹的速度为 100m/s, 这时木块的速度多大?

**解答:** 设子弹质量为  $m$ , 速度为  $v_1$ , 木块质量为  $M$ . 当子弹打入木块并留在木块内时, 子弹和木块有共同速度  $V$ , 则根据动量守恒定律, 有

$$mv = (m + M)V$$

$$V = \frac{mv}{m + M} = \frac{0.01 \times 300}{0.01 + 0.024} = 88.2 \text{ m/s}$$

如果子弹穿过木块后有速度  $v' = 100 \text{ m/s}$ , 则木块速度  $V'$  可由下式求得

$$mv = mv' + MV'$$

$$V' = \frac{mv - mv'}{M} = \frac{0.01 \times 300 - 0.01 \times 100}{0.024} = 83.3 \text{ m/s}$$

5. 光滑的水平面上停着一辆平车, 有两个人在车上相向而行, 在什么情况下平车保持静止? 在什么情况下平车要运动, 运动的方向由什么决定?

**解答:** 两人动量的大小相等时, 平车不动; 两人动量的大小不等时, 平车就要运动. 平车运动的方向跟动量小的人的运动方向相同. 这是因为, 两人动量与平车的动量之和应该守恒, 即为零, 因此, 平车的动量应与两个人的合动量的大小相等方向相反, 而两人合动量的方向决定于哪个人的动量大, 所以平车的动量方向应与动量小的人的动量方向相同.

#### 四、练习四

1. 两个质量都是 3 千克的球, 各以 6m/s 的速率相向运动, 发生正碰后每个球都以原来的速率向相反方向运动. 它们的碰撞是弹性碰撞吗? 为什么?

**解答:** 是弹性碰撞. 两个小球虽然碰撞前后运动方向都发生变化, 但速度大小不变, 所以动能不变, 由于动能守恒, 所以是弹性碰撞.

2. 一个 1.5 千克的物体原来静止，另一个 0.5 千克的以 0.2m/s 的速度运动的物体与它发生弹性正碰，求碰撞后两个物体的速度。

**解答：**根据题意， $m_1 = 0.5$  千克， $v_1 = 0.2$  米/秒， $m_2 = 1.5$  千克， $v_2 = 0$ . 因为两球发生弹性碰撞，因此满足动量守恒和动能守恒：

$$\begin{cases} m_1 v_1 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2 \\ \frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_1 v'_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v'_2^2 \end{cases}$$

解得，

$$\begin{aligned} v'_1 &= \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1 = \frac{0.5 - 1.5}{0.5 + 1.5} \times 0.2 = -0.1 \text{m/s} \\ v'_2 &= \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1 = \frac{2 \times 0.5}{0.5 + 1.5} \times 0.2 = 0.1 \text{m/s} \end{aligned}$$

$v'_1$  为负值，说明质量较小的物体碰撞后速度的方向与原来相反。

3. 甲乙两物体在同一直线上同向运动，甲物体在前，乙物体在后，甲物体质量为 2 千克，速度是 1m/s；乙物体质量为 4 千克，速度是 3m/s. 乙物体追上甲物体发生正碰后，两物体仍沿着原来的方向运动，而甲物体的速度变为 3m/s，乙物体的速度变为 2m/s，这两个物体的碰撞是弹性碰撞吗？为什么？

**解答：**设甲物体的质量为  $m_1$ ，它在碰撞前后的速度为  $v_1$ 、 $v'_1$  乙物体的质量为  $m_2$ ，它在碰撞前后的速度为  $v_2$ 、 $v'_2$ . 要判断是否弹性碰撞，可检验其碰撞前后的总动能是否守恒。

碰撞前的总动能：

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} \times 2 \times 1^2 + \frac{1}{2} \times 4 \times 3^2 = 19 \text{J}$$

碰撞后的总动能：

$$\frac{1}{2} m_1 v'_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v'_2^2 = \frac{1}{2} \times 2 \times 3^2 + \frac{1}{2} \times 4 \times 2^2 = 17 \text{J}$$

可见，总动能不守恒，不是弹性碰撞。

4. 在课文第六节的 (8.6) 式中，如果  $m_2 \gg m_1$ ，就得到  $v'_1 \approx -v_1$ ,  $v'_2 \approx 0$ . 这组解的物理意义是什么？

**解答：**在弹性碰撞方程组中解得的末速度公式 [(8.6) 式] 是：

$$\begin{cases} v'_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1 \\ v'_2 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1 \end{cases}$$

当  $m_2 \gg m_1$  时，可得  $v'_1 \approx -v_1$ ,  $v'_2 \approx 0$ . 这说明：当质量很小的物体去与质量很大的静止物体发生正碰时，小物体将原速弹回，而大物体几乎不动。

## 五、习题

1. 质量为 1 千克的手榴弹以  $60^\circ$  角斜抛出去，抛出的速度为 10m/s，手榴弹到达最高点时炸成两块，一块的质量是 0.6 千克，以 15m/s 的速度沿原方向运动，求另一块的速度大小和方向。

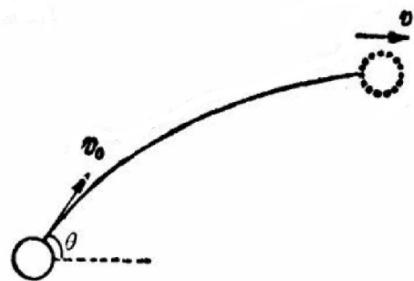


图 8.8

解答：手榴弹以  $60^\circ$  角斜抛出去，达最高点时的速度

$$v = v_0 \cos \theta = 10 \times \cos 60^\circ = 5 \text{ m/s}$$

(图 8.8). 此时手榴弹炸成两块，爆炸前后的动量应该守恒. (它们所受的重力与爆炸力相比可忽略不计). 设爆炸后沿原方向运动的一块质量为  $m_1$ , 速度为  $v_1$ , 另一块的质量为  $m_2$ , 速度为  $v_2$ . 以原运动方向为正方向，则

$$mv = m_1 v_1 + m_2 v_2$$

$$v_2 = \frac{mv - m_1 v_1}{m_2} = \frac{1 \times 5 - 0.6 \times 15}{0.4} = -10 \text{ m/s}$$

负号表示方向与手榴弹在最高点的速度方向相反.

2. 对于在一直线上运动的两个物体组成的系统，动量守恒定律的一般表达式为：

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2$$

在不同情况下，这个表达式往往可以简化为不同形式，试写出下列各种情况下得出的简化的表达式：

- (a) 两个物体原来静止，发生相互作用后分开；
- (b) 一个物体原来静止，另一个物体跟它碰撞后粘合在一起并共同沿原来的方向运动；
- (c) 一个物体原来静止，另一个运动物体与它正碰后，两物体以不同的速度在原来的直线上运动；
- (d) 两个相向运动的物体，相碰后都静止下来.

解答：

$$(a) 0 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2$$

(b) 设  $m_2$  原来静止，则

$$m_1 v_1 = (m_1 + m_2) v$$

式中  $v$  为粘合后的共同速度.

$$(c) m_1 v_1 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2$$

(d)  $m_1 v_1 + m_2 v_2 = 0$  以上几式中的  $v_1, v_2, v'_1, v'_2, v'$  等速度的正负要根据与假定正方向的一致或相反来确定.

3. 试证明：两个物体碰撞后，它们的速度变化  $\Delta v_1 = v'_1 - v_1$  和  $\Delta v_2 = v'_2 - v_2$  跟它们的质量成反比，即

$$\frac{\Delta v_1}{\Delta v_2} = -\frac{m_2}{m_1}$$

并利用所得结果来讨论：很轻的物体（如乒乓球）跟一个很重的物体（如课桌）碰撞后，它们的速度变化有什么特征。

**证明：**两物体碰撞，动量守恒。据两个物体组成系统的动量守恒定律一般表达式

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2$$

移项得

$$\begin{aligned} m_1(v'_1 - v_1) &= -m_2(v'_2 - v_2) \\ \frac{v'_1 - v_1}{v'_2 - v_2} &= -\frac{m_2}{m_1} \end{aligned}$$

即

$$\frac{\Delta v_2}{\Delta v_1} = -\frac{m_2}{m_1}$$

4. 质子的质量是  $1.67 \times 10^{-27}$  千克，速度为  $1.0 \times 10^7$  m/s，与一个静止的氦核碰撞后，质子以  $6.0 \times 10^6$  m/s 的速度反弹回来，氦核以  $4.0 \times 10^6$  m/s 的速度向前运动。

- (a) 你能否求出氦核的质量？如果能，是多少？  
 (b) 你能否求出碰撞时的相互作用力？为什么？

**解答：**

- (a) 能。可以用动量守恒定律求出。设质子质量为  $m_1 = 1.67 \times 10^{-27}$  千克，速度  $v_1 = 1.0 \times 10^7$  米/秒。碰撞后质子反弹，速度为  $v'_1 = -6.0 \times 10^6$  米/秒。氦核的质量为  $m_2$ ，碰撞后速度  $v'_2 = 4.0 \times 10^6$  米/秒。则

$$\begin{aligned} m_1 v_1 &= m_1 v'_1 + m_2 v'_2 \\ m_2 &= \frac{m_1 v_1 - m_1 v'_1}{v'_2} \\ &= \frac{1.67 \times 10^{-27} \times 1.0 \times 10^7 - 1.67 \times 10^{-27} \times (-6.0 \times 10^6)}{4.0 \times 10^6} \\ &= 6.68 \times 10^{-27} \text{ kg} \end{aligned}$$

- (b) 不能。因为根据质子的动量变化可以求得质子受到的冲量，但由于作用时间未知，所以无法求得作用力。

5. 两个球以相同的速度相向运动，其中一个球的质量是另一个的三倍，相碰后重球停止不动，轻球以二倍的速率弹回，试证明它们发生的是弹性碰撞。

**解答：**设轻球质量为  $m$ ，则重球质量为  $3m$ 。碰撞前速率都是  $v$ ，碰撞后轻球速率是  $2v$ ，重球静止，则碰撞前总动能为

$$\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2} \times 3mv^2 = 2mv^2$$

碰撞后总动能为

$$\frac{1}{2}m(2v)^2 = 2mv^2$$

可见，碰撞前后动能守恒，为弹性碰撞。

6. 在光滑水平面上一个质量为 0.2 千克的小球以 5m/s 的速度向前运动，途中与另一个质量为 0.3 千克静止的小球发生正碰。假设碰撞后第二个小球的速度为 4.2m/s，你算出的第一个小球的速度是多大？想一想，这种情况真的可能发生吗？这道题的毛病出在哪里？

**解答：**如果这种情况真的发生，则碰撞前后一定满足动量守恒。因此可用动量守恒定律求得第一个小球碰撞后的速度  $v'_1$ 。设第一个小球的质量为  $m_1$ ，碰撞前速度为  $v_1$ ，第二个小球的质量为  $m_2$ ，碰撞后的速度为  $v'_2$ 。则

$$m_1 v_1 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2$$

$$v'_1 = \frac{m_1 v_1 - m_2 v'_2}{m_1} = \frac{0.2 \times 5 - 0.3 \times 4.2}{0.2} = -1.3 \text{m/s}$$

但实际上这种情况是不可能发生的。因为碰撞前的总动能

$$E = \frac{1}{2}m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} \times 0.2 \times 5^2 = 2.5 \text{J}$$

而碰撞后的总动能为

$$\begin{aligned} E' &= \frac{1}{2}m_1 v'_1^2 + \frac{1}{2}m_2 v'_2^2 \\ &= \frac{1}{2} \times 0.2 \times (-1.3)^2 + \frac{1}{2} \times 0.3 \times 4.2^2 \\ &= 2.8 \text{J} \end{aligned}$$

碰撞后的总动能大于碰撞前的总动能是不可能的。这道题的毛病在所给的数据不符合实际情况。

7. 一个质量  $M = 0.2$  千克的小球放在高度  $h = 5$  米的直杆顶端（图 8.11），一颗质量  $m = 0.01$  千克的子弹以  $v_0 = 500\text{m/s}$  的速度沿水平方向击中小球，并穿过球心，小球落地处离杆的距离  $s = 20$  米。求子弹落地处离杆的距离。子弹的动能有多少转化成了热能？

**解答：**根据小球落地点离杆的距离  $s$ ，利用平抛运动规律，可求出小球在碰撞后的速度  $V$ 。

$$V = \frac{s}{t} = \frac{s}{\sqrt{2h/g}} = \frac{20}{\sqrt{\frac{2 \times 5}{9.8}}} = 20 \times \sqrt{0.98} = 19.8 \text{m/s}$$

再根据动量守恒定律求得子弹在穿过小球后的速度  $v'$ 。

$$mv_0 = mv' + MV$$

$$v' = \frac{mv_0 - MV}{m} = \frac{0.01 \times 500 - 0.2 \times 19.8}{0.01} = 104 \text{m/s}$$

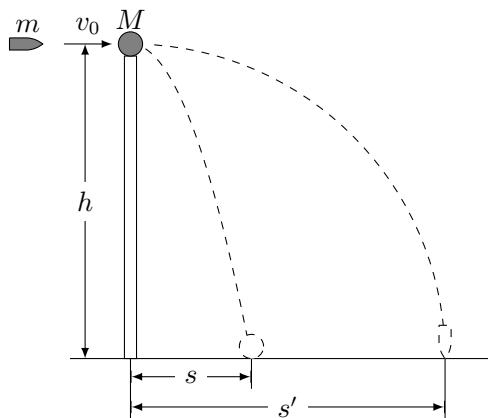


图 8.9

再根据平抛运动规律求出子弹落地点离杆的距离  $s'$ ,

$$s' = v't = v' \times \sqrt{\frac{2h}{g}} = 104 \times \sqrt{\frac{2 \times 5}{9.8}} = 105\text{m}$$

设转化为热能的能量为  $E$ , 则根据能量守恒:

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}mv'^2 - \frac{1}{2}MV^2 \\ &= \frac{1}{2} \times 0.01 \times 500^2 - \frac{1}{2} \times 0.01 \times 104^2 - \frac{1}{2} \times 0.2 \times 19.8^2 \\ &= 1.16 \times 10^3\text{J} \end{aligned}$$

8. 略 (课本已作解答).

9. 在上题中, 如果宇航员想以最短的时间返回飞船, 他开始最多能释放出多少氧气? 这时他返回飞船所用的时间是多少?

**解答:** 要使返回时间最短, 就要使开始释放的氧气最多. 这样反冲速度大, 返回时间短, 但释放氧气后的剩余氧气又必须足够宇航员在途中呼吸所用. 其极端的情况就是所剩的氧气正好够宇航员途中呼吸, 即  $m + m_{\text{吸}} = m_{\text{总}}$ , 式中  $m$  就是开始喷出的氧气质量. 根据上题分析, 宇航员的反冲速度为  $V$ , 而  $V = -mv/M$ . 返回时间

$$t = \frac{d}{V} = -\frac{Md}{mv}$$

在这段时间内宇航员吸氧气

$$m_{\text{吸}} = m_{\text{总}} - m = Rt$$

所以,

$$m_{\text{总}} - m = Rt = -R \frac{Md}{mv}$$

整理得

$$m^2 - m_{\text{总}}m - \frac{RMd}{v} = 0$$

所以,

$$m = \frac{1}{2} \left( m_{\text{总}} + \sqrt{m_{\text{总}}^2 + \frac{4RMd}{v}} \right)$$

(因  $m$  应取较大值, 所以舍去根号前的负号解). 代入数据  $m_{\text{总}} = 0.5\text{kg}$

$$\frac{RMd}{v} = \frac{2.5 \times 10^{-4} \times 100 \times 45}{-50} = -0.0225\text{kg}^2$$

解得:  $m = 0.45\text{kg}$

根据题意, 要使宇航员返回时间最短, 开始时应释放氧气 0.45 千克. 宇航员返回时间为

$$t = \frac{d}{V} = -\frac{Md}{mv} = -\frac{100 \times 45}{0.45 \times (-50)} = 200\text{s}$$

说明: 上述返回时间的答案可以验证. 看看在这段时间里宇航员呼吸氧气有没有问题. 如果从吸完氧气所需的时间来计算, 则

$$t = \frac{m_{\text{总}} - m}{R} = \frac{0.5 - 0.45}{2.5 \times 10^{-4}} = 200\text{s}$$

与上述答案是一致的.

10. 速度为  $10^5\text{cm/s}$  的氦核与静止的质子发生正碰, 氦核的质量是质子的 4 倍, 碰撞是弹性的, 求碰撞后两个粒子的速度.

**解答:** 设氦核质量为  $m_1$ , 速度为  $v_1$ , 质子质量为  $m_2$ . 已知  $m_1 = 4m_2$ . 根据弹性碰撞的动量守恒和动能守恒, 列出方程:

$$\begin{cases} m_1 v_1 = m_1 v_1' + m_2 v_2' \\ \frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 \end{cases}$$

解得碰撞后氦核速度

$$v_1' = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1 = \frac{3m_2}{5m_2} v_1 = \frac{3}{5} v_1 = \frac{3}{5} \times 10^5 = 6 \times 10^4\text{cm/s}$$

质子速度

$$v_2' = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1 = \frac{8m_2}{5m_2} v_1 = \frac{8}{5} v_1 = \frac{8}{5} \times 10^5 = 1.6 \times 10^5\text{cm/s}$$

$v_1'$ 、 $v_2'$  都与  $v_1$  的方向相同.

11. 一个质量是  $m_1$ , 动能是  $E_K$  的物体与一个质量是  $m_2$  的不动的物体正碰, 假定发生的是弹性碰撞, 在  $m_1 = 0.01m_2$ ,  $m_1 = m_2$ ,  $m_1 = 100m_2$  的情况下,  $m_1$  传递给  $m_2$  的动能各是多少?

(有兴趣的同学还可以进一步讨论  $m_1$  传递给  $m_2$  的动能最大或最小的条件).

**解答:** 设  $m_1$  的原速度为  $v_1$ , 碰撞后两物体的速度分别为  $v_1'$ 、 $v_2'$ . 则根据弹性正碰的特点列出方程:

$$\begin{cases} m_1 v_1 = m_1 v_1' + m_2 v_2' \\ \frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 \end{cases}$$

解得：

$$v'_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1, \quad v'_2 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1$$

$m_1$  传递给  $m_2$  的动能

$$\begin{aligned} E'_{k_2} - 0 = E'_{k_2} &= \frac{1}{2} m_2 v'_2^2 = \frac{1}{2} m_2 \left( \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1 \right)^2 v_1^2 \\ &= \frac{1}{2} m_1 v_1^2 \cdot \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} \\ &= \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} E_k \end{aligned}$$

- 当  $m_1 = 0.01m_2$  时，

$$E'_{k_2} = \frac{4 \times 0.01m_2^2}{1.01^2 m_2^2} E_k = 0.039 E_k$$

说明传递给  $m_2$  的动能只占  $m_1$  原动能的 3.9%.

- 当  $m_1 = m_2$  时，  $E'_{k_2} = E_k$ . 说明  $m_1$  的动能全部传递给  $m_2$ .
- 当  $m_1 = 100m_2$  时，

$$E'_{k_2} = \frac{400m_2^2}{101^2 \cdot m_2^2} E_k = 0.039 E_k$$

说明传递给  $m_2$  的动能也只占  $m_1$  原动能的 3.9%.

$m_1$  传递给  $m_2$  的动能为最大的情况，就是将自己的动能全部传给  $m_2$  的情况，即上面所说的  $m_1 = m_2$  的情况.

从式子  $E'_{k_2} = \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} E_k$  可见，

$$E'_{k_2} = \frac{4m_1 m_2}{m_1^2 + 2m_1 m_2 + m_2^2} E_k = \frac{4}{\frac{m_1}{m_2} + 2 + \frac{m_2}{m_1}} E_k$$

- 当  $m_1 \gg m_2$  时，  $\frac{m_2}{m_1} \rightarrow 0$ , 而  $\frac{m_1}{m_2} \rightarrow \infty$ , 所以  $E'_{k_2} \rightarrow 0$ .
- 当  $m_1 \ll m_2$  时，  $\frac{m_1}{m_2} \rightarrow 0$ , 而  $\frac{m_2}{m_1} \rightarrow \infty$ , 所以  $E'_{k_2} \rightarrow 0$

所以，当  $m_1 \gg m_2$  或  $m_1 \ll m_2$  时， $m_1$  传递给  $m_2$  的动能最小（等于零）.

12. 在有些原子反应堆里，要让中子与原子核碰撞，以便把中子的速率迅速降低下来. 为此，是选用较重的还是较轻的原子核效果较好？为什么？

**解答：**要使中子速率迅速降低下来，就要使中子与原子核碰撞的过程中将动能传递给原子核. 根据上题的讨论，被撞原子核的质量越接近中子质量，传递动能越多，中子的速率就降低得越快. 所以选用较轻的原子核效果较好.

## 第五节 参考资料

### 一、机械运动中动量及动能的区别

课本里的阅读材料：《笛卡儿和动量守恒定律》中已经提到动量这个概念是笛卡尔、牛顿先后提出的，并且笛卡儿明确地把物体的质量和速度的乘积作为物体“运动量”的量

度。在历史上由于他们的影响，在十七世纪四十年代至八十年代，科学界普遍承认  $mv$  是机械运动唯一的量度。

在这同一时期内，由于惠更斯对完全弹性碰撞的研究，得出了“各个质量和各个速度的平方乘积之和，在碰撞前后不变”的结论。

1686 年德国数学家莱布尼兹通过对落体运动的分析，认为物体的质量和速度平方的乘积——活力——才是机械运动的真正量度，从而与笛卡尔的主张展开了争论。

关于两种运动量度的争论，持续了近二百年，许多著名的数理学家参加到争论中。后来随着力学本身的发展，人们对这两种量度取得了清楚的认识。

牛顿第二定律

$$\frac{d(mv)}{dt} = F$$

所表现的只是运动的原因（力）和结果（动量变化）之间的瞬时关系。如果考察力在一段时间内的累积效应，可由上式得出：

$$\begin{aligned} d(mv) &= F \cdot dt \\ \therefore mv_2 - mv_1 &= \int_{t_1}^{t_2} F \cdot dt \end{aligned}$$

这就是动量定理：在一段时间内物体动量的变化，等于物体在同一时间内所受外力的冲量，如果要根据物体在力的作用下所通过的距离来考察力的作用效果，即力的空间积累效应，则可得出：

$$\begin{aligned} F \cdot ds &= \frac{d(mv)}{dt} \cdot ds \\ \int_{t_1}^{t_2} F \cdot ds &= \int_{t_1}^{t_2} v \cdot d(mv) \\ \therefore \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 &= \int_{t_1}^{t_2} F \cdot ds \end{aligned}$$

这就是动能定理：物体动能的增加，等于外力对物体所做的功。

所以，在力学中动量的变化表现着力的时间累积效应，动量的变化与外力的冲量相等；动能的变化表现着力的空间累积效应，动能的变化与外力的功相等。动量是与冲量密切联系着的，动量决定物体反抗阻力能够移动多久；动能是与功密切联系着的，动能决定物体反抗阻力能够移动多远。

## 二、动量守恒定律的适用范围比牛顿运动定律广

动量守恒定律比牛顿运动定律的适用范围要广。近代的科学实验和理论分析都表明：在自然界中，大到天体的相互作用，小到质子、中子等基本粒子间的相互作用都遵守动量守恒定律。

在天文学中发现过这样一种现象：在太空的某个地方有时会突然发出非常明亮的光，这就是超新星，可是它很快就暗淡下来，经过几十个昼夜亮度就会减弱一半，光要从这样一颗超新星出发到达地球需要几百万年，而相比之下超新星从发光到熄灭的时间就显得太短了，在光到达我们这里以前，超新星早已烧光了。

当光从超新星到达地球时，它给地球一个轻微的推动，而与此同时地球却无法给超新星一个轻微的推动，因为它已消失了，因此，如果我们想象一下超新星与地球之间的相互作用力，在同一瞬间也就不是什么大小相等，方向相反了。此时，牛顿第三定律显然已不适用了。

虽然如此，动量守恒定律还是正确的。不过，我们必须把光也考虑在内。当超新星发射光时，星体反冲，得到动量，同时光也带走了大小相等、方向相反的动量。经过几百万年光到达地球时，光把它的动量给了地球。这里要注意的是：动量不仅可以为实物所携带，而且可以以辐射的方式传递动量，当我们考虑到这点时，动量守恒定律还是正确的。

### 三、相对论的动量

在牛顿力学里，动量定义为  $mv$ ，质量  $m$  是个不变的量。根据牛顿第二定律，一个恒定的力，持续作用于一个物体，可以使该物体有任意大的高速度。但是在现实中，真空中的光速是极限速度，并且在任何条件下物体的速度都不可能超过真空中的光速。因此，在高速运动时，认为质量，以及动量，是与速度无关的，是不正确的。

相对论告诉我们，在高速运动时质量不再是一个不变的量，而是随着运动的速度接近光的速度  $c$  而增大，如果用  $m_0$  表示静止物体的质量，则以速度  $v$  运动的物体的质量  $m$  可以用下式表示：

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

相对论的动量仍定义为，

$$p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

在采用这样定义的情况下，牛顿本人所用的第二定律的表达式

$$\frac{dp}{dt} = F, \quad F = \frac{d}{dt} \cdot \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

在接近光速的情况下也同样适用了，因为随着运动速度的增大，决定物体惯性大小的质量也增大。当  $v \rightarrow c$  时， $m \rightarrow \infty$ ，所以加速度趋于零，不论力作用多长时间，速度也不会超过光速。

对于静止质量  $m_0 = 0$ ，而速度为  $c$  的光子来说，它的动量  $p = E/c$  可以这样推得：

因为  $E = mc^2$ ，所以

$$\begin{aligned} E^2 &= m^2 c^4 = m^2 c^4 - m^2 v^2 c^2 + m^2 v^2 c^2 \\ &= m^2 c^4 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) + p^2 c^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2 \end{aligned}$$

在  $v \rightarrow c, m_0 \rightarrow 0$  时， $E^2 = p^2 c^2$ ，所以

$$p = \frac{E}{c}$$

# 第九章 机械振动和机械波

---

<b>第一节 教学要求</b> . . . . .	<b>224</b>
<b>第二节 教学建议</b> . . . . .	<b>226</b>
一、第一单元 . . . . .	226
(一)机械振动的定义和产生的条件 . . . . .	226
(二)表征振动的物理量 . . . . .	227
(三)简谐振动的回复力 . . . . .	227
(四)简谐振动的运动规律 . . . . .	227
(五)单摆的周期公式 . . . . .	228
(六)相和相差 . . . . .	228
(七)简谐振动图象 . . . . .	229
(八)简谐振动的能量 . . . . .	229
(九)受迫振动和共振 . . . . .	229
二、第二单元 . . . . .	230
(一)机械波的基本特征 . . . . .	230
(二)机械波为什么会在媒质中传播 . . . . .	230
(三)机械波是怎样在媒质中传播的 . . . . .	230
(四)机械波也是能量在媒质中的传播 . . . . .	230
(五)波长、波速与频率的关系 . . . . .	231
(六)横波图象和纵波图象 . . . . .	231
(七)波的图象与振动图象 . . . . .	231
(八)波的独立传播和叠加 . . . . .	231
(九)波的干涉 . . . . .	231
(十)产生波的干涉以及衍射的条件 . . . . .	232
三、第三单元 . . . . .	232
(一)声源发声时的振动 . . . . .	232
(二)声波 . . . . .	233
(三)声音的现象 . . . . .	233
(四)乐音和乐音的波形曲线 . . . . .	234
(五)音调和响度 . . . . .	234
(六)音品 . . . . .	234
(七)噪声的危害和控制、超声波 . . . . .	234
<b>第三节 实验指导</b> . . . . .	<b>235</b>
一、演示实验 . . . . .	235

(一)机械振动 . . . . .	235
(二)产生振动的条件 . . . . .	235
(三)简谐振动 . . . . .	236
(四)简谐振动的周期和频率 . . . . .	237
(五)简谐振动的图象 . . . . .	237
(六)受迫振动和共振 . . . . .	239
(七)横波的形成和传播 . . . . .	240
(八)波长、频率和波速的关系 . . . . .	241
(九)波的叠加 . . . . .	243
(十)水波的干涉 . . . . .	243
(十一)声波的干涉 . . . . .	243
(十二)声音的共鸣 . . . . .	244
(十三)音调跟频率有关 . . . . .	244
(十四)响度跟振幅有关 . . . . .	244
(十五)音品 . . . . .	244
二、学生实验 . . . . .	244
(一)用单摆测定重力加速度 . . . . .	244
<b>第四节 习题解答 . . . . .</b>	<b>246</b>
一、练习一 . . . . .	246
二、练习二 . . . . .	246
三、练习三 . . . . .	247
四、练习四 . . . . .	248
五、练习五 . . . . .	249
六、练习六 . . . . .	249
七、练习七 . . . . .	250
八、练习八 . . . . .	251
九、练习九 . . . . .	251
十、习题 . . . . .	253
<b>第五节 参考资料 . . . . .</b>	<b>255</b>
一、周期运动、振荡和振动 . . . . .	255
二、谐运动和振子 . . . . .	256
三、声压、声强 . . . . .	256
四、乐器的基音与泛音 . . . . .	257
五、弦乐器上共鸣箱的作用 . . . . .	257
六、我国区域环境噪声标准 . . . . .	258

## 第一节 教学要求

这一章在前面学过的知识基础上讲解机械振动和机械波。为了清楚起见，本章教材分为三部分：第一部分讲机械振动，第二部分讲机械波，第三部分讲声学初步知识。

这一章的教学要求是：

1. 了解振动产生的条件，理解回复力的概念。

2. 理解振幅、周期和频率等概念的意义. 了解相和相差的概念, 知道什么是同相和反相.
3. 从受力情况、速度和加速度、能量几个方面明确简谐振动的特点; 掌握简谐振动的周期公式.
4. 了解振动图象的物理意义.
5. 了解自由振动和受迫振动的意义, 明确产生共振的条件.
6. 理解机械波是怎样产生的, 知道什么是横波和纵波.
7. 了解波动图象的物理意义, 知道振动图象和波动图象的区别.
8. 了解波的干涉和波的衍射.
9. 了解声波的产生, 了解声波的反射、干涉、衍射以及声音的共鸣.
10. 了解音调、响度、音品的意义, 知道它们各是由什么决定的.
11. 知道什么是乐音和噪声, 了解噪声的危害和控制, 知道什么是超声波和次声波, 了解超声波的应用.

下面对这一章的教学内容作些具体说明.

讲解产生振动的条件时, 要使学生很好地理解回复力的概念, 知道它是根据力的效果命名的. 介绍表征振动的物理量即振幅、周期和频率时, 应注意说明振动有它的特点, 需要: 引入新的物理量来描述这种特点, 讲解周期的概念时, 要着重说明什么是一次全振动, 这是正确理解周期这个概念的基础.

讲解简谐振动时, 应该让学生理解为什么要先研究简谐振动, 再一次说明理想化的方法, 要求学生对这种研究方法进一步有所领会.

简谐振动的周期公式, 虽然是就弹簧振子给出的, 但对任何简谐振动都适用; 只是对不同的简谐振动, 由于受力的性质不同,  $k$  的含义也不同. 对于单摆, 要使学生明确: 只有摆角很小时回复力才跟位移成正比, 单摆才做简谐振动. 单摆的周期公式要求学生能够根据简谐振动的一般周期公式自己推导出来.

相这个概念比较抽象, 学生不容易体会它的意义. 因此教材没有给出相的定义, 只要求了解: 两个简谐振动的振动步调不一致, 就表示它们的相不同, 或者说存在着相差. 这里, 不讲初相的概念, 只要求学生知道什么是同相什么是反相.

由于没有讲振动方程, 更需要学生理解振动图象的物理意义; 它表示了振子对平衡位置的位移怎样随时间而变化. 还要求学生明确知道: 在振动图象上可以表示出周期和振幅; 利用振动图象还可以比较振动的相.

单摆中能量的转化, 在机械能一章中已经讨论过, 这里着重说明单摆的能量跟振幅有关, 振幅越大, 能量越大, 但振动中能量的转化不要求定量讨论, 对于阻尼振动, 只要求学生知道: 什么是阻尼振动; 在什么条件下可以把阻尼振动作为简谐振动来处理.

波的概念初学者较难理解, 要做好演示, 使学生清楚地看出波是振动的传播, 媒质本身并不随波迁移. 要求学生对波的形成有明确的认识, 知道振动为什么不会局限在媒质的一个地方, 而要传播出去; 知道在振动的传播中, 后一个质点总比前一个质点迟一些开始振动, 相邻质点振动的相不同, 因而在整体上看才形成波向前传播. 对于横波和纵波, 只要求学生知道, 什么是横波, 什么是纵波, 不要求对它们的传播过程作过细的分析.

波速的公式  $v = \lambda f$  是对各种波普遍适用的公式，要求学生掌握。这里，首先是对波长的概念要有清楚的理解，其次是知道在一个周期的时间内振动传播的距离等于一个波长。

关于波的图象，要求学生了解它的物理意义，它表示的是某一时刻各个质点的位移，它是数学图象，只是对横波来说才直观地表示波形，对纵波的图象，要求学生理解图象的意义即纵坐标所表示的是各个质点离开平衡位置向左或向右的位移，不要求仔细地讲述怎样得出这个图象，要求学生能够区分振动图象和波动图象二者的不同的意义，不要求综合利用两种图象来分析问题。

关于波的干涉，要求学生知道干涉现象是怎样产生的，即波峰和波峰（波谷和波谷）相遇处，叠加的结果，振动最强，波峰和波谷相遇处，叠加的结果，振动最弱。要求学生知道什么是相干波源。这里提到相差恒定，可以要求学生从波源总保持同相这种特殊情形来理解。关于波的衍射，只作简单介绍。

第三部分介绍声学的初步知识，重点是介绍乐音的三种特性，说明它们各是由什么决定的，目前，噪声已成为污染城市环境的公害之一，教材单列一节讲述噪声的危害和控制，希望引起学生注意，并知道这方面的简单常识。

“超声波”一节是选讲内容，即使不讲授这节内容，也应该使学生知道什么是超声波和次声波。

## 第二节 教学建议

全章分为三个单元。第一单元从第一节至第七节，介绍了机械振动的基础知识，主要讨论了简谐振动的规律，介绍了受迫振动和共振的知识，本单元是全章的基础和重点。

第二单元从第八节至第十二节，介绍了机械波的产生、传播形式，描述手段和波的两个主要特性 - 干涉和衍射。第三单元从第十三节到第十七节，介绍了声波的产生、基本声现象、乐音的三要素和噪声的危害。

### 一、第一单元

#### (一) 机械振动的定义和产生的条件

为了培养学生科学的观察和分析能力，可以先学生举一些他们在生活中观察到的振动的例子，接着教师可展示一组不同物体的振动，例如可选取弹簧振子、单摆、钟摆的摆轮、一端夹紧的锯条、内燃机汽缸模型中的活塞、水中的浮子、不倒翁以及天平指针等。启发他们归纳出这些运动的共同特点即物体或物体的一部分在某位置附近沿着直线或弧线作往复的周期性运动。接着再让学生仔细观察一下竖直放置的弹簧振子的振动，分析一下振子在某位置附近作往复运动的这个“某位置”有什么特点，从而帮助学生认识课本上指的平衡位置就是振动停止时物体所在的位置。这样引导学生通过观察，掌握机械振动这种运动形式的特点。同时也为后面引入产生振动的两个条件作了准备。

在引入回复力概念时，可先提出前面讲过振动是一种作用力大小、方向都变的运动。那末振动的物体所受的作用力有什么共同的特点呢？要求学生分别观察弹簧振子以及水中浮子的运动，思考物体为什么会作往复运动。在分析物体受力基础上得出振动物体离开平

衡位置后就受到一个指向平衡位置的力的作用，因此称这个力为回复力，而这个力可以是不同性质的力或者它们的合力。这样通过典型振动实例的受力分析来引入回复力的概念，有助于学生认识回复力同向心力一样，是根据力的效果命名的。

在引入振动的第二个条件时，可先提出为什么前面演示中的振动物体最终都要停下来？在学生回答有阻力存在后，可进一步提出如果阻力越来越大会怎样？接着便让学生观察摆在水中和油中的运动，由此说明阻力过大单摆根本无法实现往复运动，只有阻力足够小时，才能多次往复运动。

### (二) 表征振动的物理量

在引入振幅概念时，要让学生通过观察明确振子或摆在振动时，以平衡位置为原点，有一个最大位移。这个最大位移的绝对值叫做振幅，所以课本中说振幅是振动物体离开平衡位置最大的距离，而不说最大位移。

学生对周期这一概念并不陌生，首先应该指出振动最基本的特点是它的周期性，在此基础上，着重帮助学生理解全振动这一概念，教学中特别要交代清课本中的“位移和速度回到原来的数值”，所指的“数值”不仅表示它们的大小而且包括正负。为了使学生掌握振动物体的位移和速度这两个矢量经过一次往复运动均返回到原先值，就完成一次全振动，有必要让学生做一次观察练习。用一硬纸板做一红色箭头标志，将此标志先后放在振子或单摆的不同位移处，让学生反复观察、明确一次全振动的意义。这样，周期和频率这两个概念和其相互关系就不难掌握了。为了使学生明确周期和频率是两个表征振动快慢的物理量，还可让学生观察比较两个摆长相差较大的单摆的振动，要求学生用脉搏或秒表计时比较一下这两个摆的周期和频率，从而认识频率越大，周期越小，它们之间的关系是互为倒数。

教学中还要注意防止学生将“振动的快慢”和“振动物体运动的快慢”这两种表述混淆起来。因此要点明前者用周期或频率来描述，对一个确定的振动物体讲是恒定的，而后者用速度来描写，它是随时间而变的，由此使学生认识振幅、周期、频率都是从整体上描述振动特点的物理量。

### (三) 简谐振动的回复力

在第二节和第三节中应使学生对简谐振动回复力的特点、来源以及分析方法有一个逐步深入的理解。第二节通过弹簧振子的实例引入简谐振动回复力的表达式  $F = -kx$  后，应该指出式中回复力与位移的比例常数，是由振动系统本身结构决定的物理量，应该指出，如果物体除受回复力作用外，在振动方向上还受其它不平衡力的作用（如阻力），物体的振动就不是简谐振动了。

### (四) 简谐振动的运动规律

分析简谐振动的规律是教学中的难点，学生对加速度最大时速度为零，加速度最小时速度最大往往不易接受，错误地认为，在平衡位置处加速度最大，在位移最大处加速度最小，这主要在于学生仍没有真正理解加速度的物理意义以及速度和加速度之间的关系。在分析简谐振动的规律时，要帮助学生澄清以上错误。

为了培养学生的观察、分析能力，建议在分析振子运动规律时将课本练习二 3 作为课堂练习，让学生一边认真观察弹簧振子（最好选一个  $k$  较小、 $m$  较大的振子）的速度随位移变化的情况，一边将观察结果先填入表中第一项和第四项（回复力和速度随位移变化的规律）。其中振子速度换向时速度为零，可提醒学生回忆一下竖直上抛物体达到最高点时的速度等于什么，然后要求学生分别根据已填好的第一和第四项来判断第三项（加速度随位移变化规律）和第二项（加速度的方向和大小变化规律）应怎样填写，在以上观察、填表、分析的基础上，最后再让学生阅读课本 283 页对简谐振动的分析，作为小结。

关于  $k$  和  $m$  对振动周期的影响可以进行定性演示。演示时可将振子放在气垫导轨上，让学生用秒表测出多次振动的平均  $T$  值，通过比较用同一弹簧不同质量振子的  $T$  值和同一振子不同  $k$  值弹簧的  $T$  值，使学生具体认识周期  $T$  随的增大而减小，随  $m$  的增大而增大，为学生理解和接受周期公式做好准备。

还要指出， $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$  是一个适用于一切简谐振动系统的表达式，只是对不同的振动系统，因回复力的性质不同，式中  $k$  的形式也不同。对于固有周期与振幅无关，也要通过演示使学生信服。

### （五）单摆的周期公式

单摆周期公式可通过实验观察、设疑、释疑的方式引入，以培养学生探求和分析新问题的能力并加深对公式中  $k$  的物理意义的理解。为此，可以首先介绍一下伽利略发现教堂吊灯振动规律的故事，并用演示说明摆的振动周期  $T$  与振幅、摆锤质量无关，而仅与摆长  $\ell$  有关。这样，一方面能进一步加深学生对前面讲过的固有振动周期与振幅无关的认识，另一方面由于  $T$  与  $m$  无关的实验结论和上节学过的简谐振动周期公式中  $T \propto \sqrt{m}$  形式上的不一致，可以提出一引导学生进一步探索的新问题。然后指出解决这一表面上“矛盾”的关键，是找出单摆振动系统的  $k$  取决于什么因素。接着通过对单摆回复力的分析，得出单摆的  $k = mg/\ell$ ，推导出单摆周期公式  $T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$ ，解决了前面提出的“矛盾”，并说明理论上的分析推导与演示实验得出的结论是一致的。

### （六）相和相差

“相”对学生来说是一个抽象和陌生的新概念，教学时主要应通过演示实验引导学生观察振动的步调是否一致来认识相和相差的物理意义，而不必引入相的定义。可先让学生观察两个相同的单摆作振幅相同但步调不一致的振动。要求学生指出这两个单摆的振动有什么相同和不同的地方。从分析这两个摆振动的不同之处，重点启发学生认识振动步调是否一致就是指是否能保持“同时、同向”（同时向一个方向运动）。在此基础上指出为了能对这两个摆的振动情况分别加以描述，就必须引入一个表示振动步调的物理量——相。接着可分别演示频率相同的摆同相和反相的振动。演示反相时可先将两单摆从平衡位置左右两侧同时放手，然后再让学生考虑一下如果两个单摆从同一侧放手，怎样实现反相，并试着做一下。

### (七) 简谐振动图象

做好绘制振动图象的演示，使学生理解振动图象的物理意义，是本节教学的关键。为了增加演示的可见度，便于边演示边分析，建议对课本图 9.6 的实验作适当改进，用投影仪来演示。

将振动曲线视为振动质点的运动轨迹，认为振动物体的速度方向沿着曲线的切线方向是学生中常见的错误。为了帮助他们理解振动图线的物理意义，关键是使学生搞清沿着拉动玻璃板方向的横轴所表示的是时间而不表示振动物体的位移。演示时，可先使摆振动但不拉动下面的玻璃板，让砂或笔头在它上面来回划出一条直线。说明振动物体仅仅只在平衡位置两侧来回运动，但由于各个不同时刻的位移在玻璃板上留下的痕迹相互重叠而呈现为一条直线。在此可让学生思考一下如何将不同时刻的位移分别显示出来，接着匀速拉动玻璃板，结果原先成一条直线的痕迹展开成一条曲线，这样便清楚显示了不同时刻振动物体的位移，从而说明横轴表示的是时间。教师还可指出匀速拉动（或转动）记录纸来记录参量随时间变化的技术，被广泛应用于各种仪器中，例如脑电图、心电图、温度、压力、地震波记录仪所记录的曲线的横坐标都表示时间，条件允许还可让学生看一下这些仪器的实物和记录下的曲线图。

### (八) 简谐振动的能量

在从能量角度对简谐振动进行描述前，可要求学生复习一下机械能守恒定律及其守恒条件，接着可让学生阅读课文和观察摆或振子的振动。将练习五作为课堂练习，让学生当场巩固、并加深对振动过程中能量转化规律的理解。

教学中应该说明振动系统的总能量取决于外界提供给振动系统的能量大小，而与振动系统本身的结构无关。还应该指出，只有与外界没有能量交换的系统作简谐振动时机械能守恒，才遵循上述能量转化规律，与外界有能量交换的系统，情况则不一定如此。

### (九) 受迫振动和共振

在受迫振动演示实验中，要指出只有当受迫振动达到稳定状态后，其频率才等于策动力的频率。此时策动力对振动系统做功所传递给系统的能量恰好补偿系统因阻力而损耗的能量，系统的机械能保持不变，成为等幅振动。

共振的演示实验，除了可用课本图 9.12 和图 9.13 两个装置来演示外，还可增加几个简单的演示，结合练习六 2 布置几个课外实验习作，以扩展学生对共振现象的认识。课本上关于对共振产生原因的定性解释，也可用单摆代替“秋千”，分别施加跟单摆振动“合拍”和“不合拍”的推力，让学生观察振幅的变化，启发学生从能量的角度，根据策动力做正功和负功去认识共振的成因。

至此本单元已介绍了简谐振动、阻尼振动、自由振动、受迫振动的概念，学生往往搞不清它们的区别和关系，教师可作一简单的归纳。

## 二、第二单元

### (一) 机械波的基本特征

在引入媒质概念时，可让学生观察下面的演示：在钟罩中置一发声的电铃，将罩中空气抽空便无法听到铃声，接着将钟罩中的电铃换成一个大功率的灯泡，抽空罩中空气接通电源，在罩外仍可看到灯泡发光和感到灯泡发出的热量，由此模拟太阳光波把光和热送到地球上是不需要任何媒质的，通过以上演示的比较，再举水波和地震波的例子说明机械波的基本特征是必须依靠某种媒质来传播。

### (二) 机械波为什么会在媒质中传播

可首先用发波水槽演示一下槽中水面上的浮子不随水波向前运动，使学生对机械波是振动的传播而不是媒质的迁移获得初步的感性认识。接着提出振动为什么不会局限在媒质内一个地方的问题让学生思考，再慢慢转动波动演示器的手柄，让学生观察沿着波的传播方向相邻质点依次振动的过程，并从媒质各部分之间存在相互作用力来分析机械波的成因。

### (三) 机械波是怎样在媒质中传播的

左右甩动放在光滑地面上的长弹簧和推动水平悬挂的长弹簧，让学生从整体上初步观察一下弹簧中凹凸相间波和疏密相间波的传播，并提出这两种波怎么形成的问题加以研究。然后在弹簧上的某处作出醒目的记号，重复以上演示，要求学生注意观察在波的传播过程中该处质点作什么运动，看它是否一直向前迁移。接着在弹簧上不同处分别做不同颜色的记号，要求学生从整体上仔细观察这几处质点振动时步调是否一致，频率是否相同。然后再用波动演示器或活动投影幻灯片模拟波的传播，放慢披的传播速度，再现课本上图9.15和图9.16的动态过程，让学生进一步证实他们在实际观察中得到的初步结论，通过以上步步深入的观察，引导学生认识弹簧上每个质点只在它自己的平衡位置附近振动，不同质点的振动频率相同，但相位不同，它们在传播方向上依次落后，就形成了在整体上所观察到的凹凸相间和疏密相间的波。

在以上分析的基础上，最后可引导学生归纳一下振动和波的区别与联系。明确它们的研究对象不同，振动是波的起因，波是振动在媒质中的传播，并由此得出形成机械波的两个条件——波源和媒质。

### (四) 机械波也是能量在媒质中的传播

在阐明机械波的传播实质上就是能量在媒质中传播时可先提出以下问题让学生思考：波源质点的振动是否可能是一种无阻尼的自由振动？通过对这一问题的讨论、分析，帮助学生认识媒质质点间的相互作用力对波源讲是阻力，对波传播方向上的质点讲它既是动力又是阻力，因此只有不断供给波源能量，它的振动才能保持下去，并不断地向外输出能量。而沿着振动传播方向的媒质质元则起了能量传递者的作用，它不断从前面的质元获取能量，又把这能量传给后面的质元，（它的能量是随时间作周期性变化的，这与前面第六节中介绍的孤立质元作无阻尼振动时机械能守恒的情况不同。）于是波在传递振动形式的

同时，也将波源的能量传递开去。

### (五) 波长、波速与频率的关系

掌握波长的定义的关键，是让学生弄清在波的传播方向上哪两个点是相邻的同相质点。可以结合课本上图 9.15 和用手摇波动器做演示让学生找一下哪些点是相邻的同相质点。引入波长定义后，还可要求学生进一步集中注意力观察一下某时刻波动演示器上横波相邻波峰（或波谷）上的两个质点或者纵波相邻密部（或疏部）中央的两个质点在振动过程中是否同相，并可将练习七 4 作为课堂练习，让学生当场巩固对波长定义的理解。

掌握波长、波速和频率关系的关键是要把波长等于一个周期内振动在媒质中传播的距离交代清楚。为此除了用图 9.15 进行分析外，仍可在波动演示器上边演示边说明以达到加深学生印象的效果。此外还可将波长、周期、波速与步行时的步长，走一步的时间和步行的速度类比（将频率理解为单位时间内走几步），以帮助学生理解和掌握这个公式。

### (六) 横波图象和纵波图象

应使学生明确，无论是横波还是纵波图象，都是表示某一时刻媒质各质点离开平衡位置位移的函数图象。横波图象直观地表示了波的形状，犹如在某时刻给波传播方向上全体质元拍的一张“照片”，故称横波图象为波形曲线。学生较难理解的是纵波图象，因为它不太直观。教学时，可将练习八 3 作为课堂练习，此外还可补充一个问题：纵波密部中央质点和疏部中央质点的位移有何特征？是否与横波中的波峰和波谷相对应。

### (七) 波的图象与振动图象

比较波动和振动图象的教学，可在引入简谐波的概念基础上，引导学生分析讨论以下问题：这两种图象描述的对象是否相同？纵、横坐标的意义是否相同？相邻两个位移最大值之间距离所表示的意义是否相同？判断质点在某时刻运动趋势的方法是否相同？由此将它们在物理意义上的本质区别作一简要归纳。

### (八) 波的独立传播和叠加

课本图 9.21 的演示可用长弹簧（或灌满铅粒的细橡皮管）代替绳子，将它们放在光滑地面上同时甩动一下两端，要求学生观察两个脉冲波在相遇时振幅怎样变化，相遇后是否会消失或改变方向和形状，为了使学生对波的这一基本性质获得更为具体生动的认识，可在波纹槽或盛水面盆中用两个手指同时轻点水面，就能看到两列水波互相穿过，这说明了水波的独立传播。在以上演示基础上再用运动和位移的合成分解来解释波的叠加现象，学生便较易接受和理解了。

### (九) 波的干涉

波的干涉的教学可采用两种方式处理，第一种方式可按课本的顺序，在前面介绍波的独立传播和叠加原理的基础上，先从理论上分析两列频率和相都相同、振动方向一致的水波叠加后会出现什么现象，然后再用演示实验验证预期的现象，并得出结论。在演示水波的干涉图样时，用音叉作为两个相干波源，也可取得较好效果。敲击音叉，将它的两臂接触水面，用投影仪或直接利用阳光的反射都可将水面上的干涉图样清晰地显示在屏幕或墙

壁上。第二种方式可先用波纹槽演示两列频率和相都相同的水波叠加后产生的干涉现象，以激起学生探索兴趣，然后再根据波的传播和叠加原理从理论上分析形成所观察到的现象的原因。

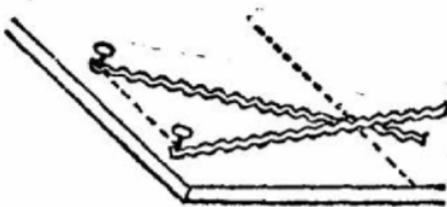


图 9.1

在用波的叠加原理分析干涉现象时，最好先让学生用两条截下的瓦楞纸表示两列横波，如图 9.1 所示，用两个大头针将它们的端部分别固定在木板上两点表示两个波源，使两条瓦楞纸在波源前方交叉，交叉点沿着平行于连接两个波源的一条直线移动。分别用两种不同记号表示交叉处波峰与波峰（或波谷与波谷）以及波峰与波谷的叠加。这样，可使学生形象地认识两列同频率的波迭加所产生的振动加强和削弱互相间隔的效果，还可启发学生通过仔细的观察思考一下，在振动最强处和最弱处质点所参与的两个振动的相位关系。讲述时还可用两张印有许多同心圆的投影片的重叠所产生的视觉形象来清晰显示课本图 9.22 所示的两个相干波源产生的干涉条纹。

#### (十) 产生波的干涉以及衍射的条件

首先要求学生明确产生干涉现象的两列波的振动方向必须一致，关于相干波源的条件的教学，可用演示实验来说明，两个波源的频率必须相同。关于要求两个波源相差恒定这一点只需从演示干涉现象时两个波源保持同相这一特殊情况推广即可，不必再引伸解释。如果时间允许还可用上面介绍的瓦楞纸教具结合章末习题 9 做一下，两个波源频率相同但振动反相是否也会出现干涉现象的演示（用两枚大头针分别将一条瓦楞纸端部的波峰和另一条端部的波谷固定在木板上两点，代表两个反相的波源）。

有关波的衍射条件，只需用发波水槽通过演示课本图 9.24 的情况给出，而不必作理论上的分析解释。应该向学生指出课本上讲的障碍物或孔的大小尺寸与波长差不多是指产生明显衍射现象的起码条件，若障碍物或孔的尺寸远小于波长，无疑是不可以产生衍射的，这一点可以通过演示水波通过的孔缩小至比波长还小时衍射现象越来越明显来说明。

在指出波的干涉、衍射是一切波所特有的现象时可举无线电波衍射的例子和让学生观察光通过指缝时的衍射现象，从而使学生获得初步的感性认识。有条件的学校还可用厘米波发生接收器来演示无线电波通过双缝时的干涉和通过单缝时的衍射现象。

### 三、第三单元

#### (一) 声源发声时的振动

在介绍声源是振动物体时，要做好几个不同的演示，除了课本图 9.25 的实验外，还可以选用以下几个演示实验。

1. 用敲响的音叉接触蒸发皿中的水面，可看到水向外飞溅。
2. 在鼓面或向上放置的喇叭纸盒上撒一些碎的硬质泡沫塑料屑，敲响鼓面和使喇叭发声，可看到碎屑的跳动。
3. 弹拨绷紧的橡皮筋或弦可看到橡皮筋和弦的轮廓变模糊，发音时用手摸咽喉可感到声带的振动。

### (二) 声波

说明声波是声源的振动在媒质中的传递时，可在一发出低频信号声的喇叭纸盆前置一烛焰，观察烛焰随着信号声而抖动的现象，从而形象地显示出图 9.26 所示的声波是纵波。教学中还可选用以下几个随堂小实验来显示声波也可在固体、液体中传播以及在不同的媒质中传播的速率不同。

1. 将耳朵贴在桌面上，在离耳朵不同距离处用指甲轻敲桌子。
2. 如图 9.2 所示，将匙子系在绳子的中间，把绳子的两端分别用两具手的拇指按在两个耳孔上，敲响匙子，接着松开按住耳朵的手指，比较前后听到的两种声音有何不同。

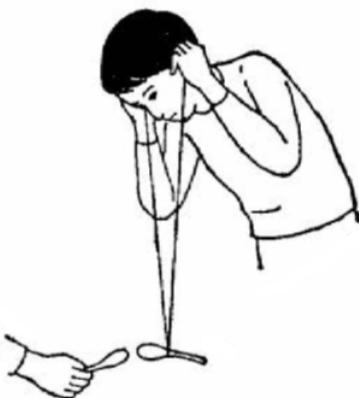


图 9.2

3. 把耳朵紧贴在一个盛满水的塑料袋上，能听到贴在水袋另一边表的滴嗒声。把塑料水袋取走，比较前后两次听到的声音有何不同？
4. 将一敲响的音叉放在鱼缸水面的上方，观察缸内鱼的反应。

### (三) 声音的现象

讲声波的反射时，要注意讲清人耳能分清回声的间隔时间与建筑物内交混回响时间的区别，免得学生把两者混淆起来。

讲解声波的干涉和共鸣现象时，可把音叉发给学生，让他们自己做课本图 9.29 的实验，此外还可将面对学生的两个扬声器（相距约 1 米）接到同一音频信号发生器上，让学生在座位上左右晃动身体，便可听到有的地方声音增强，有的地方声音减弱。在做声音共鸣实验时可用扩音机把共鸣声放大，使全班同学都能听到。

#### (四) 乐音和乐音的波形曲线

学生往往容易把一些声学名词和概念混淆起来，因此教学中应尽可能使学生通过自身的听觉和观察来认识和描述人耳对乐音感觉的三个特征以及它们取决于什么因素。

在介绍课本图 9.30 乐音的周期性波形曲线时，应说明是由单一乐器（钢琴）所发出的，并非表示许多乐器或同一乐器演奏一首乐曲时的波形曲线。此外可以点明这里的波形曲线实质上也是波源或媒质质点的振动曲线，它的横轴是时间轴，纵轴是位移轴。后面课本图 9.33(乙) 和图 9.34(乙) 所表示的波形曲线也是如此。有条件的话，最好用示波器演示乐音和噪声的波形曲线。

#### (五) 音调和响度

课本图 9.32 的演示实验可见度大，效果较明显，但发声较轻，可用扩音机放大声音。在说明声源振幅对响度的影响时，应设法增加声源振幅大小的可见度，例如可轻拨和重拨拉紧的弦或一端夹紧的锯条，使学生看到声音强弱不同时振幅不同。用课本介绍的音叉或鼓做实验时，可将敲响的音叉接触通草球或碟子中的水面，在鼓面上撒一些爆米花来间接显示振幅大小。

在引入声强概念时应使学生明确响度是人们主观上感觉到的声音强弱，它跟客观上的声强有密切关系。但是，人耳能听到的最低声强随频率而异。所以，不同频率的声音，即使声强相同，响度也是不一致的。

#### (六) 音品

学生对音品这一概念较难理解，而且容易将它与音调混淆起来，为此在引入音品这一概念时可播放一段事先准备好的用不同乐器（如钢琴、小提琴、笛子等）以同一音调演奏的同一乐曲的录音，让学生辨别这样能使学生对人耳之所以能辨别出不同乐器的声音，是由于音品不同，留下一个鲜明生动的印象。为了使学生了解音品取决于什么因素，关键是要讲清基音和泛音这两个概念。讲解时最好用示波器来显示音叉发出的声波是简谐波，而其他乐器发出的声波是类似图 9.33、9.34 所示的周期性波。不同乐器发出声音的音调相同即是指其基音频率相同，而人耳之所以能分辨出不同乐器发出的声音，是因为它们发出的泛音的多少、频率、振幅不同所致。

#### (七) 噪声的危害和控制、超声波

这两节课可以学生阅读讨论为主，提高他们的阅读和表达能力。例如让学生列出一张生活中环境中各种噪声源的表，考虑一下有什么控制的方法，采用讨论的方式，互相交流、补充。此外还可组织看有关超声波和噪声的教学电影并选择一些杂志上有关的科普文章推荐给学生看，以开拓他们的知识面。对有兴趣的同学还可组织他们对周围环境中的噪声（噪声的强弱及噪声源）作些调查，对噪声治理提出一些建议和办法。

### 第三节 实验指导

#### 一、演示实验

##### (一) 机械振动

(1) 课本图 9.1 的实验可用倔强系数较小的弹簧来做，重物的质量可以稍大些，这样可使振动较慢。如果没有  $k$  值较小的弹簧，也可以把弹簧取得长一些，这样就相当于  $k$  值变小。在演示时可在铁架台上用标记指示重物的平衡位置，以便于观察重物以这一位置为中心上下往复运动。

(2) 也可以用图 9.3 的装置来演示机械振动，在一乒乓球的两侧，分别用橡皮胶粘贴一段细橡皮绳（航模材料），将两端的橡皮绳固定在两个铁架台上，调节两个铁架台间的距离，使得两段橡皮绳都被绷紧，将乒乓球向上（或向下）拉开一段距离，释放后，乒乓球就以平衡位置  $O$  点为中心做上下往复运动，如果把两个铁架台前后放置，也可以观察乒乓球以平衡位置为中心的左右往复运动。

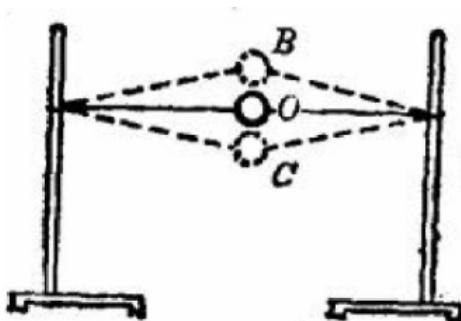


图 9.3

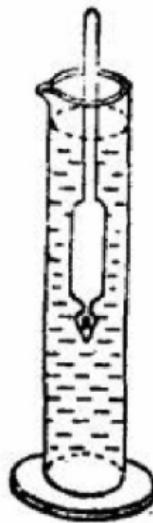


图 9.4

(3) 如图 9.4 所示，在大量筒（800—1000 毫升）里盛满酒精（粘滞系数比水小），将一密度计（比重计——轻表）浮在酒精中，注意不要让密度计与筒壁相接触。当它静止后，把它向下压（或向上提起）一小段距离，释放后，可观察到密度计在酒精中以原来的平衡位置为中心上下振动。

##### (二) 产生振动的条件

(1) 当物体离开平衡位置后必须受到回复力的作用。如图 9.5 所示，弹簧  $A$  和由普通铁丝绕成的形状和  $A$  相仿的“弹簧”  $B$ ，在它们的下方各挂一个 50 克的钩码。并使两个钩码都在同一高度，这一位置就是两个钩码的平衡位置。将弹簧  $A$  下的钩码再往下拉一小段距离，释放后，可观察到钩码做上下振动；而将“弹簧”  $B$  下的钩码也往下拉一小段相同距离，释放后钩码根本不运动。以此来说明物体离开平衡位置后必须受到回复力的

作用，才能产生振动。

(2) 将一单摆放在空气中观察其振动，然后再把一盛有粘性很大的油（如 10 号或 15 号机油）的玻璃缸放在桌上，缸内油面的深度要能使摆球经过平衡位置时全部被浸没（图 9.6）。将摆球拉出油面，释放后，摆球只能比较缓慢地运动到平衡位置附近，而不能继续做往复运动。这说明产生振动的第二个必要条件是：阻力要足够小。

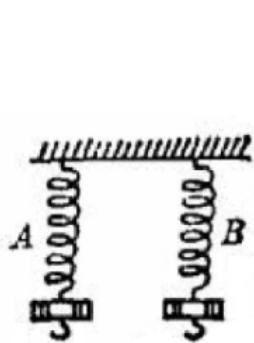


图 9.5

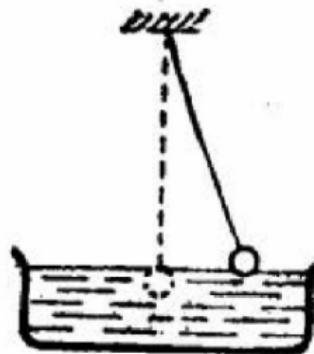


图 9.6

(3) 将一钢球放在离心轨道（可用两条粗铁丝自制，如图 9.7 所示）的底部  $O$  点，指出这是钢球的平衡位置，然后将钢球移到位置  $B$ ，释放后，可观察到钢球将以  $O$  点为中心沿着圆弧做往复运动。这说明钢球离开平衡位置后，受到重力和弹力的作用（阻力可以不计），这两个力的合力，是使钢球回到平衡位置的回复力。



图 9.7

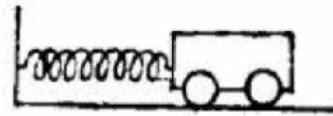


图 9.8

### (三) 简谐振动

(1) 可利用气垫导轨，在滑块上固定一根倔强系数较小的细弹簧（弹簧的直径约 1.5—2.0 厘米），弹簧的另一端固定在气垫导轨的一侧，按课本图 9.2 进行演示和分析。演示时可在导轨旁放一大的刻度板，用来指示滑块原来的平衡位置，并可观察滑块在平衡位置两侧的位移变化。

(2) 也可利用图 9.8 所示的装置。在小车的一端固定一根值较小的弹簧，小车下面垫放一块玻璃板，放在水平桌面上进行演示。

(3) 利用课本图 9.1 的演示，说明挂在弹簧下端的重物的振动是简谐振动时，应指出如重物在平衡位置弹簧的形变为  $x_0$ ，则弹簧的弹力  $kx_0$  和重力  $mg$  相平衡的位置即是振动中的平衡位置（图 9.9 甲）。当重物向下距平衡位置的距离为  $x$  ( $x < x_0$ ) 时，它受的合力  $F = k(x_0 + x) - mg = kx$ ，方向向上（指向平衡位置），如图 9.9 乙所示。在重物向上

运动的过程中，这一合力将逐渐变小，当经过平衡位置时，合力  $F = 0$ 。而当重物继续向上运动离开平衡位置的距离为  $x$  时，重物所受合力  $F = mg - k(x_0 - x) = kx$ ，方向向下（指向平衡位置，图 9.9 丙），这一合力将随着上升距离  $x$  的增大而增大，因此从整个振动过程来分析，重物所受的合力跟它离开平衡位置的位移  $x$  成正比，而方向始终跟位移相反，所以挂在弹簧下端的重物在竖直方向上的振动是简谐振动。

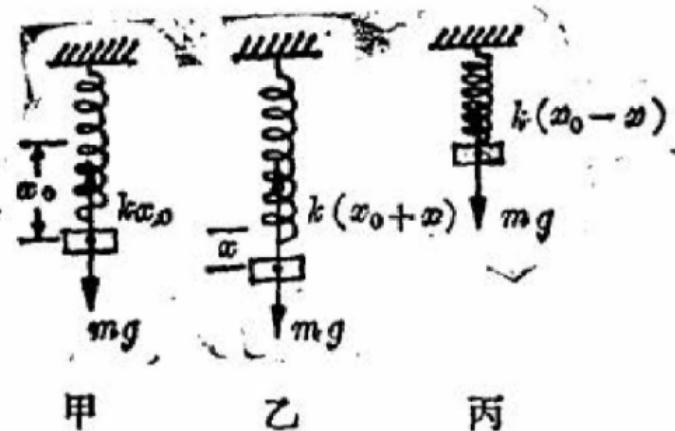


图 9.9

#### (四) 简谐振动的周期和频率

做课本图 9.1 的实验时，如果把重物的质量减小为原来的  $1/4$ ，振动周期约减小一半，也就是频率约增加一倍。重物质量不变的情况下，还可以改用  $k$  值较大或较小（可采用不同长度的同种弹簧，弹簧原长增加一倍，相当于  $k$  值减小一半，弹簧原长减少一半，相当于  $k$  值增加一倍）的弹簧，重新测定振动周期，以获得弹簧振子的周期跟它的质量和弹簧  $k$  值大小有关的认识。

#### (五) 简谐振动的图象

(1) 在做课本图 9.6 的演示实验时，要使用烘干的并用细端筛过的砂粒（若用金刚砂则效果更好），平板可以用玻璃板（或透明的有机玻璃板），整个装置放在投影仪上进行演示，让学生看到振动图象的描绘过程。为了使摆锤的摆动稳定，可以采用双线摆的结构（图 9.10）。

(2) 或可将一毛笔头缚在锯条的一端，锯条的另一端用夹具夹住（图 9.11），把毛笔尖蘸上少许墨水，将锯条拨动使之发生振动，同时将与笔尖刚接触的纸片，沿着垂直于笔尖的振动方向匀速拉动，在纸片上就描绘出笔尖做简谐振动的图象。

(3) 也可以像图 9.12 那样，在两根轻质弹簧之间拴一具有较大质量的金属螺母，在螺母上固定一个蘸有墨水的毛笔头，将两根弹簧的另一端  $A$  和  $B$  固定起来，使两根弹簧适当绷紧，弹簧基本上在水平方向，将金属螺母向右（或向左）拉过一小段距离，释放后带动笔尖在水平方向做简谐振动。调节两根弹簧固定端  $A$ 、 $B$  的高度，使得笔尖刚能和放在下面的一张纸片接触，将纸片沿着垂直于笔尖的振动方向匀速拉动，在纸片上就描绘出笔尖做简谐振动的图象。

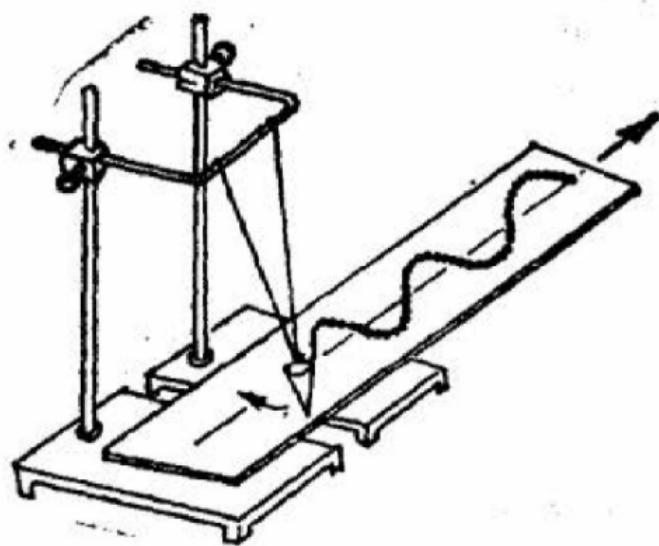


图 9.10

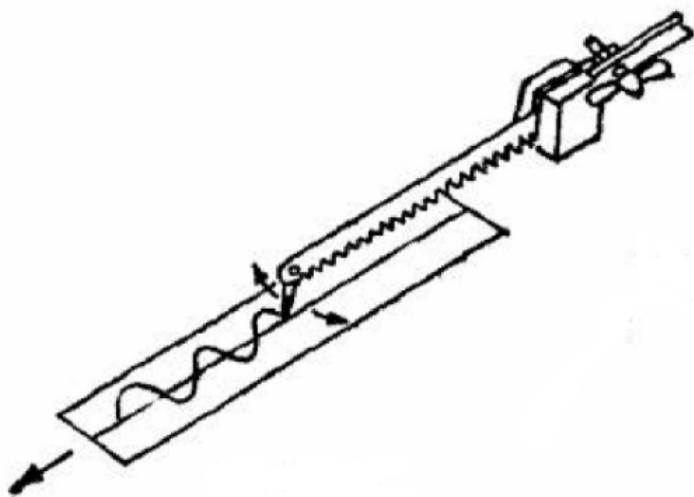


图 9.11

(4) 在上述(2)、(3)两个演示实验中，如果适当降低锯条和弹簧的高度，使得笔尖和纸片间的压力增大，从而增大了振动时的摩擦力，则可描绘出明显的阻尼振动的图象。

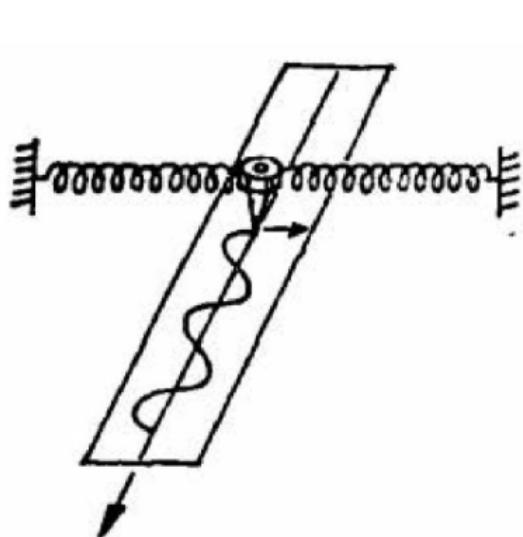


图 9.12

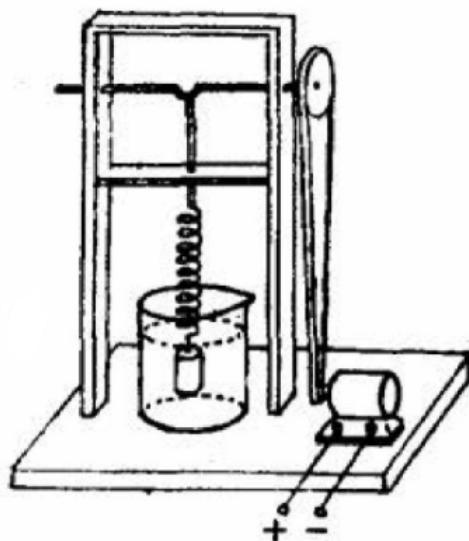


图 9.13

### (六) 受迫振动和共振

(1) 课本所示的受迫振动实验，可以在振子下方放一个盛着水的烧杯(图 9.13)，适当调节烧杯的高度，使得振子在水中振动，以增大阻尼，使它的固有振动尽快得到衰减，呈现受迫振动，但要控制摇手柄的转速，使策动力的频率不要远大于振子的固有频率，因为由于水的阻力，振子会来不及振动，如果摇手柄的转速较小，策动力的频率小于振子的固有频率，演示效果较好。为了使转速均匀，可以把手柄拆下，在曲轴上安装一个直径约为 10—12 厘米的皮带轮(可用厚有机玻璃片车制)，利用玩具电动机(2—6 伏)通过皮带传动装置来带动曲轴转动(图 9.13)，而且通过调节串联在电动机电路中的滑动变阻器，可以方便地改变电动机转速(相当于改变策动力的频率)。

(2) 摆的共振：用课本图 9.13 的装置观察摆的共振时，*A* 摆的摆球质量要大些，以贮存较多的能量，在张紧的绳上不一定要同时放上七个单摆，例如除 *A* 外保留 *B*、*D*、*E* 三个摆，能观察到跟 *A* 摆摆长相等的 *B* 摆振动的振幅最大也就足以说明问题了。

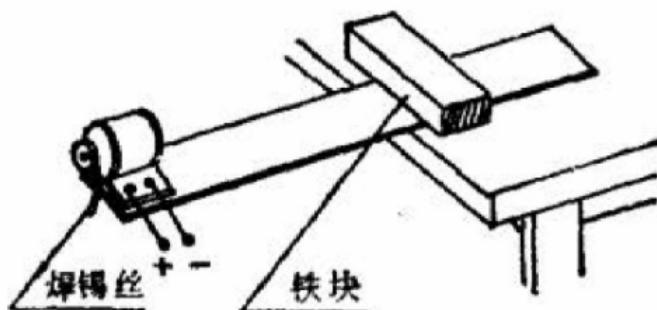


图 9.14

(3) 如图 9.14 所示, 将一长木片(航模材料,  $50 \times 1 \times 300\text{mm}^3$ )用铁块压在桌子边, 长木片露出桌边的长度约为 12—14 厘米。木片的端部用螺丝固定一个玩具电动机(2—6 伏), 在机轴上缠绕一段焊锡丝并留出一段(约 2 厘米)不绕上去。这样, 玩具电机运转时就对长木片产生一个周期性的策动力。在电动机电路中串联一个滑动变阻器, 当变阻器的阻值较小时, 电动机转速较大, 形成的策动力频率也较大, 露出桌边部分的木片就按相同频率做受迫振动, 可观察到这时木片的振幅较小, 调节变阻器, 使电阻逐渐增大, 电动机转速逐渐变小, 当形成的策动力频率等于露出桌边部分木片的固有频率时, 便可观察到木片做受迫振动的振幅达到最大——即产生共振的现象。

### (七) 横波的形成和传播

(1) 课本图 9.15 的演示, 如果把绳子放在地上做, 由于地面支持力抵消了重力作用, 效果较好。但最好选择象磨光水泥地那种摩擦较小的地面来做。

如果用弹簧来代替绳子, 则效果更好。可采用直径为 12—15 毫米左右钢丝直径约为 0.30—0.35 毫米的密绕弹簧。如果买来的弹簧比较短, 则可以用几段接到一起使总长度约为 4—5 米。联接的方法: 可以用铜丝把两段弹簧一端的一圈钢丝绞合在一起。

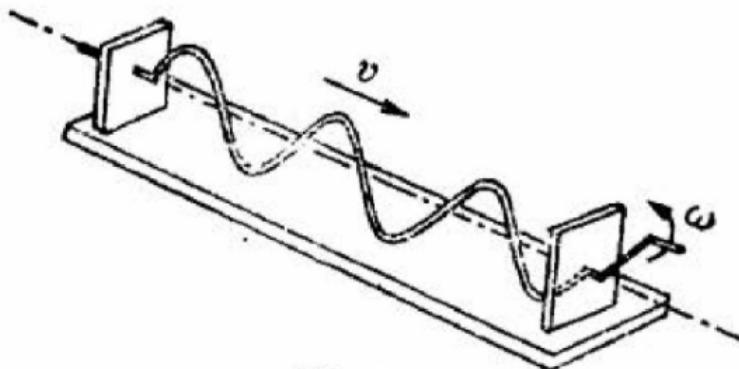


图 9.15

(2) 如图 9.15 所示的简单装置, 可用来演示横波的形成。一根拉长到发生均匀范性形变的弹簧, 根据需要可截取数圈装置在有机玻璃支架上。当缓慢转动弹簧时, 通过投影仪, 在屏幕上可形象地观察横波的传播过程, 改变弹簧的转向, 波的传播方向也随之改变。

这类装置制作简便, 但要注意每圈弹簧间的间隔应相等, 并且转动轴在弹簧的轴线上, 为了观察横波中质点的振动方向, 可在弹簧的任一圈上滴上一滴熔融的火漆成一小球。当转动弹簧时, 可观察到凹、凸相间的横波波形向前推进的同时, 质点以平衡位置为中心作振动(图 9.16)。

为比较同相点或反相点的振动, 可在弹簧的相应位置上滴制二个或四个火漆小球(图 9.17)。

为了不同的观察目的, 这类装置可以制作一批, 例如弹簧的不同圈距可以表示不同波长, 弹簧的不同直径则可表示不同的波幅。

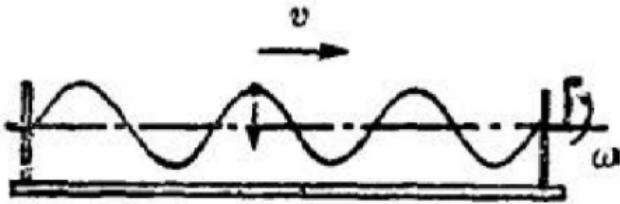


图 9.16

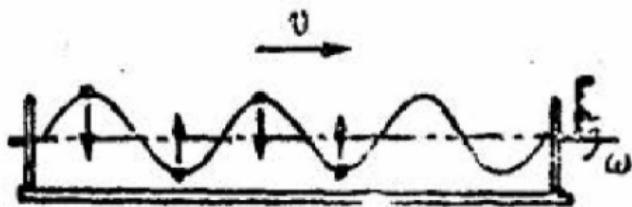


图 9.17

### (八) 波长、频率和波速的关系

(1) 可利用发波水槽和投影仪进行演示。如图 9.18 所示。在玩具电动机的机轴上用焊锡丝缠绕成一个偏心装置，将玩具电动机固定在具有弹性的金属片的一端，金属片固定在发波水槽的边上，它的伸出部分的长度可以调节，在金属片的伸出端下方装一个用来跟水面接触的平板型振子（图 9.19）。振子可用 1.5—2 毫米厚的木板制成，用螺丝固定时要注意调节安装位置，使得电动机转动时它只做上下振动而没有横向摆动（还可以通过改变金属片的伸长部分的长度来调节）。这样，通过投影就可以在屏幕上观察到平板型振子所产生的平面波。从波纹明暗相间的间隔宽度可以大致看出波长。改变电动机电路中串联的滑动变阻器的阻值，使电动机转速变快，相当于使波源的频率变大，这时可以观察到，波纹间的间隔变窄，即波长变小；使变阻器电阻增大，电动机转速变慢，波源频率变小，则波纹间距变宽，即波长变大。这就定性地说明了在波速一定时（机械波的波速是由媒质性质所决定的），波长跟频率成反比关系。

(2) 用圆盘频闪观察器观察当频率一定时，波长随波速的增大而增大。

如图 9.20 所示，在发波水槽的一边装一个框架，把带有偏心装置的玩具电动机安装在一块木条上，木条用两根橡皮筋（或弹簧）吊在框架上，使木条下部稍许浸入水中，当电动机转动时，使木条振子发生上下振动，在水面上形成一系列平面水波。在水槽的另一边叠放几块矩形玻璃板，调节玻璃板的厚度，使水层变得很浅。这样，当平面波进入到这一薄层的区域时，相当于传播振动的媒质性质发生了改变，于是波速有了改变（变小），由于波源的频率不变，因此波长也有了相应改变（变短）。上述现象可以投影在屏幕上直接观察（为了消除槽边反射波的影响，可在水槽四周垫放一些塑料回丝）。

屏幕上的波纹可以利用手动式圆盘频闪观察器来进行观察。频闪观察器可以自制，在一块直径约 25 厘米的圆盘状硬纸板或薄木板上开 6 条或 12 条等距对称、成辐射状的条形观察孔，如图 9.21 所示，在圆盘中心开孔，用螺栓做轴，使圆盘能绕轴转动，在轴上用螺母固定一个手柄，并在盘上靠近中心处开一个直径约 1.5—1.8 厘米的指孔，用来拨动圆

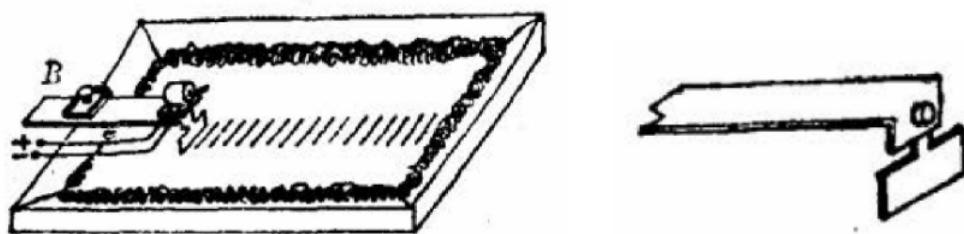


图 9.18

图 9.19

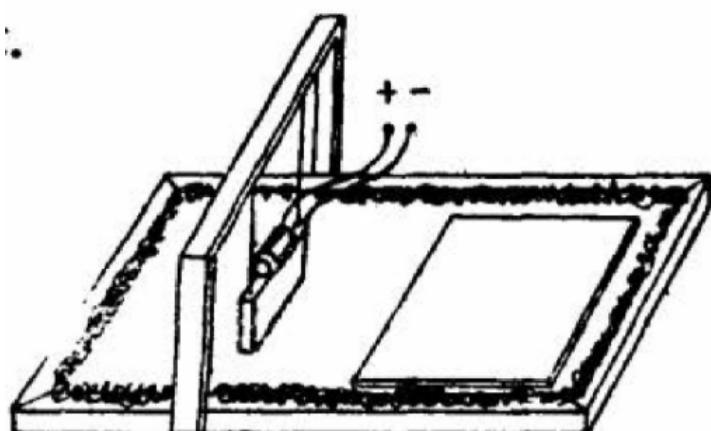


图 9.20

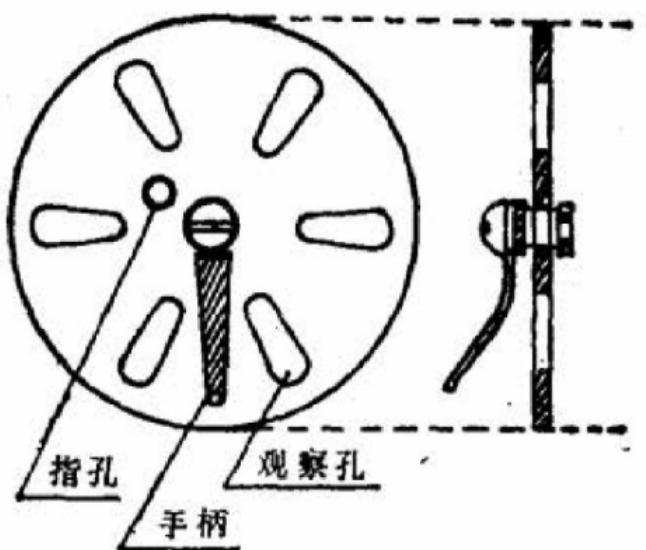


图 9.21

盘，这便制成了圆盘频闪观察器。使用时一手持柄，另一手用食指插入指孔转动圆盘，眼睛通过盘上的辐射状观察孔注视屏幕上的波纹，逐渐增大圆盘转速，当圆盘上的观察孔经过眼前的频率与水波频率同步时，所观察到的波纹就会“固定”下兼静止不动（否则波纹不是前进便是后退）。这时可看到玻璃板上方的波纹和前面部分的波纹同时被“固定”住。但这两个区域内相邻两条波纹的间距大小是不相等的，即波长不同。这就直观地显示了波进入不同媒质时频率不变，波速和波长发生了变化的情况。

### （九）波的叠加

(1) 课本图 9.21 所示的在绳子上两个相遇的波互相穿过的实验效果不是很明显。可以改用前述的 4—5 米长的弹簧进行演示。演示时让学生围在四周观察，请一位学生当助手。教师与学生各拿着弹簧的一端，把弹簧平放在地板上先让学生把弹簧的 A 端按在地上，教师把弹簧的 B 端迅速向上抖动一下，这时可观察到一个凸起的（振动平面垂直于地面）半波，从 B 向 A 传播。分别从弹簧的 A、B 端发出一个波，可观察到这两列波相遇，互相穿过后，仍然各自保持原有的状态继续向前传播的现象，这个实验也可以贴着地面抖动弹簧，使波动在水平方向上发生。

(2) 利用发波水槽也可以观察两列水波互相穿过的现象。演示时可用两支口径粗细不同的滴管，在水槽中同时滴下两颗水滴，大水滴激起的水面波的能量较大，从屏幕上看，圆面的波纹较粗，小水滴激起的水而波的波纹较细。可以看到粗、细两个圆形波互相穿过后，仍保持各自原有的粗细程度向前传播。

(3) 还可利用课本图 9.16 的装置，在细长弹簧的左端推动摆球振动一次，发出一个波的同时，在右端用手掌推动一下弹簧形成一个频率较小的波，可以观察到这两列纵波相互穿过的现象。

### （十）水波的干涉

利用图 9.18 的发波水槽和投影装置，可以观察课本图 9.23 的水面波的干涉图样，演示时可以在弹性金属片下安装两个相隔一定距离的金属小球（直径约 4—5 毫米），作为两个频率和相都相同的波源（相干波源）。观察时要调节聚光镜的位置，使水面的像最为清晰。

发生干涉时只要求两个波源频率相同、相差恒定，两个波源的振幅不一定要相等，这一点可以通过演示证明。把安装双球振子的固定片稍稍倾斜，使一个球接触水面的深度深些，另一个浅些，这样，发出的两列波的振幅就不相等，但还是能看到稳定的干涉图样。

### （十一）声波的干涉

将正在发声的音叉放在耳旁徐徐转动，就能辨别出声音忽强忽弱的现象。也可以将正在发声的音叉放在一个话筒前转动，把信号放大后接在扬声器上，可以听出声音忽强忽弱。还可以把示波器并联在扬声器两端进行观察，可以看到随着音叉的转动，所形成的声波波幅的变化。

以上几个现象都说明了声波的干涉。但对如何形成声波干涉的具体过程，建议不必行分析，因为这是比较复杂的，不象发波水槽中水面波产生干涉那样的单纯。

### (十二) 声音的共鸣

(1) 利用课本所述的共振音叉演示声音的共鸣时，要使两个共鸣箱的开口端互相对着，比较靠近些，并且使两个音叉的振动方向在同一平面上。当用橡皮锤敲击一个音叉时，要稍待一会儿，使得通过空气的振动把能量较多地传给另一个音叉，然后用手按住被敲出的音叉，去听另一音叉发出的声音。

(2) 也可利用弦的共振来进行演示（沈括在《梦溪笔谈》当中所介绍的方法），把两根弦固定在弦音计上，调整到相同的频率，拨动一根弦时，可以看到骑放在另一根弦上的小纸片会发生弹跳飞落的现象。

(3) 课本图 9.29 所示的空气柱的共鸣实验中，所用的玻璃管的直径约为 2 厘米左右。如果选用频率为 520 赫兹的音叉，则玻璃管的长度应不小于 20 厘米，因为声波在这一频率时它的四分之一波长约为 16 厘米，这样才能上下移动玻璃管调节气柱的长度。

### (十三) 音调跟频率有关

(1) 按课本图 9.32 的装置进行演示时，所用的纸片应选用薄而硬的材料（譬如可用一小块新的牛皮纸效果很好）。

(2) 敲击不同频率的音叉，由话筒通过放大器用示波器观察它们的波形。若以 384 赫的波形为标准（譬如调到出现三个全波），再换上 256 赫兹或 520 赫兹的音叉，可以明显地看到波数变少或变多，说明频率越大，音调越高。

(3) 利用音频信号发生器，当音调连续（或不连续）改变时，可观察到示波器上的波数出现相应的改变。

### (十四) 响度跟振幅有关

(1) 音叉插在共鸣箱上，用橡皮锤轻敲，音叉发出比较轻的声音，同时用悬挂在支架上的小木球靠近音叉的一个叉股，观察小球被弹开的角度。然后再用橡皮锤较重地敲击音叉，音叉发生较响的声音，用小木球靠近时，可观察到小木球被弹开的角度要大得多。

(2) 利用示波器进行观察，轻敲音叉时波形的波幅较小，较重地敲击音叉时，可观察到波幅明显增大。

### (十五) 音品

用示波器观察，对纯音（可用频率为 256 赫兹的音叉）和其他乐器（或人声）所发出的中央 C 音的波形进行对比。

## 二、学生实验

### (一) 用单摆测定重力加速度

(1) 单摆是一个理想化的振动系统，选择材料时应用较细的蜡线或尼龙丝，小球应选用体积较小、密度较大的金属球，这样，才能比较符合一根“不能伸长，设有质量的线的下端系一质点”的要求。

(2) 为了使摆角不超过  $5^\circ$ ，摆球从平衡位置拉开的距离应不超过  $\ell \sin 5^\circ$ 。如果摆长  $\ell = 1.000$  米， $\sin 5^\circ = 0.0872$ ，则摆球从平衡位置拉开的距离  $A = \ell \sin 5^\circ = 0.0872\text{m} =$

8.7cm.

(3) 测量单摆的振动周期时, 在摆球的平衡位置下面做一记号(譬如放一支铅笔, 如图 9.22 所示). 将摆球从平衡位置拉开一小段距离, 由静止释放后, 观察摆球的振动, 同时以平衡位置为标准, 默数摆球完成全振动的次数, 使数数的快慢能跟振动周期同步, 然后再来计时, 当观察到摆球又一次经过平衡位置时, 采取倒数的方法, 默数“四——、三——、二——、一——、零”, 数到零时开始计时, 接着顺数单摆完成全振动的次数, 记下摆动 30—50 次全振动的时间.

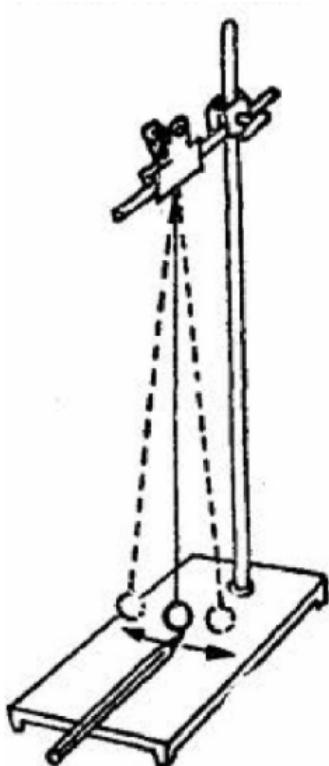


图 9.22

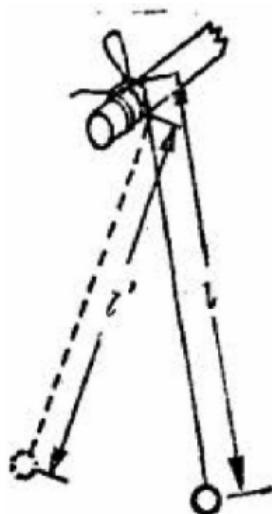


图 9.23

#### (4) 实验中应注意的几个问题

1. 摆线的悬点一定要固定好, 要用比较紧一些的铁夹(文具夹)夹牢, 以免在摆动过程中摆长发生改变. 不允许将悬线随意绕在铁架台的复夹上, 如图 9.23 所示的固定悬线的方法是错误的, 这将使摆长在振动过程中时刻发生变化. 使用铁夹固定悬点, 还可以根据实验需要方便地改变摆长.
2. 测量周期时, 开始计时要以平衡位置为标准, 而不是以摆球到达最大位移处为标准, 这是因为摆球经过平衡位置时的速度最大, 误差可以小一些; 而当摆球到达最大位移处时, 摆球的速度最小, 人的眼睛不易分辨摆球的速度是否恰好等于零.

#### (5) 几个可以让同学思考的问题

1. 为什么要测出摆动 30—50 次的时间, 再算出平均摆动一次的时间, 而不是只测一次全振动的时间?
2. 为了更接近于单摆这一理想化的模型, 实验中所用的悬线长度长一些好还是短一些

好？摆球的体积大一些好还是小一些好？

3. 在研究周期与摆长的关系时，是否可以计算出  $T^2$  的数值，然后跟对应的摆长  $\ell$  来计算出每一组比值  $T^2/\ell$ ，看看它们的关系如何？或者是否可以画出  $T^2-\ell$  图象来进行研究？

## 第四节 习题解答

### 一、练习一

1. 设图 9.1 中振幅是 2 厘米，完成一次全振动，振动物体通过的路程是多少厘米？如果频率是 5 赫，振动物体每秒通过的路程是多少厘米？

**解答：**完成一次全振动，振动物体通过的路程

$$s = 4 \times 2 = 8\text{cm}$$

已知频率  $f = 5$  赫，每秒钟通过的路程

$$s' = 8 \times 5 = 40\text{cm}$$

2. 设图 9.1 中振幅是 2 厘米，取竖直向上的方向作为正方向，物体运动到点 C 时对平衡位置的位移是多大？运动到点 B 时对平衡位置的位移又是多大？

**解答：**物体运动到 C 点时，位移  $x_C = 2$  厘米。物体运动到 B 点时，位移  $x_B = -2$  厘米。

### 二、练习二

1. 物体在任意回复力作用下振动，一定是做简谐振动吗？为什么？

**解答：**不一定，因为做简谐振动的物体，受到的回复力不能是任意的，它一定是跟对平衡位置的位移成正比而方向相反的，即  $F = -kx$ ，否则物体的振动就不是简谐振动。

2. 用手拍球，使球在硬地上来回跳动，球的运动是简谐振动吗？为什么？

**解答：**上下跳动的球，除了运动到最低点，即跟地面发生碰撞的很短一段时间外，只受到重力的作用。重力是一个跟球的位移无关的恒力，不是回复力。所以球的跳动不是简谐振动。

3. 分析课本图 9.2 中弹簧振子的运动，并填好下表：

振子的运动	$C \rightarrow O$	$O \rightarrow B$	$B \rightarrow O$	$O \rightarrow C$
回复力的方向怎样？大小如何变化？	向右变小	向左变大	向左变小	向右变大
运动的性质（加速或减速）	加速	减速	加速	减速
加速度的方向怎样？大小如何变化？	向右变小	向左变大	向左变小	向右变大
速度的方向怎样？大小如何变化？	向右变大	向右变小	向左变大	向左变小

4. 课本图 9.2 所示的弹簧振子的质量是 100 克，频率为 2 赫，求弹簧的倔强系数.

解答：由公式  $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$  和  $f = \frac{1}{T}$ ，得

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

所以

$$k = 4\pi^2 f^2 m = 4 \times 3.14^2 \times 2^2 \times 0.1 = 15.8 \text{ N/m}$$

5. 一个如课本图 9.2 所示的弹簧振子的质量是 200 克，弹簧的倔强系数是 16 牛/米，振幅是 2 厘米，取水平向右的方向作为正方向. 当振子运动到右方最大位移时，回复力和加速度的数值各是多大？当振子运动到左方最大位移时，回复力和加速度的数值又各是多大？这个弹簧振子的周期和频率各是多大？

解答：振子运动到右方最大位移时，回复力的数值

$$F = -kx = -16 \times 0.02 = -0.32 \text{ N}$$

加速度

$$a = \frac{F}{m} = -\frac{0.32}{0.2} = -1.6 \text{ m/s}^2$$

振子运动到左方最大位移时，回复力的数值

$$F = -kx = -16 \times (-0.02) = 0.32 \text{ N}$$

加速度

$$a = \frac{F}{m} = \frac{0.32}{0.2} = 1.6 \text{ m/s}^2$$

这个弹簧振子的周期

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2 \times 3.14 \times \sqrt{\frac{0.2}{16}} = 0.70 \text{ s}$$

频率

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.70} = 1.4 \text{ Hz}$$

### 三、练习三

1. 假如把单摆和弹簧振子都从地球移到月球上，它们的振动频率是否改变？为什么？

解答：弹簧振子的周期不会改变，由于周期  $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ ，把弹簧振子从地球移到月球上后  $m$  和  $k$  都不变，所以周期不变，振动频率也不变.

单摆的周期会发生变化，由于周期  $T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$ ，而月球上的重力加速度  $g_{月}$  与地球上的重力加速度  $g$  不等，所以周期要变，振动频率也要变.

2. 两个单摆，它们的摆长的比是 1:4，求它们的周期的比. 两个单摆，它们的频率的比是 1:4，求它们的摆长的比.

解答：由单摆周期公式  $T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$ , 得周期之比

$$\frac{T_1}{T_2} = \sqrt{\frac{\ell_1}{\ell_2}} = \sqrt{\frac{1}{4}} = \frac{1}{2}$$

由单摆频率公式  $f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{\ell}}$ , 得

$$\frac{f_2}{f_1} = \sqrt{\frac{\ell_1}{\ell_2}}$$

所以

$$\frac{\ell_1}{\ell_2} = \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2 = \left(\frac{4}{1}\right)^2 = 16$$

3. 测某地的重力加速度时, 用了一个摆长为 2 米的单摆, 测得 100 次全振动所用的时间是 4 分 44 秒, 这个地方的重力加速度多大?

解答：100 次全振动所用的时间

$$t = 4 \times 60 + 44 = 284\text{s}$$

周期  $T = \frac{t}{100} = 2.84\text{s}$ , 由  $T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$ , 得:

$$g = \frac{4\pi^2\ell}{T^2} = \frac{4 \times 3.14^2 \times 2}{2.84^2} = 9.78\text{m/s}^2$$

4. 假如把上题中的单摆拿到月球上去, 月球的重力加速度是  $1.6\text{m/s}^2$ , 摆的周期将变为多少秒?

解答：在月球上的周期

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g_{\text{月}}}} = 2 \times 3.14 \times \sqrt{\frac{2}{1.6}} = 7.0\text{s}$$

#### 四、练习四

1. 图 9.24 是一个简谐振动的图象. 根据图象确定它的振幅和周期.

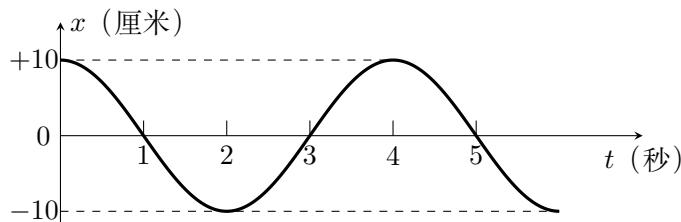


图 9.24

解答：振幅  $A = 10$  厘米, 周期  $T = 4$  秒.

2. 图 9.10 的振动图象是一条余弦曲线, 你能不能应用学过的数学知识算出下列时刻振子对平衡位置的位移?

- (a)  $t = 0.5$  秒;  
(b)  $t = 1.5$  秒.

提示：想一想在图 9.24 中，1 秒、2 秒等时刻相当于余弦函数的多大的角度.

解答：因为振动曲线是余弦函数图象，位移的函数表达式可写为  $x = A \cos \theta$ , 由图象可以看出周期  $T = 4$  秒. 当  $t_1 = 0.5$  秒时，相当  $\theta_1 = 0.5 \times \frac{2\pi}{4} = \frac{\pi}{4}$ , 当  $t_2 = 1.5$  秒时，相当  $\theta_2 = 1.5 \times \frac{2\pi}{4} = \frac{3\pi}{4}$ . 故有

$$x_1 = A \cos \theta_1 = 10 \times \cos \frac{\pi}{4} = 10 \times \frac{\sqrt{2}}{2} = 7.07 \text{ cm}$$

$$x_2 = A \cos \theta_2 = 10 \times \cos \frac{3\pi}{4} = 10 \times \left( -\frac{\sqrt{2}}{2} \right) = -7.07 \text{ cm}$$

## 五、练习五

分析弹簧振子（课本图 9.2）和单摆（课本图 9.3）在振动中能量的转化情况（增多或减少），填好下表：

振子的运动	$C \rightarrow O$	$O \rightarrow B$	$B \rightarrow O$	$O \rightarrow C$
动能的变化	增大	减小	增大	减小
势能的变化	减小	增大	减小	增大
总能量的变化	不变	不变	不变	不变

## 六、练习六

1. 除了书上讲过的自由振动和受迫振动的例子外，再各举两个实例.

解答：琵琶的弦被拨动后的振动，鼓面被击后的振动是自由振动.

蚊子、蜜蜂、蜻蜓等飞行时翅膀的振动，人挑担行走时扁担的振动都是受迫振动.

2. 仿照课本图 9.13 所示的研究共振现象的装置，自己利用手边的材料来做实验，观察受迫振动的振幅跟策动力频率之间的关系.

解答：（解答略）

3. 汽车的车身是装在弹簧上的，如果它的固有周期是 1.5 秒，汽车在一条起伏不平的路上行驶，路上各凸起处相隔的距离都大约是 8 米，那么汽车以多大的速度行驶时车身的起伏振动最激烈？

解答：汽车受迫振动频率由  $f = v/\ell$  决定，式中  $v$  为汽车速率， $\ell$  是路面凸起处的间隔，当  $f = f_{固}$  时发生共振，车身振动最剧烈，故有

$$\frac{v}{\ell} = \frac{1}{T_{固}}$$

则

$$v = \frac{\ell}{T_{固}} = \frac{8}{1.5} = 5.33 \text{ m/s}$$

## 七、练习七

1. 在某一地区，地震波的纵波和横波在地表附近的传播速率分别是  $9.1\text{km/s}$  和  $3.7\text{km/s}$ 。在一次地震时，这个地区的一个观测站记录的纵波和横波的到达时刻相差 5 秒，那么地震的震源距这个观测站多远？

**解答：**设震源距观测站距离为  $s$ ，由于地震波的纵波和横波由震源处同时发出，它们的速度分别为  $v_1$ 、 $v_2$ ，则先后到达观测站的时间差

$$\Delta t = \frac{s}{v_2} - \frac{s}{v_1}$$

所以

$$s = \left( \frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1} \right) \Delta t = \left( \frac{1}{3.7} - \frac{1}{9.1} \right) \times 5 = 31\text{km}$$

2. 一只船停泊在岸边，如果海浪的波峰间的距离是 6 米，海浪的波速是  $1.5\text{m/s}$ ，求船摆晃的周期是多少？

**解答：**海浪波峰间距离即海浪的波长  $\lambda$ 。船摇晃的周期就是它上下浮动，完成一次全振动的周期  $T$ 。

$$T = \frac{\lambda}{v} = \frac{6}{1.5} = 4\text{s}$$

3. 甲乙二人分乘两只船在湖中钓鱼，两船相距 24 米。有一列水波在湖面上传播开来，每只船每分钟上下浮动 20 次，当甲船位于波峰时，乙船位于波谷，这时两船之间还有一个波峰，水波的波速是多大？

**解答：**船每分钟上下浮动 20 次，即完成 20 次全振动，故水波周期

$$T = \frac{t}{20} = \frac{60}{20} = 3\text{s}$$

甲、乙两船相距 1.5 个波长，故波长

$$\lambda = \frac{s}{1.5} = \frac{24}{1.5} = 16\text{m}$$

波速

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{16}{3} = 5.33\text{m/s}$$

此题也可按以下方法求解：因为甲、乙两船相距 1.5 个波长，故水波通过两船时间为 1.5 个周期，于是波速

$$v = \frac{s}{t} = \frac{24}{1.5T} = \frac{24}{1.5 \times 3} = 5.33\text{m/s}$$

4. 仔细研究课本图 9.15，说明：两个相邻的反相质点间的距离等于波长的多少。

**解答：**由于两个相邻的同相质点间的距离等于一个波长，则两个相邻的反相质点间的距离等于半个波长。

### 八、练习八

1. 振动图象和波的图象各表示的是什么内容？振动图象中相邻两个最大值之间的间隔等于什么？波的图象中相邻两个最大值之间的间隔等于什么？

**解答：**振动图象表示的是某振动质点对平衡位置位移怎样随时间而变化。波的图象表示的是某一时刻沿波传播方向上媒质各质点对平衡位置的位移。振动图象中相邻两个最大值之间的间隔等于振动周期  $T$ ，波动图象中相邻两个最大值之间的间隔等于波长  $\lambda$ 。

2. 有一列波，它在某一时刻的波形曲线如课本图 9.18 中的实线所示，这列波经过  $T/4$  后的波形曲线是什么样？经过  $2T/4$ ， $3T/4$  后又是什么样？

**解答：**经过  $T/4$ 、 $2T/4$ 、 $3T/4$  后的波形曲线分别如图 9.25 的甲、乙、丙所示。

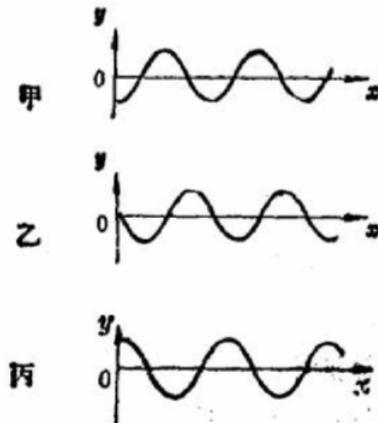


图 9.25

3. 横波的图象直观地表现了横波在某一时刻的波形，纵波的图象却不能直观地表现纵波的情况，但是，我们看到纵波的图象应该很自然地想出纵波的情况，就象我们看到振动图象应该很自然地想出弹簧振子或单摆的振动情况一样。仔细考察课本图 9.19，回答下面的问题。

- (a) 在图象的什么地方质点向右的位移最大？
- (b) 在图象的什么地方质点向左的位移最大？
- (c) 在图象的什么地方质点的位移为零？
- (d) 密部中央两侧质点的位移有什么特征？
- (e) 疏部中央两侧质点的位移有什么特征？

**解答：**在图线的最高点处质点向右的位移最大；在图线的最低点处质点向左的位移最大；在图线与横轴的交点处质点的位移为零；密部中央左侧的质点位移向右，右侧的质点位移向左；疏部中央左侧的质点位移向左，右侧的质点位移向右。

### 九、练习九

1. 第一次测定声音在水中的传播速率是 1827 年在日内瓦湖上用下面的方法进行的：在一只船上实验员向水里放下一个钟，当敲这个钟的时候，使船上的火药同时发光；在

另一只船上，另一实验员向水里放下一个听音器，他测量从看到火药闪光到听到钟声所经过的时间。

两船相距 14 千米，看到火药闪光后 10 秒钟听到声音，求声音在水中的传播速率。

**解答：**光在空气中的传播速率很大，它在两只船间的传播时间可以忽略不计，因此声在水中的传播速率

$$v = \frac{s}{t} = \frac{14000}{10} = 1400 \text{ m/s}$$

2. 第一次测定铸铁里的声速是在巴黎用下面的方法进行的：从铸铁管的一端敲一下钟，在管的另一端听到两次响声，第一次是由铸铁管传来的，第二次是由空气传来的。管长 931 米，两次响声相隔 2.5 秒，如果当时空气中的声速是 340 m/s，求铸铁中的声速。

**解答：**设管长为  $s$ ，声波在空气中传播速度为  $v_1$ ，在铸铁中传播速度为  $v_2$ ，则在管端听到两次声音的时差为

$$\frac{s}{v_1} - \frac{s}{v_2} = t$$

所以

$$v_2 = \frac{s}{s - v_1 t} \cdot v_1$$

代入数值计算可得： $v_2 = 3.9 \times 10^3 \text{ m/s} = 3.9 \text{ km/s}$

3. 为了听到回声，反射声波的障碍物至少应该离开我们多远？猎人在射击后 6 秒钟听到射击的回声，障碍物离猎人有多远？设空气中的声速是 340m/s。

**解答：**设从声源（人）发出声波到接收到从障碍物反射回来的声波的时间为  $t_0$ ，只有当  $t_0 \geq 0.1$  秒时才能将回声和原来的声音区分开来。如果声源（人）到障碍物距离为  $s$ ，能听到回声的条件是

$$\frac{2s}{v} \geq 0.1 \text{ s}$$

所以

$$s \geq \frac{v}{2} \times 0.1 = \frac{340}{2} \times 0.1 = 17 \text{ m}$$

得  $s \geq 17$  米，即反射物离人至少应有 17 米远。

设障碍物离猎人的距离为  $L$ ，因射击后 6 秒钟听到回声，故

$$\frac{2L}{v} = t, \quad L = \frac{vt}{2}$$

代入数值计算可得

$$L = \frac{340 \times 6}{2} = 1020 \text{ m}$$

4. 人能听到的声波的最高频率是 20000 赫。狗能听到的声音的最高频率是 50000 赫。蝙蝠能发出并且能听到的声音频率高达 120000 赫。分别求出人、狗、蝙蝠能听到的，在 0°C 空气中传播的声波的最短波长。

**解答：**在 0°C 空气中，人能听最短声波波长

$$\lambda_1 = \frac{v}{f_1} = \frac{332}{20000} = 0.0166 \text{ m} = 1.66 \text{ cm}$$

狗能听到最短声波波长

$$\lambda_2 = \frac{v}{f_2} = \frac{332}{50000} = 0.00664\text{m} = 6.64\text{mm}$$

蝙蝠能听到的最短声波波长

$$\lambda_3 = \frac{v}{f_3} = \frac{332}{120000} = 0.00227\text{m} = 2.77\text{mm}$$

5. 在一次如课本图 9.29 所示的空气柱共鸣的实验中，测得共鸣时空气柱的最短长度为 19 厘米，声波的波长有多长？已知音叉的频率是 440 赫，空气中的声速有多大？

**解答：**声波的波长

$$\lambda = 4L = 4 \times 19 = 76\text{cm}$$

在空气中的声速

$$v = \lambda f = 0.76 \times 440 = 334\text{m/s}$$

## 十、习题

1. 一座摆钟走得慢了，要把它调准，应该怎样改变它的摆长？是增长还是缩短？为什么？

**解答：**应该缩短摆长。因为摆长短了，周期变小，频率加快，钟比原来走得快，这样原先走得慢的钟就能调准了。

2. 周期是 2 秒的单摆叫做秒摆，试根据测得的当地重力加速度  $g$  的数值自制一个秒摆。

**解答：**略。

3. 使悬挂在长绳上的小球偏离平衡位置一个很小的角度，然后放开它；使另一个小球以初速度为零从长绳的悬挂点自由落下，如果两球同时开始运动，哪一个球先到达第一个球的平衡位置？

**解答：**单摆小球到达平衡位置所需时间

$$t_1 = \frac{T}{4} = \frac{1}{4} \times 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\ell}{g}} = 1.57 \sqrt{\frac{\ell}{g}}$$

自由下落的小球到达摆球平衡位置所需时间

$$t_2 = \sqrt{\frac{2\ell}{g}} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{\ell}{g}} = 1.41 \sqrt{\frac{\ell}{g}}$$

因为  $t_1 > t_2$ ，所以自由下落的小球先到达单摆的平衡位置。

4. 一位物理学家通过电视机观看宇航员登月球的情况，他发现在发射到月球上的一个仪器舱旁边悬挂着一个重物，在那里摆动，悬挂重物的绳长跟宇航员的身高相仿。这位物理学家看了看自己的手表，测了一下时间，于是他测出了月球表面上的自由落体加速度的数值，他是怎么测出的？

**解答：**据公式

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g_{月}}}$$

只要用手表测出摆的振动周期估测出宇航员的身高，即得

$$g_{月} = \frac{4\pi^2 \ell}{T^2}$$

5. 一个准备装到人造卫星上的小型电子计算机将承受  $10g$  的加速度，为了试验它是否承受得了这样大的加速度，将它装到一个在水平方向上做简谐振动的试验台上。试验台的频率是 10 赫，要使试验台的最大加速度达到  $10g$ ，它的振幅必须多大？

**解答：**据作简谐振动回复力公式  $F_m = kA$ ，最大加速度的大小  $a_m = \frac{F_m}{m} = \frac{k}{m}A$ 。

由  $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$ ，得：  $k = 4\pi^2 f^2 m$ ，代入上面的  $a_m$  表达式  $a_m = 4\pi^2 f^2 A$ ，得：

$$A = \frac{a_m}{4\pi^2 f^2} = \frac{10g}{4\pi^2 f^2} = \frac{10 \times 9.8}{4 \times 3.14^2 \times 10^2} = 0.0248\text{m} = 2.48\text{cm}$$

6. 火车车轮经过接轨处时要受到震动，因而使车厢在弹簧上上下振动。已知弹簧每受 1 吨的力，被压缩 1.6 毫米。三厢和载重共重 55 吨，每段铁轨长 12.5 米，火车沿轨道做匀速运动时，它的危险速度是多少 km/h？

**解答：**据胡克定律，车厢弹簧的倔强系数

$$k = \frac{F}{x} = \frac{9800}{0.0016}\text{N/m}$$

可计算出火车行驶时振动的固有周期

$$T_{固} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 2 \times 3.14 \times \sqrt{\frac{55000 \times 0.0016}{9800}} = 0.60\text{s}$$

火车受迫振动周期

$$T = \frac{\ell}{v}$$

式中  $v$  为火车的行驶速度， $\ell$  是铁轨的长度。

只有当  $T = T_{固}$  时火车才发生共振，车身振动最剧烈，故危险速度

$$v = \frac{\ell}{T_{固}} = \frac{12.5}{0.60} = 21\text{m/s} = 75.6\text{km/h}$$

7. 已知  $0^\circ\text{C}$  时空气中的声速是  $332\text{m/s}$ ，水中的声速是  $1450\text{m/s}$ ，声波由空气传入水中时波长变化了多少倍？

**解答：**因为声音由空气传入水中时，频率不变，故有

$$\frac{v_{水}}{\lambda_{水}} = \frac{v_{空}}{\lambda_{空}}$$

所以

$$\frac{\lambda_{水}}{\lambda_{空}} = \frac{v_{水}}{v_{空}} = \frac{1450}{332} = 4.37$$

即：水中波长增大至空气中波长的 4.37 倍。

8.  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三点分别距声源  $S$  40 厘米、52.5 厘米、65 厘米，从  $S$  传出的声波波长是 25 厘米，分别求出  $A$ 、 $B$  两点和  $A$ 、 $C$  两点相的关系。

**解答：**设在波的传播方向上有两点，若振源到这两点的距离的差等于波长的整数倍，这两点同相；若振源到这两点的距离的差等于半波长的奇数倍，这两点反相。故有声源距  $A$ 、 $B$  两点的距离的差为

$$\Delta s_{AB} = s_B - s_A = 52.5 - 40 = 12.5\text{cm} = \frac{\lambda}{2}$$

所以  $A$ 、 $B$  两点反相。

声源距  $A$ 、 $C$  两点的距离的差为

$$\Delta s_{AC} = s_C - s_A = 65 - 40 = 25\text{cm} = \lambda$$

所以  $A$ 、 $C$  两点同相。

9. 图 9.26 中的  $S_1$  和  $S_2$  是两个同相、同频率的波源： $S_1$  和  $A$  点的距离是  $\ell_1$ ， $S_2$  和  $A$  点的距离是  $\ell_2$ ，如果  $\ell_2 - \ell_1$  等于一个波长，两列波到达  $A$  点时同相，波峰和波峰相遇（或波谷和波谷相遇）， $A$  点的振动加强；如果  $\ell_2 - \ell_1$  等于半个波长，两列波到达  $A$  点时反相，波峰和波谷相遇， $A$  点的振动减弱。

试证明：当  $\ell_2 - \ell_1$  为半波长的偶数倍时， $A$  点的振动加强；当  $\ell_2 - \ell_1$  为半波长的奇数倍时， $A$  点的振动减弱。

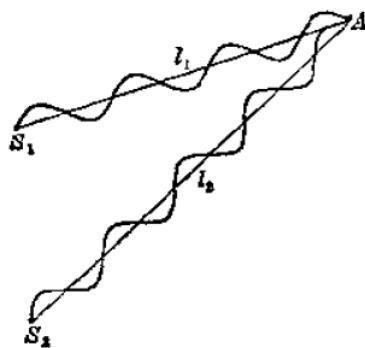


图 9.26

**证明：**由于两个波源  $S_1$  和  $S_2$  的频率相同而且是同相的， $A$  点距离两个源的距离之差  $\ell_2 - \ell_1$  只要是波长的整数倍，两列波到达  $A$  点时就是同相的，振动互相加强；如果  $\ell_2 - \ell_1$  比波长的整数倍相差半个波长，两列波到达  $A$  点时就是反相的，振动互相减弱。

所以，如果  $k$  为任意的正整数，当  $\ell_2 - \ell_1 = 2k \cdot \frac{\lambda}{2}$  时，有  $\ell_2 - \ell_1 = k\lambda$ ，为波长的整数倍，两列波到达  $A$  点时互相加强。当  $\ell_2 - \ell_1 = (2k+1) \frac{\lambda}{2}$  时，有  $\ell_2 - \ell_1 = k\lambda + \frac{\lambda}{2}$ ，比波长的整数倍相差半个波长，两列波到达  $A$  点时互相减弱。

## 第五节 参考资料

### 一、周期运动、振荡和振动

周期运动是任何一种在相等的间隔中完全重复的运动。设  $X(t)$  代表系统在时刻  $t$  在某坐标系中的位移，则对于时间变量的每一个  $t$  值周期运动都具有方程  $X(t+T) = X(t)$

所定义的性质。一个循环持续的时间  $T$  称为运动的周期。钟表的擒纵机构的运动，地球绕太阳的公转以及发动机在匀速运转时曲柄、连杆和活塞更复杂的运动都是周期运动的例子。任何周期运动都可以表示为傅里叶级数，即一些正弦项或余弦项之和，各项的频率是整个周期运动频率  $f$  的整数倍。例如通过傅里叶分析任何一个复杂的周期波都可以表示为一系列正弦波分量的级数之和，分量的周期是这个复合波的基本周期的  $1/n$ ,  $n$  为正整数。

振荡是任何一种往复变化的现象，振荡的例子包括声波中压力的变化，以及数学函数的起伏，即某数值在某一平均值上下的重复交替变化。振荡这个词在很多场合与振动同义，虽然后者主要指机械振动。例如为了检测产品抗震性能的机器称为振动台，而使电流方向周期性反复交变的电子器件通常称为振荡器。电磁场的交替变换称为电磁振荡。如给系统以某一初扰动，然后让它自己进行振荡，这种现象称为**自由振荡**。系统对恒定作用的周期激扰的响应称为**受迫振荡**。振幅不断减小的任何振荡称为**衰减振荡**。通常是由于系统有能量输出。振幅保持不变的振荡称为非衰减振荡，这通常是由于外部能源补充能量。

振动这个术语描述相对于某一规定的中心基准（平衡位置）位移的持续周期变化，这种周期运动可以包括从摆的简单来回摆动、钢板受锤击后的较为复杂的振动，直到大型结构的极其复杂的振动。例如汽车在粗糙路面上行驶时发生的振动。所有的原子、分子与核子也都在不断振动，一个机械系统要能自身维持其自由振动必须具有质量与弹性的特性或者与此相当的特性，具有弹性是指系统从正常形态的任何偏离将引起回复力促使系统返回正常形态。具有质量或惯性是指系统在回到正常形态时所获得的速度又可使系统超越这一形态。正是由于质量和弹性的相互作用，机械系统才有可能发生周期振动。

## 二、谐运动和振子

谐运动是以时间的正弦（或余弦）函数表示的一种周期运动，通常称为简谐运动，它是最简单形式的振动，这种运动对它的平衡位置是对称的，在平衡位置处速度最大，加速度为零；在最大位移（或转向点）处速度为零，加速度最大。这种运动的特征是由单一的频率（无泛音）来表示的。谐运动可出现于非常简单的机构中，例如匀速圆周运动物体上任一点在固定直线上的投影。谐运动也可以是振动系统对某一周期正弦力的响应。谐运动是许多简单系统的典型运动，只要使系统偏离其稳定平衡位置然后释放并略去阻力得到的即是简谐运动。

振子是被回复力或回复力矩束缚在稳定平衡位置的任何物理系统，其中回复力或回复力矩与离开平衡位置的线位移或角位移成正比。如果这样一个物体从它的平衡位置被扰动后释放并且阻尼可以忽略，则由此引起的振动是简谐振动而没有谐波。振动频率是振子的固有频率，取决于它的惯性（质量）和回复力的劲度（倔强系数）。振子并不限于力学系统也可以是电学系统。（然而典型的电子振荡器只是近似的振子）

## 三、声压、声强

声压：没有声波传播时媒质中的压强为  $p_0$ ，当声波在媒质中传播时，某点的压强为  $p_1$ ，定义  $p = p_1 - p_0$  为该点的声压。随着质点位移的周期性变化，声压也作周期性的变化，

声压与媒质中质点的速度成正比，而且两者的位相相同。频率越高，越容易获得较大的声压。正是由于声压的变化，引起耳膜的振动才产生了听觉。在室内大声说话的声压大约为 $10^5$  帕。

声强：声波的能流密度称为声强，平面简谐波声强的大小为

$$I = \frac{1}{2} \rho u A^2 \omega^2$$

其中  $\rho$  为媒质密度， $u$  为波速， $A$  为振幅， $\omega$  为振动角频率）。声强的单位是  $\text{W/m}^2$ 。对于能引起听觉的声波，不仅有频率的限制，而且声强也必须满足一定的要求，对每一频率的声波，人能听到的声强都有一个上限值和一个下限值。低于下限值或高于上限值都不能引起听觉。

#### 四、乐器的基音与泛音

乐器的种类很多，按其发声部分的性质，可分为弦乐器和管乐器，凡是振动部分是弦线的，称为弦乐器；凡是利用空气柱的振动发声，称为管乐器。

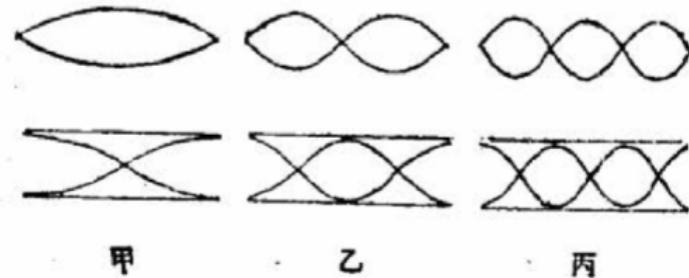


图 9.27

弦乐器：入射波和反射波的叠加形成驻波。入射波和反射波叠加在固定端形成波节，在自由端形成波腹。弦乐器的两端形成波节，最简单的弦振动如图 9.27 甲上图，波长是弦长的 2 倍，或弦长等于半波长，若波的传播速度为  $v$ ，弦长为  $\ell$ ，则所发声音的频率

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2\ell}$$

这是基音。弦的振动还有如图 9.27 乙、丙……上图所示的情况，即弦长分别等于半波长的 2, 3……倍，声音的频率分别为  $2f$ 、 $3f$ ……这些频率较高的声音叫泛音。

管乐器：管乐器可分为两端开口的开管和一端关闭的闭管。吹入气流，引起管内气柱的振动，形成驻波，发生乐音。开管的两端都是波腹，它的基音波长是管长的 2 倍，如图 9.27 甲下图，乙、丙下图是开管的泛音。

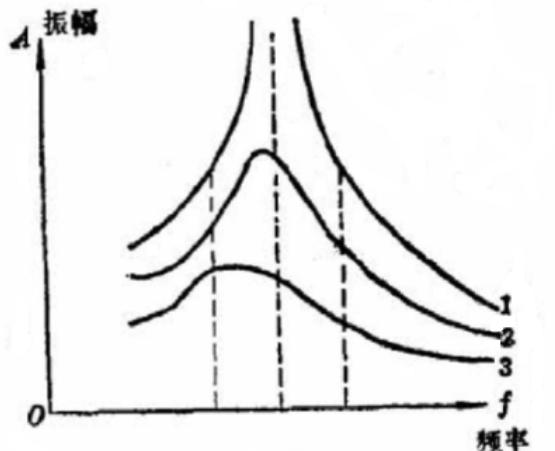
闭管末端的空气不能振动，总是波节，所以它的基音波长等于管长的 4 倍（如图 9.28 所示），或者说管长等于基音波长的  $1/4$ 。它也产生泛音，管长等于泛音波长的  $3/4, 5/4, \dots$

#### 五、弦乐器上共鸣箱的作用

弦乐器上共鸣箱里的空气柱，只是在弦振动周期力的作用下，发生受迫振动。一定形状、体积和密度的空气柱的固有频率是一定的，而弦振动的频率是变化的，故空气柱不可



图 9.28



1. 阻尼很小, 2. 阻尼较大, 3. 阻尼很大

图 9.29

能跟弦振动的各种频率都发生共振, (声音的共振现象也称共鸣). 实际上弦乐器在演奏时应避免尖锐的共振, 因为它会使这一频率的声音特别响. 弦乐器上装“共鸣”箱, 要避免共鸣箱对某一频率过分增强的现象, 使琴体空气柱的固有频率偏离演奏时弦振动的频率, 并应有适当的阻尼作用. 共鸣箱的主要作用在于增大发声体辐射面的面积, 提高向周围空气辐射声能的效率, 因此把琴筒、琴体等称之为共鸣箱是不确切的, 这“共鸣”二字, 只能从增强声音的辐射效率方面去理解.

## 六、我国区域环境噪声标准

适用区域	昼间分贝	夜间分贝
特殊住宅区	45	35
居民、文教区	50	40
一类混合区	55	45
商业中心区、二类混合区	60	50
工业集中区	65	55
交通干线道路两侧	70	55

单位: 等效声级 log 分贝

说明: “特殊住宅区”指当地人民政府指定的特别需要安静的住宅地区(如休养地、高级宾馆等). “居民、文教区”指纯居民和文教、机关地区. “一类混合区”指工业、商业、少量交通和居民混合区. “商业中心区”指商业集中的繁华地区, “工业集中区”是指当地政府指定的工业地区. “交通干线道路两侧”是指车流量每小时一百辆以上的道路两侧. (引自国家劳动总局主编《噪声控制技术》, 上海科技出版社 1983 年 1 月第 1 版)