

经全国中小学教材审定委员会

2004年初审通过

普通高中课程标准实验教科书

物理 ①

必修

人民教育出版社 课程教材研究所 编著
物理课程教材研究开发中心



人民教育出版社

普通高中课程标准实验教科书

物理 ①

必修

人民教育出版社 课程教材研究所 编著
物理课程教材研究开发中心



人 民 教 育 出 版 社

总主编：张大昌
副总主编：彭前程
主编：张维善
执笔人员：黄怒伯 刘彬生 彭前程 张维善 张颖
绘图：王凌波 张傲冰 张良
责任编辑：孙新 苗元秀
版式设计：马迎莺
审读：王寿志

普通高中课程标准实验教科书

物理 1

必修

人民教育出版社 课程教材研究所 编著
物理课程教材研究开发中心

*

人民教育出版社 出版发行

(北京市海淀区中关村南大街17号院1号楼 邮编：100081)

网址：<http://www.pep.com.cn>

×××印刷厂印装 全国新华书店经销

*

开本：890毫米×1240毫米 1/16 印张：7 字数：155 000

2006年12月第2版 年月第 次印刷

ISBN 978-7-107-20157-8 定价： 元

G·13207(课)

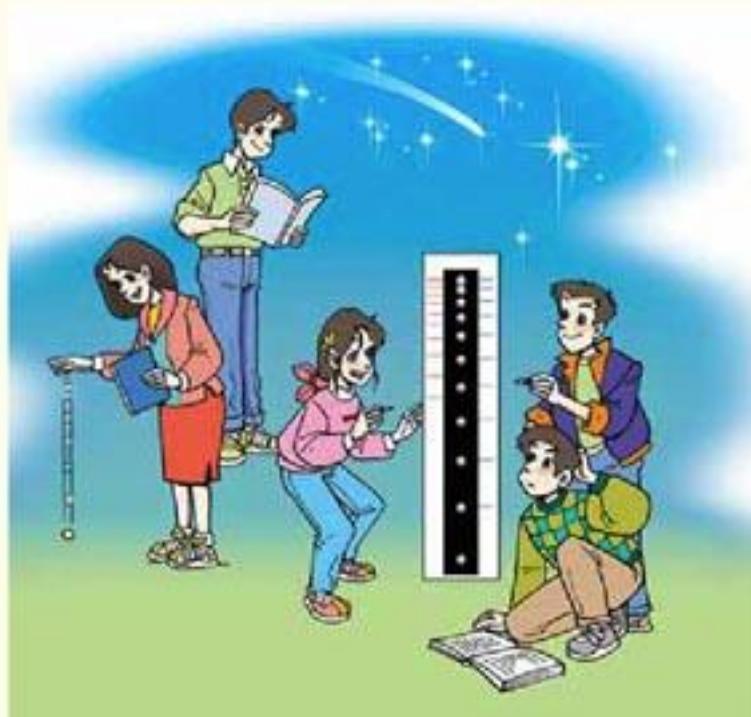
著作权所有·请勿擅用本书制作各类出版物·违者必究
如发现印、装质量问题，影响阅读，请与出版社联系调换。

走进物理课堂之前

赵凯华①

一群顽童，衣着五色斑斓，凑在一起，专爱找些新鲜游戏来玩。他们上树掏鸟蛋、下河捞鱼虾，把蝌蚪养在玻璃罐里，要看它们怎样变青蛙，把鸟蛋放在被窝里孵化，想看小鸟怎样从壳里往外爬，睡觉时把鸟蛋压碎了，弄得被窝一塌糊涂，挨了妈妈的骂。

一天在树下玩耍，一只熟透了的苹果掉下来，他们就辩论起来：苹果是不是越落越快？不过他们很快就达成一致：是的，苹果越落越快。怎见得？苹果刚离开树枝时几乎是静止的，落地前已相当快，于是就摔烂了。文静的紫珠说：“只说苹果越落越快，没什么了不起，谁能说出苹果下落怎么个越来越快法？”黑柱说：“苹果越落越快，就是它的速度正比于落下的距离呗！比如它落下2米时的速度是落下1米时速度的两倍。”白胖说：“我看是苹果的速度正比于落下的时间，它下落2秒后的速度是下落1秒后速度的两倍。”红孩思考了一会儿说：“你们都说速度的变化，可是速度很难测量，还不如说落下的距离。我猜，要是苹果在第1秒内下落的距离是1，那么在第2秒内下落的距离就是2，在第3秒内下落的距离就是3，等等。我这个想法容易用实验来检验。”孩子们七嘴八舌，莫衷一是。坐在一边的蓝仔插进来说：“实验是必须做的，不过垂直下落太快，也许得利用斜面。我得回去好好想想，要讲清道理。”天色已晚，黄娃建议明天到游戏场去做实验，于是大家就散伙回家了。



① 赵凯华（1930—），北京大学教授，曾任中国物理学会副理事长兼教学委员会主任。

第二天大家来到游戏场，蓝仔宣布，他对红孩的猜测有修正，每秒落下的距离不是

$1:2:3:4:5:\dots$

而是

$1:3:5:7:9:\dots$

白胖说：怪了！凭什么不是下面这样的？

$2:4:6:8:10:\dots$

黄娃兴冲冲地跑到滑梯上把自己的书包放到斜面上让它下滑，没想到摩擦力太大，书包滑到半路不走了。黑柱掏出一个皮球，说：“来，用这个！”

大家选红孩当指挥，他要其他人手里各拿一段粉笔头，沿滑梯一字排开。红孩在滑梯顶上，看着手表说：“我喊‘开始！’，就把皮球放开，喊‘1秒’，站在滑梯旁的第一个人用粉笔在球经过的地方画一道，喊‘2秒’，第二个人用粉笔再在球经过的地方画一道，如此等等。”他发号施令，球沿滑梯滚下来。没想到，第一个人画了粉笔道后，没等第二个人画，球已经滚出了滑道。再试，还是那样。大家有点儿懊恼了。紫珠提议：“我们找物理老师去！”

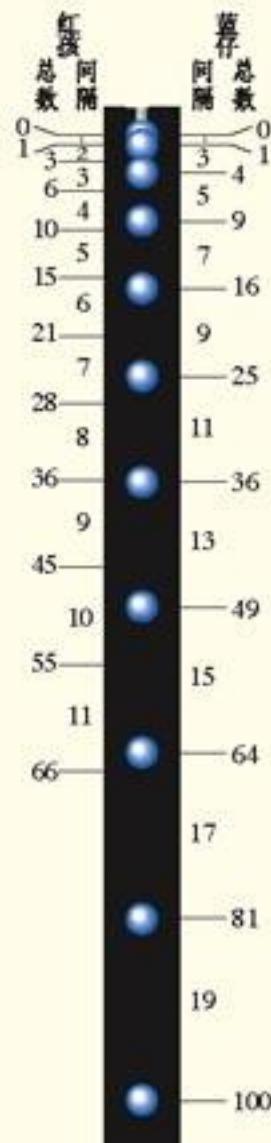


图1 落体的频闪照片

老师听了他们的汇报后，笑眯眯地说，我带你们到实验室看一样东西。在实验室里看到有盏灯一闪一闪地照着一个下落的球，那球的影像断断续续地，像一串断了线的珍珠，上密下疏。老师解释说：“这架仪器叫做‘频闪仪’，它每隔一定时间间隔发出一次闪光，于是我们就看到了从静止下落的球每隔一定时间间隔的位置。这过程用肉眼看还是太快，无法看清楚，更无法测量。我们用照相机连续曝光，把整个过程拍下来。我这里正好有一张拍好的照片（见图1），你们可以拿去研究。”

孩子们非常兴奋。红孩说：“我们先找一张比照片还大些的白纸，以照片上头两个球的影像之间的距离为间隔，精确地在纸上画许多水平线，然后把照片叠放上去，确定以下各个影像的位置，并算出它们之间距离的比例。”孩子们做得非常认真，水平线画得很平行，间隔也很准确。图画好了，白胖建议先不把照片叠上去，让红孩和蓝仔分别按他们的预期，在左右标出球各次将要到达的位置，最后比一比，看看谁对。

红孩在左边标的是

$$\begin{aligned}0 \\ 1 \\ 1+2=3 \\ 3+3=6 \\ 6+4=10 \\ 10+5=15 \\ 15+6=21 \\ 21+7=28 \\ 28+8=36 \\ 36+9=45 \\ 45+10=55\end{aligned}$$

蓝仔在右边标的是

$$\begin{aligned}0 \\ 1 \\ 1+3=4 \\ 4+5=9 \\ 9+7=16 \\ 16+9=25 \\ 25+11=36 \\ 36+13=49 \\ 49+15=64 \\ 64+17=81 \\ 81+19=100\end{aligned}$$

白胖惊讶地对蓝仔喊道：“没想到你这里都是整数的平方，妙极了！”于是大家郑重地把照片叠上去，将起始点对准纸上的零线。啊！答案出来了，红孩的估计比实际慢了很多，蓝仔的猜测非常符合照片上显示的实际情况。大家为蓝仔欢呼，这时绿妹却质问蓝仔说：“你得给我们说清楚，你是怎么想的。”蓝仔说：“说来话长，得找个有黑板的地方讲。”

孩子们来到教室，把老师也请来了，听蓝仔讲。蓝仔说：“其实我是吸取了白胖的想法，速度正比于走过的时间。”

设第1秒末的速度为 v ，初速度为0，所以平均速度为

$$\bar{v} = \frac{0+v}{2} = \frac{v}{2}，\text{走过的距离为} \frac{v}{2} \times 1\text{秒}。$$

第2秒末的速度为 $2v$ ，初速度为 v ，所以平均速度为

$$\bar{v} = \frac{v+2v}{2} = \frac{3v}{2}，\text{走过的距离为} \frac{3v}{2} \times 1\text{秒}。$$

第3秒末的速度为 $3v$ ，初速度为 $2v$ ，所以平均速度为

$$\bar{v} = \frac{2v+3v}{2} = \frac{5v}{2}，\text{走过的距离为} \frac{5v}{2} \times 1\text{秒}。$$

依此类推。为了取整数，可令 $v=2$ ，于是球在相继各秒下落距离之比就是

$$1:3:5:7:9:\dots$$

如果从零线起算各秒末的总路程，那就是整数的平方

$$1:4:9:16:25:\dots$$

蓝仔讲完后，白胖颇有感慨地说：“真没想到，蓝仔的说法听起来和我的猜测是那样的不同，居然是一致的！可是他把我的想法发挥到了更精致的程度。”



图2 列昂纳多·达·芬奇
(Leonardo da Vinci, 1452—1519)

孩子们兴奋之余，没忘了请老师讲话。老师说：“同学们，你们干了伟大的事。虽然你们得到的结论早已写在物理教科书里，但你们干的，是三个半世纪前伟人们干的事。15世纪欧洲文艺复兴时期，有多位大师参与了落体定律的创立。艺术巨匠列昂纳多·达·芬奇（Leonardo da Vinci，见图2）提出的落体定律就是红孩的 $1:2:3:4:5$ 律，物理学的创立人之一的伽利略·伽利莱（Galileo Galilei）提出的落体定律就是蓝仔的 $1:3:5:7:9$ 律，最后是伽利略自己用精巧的斜面验证了它，建立了不朽的落体定律，至今每个中学生都在学习它。你们还没学物理就自己找到了它，多么了不起！”

绿妹插嘴道：“列昂纳多·达·芬奇的名画我见过一张，叫《蒙娜丽莎》（见图3），是在我哥哥带回家来的一本世界名画集中看到的，我哥哥在美术学院学习。”老师补充说：“挂在蒙娜丽莎嘴角上那一丝‘神秘的微笑’令世人倾倒。应当指出，达·芬奇不仅是艺术家，他还是一位工程师和科学家哩。他设计了多种机器、武器和建筑，搞过人体解剖。科学和艺术是相通的嘛。”

“分析起来你们的研究还真有点儿符合物理学的科学方法哩。”老师继续说：“物理学是探索自然界最基本、最普遍规律的科学，物理学的一般探索过程是通过观察和实验积累经验，在经验事实的基础上建立物理模型，提出（往往是猜测出）简洁的物理规律（物理学要求这些规律是定量化的，也就是用公式或数字表达的），用它们去预言未知现象，再用新的实验去检验这些物理模型和物理规律，去否定或进一步修正它们。”黄娃插问：“老师，什么是物理模型？”老师解释道：“实际问题往往是复杂的，其中包含一些非本质的枝节，物理模型就是把实际问题理想化，先略去一些次要因素，突出其主要因素。不这样做我们就得不到简洁的物理规律。拿你们研究的落体规律来说，空气的阻力或斜面的摩擦力就是次要因素，不排除和忽略它们，我们就得不到简洁的落体定律。你黄娃的书包在滑梯上滑不下去，不是再好不过地说明了这个问题吗？”白胖问：“老师，您说简洁的物理规律是什么意思？”老师说：“对问题认识得越深刻，得到的规律就显得越简洁。你不觉得蓝仔的整



图3 《蒙娜丽莎》

数的平方律 $1:2^2:3^2:4^2:5^2$ 比奇数律 $1:3:5:7:9$ 更优美吗？其实还有更简洁的说法。物理学把每秒内速度的增加量叫做‘加速度’，这个概念是伽利略在研究落体定律时创建的。蓝仔的（其实也是你白胖的）落体模型可以概括为‘落体运动是加速度不变的运动’，这不是更简洁吗？物理学中把这种运动叫做‘匀加速运动’，即‘落体运动是匀加速运动’。认识一步一步地深入要靠逻辑推理，要靠数学，数学可以把表面上看起来不同的说法联系在一起，在认识上把它们统一起来。”

黑柱忽然问：“落体就是越落越快呗，研究得那么细有什么用？”大家面面相觑，都愣住了。

老师从皮包里掏出一张画，上面画的是一个航天员站在月球的表面，双手各丢下一把榔头和一根鹰的羽毛，检验它们在月球上没有空气的条件下是否落得一样快。这位航天员是阿波罗 15 号的斯科特（D. R. Scott），他说，如果没有伽利略落体定律的发现，他就不可能站在那个地方。于是他情不自禁地在月球上重复他在中学时就在抽空的玻璃管内看到的鸡毛铜钱实验（见图 4）。老师说：“航天员深刻地知道，虽然仅靠伽利略的落体定律还不能登月，但没有以伽利略落体定律为代表的科学基础，人类社会是不会有今天辉煌的科学技术成就的。物理学是所有现代技术的基础，也是其他自然科学（如化学、生命科学）的基础。同学们今天学习物理学，主要不是马上去用它，而是为将来掌握高科技打好基础。学物理就得从根上学起，从伽利略的加速度概念和落体定律开始。”

孩子们又活跃起来，热切希望跟老师学好物理课。



图 4 真空玻璃管内的鸡毛、铜钱同时下落。

目 录

物理学与人类文明	1	
第一章 运动的描述	8	
1 质点 参考系和坐标系	9	
2 时间和位移	12	
3 运动快慢的描述——速度	15	
4 实验：用打点计时器测速度	19	
5 速度变化快慢的描述——加速度	25	
第二章 匀变速直线运动的研究	30	
1 实验：探究小车速度随时间变化的规律	31	
2 匀变速直线运动的速度与时间的关系	34	
3 匀变速直线运动的位移与时间的关系	37	
4 匀变速直线运动的位移与速度的关系	41	
5 自由落体运动	42	
6 伽利略对自由落体运动的研究	45	
第三章 相互作用	50	
1 重力 基本相互作用	51	
2 弹力	54	
3 摩擦力	57	
4 力的合成	61	
5 力的分解	64	
第四章 牛顿运动定律	67	
1 牛顿第一定律	68	
2 实验：探究加速度与力、质量的关系	71	
3 牛顿第二定律	74	
4 力学单位制	77	
5 牛顿第三定律	80	
6 用牛顿运动定律解决问题（一）	83	
7 用牛顿运动定律解决问题（二）	85	
学生实验	90	
课题研究	98	
课外读物	102	

判天地之美，析万物之理。

——庄子①

物理学与人类文明

在初中，大家已经学习了一些物理知识和科学方法。进入高中之后，你们将会见识更为丰富多彩的物理现象，学到更为深刻的物理知识，进一步领悟科学的研究方法，增进对科学的感情，受到科学精神的陶冶。

现在，让我们在新的高度上概要了解一下，物理学研究哪些问题，它与其他科学和技术的关系，以及它对人类文明所起的作用。

物理学

物理学是一门自然科学。它起始于伽利略和牛顿的年代。经过三个多世纪的发展，它已经成为一门有众多分支的、令人尊敬和热爱的基础科学。

在远到宇宙深处，近至咫尺之间，大到广袤苍穹，小到微观粒子的浩瀚而又精细的时空中，物理学研究物质存在的基本形式，以及它们的性质和运动规律。物理学还研究物质的内部结构，在不同层次上认识物质的各种组成部分及其相互作用，以及它们运动和转化的规律。因此，说物理学是关于“万物之理”的学问并不为过。

物理学是一门实验科学，也是一门崇尚理性、重视逻辑推理的科学。由于自然界并不自动地展现其背后的本质、规律和内在联系，所以物理学又是极富洞察力和想像力的科学。在物理学研究中形成的基本概念和理论、基本实验方法和精密测试技术，已经越来越广泛地应用于其他学科，进而极大地丰富了人类对物质世界的认识，极大地推动了科学技术的创新和革命，极大地促进了物质生产的繁荣与人类文明的进步。



图 0-1 “长征二号” F型火箭
载着神舟号载人航天器直入云霄。物理学的基本理论是
空间技术的基础。

① 庄子(名周，约前369—前286)，战国时期杰出的思想家，对中国古代哲学的发展具有重要影响。

物理学与其他科学技术

物理学的发展，促进了技术的进步，引发了一次又一次产业革命。现代物理学更是成为高新科技的基础。通过图 0-1 到图 0-8 展示的内容可以窥见一斑。



图 0-2 电视机显像管的剖面图

带电粒子在电磁场中的运动规律在科学技术的许多领域都有重大意义。电子显微镜、电视显像管、磁控管、粒子加速器等都与它密切相关。



图 0-4 半导体芯片的照片

20世纪初相对论和量子力学的建立，是物理学史上惊天动地的革命。由此诞生的近代物理学以雷霆万钧之势将世界带入高科技时代。组成物质的微粒服从量子规律，因此，半导体芯片等产业离不开量子力学的理论支撑。可以说，没有量子力学就没有现代技术，也就没有现代化的生活。



图 0-3 患肿瘤的病人在接受放射治疗

原子核物理学的进展，使人类直接利用射线与核能成为现实。

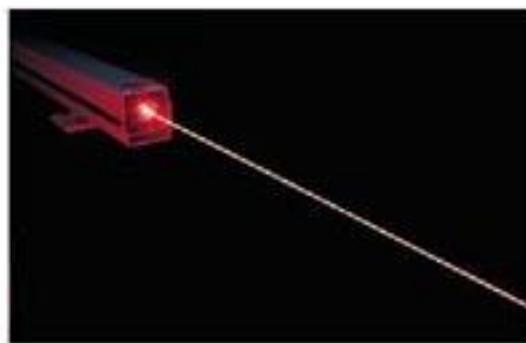
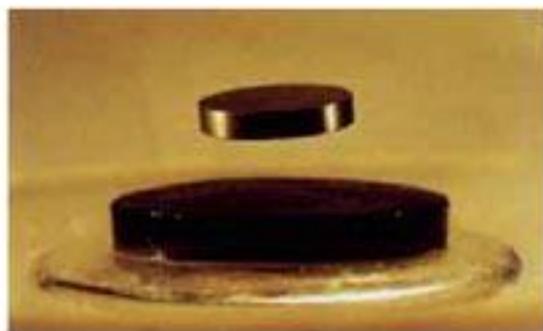


图 0-5 光彩夺目的激光束

20世纪60年代初，激光器诞生。激光物理的进展为激光在制造业、医疗技术和国防工业中的应用打开了大门。

图 0-6 超导磁悬浮照片。图中上面是用超强永磁体制成的圆片，下面是烧制的高温超导体。



当温度低于超导转变点时，超导体具有完全抗磁性，下方的超导体如同一块和上方的永磁体同极相对的磁铁一样，使永磁体片飘浮起来。20世纪80年代，高温超导的研究取得重大突破，为超导的实际应用开辟了道路。

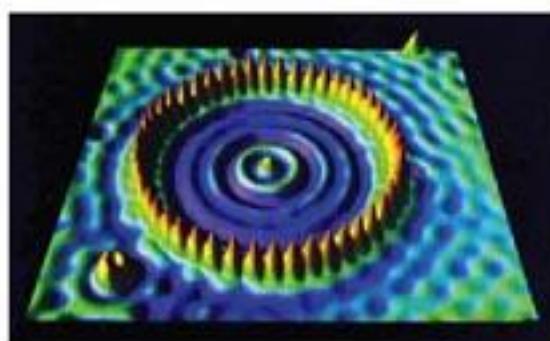


图 0-7 量子围栏。它是用扫描隧道显微镜把 48 个 Fe 原子搬到 Cu 表面上构成的。

20世纪 90 年代发展起来的纳米科技，使人们可以按自己的需要去设计并重新排列原子或原子团，使其具有人们希望的特性。这使人类在材料科学的研究中迈出了极其重要的一步。

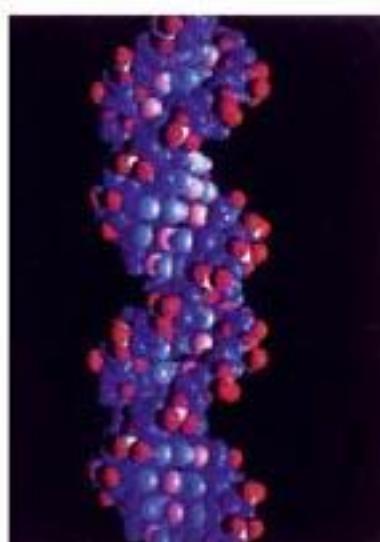
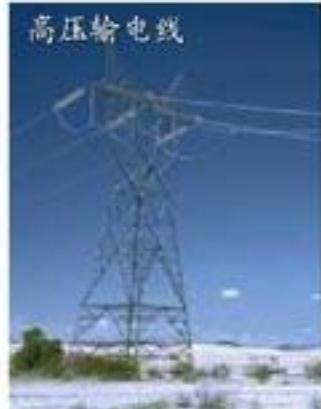


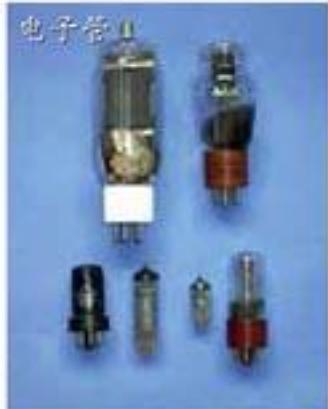
图 0-8 DNA 的双螺旋结构模型

物理学与社会进步

物理学的发展孕育了技术的革新，促进了物质生产的繁荣，改变了人类的生产生活方式，推动了社会的进步。图 0-9 到图 0-11 表示这一进程的几个重大事件。



高压输电线



电子管



集成电路



图 0-9 第一辆蒸汽机车(模型)

19世纪后半叶，在电磁学研究的基础上发展起来的电力工业，给生产和生活带来深刻的影响，使人类社会进入了电气时代。

图 0-10 我们生活在电气化的时代



图 0-11 信息时代

20世纪70年代，微观物理方面的重大突破开创了微电子工业，从而触发了第三次产业革命。世界开始进入以电子计算机应用为特征的信息时代。

物理学与思维观念

物理学极大地丰富了人类对物质世界的认识，也改变和扩展着人类的思维方式。物理学的每一个重大进展，都是人类思维观念进步的伟大阶梯。图0-12到图0-14反映了这一阶梯的几个台阶。



图 0-12 甲 古人心中的“宇宙”

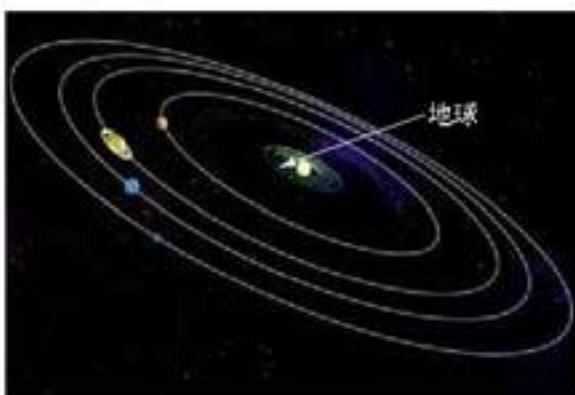


图 0-12 乙 16世纪，人们认识到地球和行星都在绕太阳运动。



图 0-12 丙 现代天文学家已经观测到距我们约140亿光年的天体

在人类文明的初期，人们认为大地是一个大扁盘，物理学的发展使人类对大地乃至宇宙的认识发生了翻天覆地的变化。从“天圆地方”到“地心说”；从“地心说”到“日心说”；从太阳系到河外星系；从静态的宇宙到膨胀的宇宙；从“盘古开天地”到“大爆炸”的宇宙演化论……



图 0-13 甲 哈雷彗星和它的公转轨道。公元前 613 年至公元 1910 年，中国有它 31 次回归的记录。1705 年，英国天文学家哈雷根据牛顿的万有引力定律正确地预言了它的回归。



图 0-13 乙
哈雷彗星

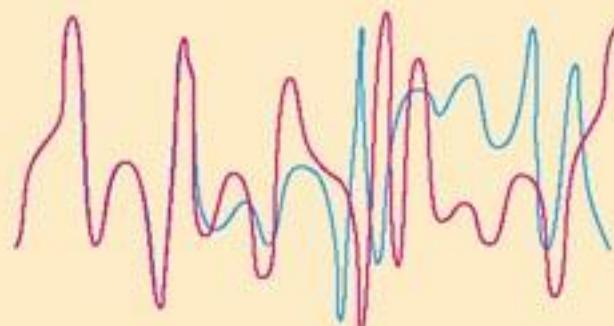


图 0-13 丙 单变量数值仿真。
洛伦兹^①将仅仅相差 0.000 1 的两个初始条件输入一个数学方程，计算得出的两条曲线不久就分道扬镳，南辕北辙。真是“差之毫厘，谬以千里”。

在牛顿力学建立后，人们能精确地预言哈雷彗星每 76 年回归地球一次。这意味着，已知受力情况和初始条件——物体的位置和速度，就可以求出以后任何时刻物体的位置和速度。由此，人们形成了“机械决定论”的思维方式。很自然地，人们梦想对天气也能做同样的预报。20 世纪 60 年代初，美国气象学家洛伦兹研究了服从三个含有非线性项方程的气象模型系统，揭示了复杂系统的行为对微小初值差异的敏感依赖性，从而断言长期天气预报不可能实现。为此，他提出了“一只蝴蝶在巴西扇动翅膀，有可能在美国得克萨斯引起一场龙卷风”的说法，被称为“蝴蝶效应”。这就动摇了长期在人们头脑中占主导地位的“机械决定论”的思维方式。

^① 洛伦兹(Edward N. Lorenz)，美国麻省理工学院的气象学家。他于 1960 年发现，一个复杂系统初始条件的微小差异可能使结果产生巨大偏差。

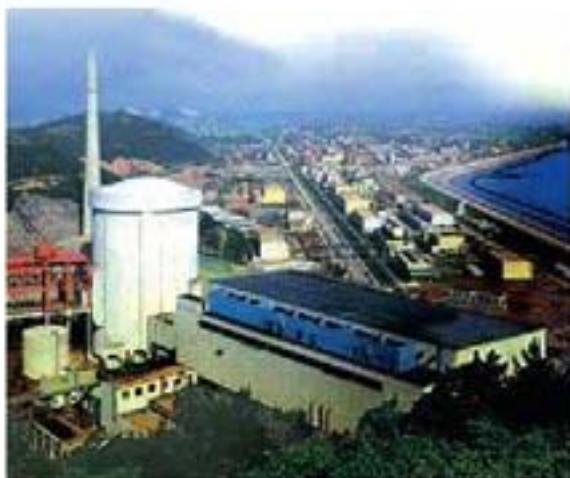


图 0-14 我国秦山核电站

科学活动是人类认识自然的活动，现代技术已经与科学活动密不可分了。科学技术方面的突破，对于社会发展会起到至关重要的作用。正是科学成果在技术上的应用，才创造了我们今天的物质文明，然而事实表明，技术是一把“双刃剑”。当人类合理而明智地利用技术时，它给人类带来许多恩惠；但是，如果利用不当，甚至滥用，就会给人类带来诸如生态失衡、资源枯竭等问题。人们有责任避免技术的滥用，既要大力发展和应用先进的技术，还必须细致分析技术的正、负面影响，积极开展技术评价和技术预见工作，让技术更好地服务于人类。

物理学的未来

19世纪下半叶，以经典力学、热力学、统计物理学和经典电动力学为主要内容的物理学，几乎能解释当时已知的所有物理现象。因此，当20世纪第一个春天来临之际，久负盛名的英国物理学家、被英王授予“开尔文勋爵”的威廉·汤姆孙在《新春献词》的演说中，踌躇满志地宣告：“科学大厦已经基本建成……后辈物理学家只需做一些零碎的修补工作就行了。”但话音刚落，他的预言就被一个接一个的重大发现所粉碎。

从表0-1中可以看出，在20世纪，物理学捷报频传，重大发现此伏彼起，从来没有停止过。

表 0-1 20世纪物理学重大发现举例

年 代	重大发现和与物理学相关的重大技术进步
1900~1909	阴极射线，黑体辐射理论，狭义相对论，光电效应
1910~1919	晶体的X射线衍射理论及实验，超导现象，广义相对论，威尔逊云室
1920~1929	量子力学，康普顿效应，晶体电子衍射
1930~1939	发现中子、正电子和宇宙射线，产生人工放射性元素，核磁共振理论
1940~1949	半导体及晶体管，发现介子，氢光谱精细结构
1950~1959	弱相互作用下宇称不守恒，发现反质子，穆斯堡尔效应
1960~1969	激光器，超导体的隧道效应，宇宙微波背景辐射
1970~1979	发现J/ψ粒子和τ轻子，弱电统一理论，非线性物理
1980~1989	发现W [±] 和Z ⁰ 粒子，扫描隧道显微镜，高温超导材料，超弦与大统一理论
1990~1999	介观物理理论及器件，发现C ₆₀ 及其家族，纳米材料与纳米结构

那么，21世纪又会怎样呢？还会有重要的发现吗？

著名法国物理学家、诺贝尔奖获得者德布罗意在《物理学的未来》一文中说：

我们的知识越是发展，自然就越是以其多种表现证明它拥有无尽的财富；甚至在很先进的科学领域，如物理学，我们也没有理由认为我们已经“耗尽”了自然财富，或者认为我们已经接近完整地掌握了自然界的全部财富。

事实正是这样，当前还有许多困扰物理学的难题。例如，在物质结构理论中，认为“夸克”构成了质子、中子等强子，但是，夸克为什么不能单独存在？寻找传递强相互作用的胶子的实验能否得出预期的结果？如何将量子力学和广义相对论结合起来，以解释宇宙的起源和演化？此外，自然界中最常见的运动状态，往往既不是完全确定的，也不是完全随机的，而是介于二者之间，但为理解这类现象的混沌理论还远未成熟……所有这些都有待人们去探索。

综观世界科学技术发展史，许多科学家的重要发现和发明，都产生于风华正茂、思想敏捷的青年时期，这是一条普遍性的规律。哥白尼提出日心说时是38岁；牛顿和莱布尼茨发明微积分时分别是22岁和28岁；爱迪生发明留声机时是29岁，发明电灯时是31岁；贝尔发明电话时是29岁；居里夫人发现镭、钋、钋三种元素的放射性时是31岁；爱因斯坦提出狭义相对论时是26岁，提出广义相对论时是37岁；李政道和杨振宁指出弱相互作用下宇称不守恒时分别为30岁和34岁；沃森和克里克提出DNA分子结构的双螺旋模型时分别是25岁和37岁……

尽管年轻人的知识不如老年人丰富，但却很少保守思想，最具创新精神。虽然多数同学今后未必进行基础科学的研究，但是，不论从事什么职业，高中物理学习中树立的创新精神，学到的科学方法，积累的科学知识，将会使你终身受益。

“江山代有人才出，各领风骚数百年。”同学们，努力啊！

不了解运动，就不了解自然。

——亚里士多德^①

第一章 运动的描述



在我们周围，到处可以看到物体在运动：汽车在公路上飞驰，江水在咆哮着奔向远方，鸟儿在飞翔，树叶在摇动……连我们脚下的地球，也在不停地自转、公转。物体的空间位置随时间的变化，是自然界中最简单、最基本的运动形态，称为机械运动（mechanical motion）。在物理学中，研究物体做机械运动规律的分支叫做力学（mechanics）。人们在力学的研究中，不仅了解了物体做机械运动的规律，而且还创造了科学的基本方法。所以霍尔顿（G. Holton）说：“无论从逻辑上还是从历史上讲，力学都是物理学的基础，也是物理学及其他科学的研究的典范……力学之于物理学如同骨骼之于人体。”在这一章，我们研究怎样描述物体的运动。

^① 亚里士多德（Aristotle，前384—前322），古希腊杰出的哲学家、科学家，形式逻辑学的创始人。在物理学方面，亚里士多德认为自然中一切对象都在不断地运动和变化，空间和位置是一切种类运动的普遍条件。他首先给出了时间的定义，并认为既然运动是永恒的，那么时间也同样是永恒的。

1

质点 参考系和坐标系

对于机械运动，你一定十分熟悉了。怎样描述机械运动呢？不同的人有不同的视角。诗人可以用“气势磅礴”这样的词语描述大河中的水流，用“矫捷如燕”描述滑冰运动员轻盈的舞姿；画家可以用汽车后面的几个线条表示“风”，来描述车辆的飞驰。科学家应该怎样描述物体的机械运动？



图 1.1-1 画家用车后的几条直线表示汽车在很快地运动

物体和质点 雄鹰拍打着翅膀在空中翱翔，足球在绿茵场上飞滚……在这些司空见惯的现象中，雄鹰、足球都在做机械运动。但是，谁又能准确地描述其上各点的位置及其随时间的变化呢？雄鹰的身体在向前运动，但它的翅膀在向前运动的同时还在上下运动，足球在向前运动的同时还在滚动……可见要准确地描述物体的运动，并不是一件容易的事。

困难和麻烦出在哪里？稍加分析就可以知道，这是因为任何物体都有一定的大小和形状，物体各部分的运动情况一般说来并不一样。

你可能会想，要是物体都是一个个没有大小和形状的“点”的话，这些困难和麻烦不就自然地消失了吗？然而，如果自然界中的物体，包括我们每一个人，都是一些没有大小和形状的“点”，这样的世界岂不过于单调乏味了吗？

尽管这种想法与真实的自然界并不相符，但也不要因此而折断想像的翅膀。我们可以换一个角度，提出这样一个问题：在现实的自然界中，在某些情况下，根据所要研究问题的性质，是否可以忽略某些物体的大小和形状，而把它们看做“点”呢？让我们考察以下几种情况。

人类居住的地球在绕太阳公转，同时又在自转。因此，地球的各部分离太阳的远近在不断变化。但是，如果考虑到地球到太阳的距离长达 1.5×10^8 km，而地球的直径只有 1.3×10^4 km，还不到它与太阳距离的万分之一，那么，在研究地球公转的时候，由地球的大小而引起的地球上各部分的运动差异就可以忽略不计了。也就是说，研究地球公转时可以忽略地球的大小和形状而把它视为“点”。

一列火车在铁轨上行驶，它的发动机、传动机构及车轮的运动是很复杂的。但是当我们只关心列车整体的运动情况时，上述运动均可不予考虑，而用一个“点”的运动代替列车这个庞然大物的运动。



图 1.1-2 什么情况下火车可以视为一个点？

看来，在某些情况下，真的可以不考虑物体的大小和形状。这时，我们突出“物体具有质量”这一要素，把它简化为一个有质量的点，称为质点(**mass point**)。于是，对实际物体运动的描述，就转化成对质点运动的描述^①。

一个物体能否看做质点是有条件的。例如，在研究地球的公转时，地球的大小可以忽略；研究宇宙飞船在轨道上的运动时，飞船的大小也可以忽略。这时可以把地球、飞船看做质点。又如，在研究列车沿平直轨道的运动时，车厢各点的运动完全一样，可以用车上一点的运动代表火车的运动。这时也能把火车看做质点。

从这些例子可以看出，一个物体能否看成质点是由问题的性质决定的。在研究地球的自转和调整飞船的飞行姿态时，或是研究火车车轮的运动时，如果再把地球、飞船和火车当做质点，那就荒唐可笑了。

参考系 我们说房屋、树木是静止的，这大概是不会错的，但是，地球以外的人看到房屋、树木在随着地球一起运动。铁路边的人看到火车中的乘客在飞快离去，而乘客却认为自己是静止的，他甚至可以靠在坐椅上睡觉！为什么人们的看法会不一样？

自然界的一切物体都处于永恒的运动中，绝对静止的物体是不存在的。就此意义而言，我们说运动是绝对的。但是，描述某一个物体的位置及其随时间的变化，却又总是相对于其他物体而言的。这便是运动的相对性。

可见，要描述一个物体的运动，首先要选定某个其他物体做参考，观察物体相对于这个“其他物体”的位置是否随时间变化，以及怎样变化。这种用来做参考的物体称为参考系(**reference frame**)。

描述一个物体的运动时，参考系可以任意选择。但是，选择不同的参考系来观察同一物体的运动，其结果会有所不同。例如，在匀速飞行的飞机上，人们以飞机做参考系，看到从飞机上落下的重物几乎是沿直线竖直下落的，而地面上的人以地面做参考系，看到物体是沿着曲线下落的(图1.1-4)。

由于运动描述的相对性，凡是提到运动，都应该弄清楚它是相对哪个参考系而言的。参考系的选择是个重要的问题，选取得当，会使问题的研究变得简洁、方便。

在物理学中，突出问题的主要方面，忽略次要因素，建立理想化的“物理模型”，并将其作为研究对象，是经常采用的一种科学的研究方法。质点就是这种物理模型之一。



图1.1-3 车中的小孩是静止的还是在运动？



图1.1-4 选择不同的参考系来观察同一物体的运动，看到的现象会不一样。

^① 在高中物理必修课中，我们只研究那些能够简化为质点的物体的运动。因此今后不再区分“物体”和“质点”两个词。

坐标系 如果物体沿直线运动，为了定量描述物体的位置变化，可以以这条直线为 x 轴，在直线上规定原点、正方向和单位长度，建立直线坐标系。如图1.1-5所示，若某一物体运动到 A 点，此时它的位置坐标 $x_A = 3\text{ m}$ ，若它运动到 B 点，则此刻它的坐标 $x_B = -2\text{ m}$ 。



图1.1-5 直线坐标系

一般说来，为了定量地描述物体的位置及位置的变化，需要在参考系上建立适当的坐标系（coordinate system）。

说一说^①

对于在平面上运动的物体，例如冰场上的花样滑冰运动员，要描述他们的位置，你认为应该怎样建立坐标系？

科学漫步

全球卫星定位系统（GPS）



图1.1-6 这个GPS定位器此刻位于我国哪个城市的什么部位？从显示屏中你还能获得哪些信息？

我们在地图上看到的经纬线，实际上就是在地球表面建立的坐标系，地面任何一点的位置都可以用这点的坐标（也就是经度和纬度）来确定。

向空中发射几颗人造卫星，它们不停地向地面发射信号，表明自己此刻所处的位置。地面的接收器收到这些信号后进行分析，就显示出接收器自身所在地的坐标（经度、纬度）。

目前普及型GPS定位器可以做得很小，精确度能达到几米，价格也比较便宜，已经广泛应用在各种野外活动中。许多汽车上也安装了GPS定位系统。

我国独立自主研制的北斗导航卫星系统，目前正在建设中。

问题与练习

- 平常说的“一江春水向东流”“地球的公转”“钟表的时针在转动”“太阳东升西落”等等，分别是说什么物体相对什么参考系在运动？

^① 本书中，“说一说”和“做一做”栏目中的内容是扩展性的，不是基本教学内容。同学们可根据自己的条件在老师的指导下选学。

2. 将近 1000 年前，宋代诗人陈与义乘着小船在风和日丽的春日出游时曾经写了一首诗。在这首诗中，诗人艺术性地表达了他对运动相对性的理解。诗中描述了什么物体的运动？它是以什么物体为参考系的？你对诗人关于“榆堤”“云”“我”的运动与静止的说法有没有不同的认识？

3. 桌面离地面的高度是 0.8 m，坐标系原点定在桌面上，向下方向为坐标轴的正方向，如图 1.1-7 所示。通过测量，确定图中 A、B 的坐标。

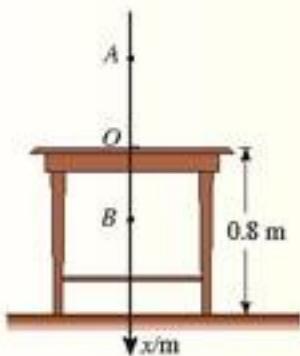


图 1.1-7 图中 A、B 的坐标各是多少？



2

时间和位移

为了描述质点的运动，我们还要对时刻和时间等这样一些耳熟能详的词语，有更为确切的认识。

时刻和时间间隔 时刻和时间间隔既有联系又有区别。我们说上午 8 时上课、8 时 45 分下课，这里的“8 时”“8 时 45 分”是这节课开始和结束的时刻，而这两个时刻之间的 45 分，则是两个时刻之间的时间间隔（图 1.2-1）。在表示时间的数轴上，时刻用点表示，时间间隔用线段表示。我们平时说的“时间”，有时指的是时刻，有时指的是时间间隔，要根据上下文认清它的含义。

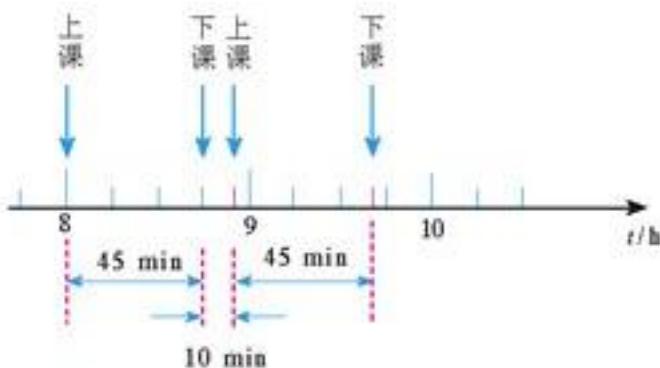


图 1.2-1 上午前两节课开始和结束的时刻及两节课和课间休息所持续的时间间隔

路程和位移 一个人从北京去重庆，可以选择不同的交通方式。既可以乘火车，也可以乘飞机，还可以先乘火车到武汉，然后乘轮船沿长江而上。显然，在这几种情况下，他所通过的路线，也就是他运动的轨迹是不一样的。我们在初中已经知道，路程(**path**)是物体运动轨迹的长度，可见他所经过的路程也不相同。但是，就位置的变动来说，无论使用什么交通工具、走过了怎样不同的路程，他总是从北京到达了西南方向直线距离约1 300 km的重庆，即位置的变动是相同的(图1.2-2)。

旅行时运动的方向在不断改变，旅行路程的长短并不涉及运动的方向。

一般说来，当物体从某一点A运动到另一点B时，尽管可以沿不同的轨迹、走过不同的路程，但位置的变动是相同的。在物理学中用一个叫做位移(**displacement**)的物理量来表示物体(质点)的位置变化。我们从初位置到末位置作一条有向线段，用这条有向线段表示位移，如图1.2-3中的AB。

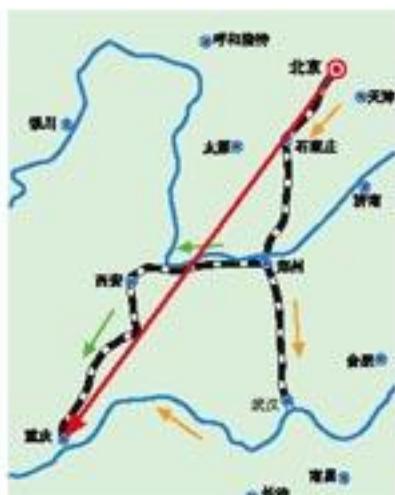


图 1.2-2 不论通过什么路线从北京到重庆，位置的变化都是一样的。

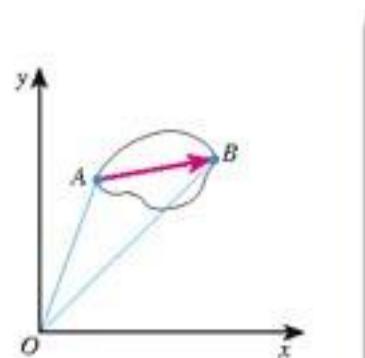


图 1.2-3 物体从A运动到B，不管沿着什么轨迹，它的位移都是一样的。这个位移可以用一条有方向(箭头)的线段AB表示。

矢量和标量 在物理学中，像位移这样的物理量叫做矢量(**vector**)，它既有大小又有方向；而温度、质量这些物理量叫做标量(**scalar**)，它们只有大小，没有方向。

矢量相加与标量相加遵从不同的法则^①。例如，一个袋子中原来有20 kg大米，又放入10 kg大米，那么现在大米的质量是30 kg。也就是说，两个标量相加遵从算术加法的法则。矢量相加的法则与此不同。我们考虑下面的问题。

思考与讨论

一位同学从操场中心A出发，向北走了40 m，到达C点，然后又向东走了30 m，到达B点。在纸上用有向线段表明他第一次、第二次的位移和两次行走的合位移(即代表他的位置变化的最后结果的位移)。

三个位移的大小各是多少？你能通过这个实例总结出矢量相加的法则吗？

^① 关于矢量相加的法则，第三章中还有更详细的讨论。

直线运动的位置和位移 在本章和后面两章中，我们主要研究直线运动。如图1.2-4，物体在时刻 t_1 处于“位置” x_1 ，在时刻 t_2 运动到“位置” x_2 。那么， $x_2 - x_1$ 就代表物体的“位移”，记为

$$\Delta x = x_2 - x_1$$

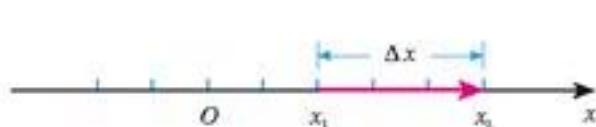


图 1.2-4 物体先后两个坐标 x_1 和 x_2 表示物体的位置，坐标的变化量 Δx 表示物体的位移。

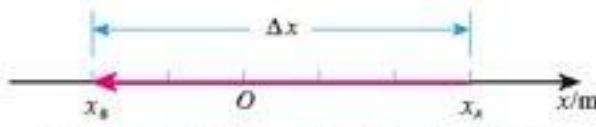


图 1.2-5 一个物体从A运动到B，初位置的坐标是 $x_A = 3\text{ m}$ ，末位置的坐标是 $x_B = -2\text{ m}$ ，它的坐标变化量 $\Delta x = ?$

问题与练习

1. 以下各种说法中，哪些指时间？哪些指时刻？

- A. 列车员说：“火车8点42分到站，停8分。”
- B. “您这么早就来啦，等了很久吧！”
- C. “前3秒”“最后3秒”“第3秒末”“第3秒内”。

2. 某市出租汽车的收费标准有1.20元/公里、1.60元/公里、2.00元/公里……其中的“公里”指的是路程还是位移？

3. 田径场跑道周长是400 m。

- (1)百米赛跑选用跑道的直道部分，运动员跑完全程的路程是多少？位移大小是多少？

- (2)在800 m跑比赛中，不同跑道的运动员跑完全程的路程相同吗？跑完全程的位移相同吗？请结合田径比赛的规则想一想。

4. 从高出地面3 m的位置竖直向上抛出一个小球，它上升5 m后回落，最后到达地面（图1.2-6）。分别以地面和抛出点为原点建立坐标系，方向均以向上为正，填写以下表格。

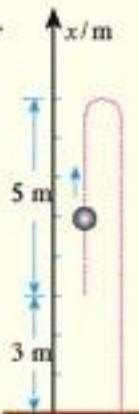


图 1.2-6 按照这个坐标系填表

坐标原点的设置	出发点的坐标	最高点的坐标	落地点的坐标	上升过程的位移	下落过程的位移	全过程的总位移
以地面为原点						
以抛出点为原点						

3

运动快慢的描述——速度

坐标与坐标的变化量 一辆汽车在沿平直公路运动，设想我们以公路为 x 轴建立直线坐标系，时刻 t_1 汽车处于 A 点，坐标是 $x_1 = 10\text{ m}$ ，一段时间之后，时刻 t_2 到达 B 点，坐标是 $x_2 = 30\text{ m}$ （图 1.3-1）。 $x_2 - x_1$ 就是这辆汽车位置坐标的变化量，可以用符号“ Δx ”表示。

$$\begin{aligned}\Delta x &= x_2 - x_1 \\ &= 30\text{ m} - 10\text{ m} \\ &= 20\text{ m}\end{aligned}$$

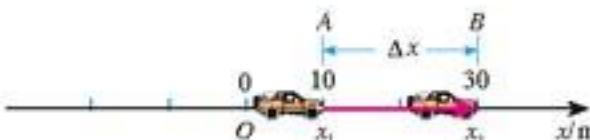


图 1.3-1 注意区别坐标和坐标的变化量

从这个例子可以看出，计算坐标变化量时，应该用后来的坐标减去原来的坐标。

我们在本章只讨论物体沿着直线的运动，并以这条直线为 x 坐标轴，这样，物体的位移就可以通过坐标的变化量来表示。 Δx 的大小表示位移的大小， Δx 的正负表示位移的方向。同样，可以用 Δt 表示时间的变化量

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

思考与讨论

- 上述汽车（质点）在向哪个方向运动？
- 如果上述汽车沿 x 轴向另外一个方向运动，位移 Δx 是正值还是负值？

速度 不同的运动，位置变化的快慢往往不同，也就是说，运动的快慢不同。要比较物体运动的快慢，可以有两种方法。一种是相同时间内，比较物体运动位移的大小，位移大，运动得快。例如，自行车在 30 min 内行驶 8 km，汽车在相同时间内行驶 50 km，汽车比自行车快。另一种是位移相同，比较所用时间的长短，时间短的，运动得快。例如，百米赛跑，目前男子百米世界记录是 9.78 s，而某位同学跑完 100 m 用了 13.5 s，这位同学跑得慢些。

那么，怎样比较汽车与百米赛跑运动员的快慢呢？这就要找出统一的比较标准。物理学中用位移与发生这个位移所用时间的比值表示物体运动的快慢，这就是速度（velocity），通常用字母 v 代表。如果在时间 Δt 内物体的位移是 Δx ，它的速度就可以表示为

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (1)$$

在这里，我们用两个物理量（位移和时间）的比值定义了一个新的物理量（速度），它的物理意义与原来的两个物理量完全不同。

今后还会多次遇到用比值定义的物理量。

在国际单位制中，速度的单位是米每秒，符号是m/s或 $m \cdot s^{-1}$ 。常用的单位还有千米每时(km/h或 $km \cdot h^{-1}$)、厘米每秒(cm/s或 $cm \cdot s^{-1}$)等。

速度也是矢量，既有大小，又有方向。速度的大小在数值上等于单位时间内物体位移的大小，速度的方向就是物体运动的方向。

平均速度和瞬时速度 一般说来，物体在某一时间间隔内，运动的快慢不一定是时时一样的，所以由(1)式求得的速度，表示的只是物体在时间间隔 Δt 内的平均快慢程度，称为平均速度(**average velocity**)。

显然，平均速度只能粗略地描述运动的快慢。为了使描述精确些，可以把 Δt 取得小一些。物体在从 t 到 $t + \Delta t$ 这样一个较小的时间间隔内，运动快慢的差异也就小一些。 Δt 越小，运动的描述就越精确。如果 Δt 非常非常小，就可以认为 $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ 表示的是物体在时刻 t 的速度，这个速度叫做瞬时速度(**instantaneous velocity**)。我们在初中学到的匀速直线运动，就是瞬时速度保持不变的运动。在这种运动中，平均速度与瞬时速度相等。

在以后的叙述中，“速度”一词有时指平均速度，有时指瞬时速度，要根据上下文判断。

与所有矢量一样，速度既有大小又有方向。瞬时速度的大小通常叫做速率(**speed**)。汽车速度计不能显示车辆运动的方向，它的读数实际是汽车的速率。日常生活和物理学中说到的“速度”，有时是指速率，要根据上下文判断。

做一做^①

设计方法：测量自行车在不同情况下行驶(如长距离和短距离)时的速度，测量蚊香燃烧的速度。对测量结果的可靠性做出评估。



图1.3-2 汽车速度计显示的速度可以看做瞬时速度

常见物体的速度 $v/(m \cdot s^{-1})$

光在真空中传播	3.0×10^8	军用喷气式飞机	约 600
地球公转	3.0×10^4	大型客机	约 300
人造卫星或飞船(近地圆轨道)	约 7×10^3	火车(快车)	可达 60
洲际弹道导弹	约 5×10^3	高速公路上的汽车	最快 33
远程炮弹	约 2×10^3	野兔	约 18
普通炮弹	约 1×10^3	远洋轮船	8~17
步枪子弹	约 900	赛马	约 15
巡航导弹	约 800		

^① 本书中，“做一做”和“说一说”栏目中的内容是扩展性的，不是基本教学内容。同学们可根据自己的条件在老师的指导下选学。

说一说

著名物理学家、诺贝尔奖获得者费恩曼 (R. P. Feynman, 1918—1988) 曾讲过这样一则笑话。

一位女士由于驾车超速而被警察拦住。警察走过来对她说：“太太，您刚才的车速是60英里每小时！”(1英里=1.609千米)。这位女士反驳说：“不可能的！我才开了7分钟，还不到一个小时，怎么可能走了60英里呢？”“太太，我的意思是：如果您继续像刚才那样开车，在下一个小时里您将驶过60英里。”“这也是不可能的。我只要再行驶10英里就到家了，根本不需要再开过60英里的路程。”

通过这个笑话，你对“用比值定义物理量”是否有了更深刻的认识？



图13-3 她没有认清哪个科学概念？

STS

速度与现代社会

人类自发明木轮车直到制成时速500 km/h的磁浮列车，以及超音速飞机，为了获得高速交通工具，奋斗了几千年。从某种意义上说，在人类发明的各种机械中，交通工具最深刻地改变了我们的生活。我们所用的物品，几乎没有一件不是由铁路或公路运输而来。不难想像，如果没有了火车和汽车，现代社会将会瘫痪。



公元前2000年印度河谷哈拉巴人所用的车辆的泥塑模型



图13-4 北京旧城地图

从世界各国的城市发展史上看，大城市规模的大小与车速的提高密切相关。大城市的直径一般就是当时最快的交通工具在1 h内行走的距离。以北京为例，清朝末年北京的“内城”大约是一个边长5 km的正方形，马车的速度大约就是5 km/h，今天，有了发达的公路系统，有了快速轨道交通，汽车、城铁的速度大约是几十千米每时，北京市城区的直径也扩大到了几十千米。

城市中的车速不能无限提高，城市的规模也就不能无限扩大。“摊大饼”式的城市规划可能带来以交通问题为主的许多矛盾。目前许多人认为，合理的发展模式是建立中心市区与卫星城组成的城市群。

运兵工具和武器运载工具的发展改变了战争的面貌。现代战争的“战场”已经与过去的意义完全不同。相距几千千米、几万千米的敌对力量之间很短时间内就能爆发大规模战争。空中打击的力量大大加强，过去的一些战术方法已经不再适用。由于车辆的使用，部队的机动性大大提高。

速战速决的战争理论有所发展……

交通网络的形成大大缩短了不同地域的时空距离，促进了国与国、民族与民族之间的物资交流和人员往来。贸易上的互补，可以优化物质资源和人力资源的配置，促进世界经济的发展。不同文化的交融进一步促进了社会的进步……

然而，大量汽车带来了交通堵塞、频繁的事故、能源的过度消耗、尾气与噪声污染等一系列社会问题。这些不仅妨碍了人们的工作和生活，而且制约着社会经济的进一步发展。

如何处理这些矛盾，一直是人们努力探索的课题。随着可持续发展战略的实施，人们对发展交通的意义有了新的认识，采取了许多有效的措施。例如，研制各种绿色汽车（使用压缩天然气或液化石油气的汽车、太阳能车、电动车……），对现有汽车的使用在时间和道路上进行限制，根据城市发展地上、地下快速的立体化交通和轨道交通……

讨论：交通工具的速度是不是越快越好？

图1.3-5 协和式客机。由英法两国共同研制，1976年投入运营。它能在20 000 m的高空以2倍声速飞行，是唯一的超音速客机。但是，它的能耗太大，飞行和维护的成本太高，加之起飞和降落时的巨大噪声，以及安全隐患，所有协和式飞机于2003年10月已全部退出运营。近30年的“协和史”引发人们深思：有没有必要无限制地追求“高速度”？



问题与练习

1. 光在真空中传播的速度为 3.0×10^8 m/s。

(1) 1光年(光在一年中传播的距离)相当于多少米？

(2)除太阳外，最靠近地球的恒星是半人马座中的比邻星(很遗憾，在北半球看不到)，它离我们 4.0×10^{13} km，它发出的光要多长时间才能到达地球？

2. 汽车从制动到停下来共用了5 s。这段时间内，汽车每1 s前进的距离分别是9 m、7 m、5 m、3 m、1 m。

(1)求汽车前1 s、前2 s、前3 s、前4 s和全程的平均速度。这五个平均速度中哪一个最接近汽车关闭油门时的瞬时

T107		车次		T108	
北京西 ↓ 深圳	自 北京西 起公里	站名		北京西 ↑ 深圳	
20:30	0	北京西		13:35	
0:24	350	聊城		36	
32				9:28	
1:53	528	菏泽		07	
55				8:05	
4:26	853	阜阳		40	
34				5:32	
...	

图1.3-6 列车时刻表

速度？它比这个瞬时速度略大些还是略小些？

(2) 汽车运动的最后1 s的平均速度是多少？汽车的末速度是多少？

3. 图1.3-6是京九铁路北京西至深圳某一车次运行的时刻表，设火车在每个车站都能准时到达，准点开出。

(1) T107次列车由北京西站开出直至到达聊城站，运行的平均速度是多少？

(2) T107次列车由聊城站开出直至到达菏泽站，运行的平均速度是多少？

(3) T108次列车在9时30分的瞬时速度是多少？

4

实验：用打点计时器测速度

电磁打点计时器 电磁打点计时器是一种计时仪器。它使用交流电源，由学生电源供电，工作电压在6 V以下。当电源的频率是50 Hz时，它每隔0.02 s打一个点。

电磁打点计时器的构造如图1.4-1所示。通电以前，把纸带穿过限位孔，再把套在轴上的复写纸片压在纸带的上面。接通电源后^①，在线圈和永久磁铁的作用下，振片便振动起来，带动其上的振针上下振动。这时，如果纸带运动，振针就通过复写纸在纸带上留下一行小点。

如果把纸带跟运动的物体连在一起，即由物体带动纸带一起运动，纸带上各点之间的距离就表示相应时间间隔中物体的位移。由这些点的位置，我们可以了解物体的运动情况。



图1.4-1 电磁打点计时器

电火花计时器 电火花计时器的计时原理与电磁打点计时器相同，不过在纸带上打点的不是振针和复写纸，而是电火花和墨粉。

使用时，墨粉纸盘套在纸盘轴上，把纸带穿过限位孔。当接通电源、按下脉冲输出开关时，计时器发出的脉冲电流经放电针、墨粉纸盘到纸盘轴，产生火花放电（图1.4-2），于是在运动的纸带上就打出一行点迹。当电源频率是50 Hz时，每隔0.02 s打一次点。



图1.4-2 电火花计时器

^① 打点计时器只能连续工作很短时间，打点之后要立即关闭电源。

这种计时器工作时，纸带运动时受到的阻力比较小，实验误差也就比较小。

电磁打点计时器和电火花计时器打点的时间间隔都是 0.02 s，所以今后的叙述中不再区分，统称打点计时器。

练习使用打点计时器 打点计时器是高中物理实验中常用的仪器，用它进行实验之前应该事先熟悉它的使用方法。

1. 了解打点计时器的结构，然后把它固定在桌子上。
2. 把纸带装好。
3. 启动电源，用手水平地拉动纸带，纸带上就打出一行小点。随后立即关闭电源。
4. 取下纸带，从能够看清的某个点开始，往后数出若干个点。如果数出 n 个点，这些点划分出来的间隔数是多少？由此计算出纸带从第一个点到第 n 个点的运动时间。
5. 用刻度尺测量出第一个点到第 n 个点的距离。

在进行实际测量之前，自己设计一个表格，用来记录以上测量值。

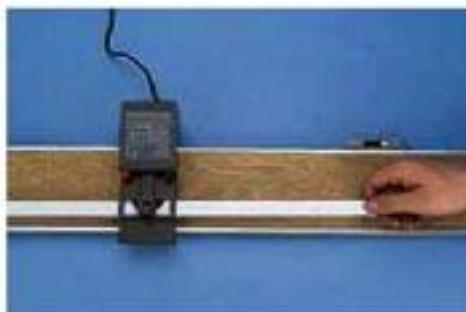


图 1.4-3 用打点计时器
测量手拉纸带的速度

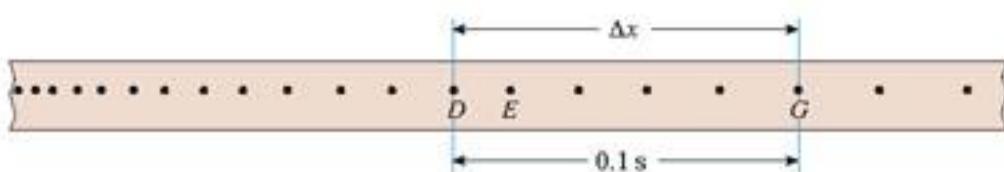


图 1.4-4 这是按实际大小画出的一条纸带。在打出 D 、 G 这两个点的时间间隔中，纸带运动的平均速度是多少？

思考与讨论

怎样根据纸带上的点迹计算纸带的平均速度？

如果纸带上的点迹分布不均匀，那么，点迹密集的地方表示运动的速度较大还是较小？

用打点计时器测量瞬时速度 在图 1.4-4 的例子中，测量后计算得出的是 D 、 G 两点间的平均速度。如果我们不要求很精确，用这个平均速度粗略地代表 E 点的瞬时速度，也未尝不可。然而，如果把包含 E 点在内的间隔取得小一些，例如图 1.4-5 中的 DF ，那么根据 D 、 F 两点间的位移 Δx 和时间 Δt ，算出纸带在这两点间的平均速度 $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ ，用这个平均速度代表纸带经过 E 点时的瞬时速度，就会更准确。

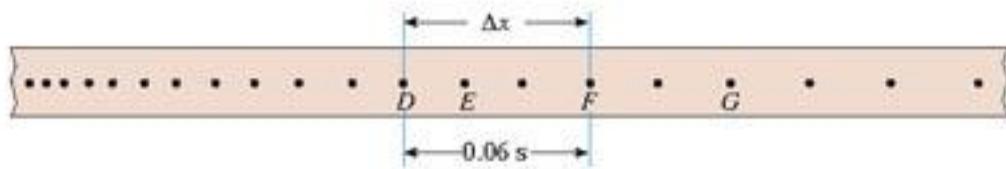


图1.4-5 $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ 可以大致表示E点的瞬时速度。D、F两点离E越近，算出的平均速度越接近E点的瞬时速度。然而D、F两点距离过小则测量误差增大。应该根据实际情况选取这两个点。

下面测量你自己用手拉纸带的速度。为了描述速度变化的情况，请你根据纸带上的点，每隔0.1 s(或更短些的时间)计算一次速度。先在纸带上用数字0,1,2,...,5标出这些计数点，然后仿照图1.4-5的办法，测量包含这个点的一段位移 Δx ，记录在表1中，同时记录对应的时间 Δt 。

表1 手拉纸带在几段时间中的位移和平均速度

位置	0	1	2	3	4	5
$\Delta x/m$						
$\Delta t/s$						
$v/(m \cdot s^{-1})$						

上表中算出的 v 是0,1,2,...,5各点附近的平均速度，把它们当做计时器打下这些点时的瞬时速度，抄入表2。点0作为计时的开始， $t=0$ 。

从器材上直接读取的数据是原始数据。原始数据是宝贵的实验资料，要整齐地记录、妥善保存。

表2 手拉纸带在几个时刻的瞬时速度

位置	0	1	2	3	4	5
t/s	0					
$v/(m \cdot s^{-1})$						

通过表2可以看出手拉纸带运动速度的变化情况。

用图象表示速度 许多变化过程，如气温的变化、股票的跌涨、传染病发病人数的增减……可以用图象展示，目的是更直观地反映变化的规律。图象是表示变化规律的好方法。

物体的运动也可以用图象描述。以速度 v 为纵轴、时间 t 为横轴在方格纸上建立直角坐标系，根据表2中的 v 、 t 数据，在坐标系中描点。图1.4-6甲是根据某同学的实测数据所描的点，从这些点的走向能够大致看出纸带速度的变化规律。为了更清晰些，可以用折线把这

些点连起来(图1.4-6乙)。然而,速度的实际变化总是比较平滑的,所以,如果用一条平滑曲线来“拟合”坐标系中描出的点,曲线反映的规律会与实际情况更接近(图1.4-6丙)。

如图1.4-6丙那样描述速度 v 与时间 t 关系的图象,叫做速度—时间图象或 $v-t$ 图象($v-t$ graph)。

看一看你得到的 $v-t$ 图象,你的手的运动速度是怎样变化的?

在作曲线“拟合”坐标系中的点时,要注意“顺势”“平滑”。如果有有些点难以落在曲线上,应该使它们大致均匀地分布在曲线两侧。为了使拟合曲线能较好地反映客观规律,根据实验数据作出的点不能太少,至少要有5、6个。

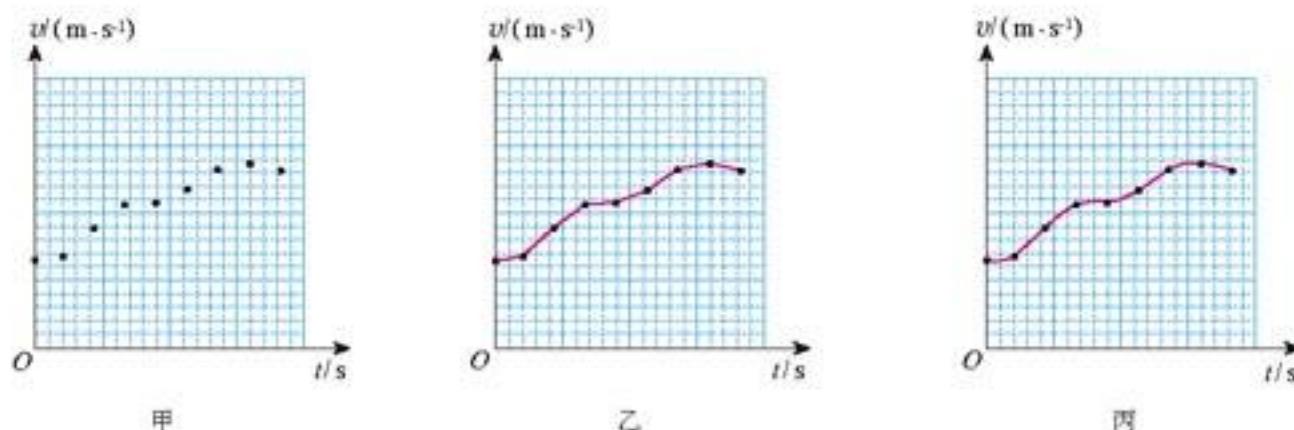


图1.4-6 某同学手拉纸带运动的 $v-t$ 图象

说一说

百米赛跑时运动员的速度从始至终不变吗?如果有变化,你估计是怎样变化的?某位运动员百米赛跑的成绩是10.57 s,按照你的估计画出他在这段时间内的 $v-t$ 图象的草图。

如果是没有受过训练的同学跑百米,他的 $v-t$ 图象的形状可能有什么不同?

做一做

借助传感器用计算机测速度

随着信息技术的发展,中学物理的实验手段也在不断进步。用“运动传感器”把物体在木板上或导轨上运动的位移、时间转换成电信号,经过计算机的运算,可以立刻在荧光屏上显示物体运动的速度,甚至能在几秒内自动绘出运动的 $v-t$ 图象。这样,同学们就可以减少重复性操作,用更多的时间和精力对物理过程进行分析。

图1.4-7是一种运动传感器的原理图。这个系统由A、B两个小盒子组成,A盒装有红外线发射器和超声波发射

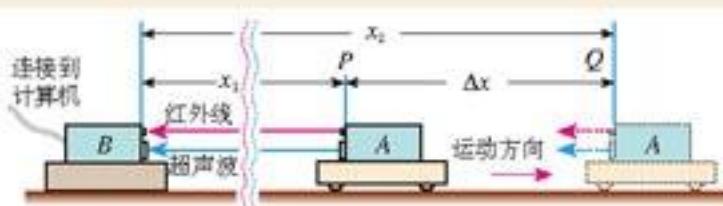


图1.4-7 用传感器测速度的原理

器，*B*盒装有红外线接收器和超声波接收器。*A*盒固定在被测的运动物体上，*B*盒固定在桌面上或滑轨上。测量时*A*向*B*同时发射一个红外线脉冲和一个超声波脉冲（即持续时间很短的一束红外线和一束超声波），*B*盒收到红外线脉冲时，开始计时，收到超声波脉冲时计时停止。根据两者的时差和空气中的声速，计算机自动算出*A*与*B*的距离（红外线的传播时间可以忽略）。雷雨时可以根据闪电与雷声的时差来计算雷电发生地的距离，与这里计算*A*、*B*间距离的道理是一样的。

经过短暂的时间 Δt 后，传感器和计算机系统自动进行第二次测量，得到物体的新位置。算出两个位置差，即物体运动的位移 Δx ，系统按照 $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ 算出速度，显示在荧光屏上。所有这些操作都可在不到1 s 的时间内自动完成。



图 1.4-8 实验室用来测速度的运动传感器

还有另外一种运动传感器。如图 1.4-9，这个系统只有一个不动的小盒子*B*。工作时小盒*B*向被测物体发出短暂的超声波脉冲，脉冲被运动物体反射后又被*B*盒接收。根据发射与接收超声波脉冲的时间差可以得到*B*盒与运动物体的距离。这个道理与雷达测距的道理一样。

有条件的学校应该试一试。

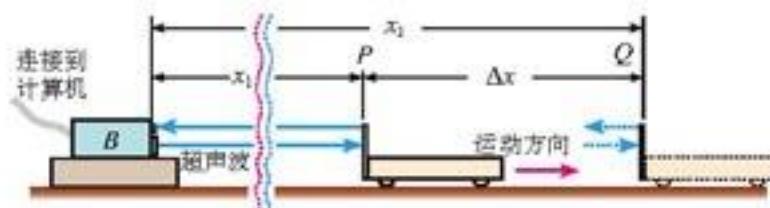


图 1.4-9 另一种运动传感器的工作原理

科学漫步

气垫导轨和数字计时器

研究物体的运动时，除了使用打点计时器计时外，还常用到数字计时器。

数字计时器常与气垫导轨配合使用（图 1.4-10）。气垫导轨上有很多小孔，气泵送来的压缩空气从小孔喷出，使得滑块与导轨之间有一层薄薄的空气，两者不会直接接触。这样，滑块运动时受到的阻力很小，实验的精确度能大大提高。

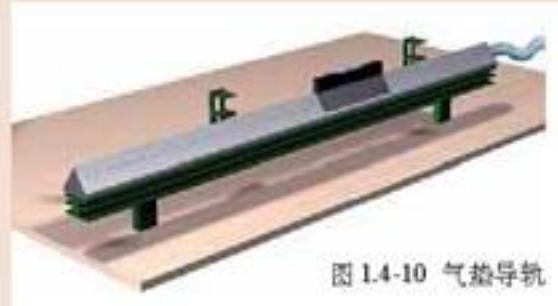


图 1.4-10 气垫导轨

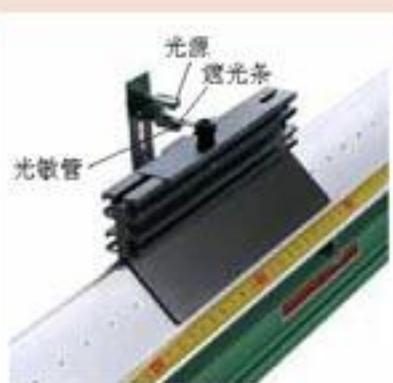


图 1.4-11 遮光条和光源、光敏管

计时系统的工作要借助于光源和光敏管（统称光电门，图 1.4-11）。光源与光敏管相对，它射出的光使光敏管感光。当滑块经过时，其上的遮光条把光遮住，与光敏管相连的电子电路自动记录遮光时间的长短，通过数码屏显示出来。根据遮光条的宽度和遮光时间，可以算出滑块经过时的速度。因为这样的计时系统可以测出 0.001 s 的时间，并且能直接以数字显示，所以又叫数字毫秒计。

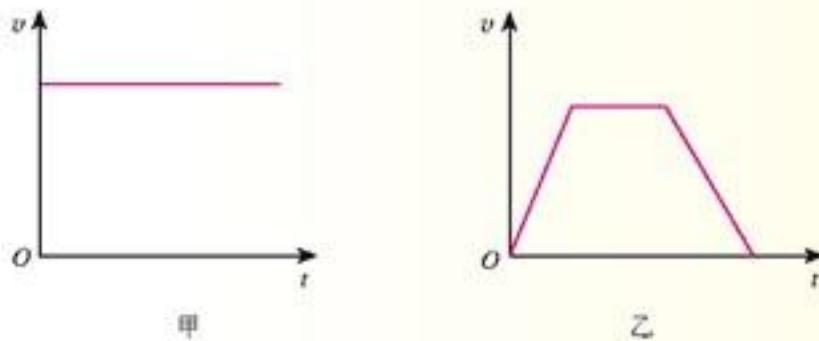
这样测出的速度是不是瞬时速度？说出你的道理。

问题与练习

- 对比电磁打点计时器和电火花计时器，你认为哪一种可能引起较大的误差？为什么？
- 把纸带的下端固定在重物上，上端用手提着，纸带穿过打点计时器。接通电源后将纸带释放，重物便拉着纸带下落，纸带被打出一系列点，其中有一段如图 1.4-12 所示。
 (1) 图 1.4-12 所示的纸带，哪端与重物相连？
 (2) 怎样计算纸带上打 A 点时重物的瞬时速度？说出你的道理。
- 图 1.4-13 是甲、乙两个物体运动的 $v-t$ 图象，至少从以下三个方面分别说明它们的速度是怎样变化的。
 (1) 物体是从静止开始运动还是具有一定的初速度？
 (2) 速度的大小是否变化？是加速还是减速？
 (3) 运动的方向是否变化？



图 1.4-12 纸带被重物牵动下落时打出的点迹

图 1.4-13 说明 $v-t$ 图象所代表的运动的特点

4. 你的左手拿着一块表，右手拿着一枝彩色画笔。你的同伴牵动一条宽约1 cm的长纸带，使纸带在你的笔下沿着直线向前移动。每隔1 s你用画笔在纸上点一个点。你还可以练习在1 s内均匀地点上两个点。这样，就做成了一个简单的“打点计时器”（图1.4-14）。想一想，相邻两点的距离跟牵动纸带的速度有什么关系？牵动纸带的快慢不均匀，对相邻两点所表示的时间有没有影响？

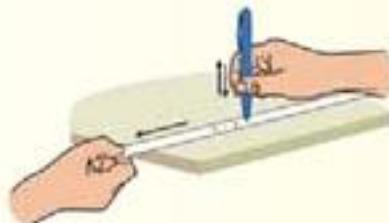


图1.4-14 自制打点计时器

5

速度变化快慢的描述——加速度

思考与讨论

普通的小型轿车和旅客列车，速度都能达到100 km/h。但是，它们起步后达到这样的速度所需的时间是不一样的。例如一辆小汽车起步时在20 s内速度达到了100 km/h，而一列火车达到这个速度大约要用500 s。



图1.5-1 汽车和火车的速度都在增加，但速度增加的快慢不一样。

谁的速度“增加”得比较快？它们的速度平均1 s各增加多少？

请再举出一些例子，说明“速度大”“速度变化大”“速度变化得快”描述的是三种不同的情况。

我们已经用速度这个物理量来描述物体运动的快慢，是不是还应该有一个物理量来描述速度“变化”的快慢？

加速度 不同物体运动时速度变化的快慢往往是不同的。例如，一架飞机在地面从静

止加速到刚离地面的过程中，约在 30 s 内速度由 0 增加到约 300 km/h(相当于 83 m/s)，飞机速度的变化与发生这个变化所用时间之比为

$$\frac{83 \text{ m/s} - 0}{30 \text{ s}} = 2.8 \text{ m/s}^2$$

一门迫击炮射击时，炮弹在炮筒中的速度在 0.005 s 内就可以由 0 增加到 250 m/s，炮弹速度的变化与发生这个变化所用时间之比为

$$\frac{250 \text{ m/s} - 0}{0.005 \text{ s}} = 5 \times 10^4 \text{ m/s}^2$$

炮弹速度的变化，比飞机起飞速度的变化快得多。

为了描述物体运动速度变化的快慢这一特征，我们引入加速度(**acceleration**)的概念：加速度是速度的变化量与发生这一变化所用时间的比值，通常用 a 代表。若用 Δv 表示速度在时间间隔 Δt 内发生的变化，则有

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (1)$$

在国际单位制中，加速度的单位是米每二次方秒，符号是 m/s^2 或 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。

就像平均速度与瞬时速度那样，加速度也有平均加速度与瞬时加速度之分。

加速度方向与速度方向的关系 加速度也是矢量，它不仅有大小，也有方向。现在讨论直线运动中加速度的方向与速度方向的关系。

如图1.5-2，汽车原来的速度是 v_1 ，经过一小段时间 Δt 之后，速度变为 v_2 。为了在图中表示加速度，我们以原来的速度 v_1 的箭头端为起点，

物体运动的快慢和运动速度变化的快慢，意思是不一样的！

加速度是用比值定义物理量的又一例子。

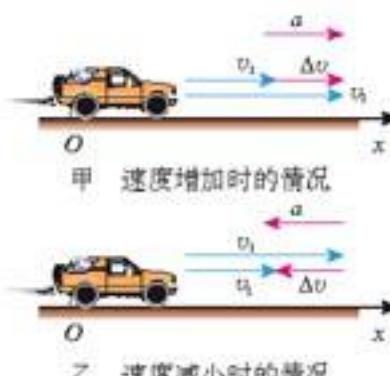


图 1.5-2 加速度方向与速度方向的关系

以后来的速度 v_2 的箭头端为终点，作出一个新的箭头，它就表示速度的变化量 Δv 。由于加速度 $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ ，所以加速度的方向与速度变化量 Δv 的方向相同；确定了速度变化量 Δv 的方向，也就确定了加速度 a 的方向。

从图中看出：在直线运动中，如果速度增加，加速度的方向与速度的方向相同；如果速度减小，加速度的方向与速度的方向相反。

这里介绍的由 v_1 和 v_2 求它们的差 Δv ($\Delta v = v_2 - v_1$) 的方法具有一般性，当物体不沿直线运动时，或者在求其他矢量的差时，也可以这样做。

说一说

日常生活中，对于运动的物体可以问它走了多远，这是路程或位移的概念；可以问它走得快慢，这是速度的概念。

然而，在我们的生活语言中，没有与加速度对应的词语。可以说，不学物理，在头脑里不会自发地形成加速度的概念。

日常生活中一般只有笼统的“快”和“慢”，这里有时指的是速度，有时模模糊糊地指的是加速度。你能分别举出几个这样的例子吗？

一些运动物体的加速度 $a/(m \cdot s^{-2})$

炮弹在炮筒中	5×10^4	赛车起步	4.5
跳伞者着陆时	-24.5	汽车起步	约 2
喷气式飞机着陆后滑行	-5 ~ -8	无轨电车起步	约 1.8
汽车急刹车	-4 ~ -6	旅客列车起步	约 0.35

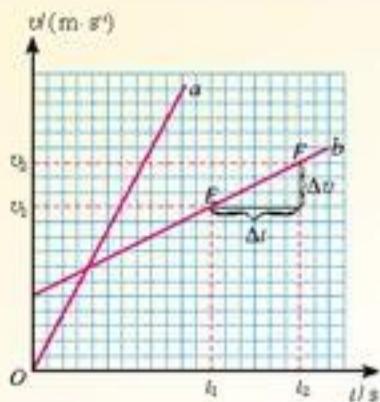
从 $v-t$ 图象看加速度 通过速度—时间图象不但能够了解物体运动的速度随时间变化的情况，还能够知道物体的加速度。

飞机起飞时，在同一底片上相隔同样时间多次曝光“拍摄”的照片（合成照片）。可以看出，在同样时间间隔中，飞机的位移不断增大。

思考与讨论

图1.5-3中的两条直线a、b分别是两个物体运动的 $v-t$ 图象。那个物体运动的加速度比较大？为什么？

图 1.5-3 从速度—时间图象看物体的加速度



图中E、F两点分别表示物体在 t_1 、 t_2 时刻的速度 v_1 、 v_2 。从图中可以看出，小三角形水平的直角边代表时间间隔 Δt ，竖直直角边代表速度的变化量 Δv 。因此，从曲线的倾斜程度就能判断加速度的大小，比值 $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ 就是加速度的数值。

科学漫步

变化率

西红柿在成熟的过程中，它的大小、含糖量等会随着时间变化；树木在成长过程中，它的高度、树干的直径会随着时间变化；河流、湖泊的水位也会随着时间变化；某种商品的价格也会随着时间变化……这些变化有时快、有时慢。描述变化快慢的量就是变化率。

自然界中某量 D 的变化可以记为 ΔD ，发生这个变化所用的时间间隔可以记为 Δt ，变化量 ΔD 与 Δt 的比值 $\frac{\Delta D}{\Delta t}$ 就是这个量的变化率。显然，变化率在描述各种变化过程时起着非常重要的作用，速度和加速度就是两个很好的例子。

变化率表示变化的快慢，不表示变化的大小。速度大，加速度不一定大。比如匀速飞行的高空侦察机，尽管它的速度能够接近 1000 m/s ，但它的加速度为 0。相反，速度小，加速度也可以很大。比如枪筒里的子弹，在扣动扳机火药刚刚爆发的时刻，尽管子弹的速度接近 0，但它的加速度可以达到 $5 \times 10^4 \text{ m/s}^2$ 。

生活中还有哪些实例与变化率相关？

问题与练习

- 小型轿车的“百公里加速时间”是汽车从静止开始加速到100 km/h所用的最少时间，它与发动机功率、车体质量、传动机构的匹配等因素有关，是反映汽车性能的重要参数。A、B、C三种型号的轿车实测的百公里加速时间分别为11.3 s、13.2 s、15.5 s，计算它们在测试时的平均加速度。
- 有没有符合下列说法的实例？若有，请举例。
 - 物体运动的加速度等于0，而速度却不等于0。
 - 两物体相比，一个物体的速度变化量比较大，而加速度却比较小。
 - 物体具有向东的加速度，而速度的方向却向西。
 - 物体做直线运动，后一阶段的加速度比前一阶段小，但速度却比前一阶段大。
- 图1.5-4中的三条直线描述了a、b、c三个物体的运动。通过目测判断哪个物体的加速度最大，并说出根据；然后根据图中的数据计算它们的加速度，并说明加速度的方向。
- 为测定气垫导轨上滑块的加速度，滑块上安装了宽度为3.0 cm的遮光板（见图1.4-10和图1.4-11）。滑块在牵引力作用下先后通过两个光电门，配套的数字毫秒计记录了遮光板通过第一个光电门的时间为 $\Delta t_1 = 0.29$ s，通过第二个光电门的时间为 $\Delta t_2 = 0.11$ s，遮光板从开始遮住第一个光电门到开始遮住第二个光电门的时间为 $\Delta t = 3.57$ s，求滑块的加速度。

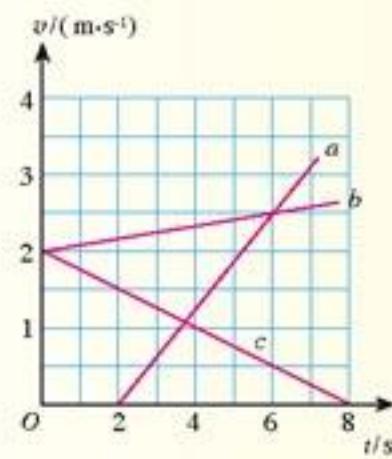


图1.5-4 计算加速度

物理定律不能单靠“思维”来
获得，还应致力于观察和实验。

——普朗克^①

第二章 匀变速直线运动的研究



世界上第一条商业运行的磁浮列车——“上海磁浮”，已于2003年10月1日正式运营。据报道，上海磁浮线路总长33 km，一次试车时全程行驶了约7 min 30 s，其中以430 km/h 的最高速度行驶约30 s。

磁浮列车的行驶速度比汽车快得多，是不是它的加速度也会很大？学过这一章后你会看到，根据报纸上的数据，再按照实际情况做些简化的假设，你自己就能估算它的加速度！

^① 普朗克 (Max Karl Ernst Ludwig Planck, 1858—1947)，德国物理学家，量子论的奠基人。1900年，他在黑体辐射研究中引入能量量子，因此于1918年获诺贝尔物理学奖。

1

实验：探究小车速度随时间变化的规律

寻求一种运动的特点和规律，一般要从某个具体事例开始。这一节我们用打点计时器研究小车在重物牵引下的运动，看看小车的速度是怎样随时间变化的。

进行实验 如图2.1-1，把附有滑轮的长木板平放在实验桌上，将细绳绕过滑轮，下面挂上适当的钩码，小车在钩码的牵引下运动。为了研究小车的速度随时间变化的规律，需要把打点计时器固定在长木板上，把纸带穿过打点计时器，连在小车的后面。

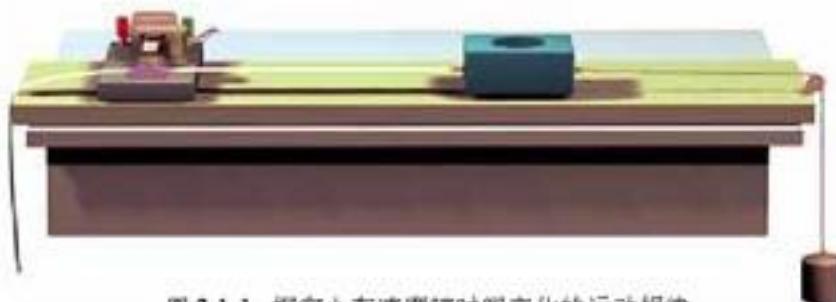


图 2.1-1 探究小车速度随时间变化的运动规律

把小车停在靠近打点计时器的位置。启动计时器，然后放开小车，让它拖着纸带运动。于是，打点计时器在纸带上打下一行小点。随后立即关闭电源。

换上新纸带，重复操作两次。

处理数据 在三条纸带中选择一条最清晰的。为了便于测量，舍掉开头一些过于密集的点迹，找一个适当的点当做计时起点。

我们仍然选择相隔 0.1 s 的若干计数点进行测量，记入自己设计的表格，利用第一章的方法得出各计数点的瞬时速度，填入下表标有“ v_1 ”的一行。

小车在几个时刻的瞬时速度										
位置编号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
时间 t / s	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$v_1 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$										
$v_2 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$										
$v_3 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$										

增减所挂的钩码，或在小车上放置重物，再做两次实验，填入上表标有“ v_2 ”和“ v_3 ”的两行。

作出速度—时间图象 以速度 v 为纵轴、时间 t 为横轴建立直角坐标系。根据表中的 v 、 t 数据，在直角坐标系中描点（图 2.1-2）。通过观察、思考，找出这些点的分布规律。

我们会看到，对于每次实验，描出的几个点都大致落在一条直线上。因此，可以有很大的把握说，如果是没有实验误差的理想情况，代表小车速度与时间关系的点真的能够全部落在某条直线上。

有了这些考虑之后，我们就可以用一条直线去代表这些点，并且可以说，小车运动的 $v-t$ 图象是一条倾斜的直线^①。

你能用自己的语言描述小车运动速度随时间变化的规律吗？

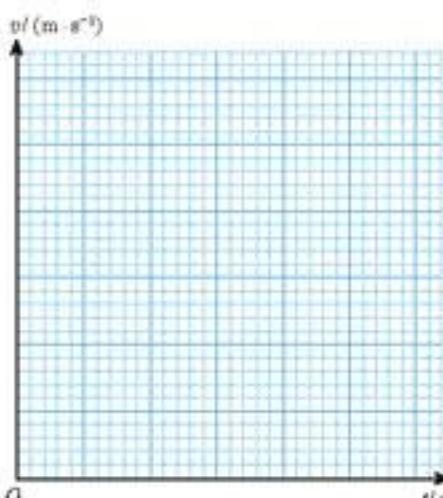


图 2.1-2 作出小车运动的 $v-t$ 图象

在科学上，为了描述实验中测量量之间的关系，先将其在坐标系中描点，然后用一条曲线（包括直线）“拟合”这些点。
画曲线时要使它两侧的点数大致相同。

做一做

用计算机绘制 $v-t$ 图象

借助常用的数表软件，可以迅速、准确地根据表中的数据作出 $v-t$ 图象，甚至能够写出图象所代表的公式。下面以 Excel 软件为例做简要说明，有兴趣的同学可以试一试。

在 Excel 软件工作簿的某一列的单元格中依次输入测量时间，在相邻的一列输入对应的速度值（图 2.1-3），用鼠标选中这些数据，按照“插入”中的“图表向导”的提示就能一步步地得到所画的图象（图 2.1-4）。

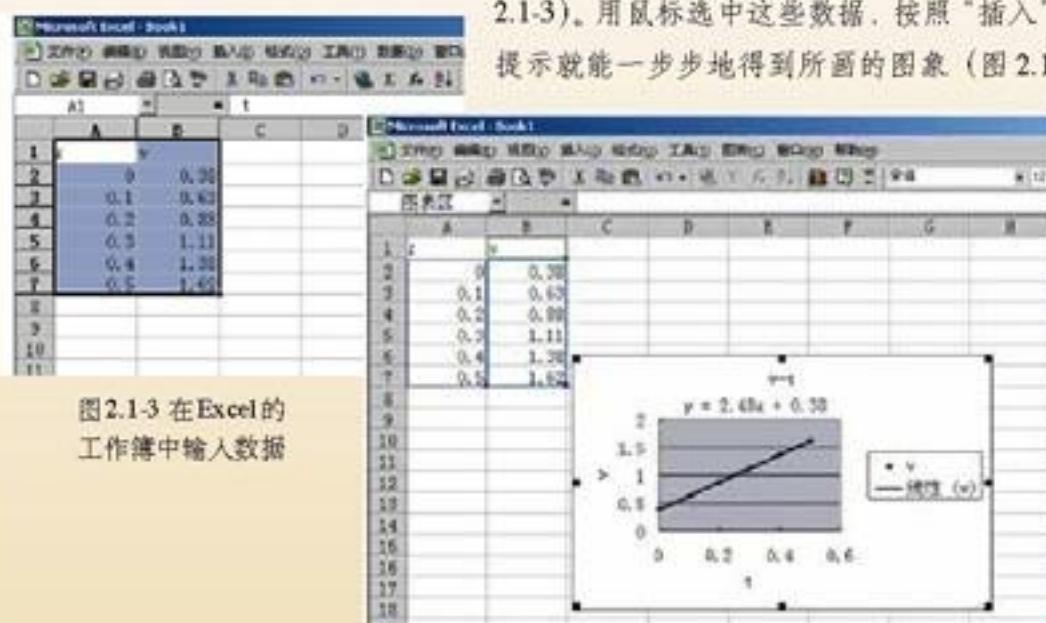


图 2.1-3 在 Excel 的工作簿中输入数据

要注意的是，操作过程中会出现“添加趋势线”对话框，其中的“类型”标签中有好几种可选择的函数。由于我们这个实验的数据几乎分布在一条直线上，所以应该选择“线性”类型。

图 2.1-4 Excel 根据数据自动作出图象

^① 在科学术语中，速度和时间的这种关系称为“线性关系”。

问题与练习

1. 火车沿长直坡路向下行驶。开始时速度表上的读数是 54 km/h ，以后每 5 s 读取一次数据，见下表。

时间 t/s	0	5	10	15	20	25	30
速度 $v/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	54	59	65	70	76	81	86
速度 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$							

- (1) 在表中填写以米每秒为单位表示的速度。
(2) 建立 $v-t$ 坐标系 (v 的单位用米每秒)，描出与表中各时刻速度相对应的点。
(3) 作出表示列车速度与时间关系的曲线。这是一条什么曲线？
2. 在同一公路上有 A 、 B 、 C 三个物体在运动，它们的 $v-t$ 图象 a 、 b 、 c 如图 2.1-5 所示。根据图象中的数据，请你尽可能详尽地描述它们的运动。
3. 为研究实验小车沿斜面向下运动的规律，把打点计时器纸带的一端固定在小车上，小车拖动纸带运动时，纸带上打出的点如图 2.1-6 所示。

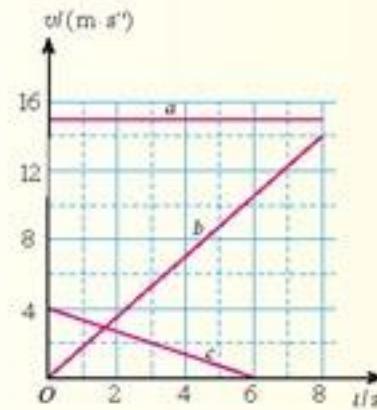


图 2.1-5 三辆汽车的 $v-t$ 图象



图 2.1-6 一次实验的纸带

- (1) 某同学用以下方法绘制小车的 $v-t$ 图象。先把纸带每隔 0.1 s 剪断，得到若干短纸条。再把这些纸条并排贴在一张纸上，使这些纸条下端对齐，作为时间坐标轴，标出时间。最后将纸条上端中心连起来，于是得到 $v-t$ 图象。请你按以上办法（用一张薄纸压在图 2.1-6 上，复制得到纸带）绘制这个图象。
(2) 这样做有道理吗？说说你的看法。
4. 把纸带穿过打点计时器，用手握住，启动计时器。用手拉动纸带，在纸带上记录了一行小点。从便于测量的位置找一个点当做起始点，在每隔相等时间间隔（如 0.1 s ）处剪开。请你试着用粘贴的方法得到一个直方图，从中可以看出手拉纸带的速度是怎样变化的。

2

匀变速直线运动的速度与时间的关系

匀变速直线运动 在图 2.2-1 中, 物体运动的 v - t 图象是一条平行于时间轴的直线, 这表示物体的速度不随时间变化, 也就是说, 它描述的是匀速直线运动。在上节的实验中, 小车在重物牵引下运动的 v - t 图象是一条倾斜的直线, 它表示小车在做什么样的运动?

从图 2.2-2 可以看出, 由于 v - t 图象是直线, 无论 Δt 选在什么区间, 对应的速度 v 的变化量 Δv 与时间 t 的变化量 Δt 之比 $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ 都是一样的, 即物体运动的加速度保持不变。所以, 上节实验中小车的运动是加速度不变的运动。

沿着一条直线, 且加速度不变的运动, 叫做匀变速直线运动 (**uniform variable rectilinear motion**)。匀变速直线运动的 v - t 图象是一条倾斜的直线。

在匀变速直线运动中, 如果物体的速度随着时间均匀增加, 这个运动叫做匀加速直线运动; 如果物体的速度随着时间均匀减小, 这个运动叫做匀减速直线运动。

速度与时间的关系式 除图象外, 还可以用公式表达物体运动的速度与时间的关系。

对于匀变速直线运动来说, 由于它的 v - t 图象是一条倾斜的直线, 无论 Δt 大些还是小些, 对应的速度变化量 Δv 与时间变化量 Δt 之比都是一样的, 因此, 我们可以把运动开始时刻 ($t=0$) 到 t 时刻的时间间隔作为时间的变化量, 而 t 时刻的速度 v 与开始时刻的速度 v_0 (叫做初速度, **initial velocity**) 之差就是速度的变化量, 也就是

$$\Delta t = t - 0 \quad (1)$$

$$\Delta v = v - v_0 \quad (2)$$

把 (2)、(1) 两式相除, 考虑到 $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ 就是加速度 a , 于是解出

$$v = v_0 + at \quad (3)$$

这就是表示匀变速直线运动的速度与时间关系的公式。

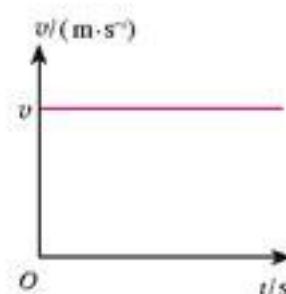


图 2.2-1 v - t 图象是一条平行于时间轴的直线, 这表示物体做匀速直线运动。

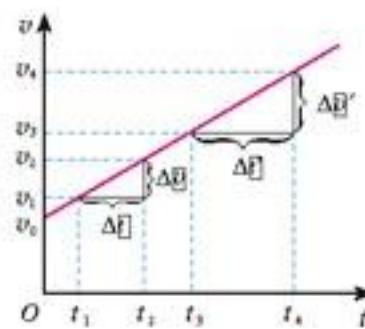


图 2.2-2 v - t 图象是一条倾斜的直线, 物体的加速度有什么特点? 直线的倾斜程度与加速度有什么关系?

物理学中所说的加速运动, 有时也包括了减速运动, 这时加速度的方向与速度的方向相反。

$v = v_0 + at$ 可以这样理解：由于加速度 a 在数值上等于单位时间内速度的变化量，所以 at 就是整个运动过程中速度的变化量；再加上运动开始时物体的速度 v_0 ，就得到 t 时刻物体的速度 v 。

| 例题 1 汽车以 40 km/h 的速度匀速行驶，现以 0.6 m/s^2 的加速度加速， 10 s 后速度能达到多少？

解 初速度 $v_0 = 40 \text{ km/h} = 11 \text{ m/s}$ ，加速度 $a = 0.6 \text{ m/s}^2$ ，时间 $t = 10 \text{ s}$ 。

10 s 后的速度为

$$\begin{aligned}v &= v_0 + at \\&= 11 \text{ m/s} + 0.6 \text{ m/s}^2 \times 10 \text{ s} \\&= 17 \text{ m/s} \\&= 61 \text{ km/h}\end{aligned}$$

描述车辆的速度，通常用的单位是千米每时。

| 例题 2 某汽车在紧急刹车时加速度的大小是 6 m/s^2 ，如果必须在 2 s 内停下来，汽车的行驶速度最高不能超过多少？

分析 我们研究的是汽车从开始刹车到停止运动这个过程。在这个过程中，汽车做匀减速运动，加速度的大小是 6 m/s^2 。由于是减速运动，加速度的方向与速度方向相反。沿汽车运动的方向建立坐标轴（图 2.2-4），则汽车的加速度取负号，记为 $a = -6 \text{ m/s}^2$ 。这个过程的末速度 v 是 0，初速度 v_0 就是我们所求的最高允许速度。过程的持续时间为 $t = 2 \text{ s}$ 。

解 根据 $v = v_0 + at$ ，我们有

$$\begin{aligned}v_0 &= v - at \\&= 0 - (-6 \text{ m/s}^2) \times 2 \text{ s} \\&= 12 \text{ m/s} \\&= 43 \text{ km/h}\end{aligned}$$

汽车的速度不能超过 43 km/h 。



图 2.2-3 汽车速度不能超过多少？

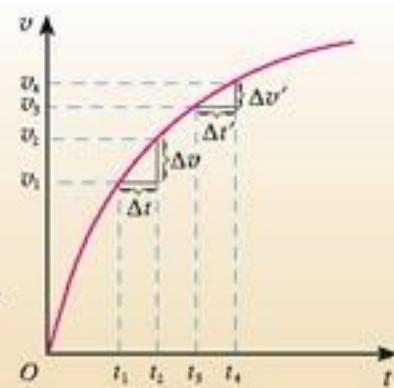


图 2.2-4 以汽车运动的方向为坐标轴的正方向，与正方向一致的量取正号，相反的取负号。

说一说

图 2.2-5 是一个物体运动的 $v-t$ 图象。它的速度怎样变化？在相等的时间间隔内，速度的变化量总是相等吗？物体在做匀加速运动吗？

图 2.2-5 时间间隔相等，对应的速度变化量相等吗？



问题与练习

- 火车机车原来的速度是36 km/h，在一段下坡路上加速度为 0.2 m/s^2 。机车行驶到下坡末端，速度增加到54 km/h。求机车通过这段下坡路所用的时间。
- 火车在通过桥梁、隧道的时候，要提前减速。一列以72 km/h的速度行驶的火车在驶近一座石拱桥时做匀减速运动，减速行驶了2 min，加速度的大小是 0.1 m/s^2 ，火车减速后的速度是多大？
- 一个物体沿着直线运动，其v-t图象如图2.2-7所示。
 - 它在1 s末、4 s末、7 s末三个时刻的速度，哪个最大？哪个最小？
 - 它在1 s末、4 s末、7 s末三个时刻的速度方向是否相同？
 - 它在1 s末、4 s末、7 s末三个时刻的加速度，哪个最大？哪个最小？
 - 它在1 s末和7 s末的加速度方向是否相同？
- 物体由静止开始做加速度为 1 m/s^2 的匀加速直线运动，4 s后加速度大小变为 0.5 m/s^2 ，方向仍与原来相同。请作出它在8 s内的v-t图象。

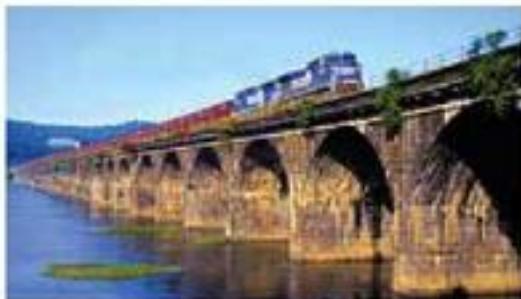


图 2.2-6 火车通过桥梁时要提前减速

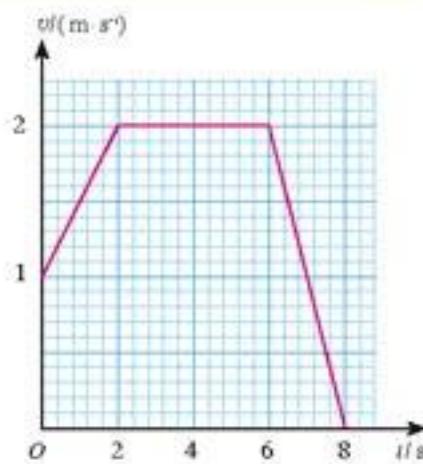


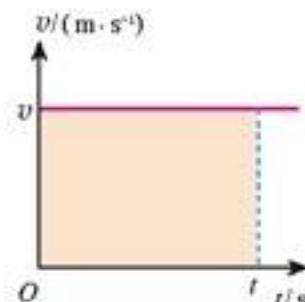
图 2.2-7 某物体的v-t图象

3

匀变速直线运动的位移与时间的关系

匀速直线运动的位移 做匀速直线运动的物体在时间 t 内的位移 $x = vt$ ^①。在它的 $v-t$ 图象中(图2.3-1)，着色的矩形的边长正好也是 v 和 t ，矩形的面积正好也是 vt 。可见，对于匀速直线运动，物体的位移对应着 $v-t$ 图象下面的面积。

对于匀变速直线运动，它的位移与它的 $v-t$ 图象，是不是也有类似的关系？

图2.3-1 位移 x 对应着矩形的面积

思考与讨论

一次课上，老师拿来了一位往届同学所做的“探究小车的运动规律”的测量记录（见下表），表中“速度 v ”一行是这位同学用某种方法（方法不详）得到的物体在 $0, 1, 2, \dots, 5$ 几个位置的瞬时速度。原始的纸带没有保存。

位置编号	0	1	2	3	4	5
时间 t/s	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	0.38	0.63	0.88	1.11	1.38	1.62

以下是关于这个问题的讨论。

老 师：能不能根据表中的数据，用最简便的方法估算实验中小车从位置0到位置5的位移？

学生A：能。可以用下面的办法估算：

$$\begin{aligned}x &= 0.38 \times 0.1 + 0.63 \times 0.1 + 0.88 \times 0.1 + 1.11 \times 0.1 + 1.38 \times 0.1 \\&= \dots\end{aligned}$$

学生B：这个办法不好。从表中看出，小车的速度在不断增加，0.38只是0时刻的瞬时速度，以后的速度比这个数值大。用这个数值乘以0.1 s，得到的位移要比实际位移小。后面的几项也有同样的问题。

学生A：老师要求的是“估算”，这样做是可以的。

^① 取运动的初始时刻物体的位置为坐标原点，这样，物体在时刻 t 的位移等于这时的坐标 x ，从开始到 t 时刻的时间间隔为 t 。

老 师：你们两个人说得都有道理。这样做的确会带来一定误差，但在时间间隔比较小、精确程度要求比较低的时候，可以这样估算。

要提高估算的精确程度，可以有多种方法。其中一个方法请大家考虑：如果当初实验时，时间间隔不是取 0.1 s ，而是取得更小些，比如 0.06 s ，同样用这个方法计算，误差是不是会小一些？如果取 0.04 s ， 0.02 s ，… 误差会怎样？

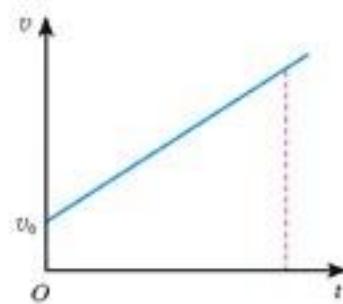
欢迎大家发表意见。

匀变速直线运动的位移 按照上面讨论中提出的思想，我们通过 $v-t$ 图象，研究以初速度 v_0 做匀变速直线运动的物体，在时间 t 内发生的位移。物体运动的 $v-t$ 图象如图 2.3-2 甲所示。

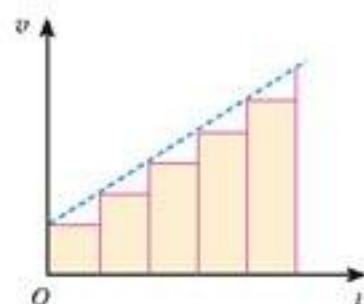
先把物体的运动分成几个小段，例如 $\frac{1}{5}t$ 算一个小段，在 $v-t$ 图中，每小段起始时刻物体的瞬时速度由相应的纵坐标表示（图 2.3-2 乙）。我们以每小段起始时刻的速度乘以时间 $\frac{1}{5}t$ ，近似地当做各

小段中物体的位移。在 $v-t$ 图中，各段位移可以用一个又窄又高的小矩形的面积代表。5 个小矩形的面积之和近似地代表物体在整个过程中的位移。

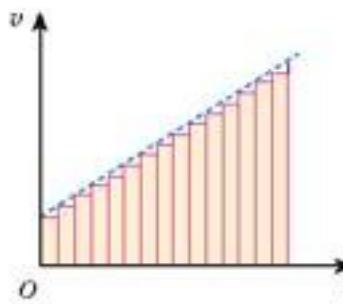
当然，上面的做法是粗糙的。为了精确一些，可以把运动过程划分为更多的小段，如图 2.3-2 丙，用所有这些小段的位移之和，近似代表物体在整个过程中的位移。从 $v-t$ 图上看，就是用更多的但是更窄的小矩形的面积之和代表物体的位移。



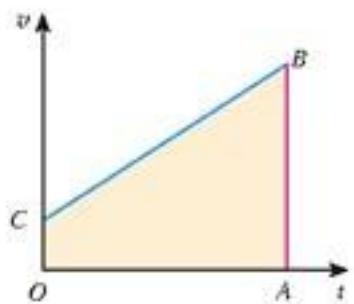
甲 某物体以初速度 v_0 做匀变速直线运动的速度—时间图象



乙 每两个位置间的位移，近似等于以 $\frac{1}{5}t$ 为底、以速度为高的细高矩形的面积。矩形面积之和，可以粗略地表示整个运动过程的位移。



丙 如果各位置的时间间隔小一些，这些矩形面积之和就能比较精确地代表整个运动的位移。



丁 如果时间分得非常细，小矩形就会非常多，它们的面积就等于 CB 斜线下梯形的面积，也就是整个运动的位移。

图 2.3-2 位移等于 $v-t$ 直线下面的面积

可以想像，如果把整个运动过程划分得非常非常细，很多很多小矩形的面积之和就能非常准确地代表物体的位移了。这时，“很多很多”小矩形顶端的“锯齿形”就看不出来了，这些小矩形合在一起成了一个梯形 $OABC$ 。梯形 $OABC$ 的面积就代表做匀变速直线运动的物体从0(此时速度是 v_0)到 t (此时速度是 v)这段时间间隔的位移。

在图2.3-2丁中， $v-t$ 直线下面的梯形 $OABC$ 的面积是

$$S = \frac{1}{2} (OC + AB) \times OA$$

把面积及各条线段换成所代表的物理量，上式变成

$$x = \frac{1}{2} (v_0 + v)t$$

把前面已经得出的 $v = v_0 + at$ 代入，得到

$$x = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

这就是表示匀变速直线运动的位移与时间关系的公式。

请你复习：

1. 怎样计算梯形的面积？
2. 图2.3-2丁中，哪两条线段是梯形的底，哪两条是梯形的腰？

做一做

位移与时间的关系也可以用图象表示，这种图象叫做位移—时间图象，即 $x-t$ 图象。运用初中数学中学到的一次函数和二次函数知识，你能画出匀变速直线运动 $x = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ 的 $x-t$ 图象的草图吗？

如果一位同学问：“我们研究的是直线运动，为什么画出来的 $x-t$ 图象不是直线？”你应该怎样向他解释？

例题 一辆汽车以 1 m/s^2 的加速度加速行驶了 12 s ，驶过了 180 m 。汽车开始加速时的速度是多少？

分析 我们研究的是汽车从开始加速到驶过 180 m 这个过程。

以开始加速的位置为原点，沿汽车前进的方向建立坐标轴(图2.3-3)。过程结束时汽车的位移 $x = 180\text{ m}$ 。由于汽车在加速行驶，加速度的方向与速度方向一致，也沿坐标轴的正方向，所以加速度取正号，即 $a = 1\text{ m/s}^2$ 。整个过程经历的时间是 $t = 12\text{ s}$ 。汽车的运动是匀变速直线运动，待求的量是这个过程的初速度 v_0 。

解 由 $x = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ 可以解出

$$v_0 = \frac{x}{t} - \frac{1}{2} a t$$



图2.3-3 求汽车的初速度

把已知数值代入

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

汽车开始加速时的速度是 9 m/s。

一般应该先用字母代表物理量进行运算，得出用已知量表达未知量的关系式，然后再把数值代入式中，求出未知量的值。这样能够清楚地看出未知量与已知量的关系，计算也比较简便。

做一做

利用图 2.3-4 所示的装置可以研究自由下落物体的运动。立柱上端有一个电磁铁，通电时，小钢球被吸在电磁铁上；断电时，小球自由下落，计时装置开始计时。立柱上还有 4 个光电门。当小球经过某一光电门时，光电计时装置能测出小球从初位置到这个光电门所用的时间 t 。用刻度尺测出电磁铁到 4 个光电门的距离，可以得到 4 段位移。将所得数据填入表中。

如果只有一个光电门，也可以让小球下落 4 次，每次下落时把光电门安放在不同位置，测量小球下落到这个位置的时间和位移。

t / s				
x / m				

作出 $x-t$ 图象并分析图象的特点。

如果是一条直线，说明 $x \propto t$ ，如果是一条曲线，就有可能是 $x \propto t^2$ 、 $x \propto t^3 \dots$

试试看，你能找出两者的关系吗？

图 2.3-4 利用光电计时器研究自由下落物体的运动



问题与练习

- 以 36 km/h 速度行驶的列车开始下坡，在坡路上的加速度等于 0.2 m/s^2 ，经过 30 s 到达坡底，求坡路的长度和列车到达坡底时的速度。
- 以 18 m/s 的速度行驶的汽车，制动后做匀减速运动，在 3 s 内前进 36 m，求汽车的加速度。
- 速度、加速度的测量通常比位移的测量要复杂些，而有的时候我们只需比较两个物体运动的加速度，并不需要知道加速度的大小，例如比较两辆汽车的加速性能就是这样。如果已知两个物体在相同时间内从静止开始运动的位移之比，怎样根据运动学的规律由此求出它们的加速度之比？

4

匀变速直线运动的位移与速度的关系

在前面两节我们分别学习了匀变速直线运动的位移与时间的关系、速度与时间的关系。通过下面的实例可以看到，有时还要知道物体的位移与速度的关系。

射击时，火药在枪筒中燃烧。燃气膨胀，推动弹头加速运动。如果把子弹在枪筒中的运动看做匀加速直线运动，子弹的加速度是 $a = 5 \times 10^5 \text{ m/s}^2$ ，枪筒长 $x = 0.64 \text{ m}$ ，我们计算子弹射出枪口时的速度。

子弹在枪筒中运动的初速度是 0，因此可以根据 $x = \frac{1}{2} at^2$ 先求出运动的时间 t ，然后根据 $v = at$ 得出子弹离开枪口的速度 v 。

但是，仔细一想我们会看到，这个问题中，已知条件和所求的结果都不涉及时间 t ，它只是一个中间量。能不能在 $v = v_0 + at$ 和 $x = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$ 两式中消去 t ，从而直接得到位移 x 与速度 v 的关系呢？

两式消去 t 后就能得到

$$v^2 - v_0^2 = 2ax$$

在子弹运动的问题中 $v_0 = 0$, $a = 5 \times 10^5 \text{ m/s}^2$, $x = 0.64 \text{ m}$, 由上式解出

$$v = \sqrt{2ax + v_0^2}$$

把数值代入后，得到子弹离开枪口的速度

$$v = \sqrt{2 \times 5 \times 10^5 \text{ m/s}^2 \times 0.64 \text{ m} + 0} = 800 \text{ m/s}$$

通过以上分析可以看到，如果问题的已知量和未知量都不涉及时间，利用本节公式求解，往往会使问题变得简单、方便。

例题 某飞机着陆时的速度是 216 km/h ，随后匀减速滑行，加速度的大小是 2 m/s^2 。机场的跑道至少要多长才能使飞机安全地停下来？

解 这是一个匀变速直线运动的问题。以飞机着陆点为原点，沿飞机滑行的方向建立坐标轴（图 2.4-1）。

飞机的初速度与坐标轴的方向一致，取正号， $v_0 = 216 \text{ km/h} = 60 \text{ m/s}$ ；末速度 v 应该是 0。由于飞机在减速，加速度方向与速度方向相反，即与坐标轴的方向相反，所以加速度取负号， $a = -2 \text{ m/s}^2$ 。

由 $v^2 - v_0^2 = 2ax$ 解出



图2.4-1 以飞机的着陆点为原点，沿飞机滑行方向建立坐标轴。

$$x = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$$

把数值代入

$$x = \frac{0^2 - (60 \text{ m/s})^2}{2 \times (-2 \text{ m/s}^2)} = 900 \text{ m}$$

跑道的长度至少应为 900 m。

从这个例题和上一节的例题可以看到，只有建立了坐标系，速度、加速度等物理量的正负号才能确定。

问题与练习

- 通过测试得知某型号的卡车在某种路面上急刹车时加速度的大小是 5 m/s^2 。如果要求它在这种路面上行驶时在 22.5 m 内必须停下，它的行驶速度不能超过多少千米每时？
- 神舟五号载人飞船的返回舱距地 10 km 时开始启动降落伞装置，速度减至 10 m/s ，并以这个速度在大气中降落。在距地 1.2 m 时，返回舱的 4 台缓冲发动机开始向下喷火，舱体再次减速。设最后减速过程中返回舱做匀减速运动，并且到达地面时恰好速度为 0，求最后减速阶段的加速度。
- 某型号的舰载飞机在航空母舰的跑道上加速时，发动机产生的最大加速度为 5 m/s^2 ，所需的起飞速度为 50 m/s ，跑道长 100 m 。通过计算判断，飞机能否靠自身的发动机从舰上起飞？为了使飞机在开始滑行时就有一定的初速度，航空母舰装有弹射装置。对于该型号的舰载飞机，弹射系统必须使它具有多大的初速度？

5

自由落体运动

物体下落的运动是一种常见的运动。挂在线上的重物，如果把线剪断，它就在重力的作用下，沿着竖直方向下落。从手中释放的石块，在重力的作用下也沿着竖直方向下落。

不同物体，下落的快慢是否相同呢？

演示

拿一个长约1.5 m的玻璃筒，一端封闭，另一端有开关，把形状和质量都不相同的几个物体，如金属片、小羽毛、小软木塞、小玻璃球等，放到玻璃筒里。把玻璃筒倒立过来，观察这些物体下落的情况。把玻璃筒里的空气抽出去，再把玻璃筒倒立过来（“走进物理课堂之前”图4），再次观察物体下落的情况。

自由落体运动 物体只在重力作用下从静止开始下落的运动，叫做自由落体运动（**free-fall motion**）。这种运动只在没有空气的空间才能发生，在有空气的空间，如果空气阻力的作用比较小，可以忽略，物体的下落也可以近似看做自由落体运动。

说一说

为什么物体在真空中下落的情况与在空气中下落的情况不同？关于这个问题，你有什么假设或猜想？

实验

如图2.5-1，打点计时器固定在铁架台上，纸带一端系着重物，另一端穿过计时器。用手捏住纸带，启动计时器，松手后重物自由下落，计时器在纸带上留下一串小点。仿照前面对小车运动的研究，测量重物下落的加速度。

改变重物的质量，重复上面的实验。

图2.5-1 用打点计时器研究自由落体运动



许许多多事实表明，自由落体运动是初速度为0的匀加速直线运动。

自由落体加速度 使用不同物体进行的反复实验表明，在同一地点，一切物体自由下落的加速度都相同，这个加速度叫做自由落体加速度（**free-fall acceleration**），也叫做重力加速度（**gravitational acceleration**），通常用g表示。

重力加速度的方向竖直向下，它的大小可以通过多种方法用实验测定。

精确的实验发现，在地球上不同的地方，g的大小是不同的，在赤道 $g=9.780\text{ m/s}^2$ ，在北京 $g=9.801\text{ m/s}^2$ 。一般的计算中，可以取 $g=9.8\text{ m/s}^2$ 或 $g=10\text{ m/s}^2$ ；本书中，如果没有特别的说明，都按 $g=9.8\text{ m/s}^2$ 进行计算。

下表列出了一些地点的重力加速度。

一些地点的重力加速度 $g/(m \cdot s^{-2})$		
标准值: $g = 9.806\ 65\ m/s^2$		
地点	纬度	重力加速度
赤道	0°	9.780
广州	23°06'	9.788
武汉	30°33'	9.794
上海	31°12'	9.794
东京	35°43'	9.798
北京	39°56'	9.801
纽约	40°40'	9.803
莫斯科	55°45'	9.816
北极	90°	9.832



你从表中发现了什么规律吗? 你能尝试解释这个规律吗? 尝试解释就是做出猜想。

自由落体运动是初速度为0的匀加速直线运动, 所以匀变速直线运动的基本公式及其推论都适用于自由落体运动, 只要把这些公式中的初速度 v_0 取为0、加速度 a 取为 g 就可以了。

做一做

测定反应时间

日常工作中, 有时需要人们反应灵敏, 对于战士、驾驶员、运动员等更是如此。从发现情况到采取相应行动所经过的时间叫做反应时间。这里介绍一种测定反应时间的简单方法。

请一位同学用两个手指捏住直尺的顶端(图2.5-2), 你用一只手在直尺下方做捏住直尺的准备, 但手不能碰到直尺, 记下这时手指在直尺上的位置。当看到那位同学放开直尺时, 你立即捏住直尺。测出直尺降落的高度, 根据自由落体运动的知识, 可以算出你的反应时间。

图2.5-2 测定反应时间



做一做

估测曝光时间

有一种“傻瓜”照相机, 其光圈(进光孔径)随被摄物体的亮度自动调节, 而快门(曝光时间)是固定不变的。为估测某架“傻瓜”照相机的曝光时间, 实验者从某砖墙前的高处使一个石子自由落下, 拍摄石子在空中的照片如图2.5-3。由于石子的运动, 它在照片上留下了一条模糊的径迹。

已知每块砖的平均厚度为6 cm, 石子起落点距地面的高度约为2.5 m, 怎样估算这架照相机的曝光时间?

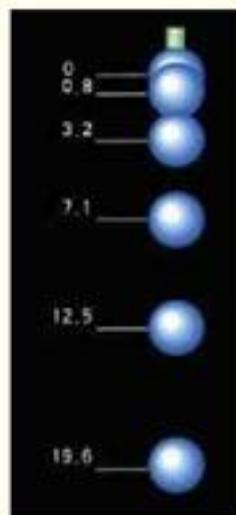
图2.5-3 通过照片中石子的径迹估算相机的曝光时间



问题与练习

- 把一张纸片和一块文具橡皮同时释放下落，哪个落得快？再把纸片捏成一个很紧的小纸团，和橡皮同时释放，下落快慢有什么变化？怎样解释这个现象？
- 一位观察者测出，悬崖跳水者碰到水面前在空中下落了 3.0 s。如果不考虑空气阻力，悬崖有多高？实际上是有空气阻力的，因此实际高度比计算值大些还是小些？为什么？
- 为了测出井口到水面的距离，让一个小石块从井口自由落下，经过 2.5 s 后听到石块击水的声音，估算井口到水面的距离。考虑到声音在空气中传播需用一定的时间，估算结果偏大还是偏小？
- 频闪摄影是研究变速运动常用的实验手段。在暗室中，照相机的快门处于常开状态，频闪仪每隔一定时间发出一次短暂的强烈闪光，照亮运动的物体，于是胶片上记录了物体在几个闪光时刻的位置。图 2.5-4 是小球自由下落时的频闪照片。频闪仪每隔 0.04 s 闪光一次。如果要通过这幅照片测量自由落体加速度，可以采用哪几种方法？试一试。照片中的数字是小球距起落点的距离。

图 2.5-4 小球自由下落的闪光照片



6

伽利略对自由落体运动的研究

绵延两千年的错误 落体的运动是司空见惯的，但人类对它的认识却经历了差不多两千年的时间。爱因斯坦曾经颇为感慨地说：“有一个基本问题，几千年来都因为它太复杂而含糊不清，这就是运动的问题。”最早研究运动问题的，大概要算古希腊学者亚里士多德了。

是什么因素决定一个下落物体的快慢呢？平常观察到的事实是，一块石头比一片树叶落得快些……亚里士多德认为物体下落的快慢是由它们的重量决定的。他的这一论断符合人们的常识，以至于其后两千年的时间里，大家都奉为经典。



亚里士多德
(Aristotle, 前 384—前 322)

逻辑的力量 16世纪末，意大利比萨大学的青年学者伽利略（Galileo Galilei, 1564—1642）对亚里士多德的论断表示了怀疑。后来，他在1638年出版的《两种新科学的对话》一书中对此做出了评论。

根据亚里士多德的论断，一块大石头的下落速度要比一块小石头的下落速度大。假定大石头的下落速度为8，小石头的下落速度为4，当我们把两块石头捆在一起时，大石头会被小石头拖着而减慢，结果整个系统的下落速度应该小于8；但两块石头捆在一起，总的重量比大石头还要重，因此整个系统下落的速度要比8还大。这样，就从“重物比轻物落得快”的前提推断出了互相矛盾的结论，这使亚里士多德的理论陷入了困境。为了摆脱这种困境，伽利略认为只有一种可能性：重物与轻物应该下落得同样快。

猜想与假说 伽利略并没有就此止步，他要进一步通过实验研究自由落体运动的规律。

伽利略首先面临的困难是概念上的，因为那时人们连速度的明确定义都没有。因此，对伽利略来说，必须首先建立描述运动所需的概念。此前我们所学的概念，诸如平均速度、瞬时速度以及加速度等，就是伽利略首先建立起来的。

伽利略相信，自然界的规律是简洁明了的。他从这个信念出发，猜想落体也一定是一种最简单的变速运动，而最简单的变速运动，它的速度应该是均匀变化的。

但是，速度的变化怎样才算“均匀”呢？他考虑了两种可能：一种是速度的变化对时间来说是均匀的，即 v 与 t 成正比，例如，每过1 s，速度的变化量都是2 m/s；另一种是速度的变化对位移来说是均匀的，即 v 与 x 成正比，例如，每下落1 m，速度的变化量都是2 m/s。

实验验证 后来发现，如果 v 与 x 成正比，将会推导出十分复杂的结论。所以，伽利略开始以实验来检验 v 与 t 成正比的猜想是否是真实的。

在伽利略的时代，技术不够发达，无法直接测定瞬时速度，所以也就不能直接得到速度的变化规律。但是，伽利略通过数学运算得出结论：如果物体的初速度为0，而且速度随时间的变化是均匀的，即 $v \propto t$ ，它通过的位移就与所用时间的二次方成正比，即 $x \propto t^2$ （学过前面的几节，我们也能进行这样



图2.6-1 比萨斜塔。传说伽利略在此做过落体实验，但后来又被严谨的考证否定了。尽管如此，来自世界各地的人们都要前往参观，他们把这座古塔看做伽利略的纪念碑。

爱因斯坦有一句很著名的话：“提出一个问题往往比解决一个问题更重要，因为解决一个问题有时仅仅是一个数学上或实验上的技巧，而提出新的问题、新的可能性，从新的角度去看旧的问题，却需要创造性的想像力，而且标志着科学上的真正进步。”

伽利略比他的前人更伟大，就在于他首先采用了以实验检验猜想和假设的科学方法。在他之前，学者们总是通过思辨性的论战来决定谁是谁非。

的数学推算了)。这样，只要测出物体通过不同位移所用的时间，就可以检验这个物体的速度是否随时间均匀变化。

但是，落体下落得很快，而当时只能靠滴水计时，这样的计时工具还是不能测量自由落体运动所用的时间。伽利略采用了一个巧妙的方法，用来“冲淡”重力。他让铜球沿阻力很小的斜面滚下(图2.6-2)，而小球在斜面上运动的加速度要比它竖直下落的加速度小得多，所用时间长得多，所以容易测量。



图2.6-2 伽利略在做铜球沿斜面运动的实验(油画)

伽利略做了上百次实验，结果表明，小球沿斜面滚下的运动的确是匀加速直线运动，换用不同质量的小球，从不同高度开始滚动，只要斜面的倾角一定，小球的加速度都是相同的。

不断增大斜面的倾角，重复上述实验，得知小球的加速度随斜面倾角的增大而变大。

小球沿斜面向下的运动并不是落体运动。但是，伽利略将上述结果做了合理的外推：当斜面倾角很大时，小球的运动不是跟落体运动差不多了吗？如果斜面的倾角增大到 90° ，这时小球的运动不就是自由落体运动了吗(图2.6-3)？伽利略认为，这时小球仍然会保持匀加速运动的性质，而且所有物体下落时的加速度都是一样的！

后人在用伽利略的器材重复他的实验时发现，铜球沿斜面滚下，如果斜面倾角超过 5° 就很难准确计时。伽利略把他的结论外推至 90° 是需要很大勇气的。后来，他的外推被直接的实验证实了。

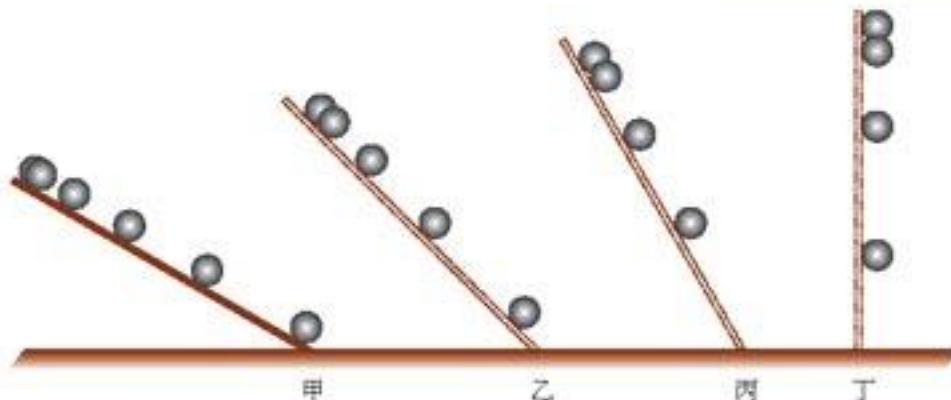


图2.6-3 伽利略设想，斜面的倾角越接近 90° ，小球沿斜面滚下的运动越接近自由落体运动。

伽利略的逻辑和实验自然使人钦佩，但是人们又疑惑地问道：为什么日常生活中常会见到，较重的物体下落得比较快呢？伽利略把原因归之于空气阻力对不同物体的影响不同。他写道：“如果完全排除空气的阻力，那么，所有物体将下落得同样快。”这时，落体运动也就真正成为自由落体运动了。为此，伽利略特别指出，在科学的研究中，懂得忽略什么，有时与懂得重视什么同等重要。

伽利略的科学方法 伽利略对运动的研究，不仅确立了许多用于描述运动的基本概念，而且创造了一套对近代科学的发展极为有益的科学方法，或者说给出了科学的研究过程的基本要素。这些要素包含以下几点：



伽利略科学思想方法的核心是把实验和逻辑推理(包括数学推演)和谐地结合起来，从而有力地推进了人类科学认识的发展。

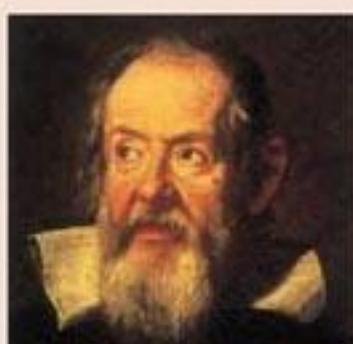
伽利略之前的科学踯躅于泥途荒滩，因而千年徘徊。从伽利略开始，大师辈出，经典如云，近代科学的大门从此打开了。

STS

从伽利略的一生看科学与社会

伽利略是伟大的意大利物理学家和天文学家，比萨大学和帕多瓦大学的教授。他融会贯通了当时的数学、物理学和天文学，在研究工作中开科学实验之先河，奠定了现代科学的基础。他在米开朗琪罗^①去世前三天出生，仿佛要连接两个时代：文艺复兴基本完成，近代科学开始奠基。

在他所处的历史时代，文艺复兴绝不限于文学艺术的复兴，它也是一次前所未有的科学振兴。文艺复兴的精神打破了束缚人们思想的桎梏，激发起人们对自然的兴趣和对自然的探索。活跃在人们心中的



他失明了，因为自然界已经没有剩下什么他没看见过的东西了。

——伽利略墓志铭

^① 米开朗琪罗 (Michelangelo, 1475—1564)，意大利文艺复兴时代的雕刻家、画家、建筑师。

各种思想，终于得到实在的结果。对于伽利略的成就和获得成就的方法，爱因斯坦的赞扬最具有代表性：“伽利略的发现以及他所应用的科学的推理方法，是人类思想史上最伟大的成就之一，而且标志着物理学的真正开端。”

伽利略的科学生涯并不是一帆风顺的。他发明了望远镜，并用它观测天空。观测的结果，支持了天文学的新学说——日心说。然而，日心说与圣经相抵触。伽利略不得不用圣经的语言来解释日心说，即便如此，仍然不能逃避教会对他的指控和迫害(1616年)。《关于两个世界体系的对话》使日心说变成摧毁教会教义和传统“科学”框架的理论，因此立刻成为禁书。1633年伽利略被罗马宗教裁判所判刑入狱，后来改为在家监禁。尽管如此，他仍坚持研究工作，并将自由落体等方面的研究成果转送荷兰，于1638年出版了《两种新科学的对话》。这部著作的出版，奠定了伽利略作为近代力学创始人的地位。

时隔346年，罗马教廷于1979年承认对伽利略的压制是错误的，并为他“恢复名誉”。但是教会对科学的干涉和对伽利略的迫害所造成的严重后果是无法挽回的。以前一直是人才辈出的意大利，在伽利略之后，它的科学活动很快衰落下去。在很长一段时间里，没有再产生重要的科学家。没有学术的民主和思想的自由，科学就不能繁荣。

交互作用是我们从现代自然科学的观点考察整个运动着的物质时首先遇到的东西。

自然科学证实了……交互作用是事物的真正的终极原因。

——恩格斯^①

第三章 相互作用



自然界的物体不是孤立存在的，它们之间具有多种多样的相互作用。正是由于这些相互作用，物体在形状、运动状态以及其他肉眼不能察觉的许多方面发生变化。在物理学中，物体间的这些相互作用抽象为一个概念：力。

自然界中最基本的相互作用是引力相互作用、电磁相互作用、强相互作用和弱相互作用。常见的重力是万有引力在地球表面附近的表现，常见的弹力、摩擦力是由电磁力引起的。

本章研究这几种常见力的特点和规律。

^① 恩格斯 (Friedrich Engels, 1820—1895)，马克思主义创始人之一。恩格斯曾致力于研究自然科学中的哲学问题，对当时自然科学最重要的成就做了辩证唯物主义的概括，逝世后这些札记被辑录成《自然辩证法》一书。引文摘自《自然辩证法》，人民出版社 1984 年 10 月第 1 版 95 页。

1

重力 基本相互作用

力和力的图示 运动员踢球，球由静止变为运动(图3.1-1)；守门员接住球，球由运动变为静止；运动员用头顶球，球的方向改变了。这几种情况下，我们都可以说，球的运动状态改变了。一句话，只要一个物体的速度变化了，不管是大小还是方向改变了，都说这个物体的运动状态发生了变化。

用手压锯条，锯条变弯；用手拉橡皮条，橡皮条变长。我们说它们发生了形变。

什么原因使物体的运动状态发生变化、使物体产生形变呢？这是其他物体作用的结果。在物理学中，人们把改变物体的运动状态、产生形变的原因，即物体与物体之间的相互作用，称做力(**force**)。

初中时我们已经知道，力的大小可以用测力计(弹簧秤)测量。在国际单位制中，力的单位是牛顿(**newton**)，简称牛，符号是N。

力是矢量，它不但有大小，而且有方向。力的方向不同，它的作用效果也不一样。作用在运动物体上的力，如果方向与运动方向相同，将加快物体的运动；如果方向与运动方向相反，将阻碍物体的运动。可见，要把一个力完全表达出来，除了力的大小外，还要指明力的方向。

可以用带箭头的线段表示力。线段是按一定比例(标度)画出的，它的长短表示力的大小，它的指向表示力的方向，箭尾(或箭头)表示力的作用点，线段所在的直线叫做力的作用线。这种表示力的方法，叫做力的图示(图3.1-2)。有时只需画出力的示意图，即只画出力的作用点和方向，表示物体在这个方向上受到了力。

重力 自然界的各种物体之间存在着多种相互作用。例如，空中的物体落向地面，是因为地球与物体之间存在着相互吸引的作用。尽管地球不停地自转，但海水不会洒向太空，也是因为地球与海水之间存在着相互吸引的作用。

地面附近一切物体都受到地球的吸引，由于地球的吸引而使物体受到的力叫做重力(**gravity**)。初中时我们就已知道，物体受到的重力G与物体质量m的关系是

$$G = mg$$



图3.1-1 运动员用力踢球使球的运动状态发生改变

到现在为止，我们学过的哪些物理量是矢量？



图3.1-2 力的图示表示作用在小车上的力为80 N，箭头的方向表示小车受力的方向。

其中 g 就是前面学过的自由落体加速度。

重力不但有大小，而且有方向。平时所说的“竖直向下的方向”，指的就是重力的方向。一个物体的各部分都受到重力的作用，从效果上看，我们可以认为各部分受到的重力作用集中于一点，这一点叫做物体的重心(**center of gravity**)。

质量均匀分布的物体，常称均匀物体，重心的位置只跟物体的形状有关。形状规则的均匀物体，它的重心比较容易确定。例如，均匀细直棒的重心在棒的中点，均匀球体的重心在球心，均匀圆柱的重心在轴线的中点(图3.1-3)。

质量分布不均匀的物体，重心的位置除了跟物体的形状有关外，还跟物体内质量的分布有关。载重汽车的重心随着装货多少和装载位置而变化(图3.1-4)。起重机的重心随着提升物的重量和高度而变化。

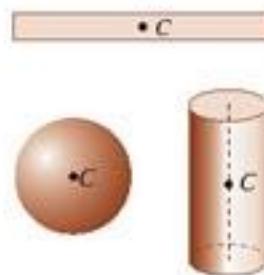


图3.1-3 均匀物体重心的位置

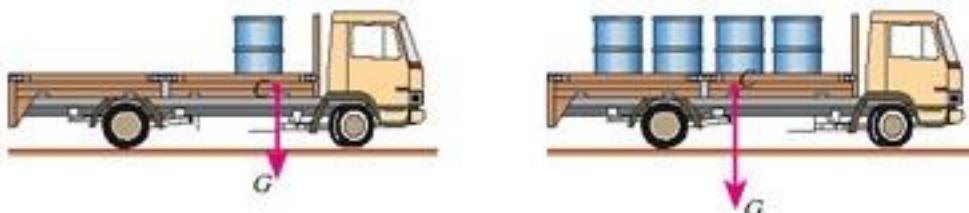


图3.1-4 不均匀物体重心的位置

做一做

确定薄板的重心

薄板重心的位置可以通过两次悬挂来确定。

先在A点把物体悬挂起来，通过A点画一条竖直线AB，然后再选另一处D点把物体悬挂起来，同样通过D点画一条竖直线DE，AB和DE的交点C，就是薄板的重心(图3.1-5)。

请你证明用这种方法确定重心的合理性。

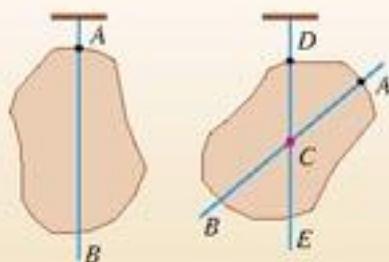


图3.1-5 确定薄板的重心

四种基本相互作用 从17世纪下半叶起，人们发现，相互吸引的作用存在于一切物体之间，直到宇宙的深处，只是相互作用的强度随距离增大而减弱。在物理学中，我们称它为万有引力(**gravitation**)。正是万有引力把行星和恒星聚在一起，组成太阳系、银河系和其他星系。

引力是自然界的一种基本相互作用，地面物体所受的重力只是引力在地球表面附近的一种表现。



图3.1-6 万有引力使众多天体聚在一起形成星系

电荷之间同样存在相互作用：同种电荷相排斥，异种电荷相吸引。类似地，两个磁体之间也存在相互作用：同名磁极相排斥，异名磁极相吸引。19世纪后，人们逐渐认识到，电荷间的相互作用、磁体间的相互作用，本质上是同一种相互作用的不同表现，这种相互作用称为电磁相互作用(**electromagnetic interaction**)或电磁力。它也是自然界的一种基本相互作用。电磁力随距离变化的规律与万有引力相似：当距离增大到原来的2倍时，它们减小到原来的 $\frac{1}{4}$ 。

思考与讨论

质子带正电，但质子（与中子一起）却能聚在一起构成原子核。根据你的推测，原因可能是什么？

20世纪，物理学家发现原子核是由若干带正电荷的质子和不带电的中子组成的，而带正电的质子之间存在斥力，这种斥力比它们之间的万有引力大得多，似乎质子与质子团聚在一起是不可能的。于是他们认识到，一定有一种新的强大的相互作用存在，使得原子核紧密地保持在一起。这种作用称做强相互作用(**strong interaction**)。与万有引力和电磁力不同，距离增大时，强相互作用急剧减小，它的作用范围只有约 10^{-15} m，即原子核的大小，超过这个界限，这种相互作用实际上已经不存在了。

19世纪末、20世纪初，物理学家发现，有些原子核能够自发地放出射线，这种现象称为放射现象。后来发现，在放射现象中起作用的还有另一种基本相互作用，称为弱相互作用(**weak interaction**)。弱相互作用的作用范围也很小，与强相互作用相同，但强度只有强相互作用的 10^{-12} 倍。

四种基本相互作用的特点已被科学所认识，但是没有人确切知道为什么是这样的四种。许多物理学家认为它们可能是某种相互作用在不同条件下的不同表现，就像电和磁是电磁相互作用的不同表现形式一样。为此，人们做了很多研究工作，但至今没有公认的结论。可能这正如牛顿所说，“真理的大海”依然在我们面前，但却尚未发现。



图3.1-7 加速器。原子核内核子间的相互作用很强，需要强大的加速器加速其他粒子，并作为“炮弹”将原子核撞开。

问题与练习

- 举出具体的实例来说明：(1)力能够改变物体的运动状态或使物体产生形变；(2)每一个力，都有一个施力物体和一个受力物体。

2. 画出下面几个物体所受重力的图示。

- (1) 放在水平桌面上的质量 $m = 0.05 \text{ kg}$ 的墨水瓶。
- (2) 坚直向上飞行的质量 $m = 2 \times 10^3 \text{ kg}$ 的火箭。
- (3) 沿着滑梯下滑的质量 $m = 20 \text{ kg}$ 的小孩。
- (4) 抛出后在空中飞行的质量 $m = 4 \text{ kg}$ 的铅球。

3. 几何学中把三角形三条中线的交点叫做重心。物理学中也有重心的概念。均匀的三角形薄板的重心是不是与几何学上的重心位于同一点上？请你通过以下实验做出判断：首先作图把均匀等厚三角形纸板的三条中线的交点 C 找出来，然后用细线悬吊三角形纸板的任意位置，看悬线的延长线是否通过 C 点。

2

弹 力

自然界的四种基本相互作用是不需要物体相互接触就能起作用的，但是日常观察到的相互作用，无论是推、拉、提、举，还是牵引列车、锻打工件、击球、弯弓射箭等，都是在物体与物体接触时才发生的，这种相互作用可称为接触力。我们通常所说的拉力、压力、支持力等都是接触力。接触力按其性质可归纳为弹力和摩擦力，它们在本质上都是由电磁力引起的。

本节重点研究弹力。

弹性形变和弹力 物体在力的作用下形状或体积发生改变，叫做形变(**deformation**)。有些物体在形变后能够恢复原状，这种形变叫做弹性形变(**elastic deformation**)。



被压弯的撑竿恢复原状时，使船离岸。



甲 被拉长的弹簧使小车向右运动



乙 被压缩的弹簧使小车向左运动

图 3.2-1

图3.2-1的例子说明，发生弹性形变的物体由于要恢复原状，对与它接触的物体会产生力的作用，这种力叫做弹力(**elastic force**)。如果形变过大，超过一定的限度，撤去作用力后，物体就不能完全恢复原来的形状。这个限度叫做弹性限度(**elastic limit**)。

物体受力时会产生形变，但有时形变很小，不易观察。

在图3.2-2中，一块三角形有机玻璃压在另一块有机玻璃上，发生的形变很小，肉眼不能看出。但是，形变使有机玻璃内不同部位的光学性质产生了差异，让特殊的光通过时，可以看到这种差异。

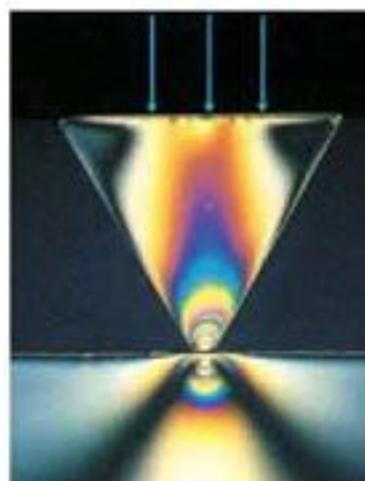


图3.2-2 有机玻璃的形变

几种弹力 放在水平桌面上的书与桌面相互挤压，书和桌面都发生微小的形变。由于书的形变，它对桌面产生向下的弹力 F_1 ，这就是书对桌面的压力。由于桌面的形变，它对书产生向上的弹力 F_2 ，这就是桌面对书的支持力(图3.2-3)。

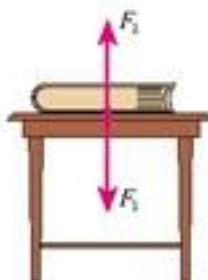


图3.2-3 书对桌面的压力和桌面对书的支持力都是弹力

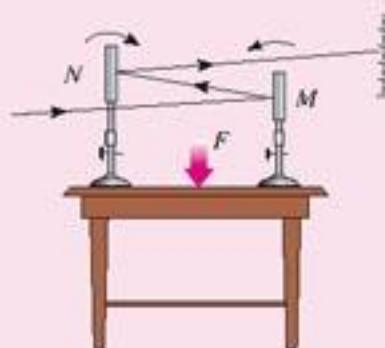


图3.2-4 观察桌面
微小形变的装置

演示

如图3.2-4，在一张大桌子上放两个平面镜 M 和 N ，让一束光依次被这两面镜子反射，最后射到墙上，形成一个光点。用力按压两镜之间的桌面，观察墙上光点位置的变化。这个现象说明了什么？

思考与讨论

用绳子拉物体时，绳子和物体都会产生形变，致使绳子对物体产生拉力，同时物体也对绳子产生拉力。试讨论拉力的方向与绳子的方向有什么关系。

压力和支持力都是弹力。压力和支持力的方向都垂直于物体的接触面。
拉力也是弹力。绳的拉力沿着绳而指向绳收缩的方向。

胡克定律 弹力的大小跟形变的大小有关系，形变越大，弹力也越大，形变消失，弹力随着消失。

弹力与形变的定量关系，一般来讲比较复杂。而弹簧的弹力与弹簧的伸长量(或压缩量)的关系则比较简单(图3.2-5)。实验表明，弹簧发生弹性形变时，弹力的大小 F 跟弹簧伸长(或缩短)的长度 x 成正比，即

$$F = kx$$

式中的 k 称为弹簧的劲度系数(**coefficient of stiffness**)，单位是牛顿每米，单位的符号是N/m。生活中说有的弹簧“硬”，有的弹簧“软”，指的就是它们的劲度系数不同。这个规律是英国科学家胡克发现的，叫做胡克定律(**Hooke law**)。

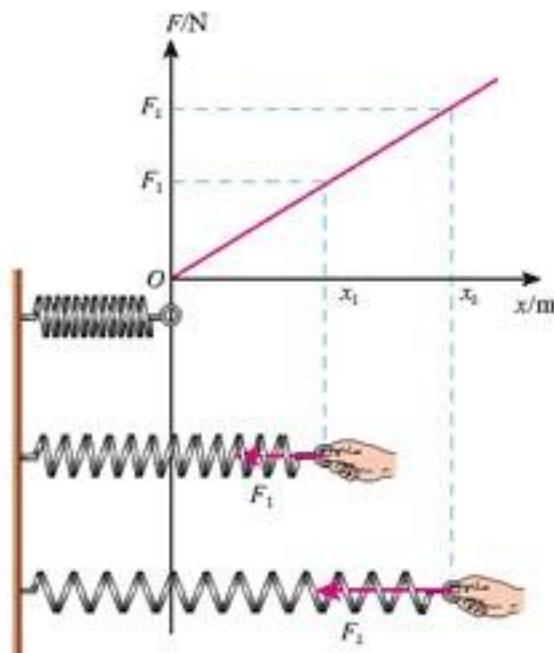


图3.2-5 弹力与弹簧伸长量的关系

问题与练习

- 取一只扁玻璃瓶，里面盛满水，用穿有透明细管的橡皮泥封口，使水面位于细管中(图3.2-6)。用手捏玻璃瓶，可以看到透明细管中的水面变化，说明玻璃瓶在手的作用下发生了形变。请你用家里的玻璃瓶做实验，体验这种微小形变。
- 质量均匀的钢管，一端支在水平地面上，另一端被竖直绳悬吊着(图3.2-7)，钢管受到几个力的作用？各是什么物体对它的作用？画出钢管受力的示意图。
- 如图3.2-8，一根筷子放在光滑的碗内，筷子与碗壁、碗边都没有摩擦。作示意图表示筷子受到的力。

图3.2-6 手的压力能
使玻璃瓶发生形变

图3.2-7 画出钢管受力的示意图

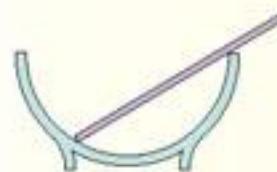


图3.2-8 画出筷子受力的示意图

- 某同学在竖直悬挂的弹簧下加挂钩码，做实验研究弹力与弹簧伸长量的关系。下面是她的实验数据。实验时弹力始终未超过弹性限度，弹簧很轻，自身质量可以不计。
 - 根据实验数据在坐标系中作出弹力 F 跟弹簧伸长量 x 关系的图象。
 - 根据图象计算弹簧的劲度系数。

砝码质量 m/g	0	30	60	90	120	150
弹簧总长度 l/cm	6.0	7.2	8.3	9.5	10.6	11.8

3

摩擦力

摩擦是一种常见的现象。同学们在初中已经知道，两个相互接触的物体，当它们发生相对运动或具有相对运动的趋势时，就会在接触面上产生阻碍相对运动或相对运动趋势的力，这种力叫做摩擦力(**frictional force**)。

思考与讨论

互相接触的物体相对静止的时候，是不是也可能产生摩擦力？



图3.3-1 有没有摩擦力？

静摩擦力 如图3.3-1甲，小孩轻推箱子，箱子有相对地面运动的趋势，但他没有推动，箱子与地面仍然保持相对静止。根据初中所学的二力平衡的知识，这时一定有一个力与推力平衡。这个力与小孩对箱子的推力大小相等、方向相反。这个力就是箱子与地面之间的摩擦力^①。由于这时两个物体之间只有相对运动的趋势，而没有相对运动，所以这时的摩擦力叫做静摩擦力(**static frictional force**)。静摩擦力的方向总是沿着接触面^②，并且跟物体相对运动趋势的方向相反。

小孩用更大的力推，箱子还是不动(图3.3-1乙)。同样根据二力平衡的知识，这时箱子与地面间的静摩擦力还跟推力大小相等。只要箱子与地面间没有产生相对运动，静摩擦力的大小就随着推力的增大而增大，并与推力保持大小相等。

演示

把木块放在水平长木板上，用弹簧测力计沿水平方向拉木块。在拉力 F 增大到一定值之前，木块不会运动。

在弹簧测力计的指针下轻塞一个小纸团，它可以随指针移动，并作为指针到达最大位置的标记(图3.3-2)。继续用力，当拉力达到某一数值时木块开始移动，此时拉力会突然变小。

^①严格地说，这个问题中的推力和摩擦力并不作用在同一直线上，但在初步讨论这个问题时，可以把物体看做质点，这样就可以认为这两个力作用在同一直线上。

^②如果接触面是曲面，静摩擦力的方向与接触面相切。

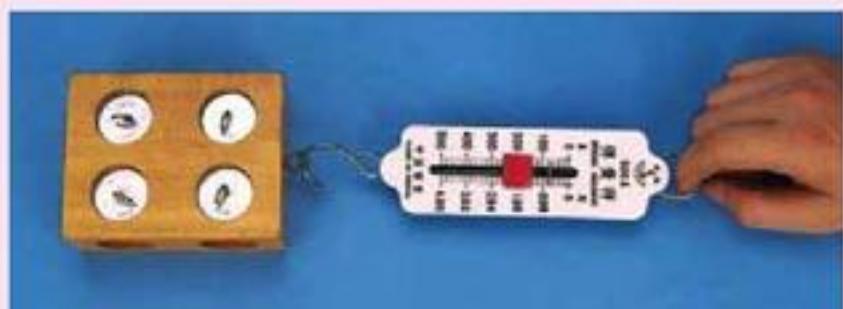


图 3.3-2 测力计指针下面的小纸团可以“记住”拉力曾经达到的最大值。

如果用力的传感器代替弹簧测力计做这个实验，能够在计算机屏幕上直接得到拉力变化的图线。

静摩擦力的增大有一个限度。静摩擦力的最大值 F_{\max} 在数值上等于物体刚刚开始运动时的拉力。两物体间实际发生的静摩擦力 F 在 0 与最大静摩擦力 F_{\max} 之间，即 $0 < F \leq F_{\max}$ 。

说一说

能把线织成布，把布缝成衣服，靠的是纱线之间静摩擦力的作用。拿在手中的瓶子、毛笔不会滑落，皮带运输机把货物送往高处（图 3.3-3），也是静摩擦力作用的结果。你还能说出日常生活和生产中利用静摩擦力的事例吗？



图 3.3-3 传送带靠静摩擦力把货物送到高处

图 3.3-4 轮胎表面都有花纹状的沟槽。雨天，沟槽能把轮胎与地面间的水排出，保持两者的良好接触以产生足够的摩擦力。沟槽的深度小于 2 mm 时轮胎就不应再使用了。



滑动摩擦力 在图 3.3-2 的实验中，木块在木板上开始滑动后，拉力明显减小，表明摩擦力明显减小。当一个物体在另一个物体表面滑动的时候，会受到另一个物体阻碍它滑动的力，这种力叫做滑动摩擦力（**sliding frictional force**）。滑动摩擦力的方向总是沿着接触面，并且跟物体的相对运动的方向相反。

实验表明：滑动摩擦力的大小跟压力成正比，也就是跟两个物体表面间的垂直作用力成正比。如果用 F 表示滑动摩擦力的大小，用 F_N 表示压力的大小，则有

$$F = \mu F_N \quad (1)$$

其中 μ 是比例常数（它是两个力的比值，没有单位），叫做动摩擦因数（**dynamic friction coefficient**）。

factor), 它的数值跟相互接触的两个物体的材料有关。材料不同, 两物体间的动摩擦因数也不同。动摩擦因数还跟接触面的情况(如粗糙程度)有关。

表1 几种材料间的动摩擦因数

材料	动摩擦因数	材料	动摩擦因数
钢—钢	0.25	钢—冰	0.02
木—木	0.30	木头—冰	0.03
木—金属	0.20	橡胶轮胎—路面(干)	0.71
皮革—铸铁	0.28		

| 例题 在我国东北寒冷的冬季, 雪橇是常见的运输工具。一个有钢制滑板的雪橇, 连同车上的木料的总重量为 $4.9 \times 10^4 \text{ N}$ 。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?

分析 雪橇在水平方向受到两个力的作用: 马在水平方向对雪橇的拉力 F_1 、冰道对雪橇的滑动摩擦力 F_2 。在这两个力的作用下, 雪橇匀速前进。

由于二力平衡, 匀速前进时马在水平方向的拉力 F_1 与摩擦阻力 F_2 大小相等, 即 $F_1 = F_2$ 。滑动摩擦力 F_2 的大小可以由 $F_2 = \mu F_N$ 求出。其中 F_N 是雪橇对地面的压力, 它的大小等于雪橇的总重量 G 。钢与冰之间的动摩擦因数 μ 可在表中查出。重量 G 是已知的, 由此可求出 F_2 , 进而求出马在水平方向的拉力 F_1 。

$$\text{解 } G = 4.9 \times 10^4 \text{ N}, \mu = 0.02$$

雪橇匀速运动, 拉力与阻力大小相等, 所以 $F_1 = F_2$

$$F_2 = \mu F_N$$

而

$$F_N = G$$

所以

$$F_1 = \mu G$$

代入数值后, 得

$$F_1 = 0.02 \times 4.9 \times 10^4 \text{ N} = 980 \text{ N}$$

马要在水平方向用 980 N 的力, 才能够拉着雪橇匀速前进。

除滑动摩擦外, 还有滚动摩擦。滚动摩擦是一个物体在另一个物体表面上滚动时产生的摩擦。当压力相同时, 滚动摩擦比滑动摩擦小很多。滚动轴承就是根据这一点制成的。

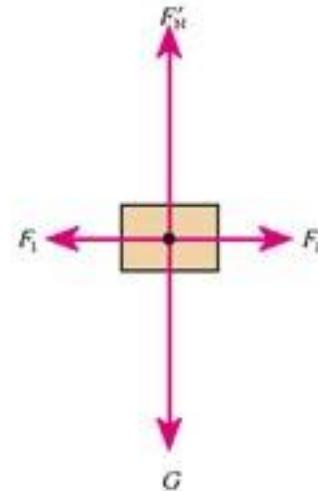


图 3.3-5 雪橇受力示意图



图 3.3-6 地面上有沙子, 易滑倒, 也是由于滚动摩擦比滑动摩擦小。

做一做

图3.3-7为自行车的滚动轴承。把滚珠沾上润滑油后放入“轴碗”，外面压上“轴挡”，中间穿上轴，就成了滚动轴承。

拆卸一个自行车的滚动轴承，观察其结构，试着自己重新组装。



图3.3-7 安装自行车的滚动轴承

科学漫步

流体的阻力

气体和液体都具有流动性，统称为流体。物体在流体中运动时，要受到流体的阻力，阻力的方向与物体相对于流体运动的方向相反。汽车、火车、飞机在空气中运动，要受到空气的阻力。快速骑自行车，我们会感到空气的阻力。轮船、潜艇在水面或水下航行，要受到水的阻力。鱼在水中游动，人在水中游泳，都要受到水的阻力。

流体的阻力跟物体相对于流体的速度有关，速度越大，阻力越大。雨滴在空气中下落，速度越来越大，所受空气阻力也越来越大。当阻力增加到跟雨滴所受的重力相等时，二力平衡，雨滴开始匀速下落。大雨滴比较重，与重力相平衡的空气阻力要比较大，雨滴速度较大时才能达到平衡。所以大雨滴落地时速度较大，“毛毛细雨”则缓慢地飘落到地面。

流体的阻力还跟物体的横截面积有关，横截面积越大，阻力越大。跳伞运动员在空中张开降落伞，凭借降落伞较大的横截面积取得较大的空气阻力，安全落地。

流体的阻力还跟物体的形状有关系。头圆尾尖的物体所受的流体阻力较小，这种形状通常叫做流线型。鱼的形状就是流线型的。为了减小阻力，小汽车、飞机、轮船的水下部分，外形都采用流线型。



图3.3-8 神舟号返回舱的空降试验



图 3.3-9 轮船的水下部分呈流线型



图 3.3-10 海豚的身体呈流线型

一般来说，空气阻力比液体阻力、固体间的摩擦力都要小。气垫船靠船下喷出的气体，浮在水面航行，阻力小、速度大。磁浮列车靠电磁力使列车悬浮在轨道上，速度可达 500 km/h。

问题与练习

- 手压着桌面向前移动，会明显地感觉到有阻力阻碍手的移动。手对桌面的压力越大，阻力越大。试一试，并说明道理。
- 一只玻璃瓶，在下列情况下是否受到摩擦力？如果受到摩擦力，摩擦力的方向如何？
 - 瓶子静止在粗糙水平桌面上。
 - 瓶子静止在倾斜的桌面上。
 - 瓶子被握在手中，瓶口朝上。
 - 瓶子压着一纸条，扶住瓶子把纸条抽出。
- 重量为 100 N 的木箱放在水平地板上，至少要用 35 N 的水平推力，才能使它从原地开始运动。木箱从原地移动以后，用 30 N 的水平推力，就可以使木箱继续做匀速运动。由此可知：木箱与地板间的最大静摩擦力 $F_{max} = \underline{\hspace{2cm}}$ ；木箱所受的滑动摩擦力 $F = \underline{\hspace{2cm}}$ ，木箱与地板间的动摩擦因数 $\mu = \underline{\hspace{2cm}}$ 。如果用 20 N 的水平推力推木箱，木箱所受的摩擦力是 $\underline{\hspace{2cm}}$ 。

4

力的合成

生活中常常见到这样的事例：如图 3.4-1，一个力的作用效果与两个或者更多力的作用效果相同。

当一个物体受到几个力的共同作用时，我们常常可以求出这样一个力，这个力产生的效果跟原来几个力的共同效果相同，这个力就叫做那几个力的合力（**resultant force**），原来的几个力叫做分力（**components of force**）。



图 3.4-1 一个成年人用的力与两个孩子用的力效果相同

力的合成 求几个力的合力的过程叫做力的合成(**composition of forces**)。这里我们探究求几个力的合力的方法。

思考与讨论

在图3.4-1中，假如这桶水的重量是200 N，两个孩子合力的大小一定也是200 N。现在的问题是：如果两个孩子用力的大小分别是 F_1 和 F_2 ， F_1 和 F_2 两个数值相加正好等于200 N吗？

实验

探究求合力的方法

如图3.4-2，手拉弹簧测力计对橡皮条产生力的作用，把它拉长。

图甲表示橡皮条GE在两个力的共同作用下，沿着直线GC伸长了EO这样的长度。图乙表示撤去 F_1 和 F_2 后，用一个力 F 作用在橡皮条上，使橡皮条沿着同一直线伸长相同的长度。

力 F 对橡皮条作用的效果与 F_1 、 F_2 共同作用的效果相同，所以力 F 等于 F_1 和 F_2 的合力。

我们要探究的是：合力 F 与分力 F_1 、 F_2 有什么关系？

探究时要注意下面几个问题。

1. 几个力的方向是沿着拉线方向的，因此要把拉线的方向描在木板的白纸上。

2. 几个力的大小由弹簧测力计读出，用力的图示法在纸上画出表示几个力的箭头。

3. 怎样表述合力的大小、方向与分力的大小、方向的关系？

建议用虚线把合力的箭头端分别与两个分力的箭头端连接，也许能够得到启示。

4. 得出你的结论后，改变 F_1 和 F_2 的大小和方向，重做上述实验，看看结论是否相同。

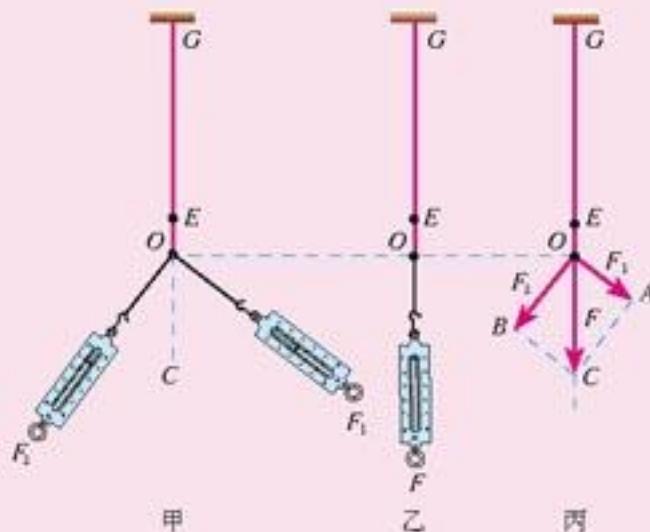


图3.4-2 探究求合力方法的实验装置

两个力合成时，以表示这两个力的线段为邻边作平行四边形，这两个邻边之间的对角线就代表合力的大小和方向(图3.4-3)。这个法则叫做平行四边形定则(**parallelogram rule**)。

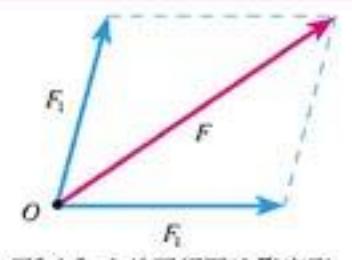


图3.4-3 力的平行四边形定则

例题 力 $F_1=45\text{ N}$, 方向水平向右。力 $F_2=60\text{ N}$, 方向竖直向上。通过作图求这两个力的合力 F 的大小和方向。

分析与解 选择某一标度, 例如用8 mm长的线段表示15 N的力, 作出力的平行四边形, 如图3.4-4所示, 表示 F_1 的线段长24 mm, 表示 F_2 的线段长32 mm。

用刻度尺测量后得知, 表示合力 F 的对角线长40 mm, 所以合力的大小 $F=15\text{ N} \times \frac{40}{8}=75\text{ N}$ 。

用量角器量得合力 F 与力 F_1 的夹角为 53° 。

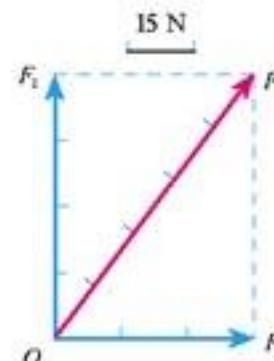


图3.4-4 求 F_1 、 F_2 的合力

如果两个以上的力作用在一个物体上, 也可以应用平行四边形定则求出它们的合力: 先求出任意两个力的合力, 再求出这个合力跟第三个力的合力, 直到把所有的力都合成进去, 最后得到的结果就是这些力的合力。

思考与讨论

根据力的平行四边形定则作图, 可以看出, 两个力 F_1 、 F_2 的合力 F 的大小和方向随着 F_1 、 F_2 的夹角而变化。当夹角分别等于 0° 和 180° 时, 怎样确定合力 F 的大小与方向?

共点力^① 如果一个物体受到两个或更多力的作用, 有些情况下这些力共同作用在同一点上, 或者虽不作用在同一点上, 但它们的延长线交于一点, 如图3.4-5, 这样的一组力叫做共点力(**concurrent forces**)。另一些情况下, 这些力不但没有作用在同一点上, 它们的延长线也不能交于一点, 如图3.4-6, 这一组力就不是共点力。

力的合成的平行四边形定则, 只适用于共点力。



图3.4-5 钩子受到的力是一组共点力

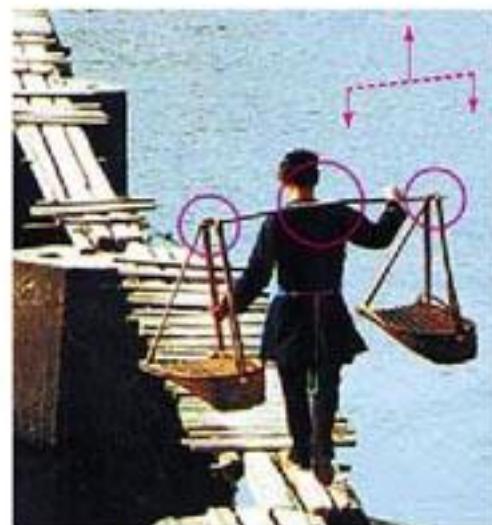


图3.4-6 担子受到的力不是共点力

^① 如果一个物体在力的作用下保持静止或匀速直线运动状态, 我们说这个物体处于“平衡状态”。受共点力作用的物体的平衡条件, 我们将在第四章第7节研究。

问题与练习

1. 有两个力，一个是10 N，一个是2 N，它们的合力有可能等于5 N、10 N、15 N吗？合力的最大值是多少？最小值是多少？
2. 有两个力，它们的合力为0。现把其中一个向东的6 N的力改为向南（大小不变），它们的合力大小、方向如何？
3. 两个力互成30°角，大小分别是90 N和120 N。通过作图求出合力的大小和方向。如果这两个力的大小不变，两力间的夹角变为150°，通过作图求出合力的大小和方向。
4. 两个力 F_1 和 F_2 间的夹角为 θ ，两力的合力为 F 。以下说法是否正确？
 - (1) 若 F_1 和 F_2 大小不变， θ 角越小，合力 F 就越大。
 - (2) 合力 F 总比分力 F_1 和 F_2 中的任何一个力都大。
 - (3) 如果夹角 θ 不变， F_1 大小不变，只要 F_2 增大，合力 F 就必然增大。

5

力的分解

力的分解 拖拉机拉着耙，对耙的拉力是斜向上方的，我们可以说，这个力产生两个效果：使耙克服泥土的阻力前进，同时把耙向上提，使它不会插得太深。这两个效果相当于两个力分别产生的（图3.5-1）：一个水平的力 F_1 使耙前进，一个竖直向上的力 F_2 把耙向上提。可见力 F 可以用两个力 F_1 和 F_2 来代替。力 F_1 和 F_2 是力 F 的分力。求一个力的分力叫做力的分解（resolution of force）。

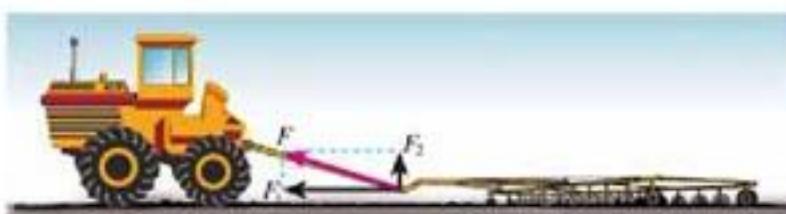


图3.5-1 拖拉机对耙的拉力产生两个作用效果

因为分力的合力就是原来被分解的那个力，所以力的分解是力的合成的逆运算，同样遵守平行四边形定则。把一个已知力 F 作为平行四边形的对角线，那么，与力 F 共点的平行四边形的两个邻边，就表示力 F 的两个分力。在图3.5-1中， F_1 和 F_2 由平行四边形的两个邻边代表。

需要指出的是，如果没有限制，对于同一条对角线，可以作出无数个不同的平行四边形（图3.5-2）。也就是说，同一个力 F 可以分解为无数对大小、方向不同的分力。一个已知力究竟应该怎样分解，要根据实际情况确定。

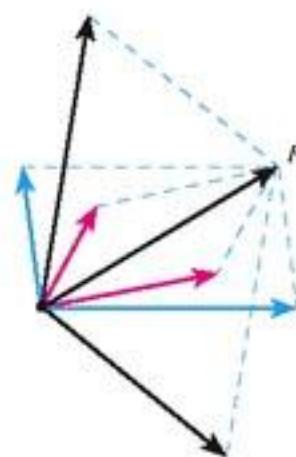


图3.5-2 一个力可以分解为无数对分力

例题 把一个物体放在倾角为 θ 的斜面上，物体受到竖直向下的重力，但它并不能竖直下落。从力的作用效果看，应该怎样将重力分解？两个分力的大小与斜面的倾角有什么关系？

分析 物体要沿着斜面下滑，同时会使斜面受到压力。这时重力产生两个效果：使物体沿斜面下滑并使物体紧压斜面。因此，重力G应该分解为这样两个分力：平行于斜面使物体下滑的分力 F_1 ，垂直于斜面使物体紧压斜面的分力 F_2 （图3.5-3）。

解 由几何关系可知，角DOE等于 θ ，所以

$$F_1 = G \sin \theta$$

$$F_2 = G \cos \theta$$

可以看出， F_1 和 F_2 的大小都与斜面的倾角有关。斜面的倾角 θ 增大时， F_1 增大， F_2 减小。

车辆上桥时，分力 F_1 阻碍车辆前进；车辆下桥时，分力 F_1 使车辆运动加快。为了行车方便与安全，高大的桥要造很长的引桥，来减小桥面的坡度。

矢量相加的法则 力是矢量，求两个力的合力时，不能简单地把两个力的大小相加，而要按平行四边形定则来确定合力的大小和方向。

我们曾经学过位移，它也是矢量。如图3.5-5，一个人从A走到B，发生的位移是AB，又从B走到C，发生的位移是BC。在整个运动过程中，这个人的位移是AC，AC是合位移。

在图3.5-5中，如果平行地移动矢量BC，使它的始端B与第一次位移的始端A重合，于是我们看到，两次位移构成了一个平行四边形的一组邻边，而合位移正是它们所夹的对角线。所以说，位移矢量相加时也遵从平行四边形定则。

从另一角度看，图3.5-5中AB和BC两个位移与它们的合位移AC又组成一个三角形。像这样把两个矢量首尾相接从而求出合矢量的方法，叫做三角形定则(**triangular rule**)。三角形定则与平行四边形定则的实质是一样的。

既有大小又有方向，相加时遵从平行四边形定则(或三角形定则)的物理量叫做矢量(**vector**)。只有大小，没有方向，求和时按照算术法则相加的物理量叫做标量(**scalar**)。

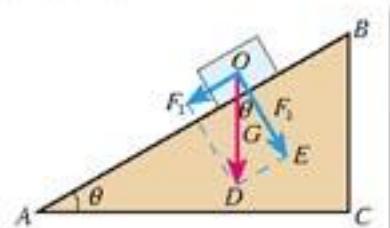


图3.5-3 物体所受重力使它下滑，同时紧压斜面。要根据这两个效果把力分解。



图3.5-4 高大的桥要造很长的引桥，减小斜面的倾角。

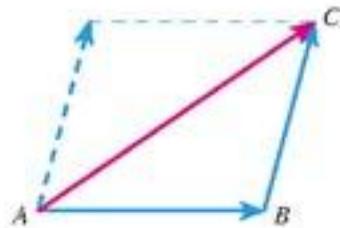


图3.5-5 位移也是矢量，求合位移时也要遵从矢量相加的法则。

请大家回顾第一章第2节的“思考与讨论”。

说一说

如图3.5-6，一个物体的速度 v_1 在一小段时间内发生了变化，变成了 v_2 。你能根据 v_1 、 v_2 ，按照三角形定则找出变化量 Δv 吗？

在第一章第5节，我们曾针对直线运动的速度，通过作图讨论过两个矢量 v_1 、 v_2 与它们的变化量 Δv 之间的关系。当时曾经指出：以原来的速度 v_1 的箭头端为起点，以后来的速度 v_2 的箭头端为终点，作出一个新的箭头，它就表示速度的变化量 Δv 。由于 $\Delta v = v_2 - v_1$ ，所以这个方法实际上是求两个矢量之差的一般性方法。

现在的问题是，图3.5-6中的 v_1 、 v_2 不在同一条直线上，还能应用这个方法吗？回答是肯定的。把 $\Delta v = v_2 - v_1$ 稍稍变形，根据矢量相加的三角形定则，你自己就能证明这一点。



图3.5-6 怎样由 v_1 和 v_2 找出 Δv ？

问题与练习

- 一个竖直向下的180 N的力分解为两个分力，一个分力在水平方向上并等于240 N，求另一个分力的大小和方向。
- 已知力 F 的大小和方向，在以下三种条件下（图3.5-7），通过作图求两个分力 F_1 和 F_2 。
 - 图甲，已知两个分力的方向，即图中 α 和 β ，求两力的大小。
 - 图乙，已知分力 F_1 的大小和方向，求另一个分力 F_2 的大小和方向。
 - 图丙，已知 F_1 的方向和 F_2 的大小，求 F_1 的大小和 F_2 的方向。

以上三种情况的解是否都是唯一的？

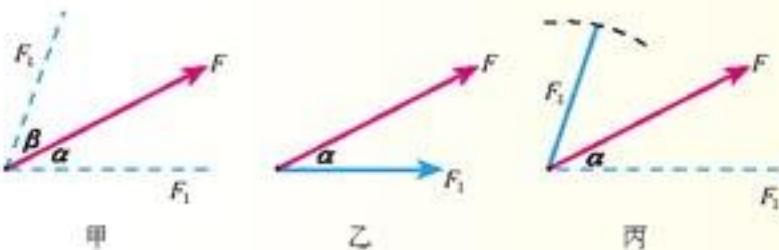


图3.5-7 已知力 F ，求它的分力。

- 一个小球在1 s时间内在水平方向上向右发生了4 m位移，同时在这1 s中，它也下落了5 m。问：该小球在这1 s内的位移是多大？方向如何？

自然和自然的法则在黑夜中隐藏；上帝说，让牛顿去吧！于是一切都被照亮。
——蒲柏①

第四章 牛顿运动定律



在前面我们学习了怎样描述物体的运动，但没有讨论物体为什么会有这种或那种运动。要讨论这样的问题，就要研究运动与力的关系。在物理学中，只研究物体怎样运动而不涉及运动与力的关系的理论，称做运动学(**kinematics**)；研究运动与力的关系的理论，称做动力学(**dynamics**)。

运动学是研究动力学的基础，但只有懂得了动力学的知识，才能根据物体所受的力确定物体的位置、速度变化的规律，才能够创造条件来控制物体的运动。例如，运动学只是使我们能够描述天体是怎样运动的，动力学则使我们能够把人造卫星和宇宙飞船送上太空，使人类登上月球，甚至奔向火星……牛顿运动定律确立了力与运动之间的关系，这一章我们就来学习它。

① 蒲柏 (Alexander Pope, 1688—1744)，英国诗人。诗句的原文是 *Nature and nature's law lay hid in night. God said, let Newton be! And all was light.*

1

牛顿第一定律

爱因斯坦曾把一代代科学家探索自然奥秘的努力，比做福尔摩斯侦探小说中警员破案的过程。在侦探故事中，有时候明显可见的线索却把人们引到错误的判断上去，也就是说，光凭经验来做判断常常是靠不住的。

长期以来，在研究物体运动原因的过程中，人们的经验证明：要使一个物体运动，必须推它或者拉它。因此，人们直觉地认为，物体的运动是与推、拉等行为相联系的，如果不再推、拉，原来的运动便停止下来。根据这类经验，亚里士多德得出结论：必须有力作用在物体上，物体才能运动；没有力的作用，物体就要静止在一个地方。然而，在探究运动原因的“侦探小说”里，这正是由明显的线索引出错误判断的案例，而且这个“错案”竟维持了近两千年。直至三百多年前，伽利略才创造了有效的“侦察”方法，发现了正确的线索，揭示了现象的本质，成为物理学中的“福尔摩斯”。

理想实验的魅力 伽利略认为，将人们引入歧途的是摩擦力，而在日常物体的运动中，摩擦力又是难以避免的。

伽利略注意到，当一个球沿斜面向下滚动时，它的速度增大，而向上滚动时，速度减小。他由此猜想：当球沿水平面滚动时，它的速度应该不增不减。但是实际情况却是，即使沿水平面滚动，球也越来越慢，最后停下来。伽利略认为，这是摩擦阻力作用的结果，因为他同样还观察到，表面越光滑，球便会滚得越远。于是，他推断：若没有摩擦阻力，球将永远滚动下去。

伽利略为了说明他的思想，设计了一个如图4.1-1所示的实验：让小球沿一个斜面从静止状态开始滚下，小球将滚上另一个斜面，如果没有摩擦，小球将上升到原来的高度。减小后一斜面的倾角，小球在这个斜面上仍达到同一高度，但这时它要滚得远些。继续减小第二个斜面的倾角，球达到同一高度时就会离得更远。于是他问道：若将后一斜面放平，球会滚动多远？结论显然是，球将永远滚动下去。这就是说，力不是维持物体运动的原因，也就是说，力不是维持物体的速度的原因，而恰恰是改变物体运动状态，即改变物体速度的原因。因此，一旦物体具有某一速度，如果它不受力，就将以这一速度匀速直线地运动下去。



动力学的奠基者是英国科学家牛顿 (Isaac Newton, 1643—1727)。他在 1687 年出版的《自然哲学的数学原理》中提出了三条运动定律，后人把它们总称为牛顿运动定律 (Newton laws of motion)，它们是整个动力学的核心。

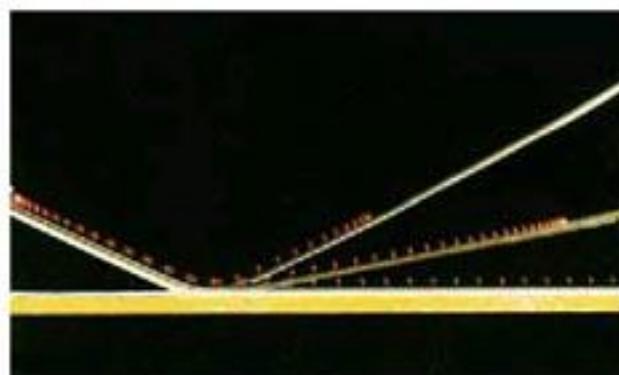


图 4.1-1 现代人所做伽利略斜面实验的频闪照片 (组合图)

当然，我们不能消除一切阻力，也不能把水平木板做得无限长，所以伽利略的实验是个“理想实验”。

与伽利略同时代的法国科学家笛卡儿(R. Descartes, 1596—1650)补充和完善了伽利略的观点，明确指出：除非物体受到力的作用，物体将永远保持其静止或运动状态，永远不会使自己沿曲线运动，而只保持在直线上运动。他还认为，这应该成为一个原理，它是人类整个自然观的基础。

牛顿物理学的基石——惯性定律 伽利略和笛卡儿的正确结论在隔了一代人以后，由牛顿总结成动力学的一条基本定律：一切物体总保持匀速直线运动状态或静止状态，除非作用在它上面的力迫使它改变这种状态。这就是牛顿第一定律(**Newton first law**)。牛顿第一定律表明，物体具有保持原来匀速直线运动状态或静止状态的性质，我们把这个性质叫做惯性(**inertia**)。牛顿第一定律又叫做惯性定律(**law of inertia**)。

因为不可能把自然界的任何物体完全孤立起来，也就是说，不受力作用的物体是不存在的，所以，牛顿第一定律是利用逻辑思维对事实进行分析的产物，不可能用实验直接验证。但是，许许多多现象可以帮助我们理解牛顿第一定律。例如，冰球场上，冰球离开球杆后，能以几乎不变的速度继续前进，直到它再一次受到球杆的打击或碰到障碍物，才改变这种状态。

惯性与质量 牛顿第一定律涉及两个重要的物理概念：力和惯性。力，不仅是物理学中的基本概念，也是日常生活中用得很多的一个名词，这在上一章已经讨论过了。

思考与讨论

从牛顿第一定律我们得知，物体都要保持它们原来的匀速直线运动或静止的状态，或者说，它们都具有抵抗运动状态变化的“本领”。但是这种“本领”的大小是不一样的。

物体抵抗运动状态变化的“本领”，与什么因素有关？请大家通过实例进行分析。

如果一个物体由静止变为运动或由运动变为静止，我们说，它的“运动状态”发生了改变。

如果一个物体速度的大小或方向变了，我们也说，它的“运动状态”发生了改变。

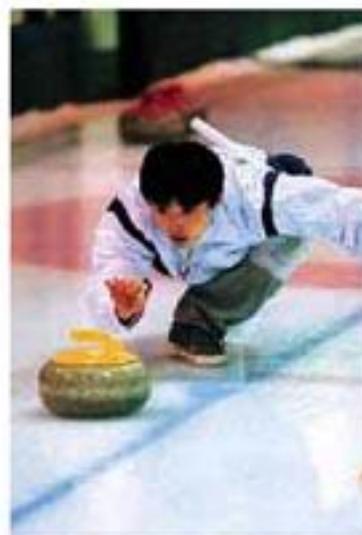


图4.1-2 冰壶是冬奥会的正式比赛项目。冰壶在冰面运动时受到的阻力很小，可以在较长时间内保持运动速度的大小和方向不变。

观察和实验表明，对于任何物体，在受到相同的作用力时，决定它们运动状态变化难易程度的惟一因素就是它们的质量。由此我们得出结论：描述物体惯性的物理量是它们的

质量(**mass**)。

质量只有大小，没有方向，它是标量。在国际单位制中，质量的单位是千克，单位符号为kg。

在初中，我们把质量理解为物体所含物质的多少；现在，又从物体惯性的角度认识质量。以后我们还会通过物体间的引力认识质量。

我们对于科学概念的认识就是这样一步一步深入的。

科学漫步

惯性参考系

前面学习运动的相对性时我们已经知道，为了描述物体的运动，要选择一个物体做参考系，而参考系的选择带有一定的任意性。例如，描述火车车厢内物体的运动时，可以选择地面为参考系，也可以选择车厢为参考系。

但是，在应用牛顿第一定律时，可以任意选择参考系吗？考察下面的情况也许会有帮助。

在一节火车车厢内有一个水平的桌面，桌上有一个小球。如果火车停在水平的铁轨上，小球能够静止在桌面上，能够保持它的静止状态不变。这是符合牛顿第一定律的。

如果火车突然向前开动，小球的状态会有什么变化吗？在火车加速的同时，小球会运动吗？这时它受到水平方向的力吗？用加速运动的车厢作为参考系，牛顿第一定律适用吗？

在有些参考系中，不受力的物体会保持静止或匀速直线运动的状态，这样的参考系叫做惯性参考系，简称惯性系(**inertial system**)。以加速运动的火车为参考系，牛顿第一定律并不成立，这样的参考系叫做非惯性系。

在研究地面物体的运动时，一般可以把地面看做惯性系，相对地面做匀速直线运动的其他参考系，例如沿平直轨道匀速行驶的列车，也可以看做惯性系。



图4.1-3 以加速运动的车厢为参考系，牛顿第一定律并不成立。

问题与练习

1. 回答下列问题：

- (1) 飞机投弹时，如果发现目标在飞机的正下方才投下炸弹，能击中目标吗？为什么？
- (2) 地球在从西向东自转，你向上跳起来以后，为什么还落到原地，而不落到原地的西边？

2. 我国道路交通安全法规定，在各种小型车辆前排乘坐的人必须系好安全带。为什么要这样做规定？
3. 一个同学说，向上抛出的物体，在空中向上运动时，肯定受到了向上的作用力，否则它不可能向上运动。这个结论错在什么地方？
4. 请你通过实例说明，如果所选的参考系在相对于某惯性系做变速运动，惯性定律在所选的参考系中就不成立。

2

实验：探究加速度与力、质量的关系

物体运动状态变化的快慢，也就是物体加速度的大小，与物体的质量有关。例如，一般小汽车从静止加速到100 km/h，只需十几秒的时间，而满载的货车加速就慢得多。

物体运动状态变化的快慢，还与物体受力的大小有关。例如，竞赛用的小汽车，质量与一般的小汽车相仿，但因为安装了强大的发动机，能够获得巨大的牵引力，可以在四五秒的时间内从静止加速到100 km/h。

这些事实告诉我们，物体的质量一定时，受力越大，它获得的加速度越大；物体受力一定时，它的质量越小，加速度也越大。然而，物理学不满足于这样定性的描述。我们还想知道，物体的加速度与它受的力、它的质量有什么定量关系。下面通过实验探究这两个问题。

加速度与力的关系

实验的基本思路：保持物体的质量不变，测量物体在不同的力的作用下的加速度，分析加速度与力的关系。

实验数据的分析：设计一个表格，把同一物体在不同力的作用下的加速度填在表中。为了更直观地判断加速度 a 与力 F 的数量关系，我们以 a 为纵坐标、 F 为横坐标建立坐标系，根据各组数据在坐标系中描点。如果这些点在一条过原点的直线上，说明 a 与 F 成正比，如果不是这样，则需进一步分析。



图4.2-1 竞赛用汽车的质量不大，却安装着强大的发动机，可以获得很大的加速度。

加速度与质量的关系

实验的基本思路：保持物体所受的力相同，测量不同质量的物体在该力作用下的加速度，分析加速度与质量的关系。

实验数据的分析：设计第二个表格，把不同物体在相同力的作用下的加速度填在表中。

根据我们的经验，在相同力的作用下，质量 m 越大，加速度 a 越小。这可能是“ a 与 m 成反比”，但也可能是“ a 与 m^2 成反比”，甚至是更复杂的关系。我们从最简单的情况入手，检验是否“ a 与 m 成反比”。在数据处理上要用到下面的技巧。

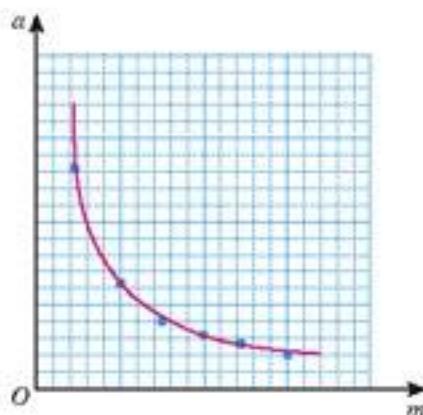


图 4.2-2 按照初中的数学知识，检查 a - m 图象是不是双曲线，就能判断它们之间是不是反比例关系，但检查这条曲线是不是双曲线并不容易。

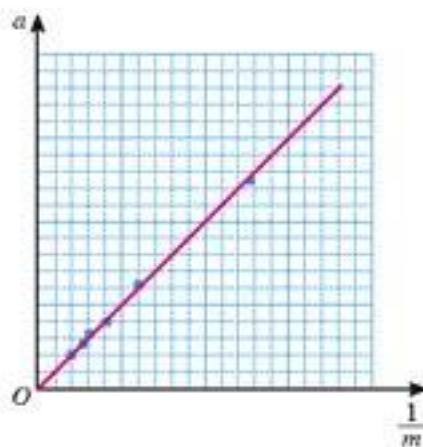


图 4.2-3 检查是否能用一条直线描述这些点的关系，那就容易多了。

“ a 与 m 成反比”实际上就是“ a 与 $\frac{1}{m}$ 成正比”，如果以 a 为纵坐标、 $\frac{1}{m}$ 为横坐标建立坐标系，根据 a - $\frac{1}{m}$ 图象是不是过原点的直线，就能判断加速度 a 是不是与质量 m 成反比。用相似的方法也可以检验关于 a 、 m 之间关系的其他假设。

这里我们已经假设加速度与质量成反比，如果当初假设加速度与质量的二次方成反比，最好作哪两个量之间关系的图象？

制定实验方案时的两个问题 这个实验需要测量的物理量有三个：物体的加速度、物体所受的力、物体的质量。质量可以用天平测量，并不困难，本实验要解决的主要问题是怎样测量加速度和怎样提供并测量物体所受的力。

1. 怎样测量(或比较)物体的加速度

如果物体做初速度为 0 的匀加速直线运动，那么，测量物体加速度最直接的办法就是用刻度尺测量位移并用秒表测量时间，然后由 $a = \frac{2x}{t^2}$ 算出。也可以在运动物体上安装一条打点计时器的纸带，根据纸带上打出的点来测量加速度。

其实，在这个实验中也可以不测加速度的具体数值，这是因为我们探究的是加速度与其他量之间的比例关系。因此，测量不同情况下(即不同受力时、不同质量时)物体加速度的比值，就可以了。

由于 $a = \frac{2x}{t^2}$ ，如果测出两个初速度为 0 的匀加速运动在相同时间内发生的位移 x_1 、 x_2 ，位移之比就是加速度之比，即

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{x_1}{x_2}$$

2. 怎样提供并测量物体所受的恒力

现实中，除了在真空中抛出或落下的物体(仅受重力)外，仅受一个力的物体几乎是不存在的。然而，一个单独的力的作用效果与跟它大小、方向都相同的合力的作用效果是相同的，因此，实验中力 F 的含义可以是物体所受的合力。

如何为运动的物体提供一个恒定的合力？如何测出这个合力？有很多可行的方法。下面案例中的方法可供选用，也可以设计其他方法。

参考案例

两个相同的小车放在光滑水平板上，前端各系一条细绳，绳的另一端跨过定滑轮各挂一个空盘，盘中可放砝码(图4.2-4)。小盘和砝码所受的重力，等于使小车做匀加速运动的力^①。因此，增减小盘中的砝码就可以改变小车受到的合力。

两个小车后端各系一条细线，用一个黑板擦把两条细线同时按在桌子上，使小车静止(图4.2-5)。抬起黑板擦，两个小车同时开始运动，按下黑板擦，两个小车同时停下来。用刻度尺测出两个小车通过的位移，位移之比就等于它们的加速度之比。

为了改变小车的质量，可以在小车中增减砝码。

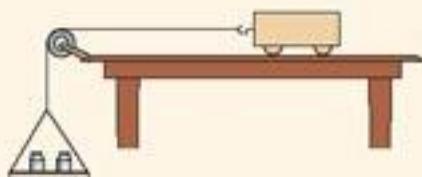


图4.2-4 实验装置(侧视图，只画了一个小车)

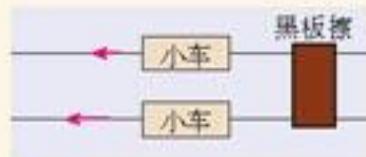


图4.2-5 用黑板擦控制小车的动与停

请确定自己的探究方案、进行实验、作出图象、进行分析、形成结论，并与同学交流。对结论的可靠性要进行评估。

怎样由实验结果得出结论 在这个实验中，我们根据日常经验和观察到的事实，首先猜想物体的加速度与它所受的力及它的质量有最简单的关系，即加速度与力成正比、与质量成反比

$$a \propto F, \quad a \propto \frac{1}{m}$$

如果这个猜想是正确的，那么，根据实验数据以 a 为纵坐标、 F 为横坐标，和以 a 为纵坐标、 $\frac{1}{m}$ 为横坐标作出的图象，都应该是过原点的直线。但是实际情况往往不是这样：描出的点并不是严格地位于某条直线上；用来拟合这些点的直线并非准确地通过原点。

这时我们会想，自然规律真的是 $a \propto F$ 和 $a \propto \frac{1}{m}$ 吗？如果我们多做几次类似的实验，每次实验的点都可以拟合成直线，而这些直线又都十分接近原点(参见本书图实-6)，那么，实

^① 这两个力只是近似相等，条件是盘和砝码的质量要比小车的质量小很多。通过以后的学习我们将会证明这一点。

际的规律很可能就是这样的。

可见，到这时为止，我们的结论仍然带有猜想和推断的性质。只有根据这些结论推导出的很多新结果都与事实一致时，这样的结论才能成为“定律”。本节实验只是让我们对于自然规律的探究有所体验，实际上一个规律的发现不可能是几次简单的测量就能得出的。

由此看来，科学前辈们在根据有限的实验事实宣布某个定律时，既需要谨慎，也需要勇气。

现在，科学研究人员做实验时都要对误差做定量的分析，以确认这些偏差与实验误差的关系。这样，下结论时的把握就大多了。

3

牛顿第二定律

牛顿第二定律 通过上一节的探究我们已经看到，小车的加速度可能与它所受的力成正比，与它的质量成反比。大量实验和观察到的事实都能得出同样的结论，由此可以总结出一般的规律：物体加速度的大小跟作用力成正比，跟物体的质量成反比，加速度的方向跟作用力的方向相同。这就是牛顿第二定律(**Newton second law**)。

牛顿第二定律可以用比例式来表示，这就是

$$a \propto \frac{F}{m}$$

或者

$$F \propto ma$$

这个比例式也可以写成等式

$$F = kma$$

其中 k 是比例系数。

实际物体所受的力往往不止一个，这时式中 F 指的是物体所受的合力。

力的单位 我们在初中已经知道，在国际单位制中，力的单位是牛顿。“牛顿”这个单位是怎样定义的？学过牛顿第二定律之后，我们就能知道了。

在17世纪，人类已经有了一些基本物理量的计量标准，但是，还没有规定多大的力作为力的单位。因此，在 $F = kma$ 这个关系式中，比例系数 k 的选取就有一定的任意性，只要是常数，它就能正确表示 F 与 m 、 a 之间的比例关系。如果选取 $k=1$ ，那么就有

$$F = ma$$

这就是今天我们熟知的牛顿第二定律的数学表达式。当物体的质量是 $m=1\text{ kg}$ 、在某力的作用下它获得的加速度是 $a=1\text{ m/s}^2$ 时， $F = ma = 1\text{ kg} \times 1\text{ m/s}^2 = 1\text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$ 。我们就把这个力叫做“一个单位的力”。也就是说，如果质量和加速度的单位分别用千克和米每二次方秒，力的单位就是千克米每二次方秒。后人为了纪念牛顿，把 $\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$ 称做“牛顿”，用符号 N 表示。

例题1 某质量为1 100 kg的汽车在平直路面试车，当达到100 km/h的速度时关闭发动机，经过70 s停下来，汽车受到的阻力是多大？重新起步加速时牵引力为2 000 N，产生的加速度应为多大？假定试车过程中汽车受到的阻力不变。

分析 由于路面水平，汽车在竖直方向受到的重力与地面的支持力大小相等、方向相反，合力为0，所以只需要考虑汽车在水平方向的运动。在水平方向，只有牵引力和阻力，使汽车产生加速度的力是这两个力的合力。

在试车的第一阶段，已经知道初速度和末速度，可以求出加速度，进而由牛顿第二定律可以计算汽车受到的阻力。

阻力包括路面的摩擦力和空气的阻力。一般说来，空气阻力与车速有关，但本题做了简化，认为阻力是不变的，所以从题目所给的牵引力减去第一阶段得出的阻力就是试车的第二阶段的合力，根据牛顿第二定律就能算出汽车的加速度。

同样，因为假定汽车所受的阻力不变，所以它的加速度是一定的，可以应用匀变速运动的规律。

解 沿汽车运动的方向建立坐标轴（图4.3-1、4.3-2）。

在试车的第一阶段，汽车做匀变速运动，初速度是 $v_0 = 100 \text{ km/h} = 27.8 \text{ m/s}$ ，末速度是0，滑行时间 $t = 70 \text{ s}$ 。因此加速度 a_1 为

$$a_1 = \frac{0 - v_0}{t} = -\frac{v_0}{t}$$

汽车受到的阻力为

$$F_{\text{阻}} = ma_1 = -\frac{mv_0}{t} = -\frac{1100 \times 27.8}{70} \text{ N} = -437 \text{ N}$$

负号表示阻力的方向与坐标轴的方向相反，即与速度的方向相反。

在重新起步并加速后，汽车除了受到上述阻力外，还受到牵引力 F ， F 的方向与坐标轴的方向一致，取正号。合力是牵引力的大小与阻力的大小之差，即

$$F_{\text{合}} = 2000 \text{ N} - 437 \text{ N} = 1563 \text{ N}$$

由牛顿第二定律可得汽车的加速度 a_2

$$a_2 = \frac{F_{\text{合}}}{m} = \frac{1563}{1100} \text{ m/s}^2 = 1.42 \text{ m/s}^2$$

在试车的第二阶段，加速度的方向与坐标轴的方向相同，即与速度的方向相同。

例题2 一个物体，质量是2 kg，受到互成120°角的两个力 F_1 和 F_2 的作用，此外没有其他的力。这两个力的大小都是10 N，这个物体产生的加速度是多大？

分析 考虑下面几个小问题有助于解决这个例题。

(1) 这个问题是求物体的加速度，自然会想到由牛顿第二定律 $F = ma$ 可以得到 $a = \frac{F}{m}$ 。

汽车的最大牵引力可根据技术手册中的数据推算得出。



图4.3-1 汽车减速时的受力情况



图4.3-2 汽车重新加速时的受力情况

但是，这个问题中作用在物体上的是两个力 F_1 和 F_2 ，应该怎样处理？

(2) 两个不在一条直线上的力，求它们的合力时可以把它们在各个坐标轴上的投影分别相加。这时，恰当地选择坐标轴的方向能够使问题简化。在这个问题中，应该怎样建立坐标系？

解 先求 F_1 和 F_2 的合力 $F_{合}$ ，然后用牛顿第二定律求出加速度。

以 F_1 和 F_2 为邻边作出平行四边形。由于 F_1 和 F_2 的大小相等，由对称性可以知道，合力的方向不会偏向于 F_1 ，也不会偏向于 F_2 ，它应该在 F_1 和 F_2 的夹角的平分线上。所以最好以合力的方向为 x 轴的方向，即按图4.3-3建立坐标系。

把力 F_1 和 F_2 分别沿 x 轴和 y 轴的方向分解，它们的分力为

$$F_{1x} = F_1 \cos 60^\circ, F_{1y} = F_1 \sin 60^\circ$$

$$F_{2x} = F_2 \cos 60^\circ, F_{2y} = F_2 \sin 60^\circ$$

F_1 和 F_2 在 y 方向的两个分力 F_{1y} 和 F_{2y} 大小相等、方向相反，作用相互抵消，它们在 x 方向的分力 F_{1x} 和 F_{2x} 的方向相同；所以 F_{1x} 和 F_{2x} 的合力就是 F_1 和 F_2 的合力，即

$$F_{合} = F_{1x} + F_{2x} = F_1 \cos 60^\circ + F_2 \cos 60^\circ = 5 \text{ N} + 5 \text{ N} = 10 \text{ N}$$

由于知道了合力 $F_{合}$ 与物体的质量 m ，由牛顿第二定律 $F_{合} = ma$ 就可以求出加速度

$$a = \frac{F_{合}}{m} = \frac{10 \text{ N}}{2 \text{ kg}} = 5 \text{ m/s}^2$$

加速度的方向与 $F_{合}$ 方向相同。

说一说

质量不同的物体，所受的重力不一样，它们自由下落时加速度却是一样的。你怎样解释？

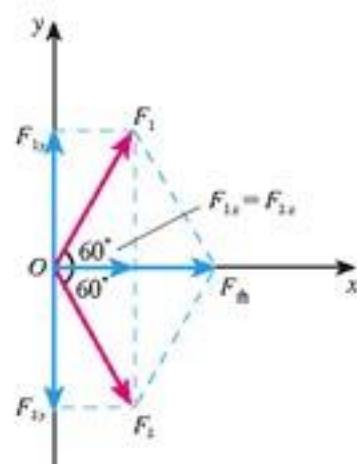


图 4.3-3 求 F_1 和 F_2 的合力

$F_{1x}, F_{1y}, F_{2x}, F_{2y}$ 叫做 F_1, F_2 在 x 轴和 y 轴上的投影。

这个解题过程使我们受到启发：求几个矢量的合矢量时，可以分别计算它们在 x, y 轴上的投影，然后对它们在同一坐标轴上的投影求代数和。有时这样可以免去许多平面几何的烦琐证明和计算。

科学漫步

用动力学方法测质量

大家都知道，质量可以用天平来测量。可是在宇宙空间，怎样测质量？设想，你自己就是一艘带有喷气发动机的飞船，你用力推一个质量未知的物体，当用力一定时，它的质量越大，产生的加速度就越小……知道了所用的力和物体的加速度，根据牛顿第二定律就能得出物体的质量了。这就是动力学的方

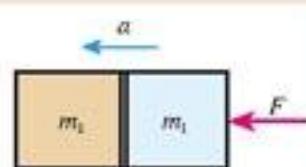


图 4.3-4 测量质量 m_1

法。飞船的推力是已知的，飞船的加速度应该怎样测出？

在阅读下面一段前请先想一想，用这种方法测量一个物体的质量，例如一个小型空间站的质量，需要进行哪些测量，测量数据应该怎样处理。方法要尽可能简单、可行。

1966年曾在地球的上空完成了以牛顿第二定律为基础的测定质量的实验。实验时，用双子星号宇宙飞船 m_1 去接触正在轨道上运行的火箭组 m_2 （发动机已熄火）。接触以后，开动飞船尾部的推进器，使飞船和火箭组共同加速（图4.3-4）。推进器的平均推力 F 等于895 N，推进器开动时间为7 s。测出飞船和火箭组的速度变化是0.91 m/s。双子星号宇宙飞船的质量是已知的， $m_1 = 3\,400 \text{ kg}$ ，我们要求的是火箭的质量 m_2 。

接下来的计算请同学们自己完成。

实际上，火箭组的质量 m_2 已经事先测出，为3 660 kg，与动力学方法测得的结果相差不到5%，正在预期的误差范围之内。这次实验的目的是要发展一种技术，找出测定轨道中人造天体的质量的方法。

问题与练习

- 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箱子，却提不动它。这跟牛顿第二定律有没有矛盾？应该怎样解释这个现象？
- 一个物体受到 $F_1 = 4 \text{ N}$ 的力，产生 $a_1 = 2 \text{ m/s}^2$ 的加速度，要使它产生 $a_2 = 6 \text{ m/s}^2$ 的加速度，需要施加多大的力？
- 甲、乙两辆实验小车，在相同的力的作用下，甲车产生的加速度为 1.5 m/s^2 ，乙车产生的加速度为 4.5 m/s^2 ，甲车的质量是乙车的几倍？
- 质量是2 kg的物体，只受到互成 90° 角的两个力的作用，这两个力都是14 N。这个物体加速度的大小是多少？沿什么方向？
- 水平路面上质量是30 kg的手推车，在受到60 N的水平推力时做加速度为 1.5 m/s^2 的匀加速运动。如果撤去推力，车的加速度是多少？

4

力学单位制

由位移和时间求速度时，所用的关系式为 $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ 。如果位移用米做单位，时间用秒做单位，得出的速度单位就是米每秒。已知速度的变化量和发生这个变化所用的时间，要由此

求加速度时，所用的关系是 $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ 。如果速度的单位用米每秒，时间的单位用秒，得出的

加速度的单位就是米每二次方秒。由此可见，当我们说“物理学的关系式确定了物理量之间的关系”时，也指它确定了物理量的单位间的关系。

再看牛顿第二定律。如果在 $F=ma$ 这个关系式中， m 的单位用千克， a 的单位用米每二次方秒，得出的力的单位就一定是千克米每二次方秒。这个名称太长，我们给了它一个简单的名称——牛顿。

从这些例子可以看出，只要选定几个物理量的单位，就能够利用物理量之间的关系推导出其他物理量的单位。这些被选定的物理量叫做基本量，它们的单位叫做基本单位。在上面的例子中，长度、质量、时间是基本量，它们的单位米、千克、秒就是基本单位。由基本量根据物理关系推导出来的其他物理量的单位，例如速度、加速度的单位，叫做导出单位。基本单位和导出单位一起组成了单位制(**system of units**)。

如果采用不同的物理量作为基本量，或者虽然采用相同的基本量，但采用的基本单位不同，导出单位自然随之不同，从而产生不同的单位制。1960年第11届国际计量大会制订了一种国际通用的、包括一切计量领域的单位制，叫做国际单位制(**Le Système International d'Unités**，法文)，简称**SI**。

在力学范围内，国际单位制规定长度、质量、时间为三个基本量，它们的单位米、千克、秒为基本单位。对于热学、电磁学、光学等学科，除了上述三个基本量和相应的基本单位外，还要加上另外的四个基本量和它们的基本单位，才能导出其他物理量的单位。

国际单位制的基本单位

物理量名称	物理量符号	单位名称	单位符号
长度	l	米	m
质量	m	千克(公斤)	kg
时间	t	秒	s
电流	I	安[培] ^①	A
热力学温度	T	开[尔文]	K
物质的量	n , (v)	摩[尔]	mol
发光强度	I , (I_v)	坎[德拉]	cd

例题 光滑水平桌面上有一个静止的物体，质量是7 kg，在14 N的恒力作用下开始运动(图4.4-1)，5 s末的速度是多大？5 s内通过的位移是多少？

分析 物体的受力情况是已知的，需要分析它的运动情况。物体原来是静止的，初速度 $v_0 = 0$ ，在恒力的作用下产生恒定的加速度，所以它做初速度为0的匀加速直线运动。已知物体的质量 m 和所受的力 F ，根据牛顿第二定律 $F=ma$ 求出加速度 a ，再根据匀加速直线运动速度与时间的关系和位移与时间的关系，就可以求出5 s末的速度 v 和5 s内的位移 x 。

①方括号前的字是该单位的中文简称和中文符号，下同。

解 根据已知条件, $m=7\text{ kg}$, $F=14\text{ N}$, $t=5\text{ s}$,
并根据牛顿第二定律, 有

$$a=\frac{F}{m}=\frac{14\text{ N}}{7\text{ kg}}=2\text{ m/kg}=2\text{ m/s}^2$$

$$v=at=2\text{ m/s}^2 \times 5\text{ s}=10\text{ m/s}$$

$$x=\frac{1}{2}at^2=\frac{1}{2} \times 2\text{ m/s}^2 \times 25\text{ s}^2=25\text{ m}$$

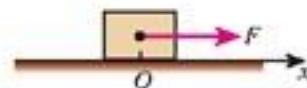


图 4.4-1 求物体通过的位移

我们看到, 题中的已知量的单位都用国际单位制表示时, 计算的结果也是用国际单位制表示的。既然如此, 在统一已知量的单位后, 就不必一一写出各量后面的单位, 只在数字后面写出正确的单位就可以了。这样, 上面的计算就可以写成:

$$a=\frac{F}{m}=\frac{14}{7}\text{ m/s}^2=2\text{ m/s}^2$$

$$v=at=2 \times 5\text{ m/s}=10\text{ m/s}$$

$$x=\frac{1}{2}at^2=\frac{1}{2} \times 2 \times 25\text{ m}=25\text{ m}$$

说一说

有时候根据物理量的单位能够查出运算或者印刷中的错误。

小刚在课余制作中需要计算圆锥的体积, 他从一本书中查得圆锥体积的计算公式为 $V=\frac{1}{3}\pi R^2 h$ 。小红说, 从单位关系上看, 这个公式肯定是错误的。她的根据是什么?

图 4.4-2 圆锥的高 h 和底面半径 R

问题与练习

- 一辆速度为 4 m/s 的自行车, 在水平公路上匀减速地滑行 40 m 后停止。如果自行车和人的总质量是 100 kg , 自行车受到的阻力是多大?
- 一辆质量是 2 t 的汽车, 在水平公路上以 54 km/h 的速度匀速行驶。根据测试, 这辆车在这种路面上紧急刹车时, 汽车所受的制动力为 $1.2 \times 10^4\text{ N}$ 。汽车要滑行多大距离才能停下来?
- 在初中已经学过, 如果一个物体在力 F 的作用下沿着力的方向移动了一段距离 l , 这个力对物体做的功 $W=Fl$ 。我们还学过, 功的单位是焦耳(J)。请由此导出焦耳与基本单位米(m)、千克(kg)、秒(s)之间的关系。
- 我们已经知道, 作为自由落体加速度, g 的单位是 m/s^2 ; 但我们在初中学过, 作为质量与物体所受重力的比例系数, g 的单位是 N/kg 。请证明: $1\text{ m/s}^2 = 1\text{ N/kg}$ 。

5

牛顿第三定律

作用力和反作用力 力是物体对物体的作用。只要谈到力，就一定存在着受力物体和施力物体。

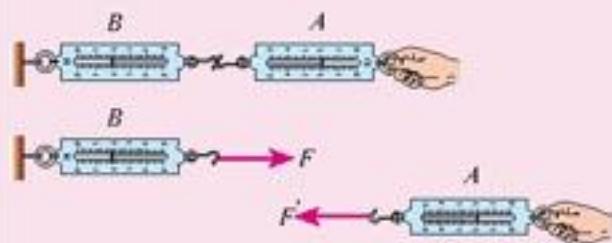
用手拉弹簧，弹簧受到手的拉力，同时弹簧发生形变，手也就受到弹簧的拉力。坐在椅子上用力推桌子，会感到桌子也在推我们，我们的身体要向后仰。在平静的水面上，一只船上的人用力推另一只船，另一只船也要推前一只船，两只船将同时从静止开始向相反方向运动（图4.5-2）。我们常说，地面上的物体受到地球的吸引（重力），其实，地球也在受着地面上的物体的吸引，地球和地面上物体之间的作用也是相互的。如此等等，不胜枚举。

观察和实验表明，两个物体之间的作用总是相互的。一个物体对另一个物体施加了力，后一物体一定同时对前一物体也施加了力。物体间相互作用的这一对力，通常叫做作用力（action）和反作用力（reaction）。作用力和反作用力总是互相依存，同时存在的。我们可以把其中任何一个力叫做作用力，另一个力叫做反作用力。

牛顿第三定律 作用力和反作用力的大小之间、方向之间有什么样的关系？这又是一个定量的问题，而定量的问题只靠日常的观察和经验是解决不了的，它需要通过实验测量来回答。

实验

探究作用力与反作用力的关系



把A、B两个弹簧测力计连接在一起，B的一端固定，用手拉测力计A。如图4.5-3所示，可以看到两个测力计的指针同时移动。这时，测力计A受到B的拉力 F' ，测力计B则受到A的拉力F。F与 F' 有什么关系？

图4.5-3 两个弹簧测力计的读数有什么关系？它们受力的方向有什么关系？



图4.5-1 手用力拉弹簧，弹簧也用力拉手。



图4.5-2 用力推另一只船时，自己的船也会受到力的作用。

做一做

用传感器探究作用力与反作用力的关系

把一只力传感器连在计算机上，传感器的钩子上挂钩码，钩子受力的大小随时间变化的情况，可以由计算机屏幕显示。

如图 4.5-4 所示，实验时把两只力传感器同时连在计算机上，其中一只系在墙上，另一只握在手中。图 4.5-5 中横坐标轴上下两条曲线分别表示两只传感器受力的大小。

用力拉一只传感器，可以看到，在一只传感器受力的同时，另一只传感器也受到力的作用，而且在任何时刻两个力的大小都是相等的、方向都是相反的（图 4.5-5）。

运动中两物体间的作用力和反作用力同样遵从牛顿第三定律。这一点可以用力传感器清楚地显示（图 4.5-6）。把一只力传感器系在一个物体上，另一只握在手中。当通过传感器用力拉物体时，尽管物体的运动状态可能变化，力的大小也可能随时间变化，但在任何时刻，作用力和反作用力总保持大小相等、方向相反。这表明，牛顿第三定律所阐明的作用力与反作用力的关系，不仅适用于静止物体之间，也适用于运动物体之间，即这种关系与物体的运动状态无关，也与参考系的选择无关。



图 4.5-4 用传感器显示作用力和反作用力

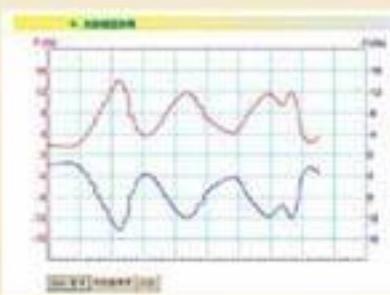


图 4.5-5 两个钩子受力的情况可以由计算机屏幕显示。横坐标是时间，纵坐标是力。

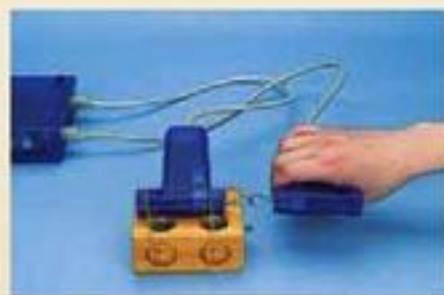


图 4.5-6 用传感器显示运动中两物体间的作用力和反作用力

大量事实表明：两个物体间的作用力和反作用力总是大小相等、方向相反，作用在同一条直线上。这就是牛顿第三定律（Newton third law）。

在生活和生产中牛顿第三定律的例子是很多的。划船时桨向后推水，水就向前推桨，从而将船推向前进。与此类似，轮船的螺旋桨旋转时也是向后推水，水同时给螺旋桨一个反作用力，推动轮船前进。汽车的发动机驱动车轮转动，由于轮胎和地面间的摩擦，车轮向后推地面，地面给车轮一个向前的反作用力，使汽车前进。汽车受到的牵引力就是这样产生的。若把驱动轮架空，不让它跟地面接触，这时车轮虽然转动，但车轮不推地面，地面也就不产生向前推车的力，汽



图 4.5-7 足球受到运动员头部的力改变了运动方向，运动员的头受到了足球的力，感到疼痛。

车就不会前进。陷在泥泞中的汽车，尽管车轮飞转，车也不能前进，就是这个道理。为了避免这类问题，多数越野车可以按需要分别由前轮或后轮驱动。



图 4.5-8 汽车的驱动轮向后推地地面，它们获得的反作用力推动汽车前进。为了清晰，画图时两个力的作用点分开了一些。

问题与练习

- 作用力和反作用力总是成对出现的。现把木箱放在地面上，如果我们所研究的物体只有木箱和地球，涉及木箱和地球的作用力和反作用力有哪几对？木箱所受的力是这几对中的哪几个？地球所受的力是其中哪几个？
- 一个物体静止地放在台式弹簧秤上，试证明物体对弹簧秤的压力等于物体所受的重力（证明时在图上标出所涉及的力）。
- 设想你处在遥远的太空，面前有一个与你相对静止的巨石，你轻轻地推它一下。试描述这块巨石和你自己在推石时与推石后的运动情况。如果巨石静止地放在地面上，结果会一样吗？为什么？
- 机车 A 拉着一节车厢 B 向右行驶。用 F_{AB} 和 F_{BA} 分别代表 A 对 B 和 B 对 A 的作用力。已知 B 行驶时受到的阻力 $F_{\text{阻}} = 2.0 \times 10^3 \text{ N}$ 。画出题中情境的草图，回答以下问题。
 - A 拉 B 匀速行驶时， F_{AB} 与 $F_{\text{阻}}$ 有什么关系？ F_{AB} 和 F_{BA} 有什么关系？（要说明大小和方向两方面的关系，并说明回答的根据。）
 - A 拉 B 加速行驶时， F_{AB} 和 $F_{\text{阻}}$ 有什么关系？ F_{AB} 和 F_{BA} 有什么关系？若车厢 B 的质量 m_B 是 4.0 t，加速度 a 是 0.3 m/s^2 ， F_{AB} 和 F_{BA} 各等于多少？
- 小强说：“我记得在初中学过，如果两个力的大小相等、方向相反，这两个力就会互相平衡，看不到作用的效果了。既然作用力和反作用力也是大小相等、方向相反的，它们也应该互相平衡呀！”
 应该怎样解答小强的疑问？

图 4.5-9 求证：物体对弹簧秤的压力与它所受的重力相等。



6

用牛顿运动定律解决问题(一)

牛顿第二定律确定了运动和力的关系，使我们能够把物体的运动情况与受力的情况联系起来。因此，它在天体运动的研究、车辆的设计等许多基础科学和工程技术中都有广泛的应用。由于我们目前知识的局限，这里只通过一些最简单的例子做些介绍。

从受力确定运动情况 如果已知物体的受力情况，可以由牛顿第二定律求出物体的加速度，再通过运动学的规律就可以确定物体的运动情况。

| 例题1 一个静止在水平地面上的物体，质量是 2 kg，在 6.4 N 的水平拉力作用下沿水平地面向右运动。物体与地面间的摩擦力是 4.2 N。求物体在 4 s 末的速度和 4 s 内发生的位移。

分析 这个问题是已知物体受的力，求它运动的速度和位移。

先考虑两个问题。

(1) 物体受到的合力沿什么方向？大小是多少？

(2) 这个题目要求计算物体的速度和位移，而我们目前只能解决匀变速运动的速度和位移。物体的运动是匀变速运动吗？

解决了这两个问题之后，就可以根据合力求出物体的加速度，然后根据匀变速运动的规律计算它的速度和位移。

解 分析物体的受力情况。

物体受到 4 个力的作用(图4.6-1)：拉力 F_1 ，方向水平向右；摩擦力 F_2 ，水平向左；重力 G ，竖直向下；地面的支持力 F_N ，竖直向上。

物体在竖直方向没有发生位移，没有加速度，所以重力 G 和支持力 F_N 大小相等、方向相反，彼此平衡，物体所受的合力等于水平方向的拉力 F_1 与摩擦力 F_2 的合力。取水平向右的方向为坐标轴的正方向，则合力 $F = F_1 - F_2 = 6.4 \text{ N} - 4.2 \text{ N} = 2.2 \text{ N}$ ，合力的方向是沿坐标轴向右的。

物体原来是静止的，初速度为 0，在恒定的合力作用下产生恒定的加速度，所以物体做初速度为 0 的匀加速直线运动。

由牛顿第二定律 $F = ma$ 可求出加速度

$$a = \frac{F}{m} = \frac{2.2}{2} \text{ m/s}^2 = 1.1 \text{ m/s}^2$$

求出了加速度 a ，由运动学公式就可以求出 4 s 末的速度 v

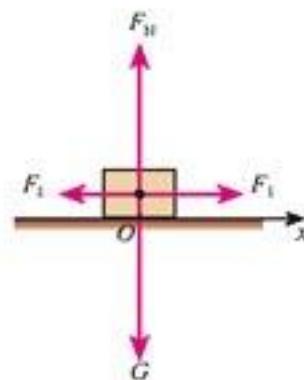


图 4.6-1 物体受力的示意图

科学工作者根据飞船的受力情况确定飞船在任意时刻的位置和速度，他们解决问题的思路跟我们在前面讲的一样，只是计算很复杂，而且由电子计算机完成。

和 4 s 内发生的位移 x

$$v = at = 1.1 \times 4 \text{ m/s} = 4.4 \text{ m/s}$$

$$x = \frac{1}{2} at^2 = \frac{1}{2} \times 1.1 \times 16 \text{ m} = 8.8 \text{ m}$$

从运动情况确定受力 如果已知物体的运动情况，根据运动学公式求出物体的加速度，再根据牛顿第二定律就可以确定物体所受的力。这是力学所要解决的又一方面的问题。

| 例题2 一个滑雪的人，质量 $m = 75 \text{ kg}$ ，以 $v_0 = 2 \text{ m/s}$ 的初速度沿山坡匀加速滑下，山坡的倾角 $\theta = 30^\circ$ ，在 $t = 5 \text{ s}$ 的时间内滑下的路程 $x = 60 \text{ m}$ ，求滑雪人受到的阻力(包括摩擦和空气阻力)。

分析 这个题目是已知人的运动情况，求人所受的力。应该注意三个问题。

(1) 分析人的受力情况，按题意作草图如图4.6-2，然后考虑几个问题。滑雪人共受到几个力的作用？这几个力各沿什么方向？它们之中哪个力是待求的？哪个力实际上是已知的？

(2) 根据运动学的关系得到下滑加速度，求出对应的合力，再由合力求出人受的阻力。

(3) 适当选取坐标系，使运动正好沿着一个坐标轴的方向。

解 如图4.6-3建立直角坐标系，把重力 G 沿 x 轴和 y 轴的方向分解，得到

$$G_x = mg \sin \theta$$

$$G_y = mg \cos \theta$$

在与山坡垂直的方向，物体没有发生位移，没有加速度，所以 G_y 与支持力 F_N 大小相等、方向相反，彼此平衡，物体所受的合力 F 等于 G_x 与阻力 F_f 的合力。

由于沿山坡向下的方向为正方向，所以合力 $F = G_x - F_f$ ，合力的方向沿山坡向下，使滑雪人产生沿山坡向下的加速度。滑雪人的加速度可以根据运动学的规律求得，即由

$$x = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

$$a = \frac{2(x - v_0 t)}{t^2}$$

把已知量的数值代入，可得滑雪人的加速度

$$a = 4 \text{ m/s}^2$$

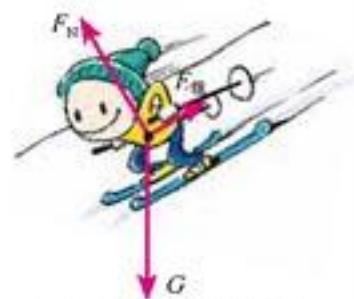


图 4.6-2 滑雪人受到的力

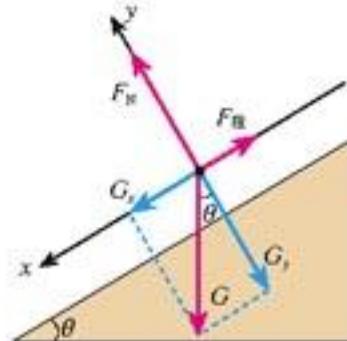


图 4.6-3 求滑雪人受到的阻力

以下运算中应该尽量使用代表物理量的字母，必要时再把已知量的数值代入。

下面求滑雪人受到的阻力。

根据牛顿第二定律 $F = ma$ 有

$$G_x - F_{\text{阻}} = ma$$

由此解出阻力

$$F_{\text{阻}} = G_x - ma = mgsin\theta - ma$$

代入数值后, 得

$$F_{\text{阻}} = 67.5 \text{ N}$$

滑雪人受到的阻力是 67.5 N。

尽管在 67.5 N 的前面没有出现负号, 我们仍然断定 $F_{\text{阻}}$ 是与坐标轴的方向相反的。这是因为负号已经写在了 $G_x - F_{\text{阻}} = ma$ 这个式子中 $F_{\text{阻}}$ 的前面, 计算得到的 67.5 N 只是阻力的大小。

问题与练习

- 一个原来静止的物体, 质量是 2 kg, 受到两个大小都是 50 N 且互成 60° 角的力的作用, 此外没有其他的力。3 s 末这个物体的速度是多大? 3 s 内物体发生的位移是多少?
- 以 15 m/s 的速度行驶的无轨电车, 在关闭电动机后, 经过 10 s 停了下来。电车的质量是 4.0×10^3 kg, 求电车所受的阻力。
- 民航客机一般都有紧急出口, 发生意外情况的飞机紧急着陆后, 打开紧急出口, 换长的气囊会自动充气, 生成一条连接出口与地面的斜面, 人员可沿斜面滑行到地上。若机舱口下沿距地面 3.2 m, 气囊所构成的斜面长度为 5.5 m, 一个质量 60 kg 的人沿气囊滑下时所受的阻力是 240 N, 人滑至气囊底端时速度有多大?
- 在某城市的一条道路上, 规定车辆行驶速度不得超过 30 km/h。在一次交通事故中, 驾驶车是一辆卡车, 测得这辆卡车紧急刹车(车轮被抱死)时留下的刹车痕迹长为 7.6 m。经过测试得知这种轮胎与路面的动摩擦因数为 0.7, 请判断该车是否超速。

7

用牛顿运动定律解决问题(二)

共点力的平衡条件 桌上的书、屋顶的灯, 虽然都受到力的作用, 但仍保持静止。火车车厢虽然受到重力、支持力、牵引力、阻力的作用, 但仍可能做匀速直线运动。如果一个物体在力的作用下保持静止或匀速直线运动状态, 我们就说这个物体处于平衡状态。

受共点力作用的物体, 在什么条件下才能保持平衡呢? 牛顿第二定律告诉我们, 当物体所受合力为 0 时, 加速度为 0, 物体将保持静止或匀速直线运动状态。因此,



图 4.7-1 悬挂路灯的一种三角形结构

在共点力作用下物体的平衡条件是合力为0。

例题1 城市中的路灯、无轨电车的供电线路等，经常用三角形的结构悬挂。图4.7-2为这类结构的一种简化模型。图中硬杆OB可绕通过B点且垂直于纸面的轴转动，钢索和杆的重量都可忽略。如果悬挂物的重量是G，角AOB等于θ，钢索OA对O点的拉力和杆OB对O点的支持力各是多大？

分析 分析O点受力的情况可知，它受三个力的作用。绳的拉力 F_1 ：沿绳的方向，指向A点。杆的支持力 F_2 ：对于重量可以忽略的硬杆，如果它只在两端受力，这两个力必然沿杆的方向，如图所示。悬绳的拉力 F_3 ：它的方向向下，大小与悬挂物的重量相等，即 $F_3 = G$ 。

在平衡状态下，三个力的合力应该为0，由此可以求出 F_1 、 F_2 的大小。

解 如图4.7-2， F_1 、 F_2 、 F_3 三个力的合力为0，表示这三个力在x方向的分矢量之和及y方向的分矢量之和也都为0。也就是

$$F_2 - F_1 \cos \theta = 0 \quad (1)$$

$$F_1 \sin \theta - F_3 = 0 \quad (2)$$

由(1)(2)解出钢索OA的拉力 F_1

$$F_1 = \frac{F_3}{\sin \theta} = \frac{G}{\sin \theta}$$

和硬杆OB的支持力 F_2

$$F_2 = F_1 \cos \theta = \frac{G}{\tan \theta}$$

当θ很小时， $\sin \theta$ 和 $\tan \theta$ 都接近0， F_1 和 F_2 就会很大，对材料的强度要求很高，所以钢索的固定点A不能距B太近。但A点过高则材料消耗过多，所以要结合具体情况适当选择θ角。

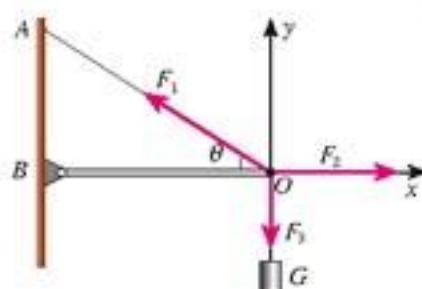


图4.7-2 F_1 、 F_2 的大小与θ角有什么关系？

如果不苛求概念的严谨性，这里说的“分矢量”可以理解为本章第3节例题2旁批中说的“投影”。



图4.7-3 电梯启动、制动时，体重计的读数怎样变化？

超重和失重 我们研究下面例题中描述的情境。

例题2 如图4.7-3，人的质量为m，当电梯以加速度a加速上升时，人对地板的压力 F' 是多大？

分析 人受到两个力：重力G和电梯地板的支持力F。由于地板对人的支持力F与人对地板的压力 F' 是一对作用力和反作用力，根据牛顿第三定律，只要求出F就可知 F' 。

电梯静止时，地板的支持力 F 与人所受的重力 G 相等，都等于 mg ；当电梯加速运动时，这两个力不再相等吗？

我们根据牛顿运动定律列出方程，找出几个力之间以及它们与加速度之间的关系，这个问题就能解决了。

解 沿向上的方向建立坐标轴 Oy ，根据牛顿第二定律写出关于支持力 F 、重力 G 、质量 m 、加速度 a 的方程

$$F - G = ma$$

由此可得

$$\begin{aligned} F &= G + ma \\ &= m(g + a) \end{aligned}$$

人对地板的压力 F' 与地板支持力 F 的大小相等，即

$$F' = m(g + a)$$

由于 $m(g + a) > mg$ ，所以当电梯加速上升时，人对电梯地板的压力比人受到的重力大。

物体对支持物的压力(或对悬挂物的拉力)大于物体所受重力的现象，称为超重(**overweight**)现象。

反之，电梯加速下降(或减速上升)时，加速度向下，与坐标轴的正方向相反， a 是负值，所以

$$m(g + a) < mg$$

这时人对电梯地板的压力比人受到的重力小。

物体对支持物的压力(或对悬挂物的拉力)小于物体所受重力的现象称为失重(**weightlessness**)现象。如果物体正好以大小等于 g 的加速度竖直下落，那么 $m(g + a) = 0$ ，这时物体对支持物、悬挂物完全没有作用力，好像完全没有了重力作用，这种状态是完全失重状态。

从动力学看自由落体运动 在第二章，我们通过实验研究了自由落体运动，知道它是加速度的大小和方向都不变的匀变速直线运动。那时我们只分析了这个现象，没有考虑它的加速度为什么不变。要回答这个问题就要分析它的受力情况了。

物体做自由落体运动有两个条件：

第一，物体是从静止开始下落的，即运动的初速度是0；

第二，运动过程中它只受重力的作用。

根据牛顿第二定律，物体运动的加速度与它受的力成正比，加速度的方向与力的方向相同。自由落体在下落的过程中所受重力的大小、方向都不变，所以加速度的大小、方向也是恒定的。

地板的支持力、人受到的重力与坐标轴正方向的关系是已知的，所以我们把它们的正负号明确地写在 $F - G = ma$ 这个等式中了，式中 F 、 G 只代表力的大小。

但是电梯可能上升也可能下降，所以在 $F' = m(g + a)$ 这个式子中， a 可能取正值，也可能取负值。



图4.7-4 人站在体重计上，下蹲、起立，也能看到超重和失重现象。

值得注意的是，在超重和失重现象中，地球对物体的实际作用力并没有变化。

实际物体下落时都要受到空气的阻力，速度越快，阻力越大。但是，如果开始下落时的高度不太高，例如几米、十几米，它的下落速度不会太大。再有，如果物体的质量不太小、体积不太大，物体所受的重力就会比阻力大得多，这时也可以忽略阻力的作用。

这样，学过了牛顿运动定律之后我们就可以从更高的视角审视自由落体运动了。

| 例题3 以10 m/s的速度从地面竖直向上抛出一个物体，空气的阻力可以忽略，分别计算0.6 s、1.6 s后物体的位置(取 $g=10 \text{ m/s}^2$)。

分析 这个物体的运动不是自由落体运动，但与自由落体相似，它在运动过程中也只受重力的作用，因此它的加速度也是 g ，大小、方向都不变。由于物体的初速度、加速度都是沿竖直方向的，所以它的运动也不可能偏离竖直方向。结论是：这个物体在竖直方向做匀变速直线运动，可以应用匀变速直线运动的规律。

解 以地面为原点，竖直向上建立坐标轴(图4.7-5)。初速度的方向与坐标轴的方向一致，取正号， $v_0=10 \text{ m/s}$ ；加速度的方向向下，与坐标轴的方向相反，取负号， $a=-g=-10 \text{ m/s}^2$ ； $t_1=0.6 \text{ s}$ ， $t_2=1.6 \text{ s}$ 。

根据匀变速直线运动的位移与时间的关系可以得到

$$\begin{aligned}x_1 &= v_0 t_1 + \frac{1}{2} a t_1^2 \\&= [10 \times 0.6 + \frac{1}{2} \times (-10) \times 0.6^2] \text{ m} \\&= 4.2 \text{ m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}x_2 &= v_0 t_2 + \frac{1}{2} a t_2^2 \\&= [10 \times 1.6 + \frac{1}{2} \times (-10) \times 1.6^2] \text{ m} \\&= 3.2 \text{ m}\end{aligned}$$

抛出0.6 s后物体位于地面以上4.2 m的位置，1.6 s后位于地面以上3.2 m的位置。

可能有的同学会问：一个竖直向上抛出的物体，为什么1.6 s时的位置反而比0.6 s时更低？在这个例题中，竖直向上抛出的物体不会永远向上运动。由于重力的作用，它的加速度向下，与速度方向相反，运动会越来越慢，速度逐渐变为0。但是，物体不可能停在空中，它随即就会向下运动。尽管向下运动与向上运动的速度不同，但受力情况完全相同，所以两个运动阶段的加速度(大小、方向)也应相同，仍是常量 g 。例题中算出的1.6 s时的位置，就是物体到达最高点后返回过程中所处的位置。

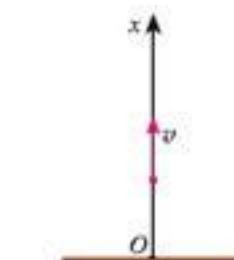


图4.7-5 以地面为原点，方向向上建立坐标轴。

如果以向下的方向为坐标轴的正方向，算式可能有所不同，但最后的结论应该一样。试试看！

把实验或者运算的结论与常识或者已有的知识做比较，讨论它是否合理，这是评估的一种重要形式。

说一说

例题3中的物体能够到达的最大高度是多少？

提示：到达最大高度时物体的速度是0。

在得出 $x = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ 和 $v^2 - v_0^2 = 2ax$ 这两个公式时我们曾说，式中的 x 是物体的位移，例题 3 中又说 x 是物体的位置；两种说法有什么区别吗？实际上，讲到“位移”时，我们指的是物体离开坐标原点的位移；讲到“位置”时，指的是物体的坐标，两者的数值是相等的。

问题与练习

1. 在光滑墙壁上用网兜把足球挂在 A 点，足球与墙壁的接触点为 B(图 4.7-6)。足球的质量为 m ，悬绳与墙壁的夹角为 α ，网兜的质量不计。求悬绳对球的拉力和墙壁对球的支持力。
2. 如图 4.7-7 所示，物体在五个共点力的作用下保持平衡。如果撤去力 F_1 ，而保持其余四个力不变，请在图上画出这四个力的合力的大小和方向。
3. 在饮料瓶的下方戳一个小孔，瓶中灌水，手持饮料瓶，小孔中有水喷出。放手让瓶自由下落，观察喷水的变化。解释这个现象。
4. 一种巨型娱乐器械可以使人体体验超重和失重。一个可乘十多人的环形座舱套装在竖直柱子上，由升降机送上几十米的高处，然后让座舱自由落下。落到一定位置时，制动系统启动，到地面时刚好停下。已知座舱开始下落时的高度为 76 m，当落到离地面 28 m 的位置时开始制动，座舱均匀减速。若座舱中某人用手托着重 50 N 的铅球，当座舱落到离地面 50 m 的位置时，手的感觉如何？当座舱落到离地面 15 m 的位置时，要用多大的力才能托住铅球？

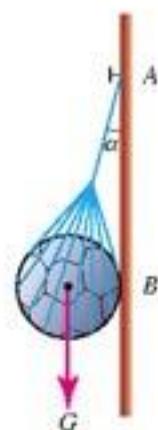


图 4.7-6 求绳的拉力和墙的支持力

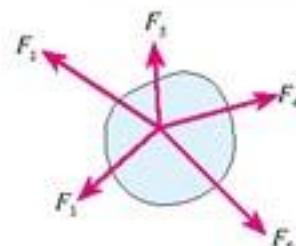


图 4.7-7 画出 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 、 F_5 的合力

实验可以推翻理论，而
理论永远无法推翻实验。
—— 丁肇中^①

学生实验

物理学是以实验为基础的科学，要学好物理就要做好实验。

本书中的实验，根据它们在物理学中和物理教学中的地位、难易程度、用时长短、学校的器材条件，分成了以下几类。

学生实验：用物理实验室内的器材做的定量实验。这些实验要按照教学要求，由同学们分组进行。本书中，一个学生实验编为一节，标题都有“实验”二字，可在两课时或一课时内完成操作，数据处理往往要在课后进行。

实验：在本书中以栏目的形式出现，在课堂上由同学们自己操作完成。这类实验比“学生实验”简单，用时短，多数是定性实验。

演示：在课堂上由老师操作，同学们观察、讨论。有些演示的操作应该有同学参与。

做一做：在“做一做”栏目中，有些是实验性的活动。这些实验中，有的要用到计算机，有的要用到生活中的器材，有条件要尽量多做。“做一做”栏目中实验的趣味性较强。

问题与练习：在“问题与练习”中也有一些实验性的题目。这些题目中的器材也是容易获得的。这些实验的难度比“做一做”中的低些，同学们都应该完成。

此外，本书安排了很多探究性的学习活动，而实验往往是这些探究活动的重要组成部分。

以下我们从整体上说明高中物理课中与实验相关的几个问题，有些内容不是一次阅读就能深刻领会的，希望同学们在整个学习过程中不时翻看，体会其中的含义。

^① 丁肇中（1936—），华裔美国物理学家。他与 B. 里希特各自独立地发现了 J/ψ 粒子，推动了粒子物理学的发展，为此与里希特共获 1976 年诺贝尔物理学奖。1979 年，丁肇中发现了三喷注现象，为胶子的存在和量子色动力学提供了实验依据。他的工作还为电磁相互作用与弱相互作用的统一理论提供了实验证据。

1

实验的重要性

实验推动了物理学的发展 物理学中，概念的形成、规律的发现、理论的建立，都有赖于实验，其正确性要不断受到实验的检验。历史上和现实中的无数事例表明，物理学离不开实验。

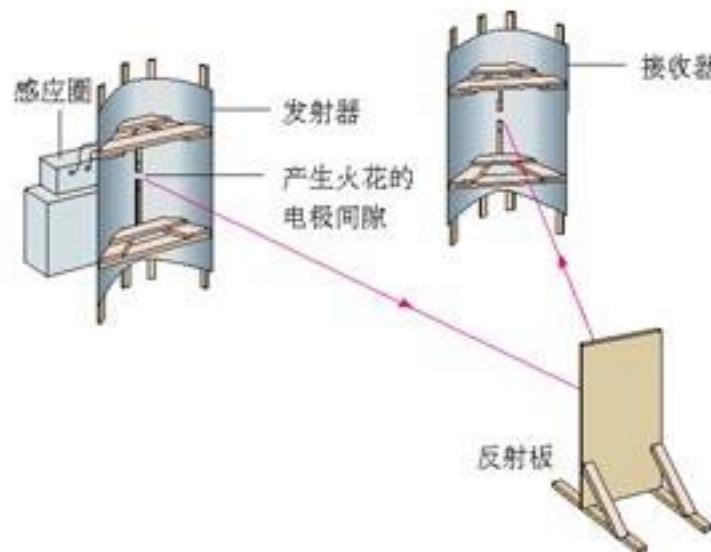
本书在前面已经详细地介绍过，伽利略开科学实验的先河，他把实验的方法引入科学研究。他研究的主要问题是力学问题。

在电磁学研究中，法拉第在10年中坚持实验，为电磁感应定律的建立打下了基础。麦克斯韦在此基础上，对这个规律和其他电磁学实验成果进行分析，加上自己的假设，为其谱上了数学的“乐曲”，于1864年建立了完整的电磁场理论，并预言了电磁波。

今天大家对电磁波已经十分熟悉，而在19世纪中叶，没有人知道电磁波为何物。麦克斯韦的预言正确吗？谁也不能肯定。23年后，德国科学家赫兹制造了一套能够发射和接收电磁波的装置，用实验证明了电磁波的存在，并且证明，大家习以为常的光，的确如麦克斯韦所说，是一种电磁波。这样，麦克斯韦的理论才为人们所接受。在这之后，以麦克斯韦的电磁场理论为基础，得到了关于电磁波的辐射、传播、接收的各种结论。这些结论都与科学实验和天文观测的事实一致。特别是在20世纪中叶，以麦克斯韦电磁理论和其他科学成果为基础的无线电电子学，以前所未有的速度和规模改变了我们的生活。



图实-1 法拉第研究电磁感应时用过的线圈



图实-2 赫兹用来研究电磁波的装置（示意图）



图实-3 巨大的射电望远镜指向宇宙的深处，收集来自遥远天体的信息。有人指望用这种方式与地外文明建立联系。你能把这些与法拉第、赫兹的实验联系起来吗？

研究质子、中子、电子及其他各种粒子的物理学分支叫做粒子物理学。在粒子物理学中有一个物理量叫做宇称。物理学家们曾经认为粒子经历的各种过程中宇称都是守恒的。1956年，杨振宁和李政道通过理论分析，认为一个过程中如果只有强相互作用和电磁相互作用，宇称的确守恒；但是如果是弱相互作用的过程，例如发射 β 射线的过程，宇称并不守恒。这

个论断引起了物理学家们的广泛注意。1956年后期至1957年初，吴健雄和她的同事们一起设计了实验，统计钴 60 同位素在 β 衰变时向各个方向发射的电子数，结果证明这个过程中宇称真的不守恒。

今天，物理学中的许多学说还在等待实验的证实或否定。

大家知道，磁极对别的磁极、电荷对别的电荷，都有力的作用，这是因为在空间激发了磁场和电场。那么，如果磁极或电荷振动起来，它周围的磁场、电场就会随之做周期性的变化……这样的变化传播开来，就是电磁波。

物体与物体之间有万有引力。如果一个物体振动或者旋转，或者有规律地变形，会不会有引力波传播出去？这是一个很自然的想法。实际上，早在 1916 年，爱因斯坦就根据他的广义相对论认为应该存在引力波。后来，物理学家们又进行了理论研究，对引力波的性质做了预言。这些预言要成为科学真理，必须有充分的实验证据。然而，引力波非常非常弱，又很难接收，验证起来十分困难。

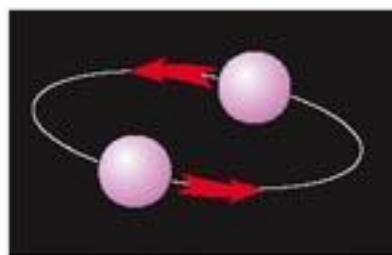
70 年代初，美国马里兰大学的 J. 韦伯首创用铝棒做“天线”，接收天体辐射的引力波的方法。为了提高灵敏度，“天线”很重，往往达到数吨，为了排除干扰，“天线”置于 -270°C 左右的超低温环境中。当时参加工作的有十几个小组，但只有韦伯宣称观测到了可能是来自其他天体的引力波信号。其后不断有人重复这个实验，但都没有肯定的结果。

70 年代末，J. H. 泰勒等人观测围绕共同质心高速转动的双星，发现转动的周期在慢慢地变短，推测这可能是它们辐射引力波时失去了能量造成的。

引力波是否真的存在？即使真的存在，它的性质是否完全如理论预言的那样？这些还都在等待实验和观测的结果。



吴健雄（1912—1997），华裔美国物理学家。她除了用实验证实宇称不守恒外，还用实验证实了电磁相互作用与弱相互作用的密切关系，对后来电、弱统一理论的提出起了重要作用。



图实 4 高速转动的双星可能发射引力波

中学生为什么做实验 限于同学们的学习基础，中学里的实验说不上推动物理学的发展。但是，中学生还是要做实验，这是出于下面的几个目的。

1. 经历科学过程，体会科学方法，树立科学的价值观

尽管学校中的物理实验比较简单，但是，“麻雀虽小，五脏俱全”，我们的各类学生实验，已经包括了科学实验的大多数要素。例如，本书有许多探究性实验，虽然问题是编者提出来的，但做出假设、设计实验、进行实验操作、数据处理等环节，都视具体情况不同程度地留给同学们去做，让大家在做中体会科学的方法。学到科学的方法，不仅在物理学习中有用，在今后认识不同领域的事务时都会受益。

同学们可能还记得初中科学课程中的科学探究。有时候大家对一个大胆的假设争论得很激烈，都说自己有理。这时候老师并没有当裁判，而是说：“让我们做实验来看看哪个意见

对吧！”于是大家都安下心来设计实验、做实验、分析，看看实验事实支持哪一种意见。久而久之，同学们形成了一种习惯：判断正确与否主要不看谁更“权威”，也不看谁说得似乎“有理”，而是看谁的意见与事实一致。这是一种“价值观”，它不仅对于科学研究至关重要，而且是做人的一条准则。

本书介绍了用传感器和计算机进行的物理实验。如果你认真地做过了，熟悉了使用方法，它们就不那么神秘了。现代社会是技术化的社会，以后你也许成为一名交警，用力的传感器测量货车的重量；也可能成为一名银行职员，用计算机为客户结账；还可能成为一名科学工作者，用计算机处理研究中的问题。当你接触自己的工作时，都会感到这个环境似曾相识，因为中学时代的物理实验室就是这样的。

因此，同学们的实验结果好不好，固然重要，但经历实验的过程，从而体会所用的方法、受到科学价值观的熏陶、熟悉技术化的环境，要比实验的结果更重要！

2. 更加热爱科学，体验科学工作的乐趣

物理学决不是有些人想像的那么乏味。几乎所有同学都喜欢做实验。实验时会接触新鲜的器材、看到新奇的现象……这些固然有趣，而经过一番巧妙的设计、谨慎的操作、详尽的计算与分析之后，得到的结果证实了当初的猜想，或者激起了新思想的火花……这样的乐趣和幸福感只有亲身经历才能体会。

3. 学习科学知识，提高操作技能

做实验要综合运用学到的科学知识，还要练习许多操作技能：螺丝怎么拧、线头怎么接、电表如何调整、游标卡尺怎样读数……也许你将来的职业并不需要这些具体的技能，但是，做过几年的物理实验，你会发现：“原来这些操作也没什么了不起！”当你在生活中、工作中需要学习某种新技能时，你就多了一分勇气。不但如此，你学习操作的速度会比别人快得多。物理实验使你不仅“心灵”，而且“手巧”！

2

怎样做好物理实验

1. 不仅动手，而且动脑

做物理实验不是一种简单的技艺，它需要动脑。

实验之前要明确实验目的：这个实验要我们做什么？是探究某个未知的规律还是验证某个已知的规律，或者是测量某个物理量？

还要明确实验的原理。不论做哪一类物理实验，都要搞清楚实验所根据的物理知识。如果实验要求进行一定的设计，那就更要费脑筋了。

实验器材的工作原理也是要动脑研究的。例如，在“用打点计时器测速度”这个实验中，同学们第一次使用打点计时器。操作前一定要认真阅读课本或老师准备的实验器材说明卡，结合实物弄清它的结构、各部分的功能、使用注意事项。使用新器材时要记住，在弄清上述

问题之前，不能进行实际操作。

本书的学生实验都没有给出具体的操作步骤，这就要求同学们在操作之前做出计划，想好先做什么、后做什么，必要时把步骤写出来。

实验中可能出现什么问题？可能是什么原因引起的？应该怎样防止？如果出现了问题应该怎样解决？……这些问题也应该事先有所考虑。

2. 实事求是，尊重事实

实验中观察到的现象、测量的数据、得出的结论，很可能跟预期的不一样、跟其他同学的不一样、跟已有的知识不一样。这时，要记住：实事求是，尊重事实。出现了这种情况，首先要检查一下，实验设计是不是有问题？操作有没有失误？出现了这种情况是好事，也许能帮助你找出学习中的弱点，甚至可能导致新的发现。

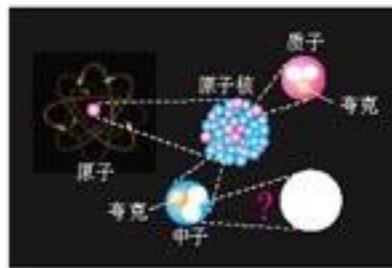
现在大家都知道，实验观察到的电荷的最小单位是质子（或电子）的电荷，叫做元电荷。美国物理学家 R. A. 密立根在1907~1913年间通过实验测量了元电荷。但是有一个数据似乎表明，实验中观察到了电荷量为元电荷的三分之一的电荷。他没有充分的根据说这是测量的错误，于是忠实地记录了这个数据。近年来，粒子物理学家认为，质子、中子是由“夸克”组成的，夸克的电荷量可以是元电荷的三分之一或三分之二。是不是可以说，密立根曾经在无意中观察到了夸克？理由并不充分。也许，这个神秘的记录要等物理学家今后去解释了。

同学们学过许多物理规律，例如力的平行四边形定则、牛顿第二定律，等等。这些规律看起来简洁而又精确。然而，实验的结果往往不尽如人意，得到的数据不像定律描述的那样完美。不过，不要气馁，更不能任意修改数据去适应书本上的结论。为什么会出现这样的差别？自然，中学物理实验器材的精密度不高，但是，下面几段话也许说出了更深层次的原因。

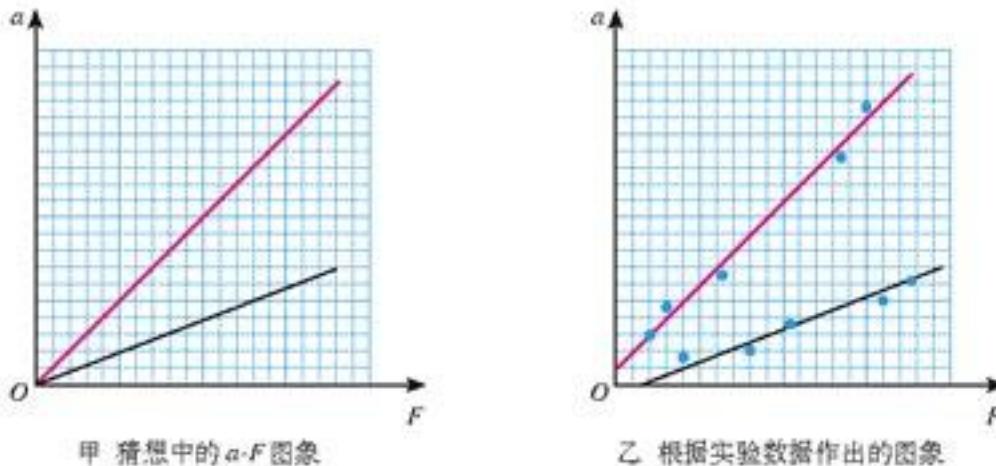
在通过实验探究加速度与物体受力的关系时，我们根据现象的分析和粗略的数据，猜测加速度可能与物体所受的力成正比。这是一个猜测，需要实验的验证，于是我们用不同的物体做了几次实验。如果实验得出的 a - F 图象不是直线，当然说明我们的猜测是错误的。然而，我们得到了图实-6乙中的几条直线。尽管这些图象没有与我们的猜测完全一致，但它们强烈地向我们提示，这样的猜测很可能是正确的！你可能说，中学物理实验器材的精密度不够，用更好的仪器就能得到过原点的直线了。但是，如果用了更好的仪器，就要用更高的标准来检验这条直线，这时仍然会发现它不过原点……

一句话，物理学的规律不是通过有限的几个实验“归纳”出来的，它们之所以正确，归根结底是因为由它们得出的许许多多结论都与事实一致。即便如此，我们也时刻不能丢掉一颗怀疑的心，很可能在某些新的情况下，我们习以为常的规律就会出问题。

有了这样的认识，就大可不必因为数据与书本不一致而苦恼，更不能随意更改记录去“凑数”。也许，这样的差异孕育着新的发现，或至少能检验出你的错误。我们的责任是忠实



图实-5 现代粒子物理学家认为质子、中子是由夸克组成的，不同夸克带电可正可负，电荷量为质子（电子）的 $\frac{1}{3}$ 或 $\frac{2}{3}$ 。



图实-6 加速度与物体受力关系的图像

地记录一切原始数据。

3. 谨慎操作，细心分析

操作中要注意安全，这是第一位的。

首先，要保证人身安全。凡涉及用电的器材，例如打点计时器，要小心处理电源。初中学过的安全用电常识会在这里派上用场。要注意保护眼睛，凡在高速转动、可能出现爆炸、可能有液体溅出的场合，最好戴上护目眼镜。

还要保证器材的安全。各种仪器都必须按照要求使用，对于不熟悉的仪器，要先弄清它的使用要领，要学会借助说明书了解仪器的原理、使用方法。

保证安全的一条重要原则是，做事之前尽量估计可能出现的所有意外：转身时会不会把器材碰到地上？加热时烧杯里的液体会不会溅出来？牵引小车的重物会不会在落地之前就把小车拖到地上？……不可能把所有情况在此罗列，实验前也不可能估计到所有的意外。但是，操作前进行安全检查的习惯，对于以后的工作、生活都是大有益处的。

操作要谨慎。任何粗心大意都会使精心准备的实验归于失败。实验的每一阶段之后都要对其进行评估，也就是回想刚才的操作，有没有什么问题，可能引起什么误差，等等。实验之后要仔细分析数据，从中得出结论。在这方面，不同实验之间的差异很大，要结合具体问题分析。

实验之后要认真写出实验报告，发表自己的成果和见解。与他人交流成果是当代科学研究所的重要组成部分。把自己的实验成果告诉别人，听取别人的批评和质疑，同时从别人的成果中受到启发。这个过程中，实验报告是很好的媒介。

实验后，要把器材放回原处，保持实验室的整洁。



图实-7 实验教室规则

3

误差和有效数字

任何测量结果都不可能绝对准确。测量值跟被测物理量的真实值之间总会有差异，这种差异叫做误差(**error**)。

由仪器直接读出的数据叫做直接测量结果。直接测量结果的误差来源于两方面。一是仪器本身的缺陷，例如米尺的刻度不够准确、天平两臂不严格等长。二是实验人操作和读数的不准确，例如用停表计时，按下按钮的时刻总会稍有滞后或提前。又如中学实验室中温度计的分度值为 1°C ，靠目测估计零点几度这位数，可能有 0.2°C 的误差。

通过改进仪器和谨慎操作，可以减小误差，但任何测量都不能完全消灭误差。

偶然误差和系统误差 人读仪表时，眼的位置可能一次稍向左偏、一次稍向右偏，电表指针由于轴上的摩擦，停下来的位置可能一次偏大、一次偏小。这些误差是由偶然因素造成的，叫做偶然误差(**accidental error**)。偶然误差的特点是，当多次重复同一测量时，偏大和偏小的机会比较接近，可以用取平均值的方法来减小偶然误差。

系统误差(systematic error)是由仪器结构缺陷、实验方法不完善造成的。例如，天平两臂不完全等长会造成系统误差。测量重力加速度时由于没有消除空气等阻力的影响，也会引起系统误差。系统误差的特点是多次重复测量的结果总是大于(或小于)被测量的真实值，呈现单一倾向。



图实-8 假如这台天平的右臂比左臂稍长，在操作无误的情况下，会引起什么系统误差？

绝对误差和相对误差 假设用米尺测一段铜线的直径，读数为 1.2 mm 。限于米尺的精确度，只能估计到分度值(1 mm)的十分之一，由于估读是不准确的，产生的误差可能为 0.2 mm 甚至更大。我们暂且说这次测量的误差是 0.2 mm ，则误差与测量值之比为

$$\frac{0.2\text{ mm}}{1.2\text{ mm}} = 17\%$$

如果把铜线密绕在木棒上，共 10 圈，测量这 10 圈的直径之和，为 12.3 mm 。由于用的是同一条米尺，还可以估计到 1 mm 的十分之一，即误差还可认为是 0.2 mm 。但是，这个误差与测量值之比变为

$$\frac{0.2\text{ mm}}{12.3\text{ mm}} = 1.6\%$$

我们把上面测量中的误差 0.2 mm 叫做绝对误差(**absolute error**)，而上面算得的比值 17% 和 1.6% 叫做相对误差(**relative error**)，即

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{测量值}}$$

可见，在相同的条件下为了提高测量的准确程度，应该考虑尽量减小相对误差。例如，在用打点计时器测量平均速度时，要选择长一些的位移；用停表测量摆的振动周期时，应当累计测量几十次振动的时间，然后除以振动的次数。又如，测量一个30 g左右的钢球的质量，选用感量为0.1 g的天平，相对误差约为0.3%；而测量300 g左右的小车的质量，选用感量为1 g的粗天平也就可以了，此时的相对误差也只约为0.3%。

有效数字 在图实-9中，根据米尺的刻度可以读出点A的位置 x_A 。从图中看出，使用分度值为1 mm的尺，并且估读到毫米数的下一位，得到

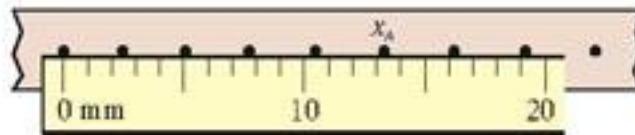
$$x_A = 13.3 \text{ mm}$$

或

$$x_A = 0.0133 \text{ m}$$

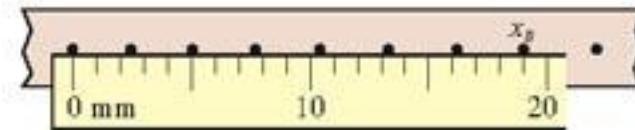
式中的末位数3是估读的、不可靠的， x_A 的真实值在13 mm和14 mm之间。但是这个不可靠的数字3还是有用的，仍要写出来，因为它表示，A点的位置在13 mm和14 mm两条刻线之间，靠近中点但离13 mm刻线稍近一些的位置。

图实-9 读数时可以读出一位估读的数字（放大图）



这种带有一位不可靠数字的近似数字叫做**有效数字 (significant figure)**。例如，13.3 mm是三位有效数字，改写成1.33 cm或0.0133 m仍然是三位有效数字。

图实-10 估读的数字应该是0（放大图）



如果仍用这个米尺测量另一点B的位置，B点的中心恰好与19 mm的刻线对正（图实-10），应当怎样记录呢？正确的是

$$x_B = 19.0 \text{ mm}$$

而不应写成19 mm。这种情况下，1、9都是可靠的，若写成19 mm，就意味着数字9是不可靠的，显然与事实上测量仪器的准确程度不相符。由此可以知道，最末一位非0数字后面的数字0是有意义的，不能随意舍去或添加。但是小数中最前一位非0数字前面的0是表示小数点的位置的，不是有效数字。例如0.92 s、0.085 kg、0.0063 m，都是两位有效数字。为了正确表达有效数字，特别大或特别小的数字都要用科学记数法，例如月球到地球的平均距离为 $3.84 \times 10^5 \text{ km}$ ，钨原子的半径为 $1.37 \times 10^{-10} \text{ m}$ 。

实验的结果往往是由若干直接测量值经过运算得到的，每一个直接测量值的误差都对最后结果产生影响，应当按照一定的数学方法来确定运算结果的有效数字。但是这种处理的计算比较复杂，中学阶段不做要求，运算结果一般取两位或三位有效数字就可以了。

课题研究

学习是一个主动参与、积极探索的过程。学习物理必须主动地发现问题，并用科学的方法解决问题。为了便于同学们主动地学习，教科书在叙述的方式、材料的选择、栏目的设计等诸多方面，采用多种方法，力图使大家积极主动地参与，充分地发挥同学们自主学习的潜能。

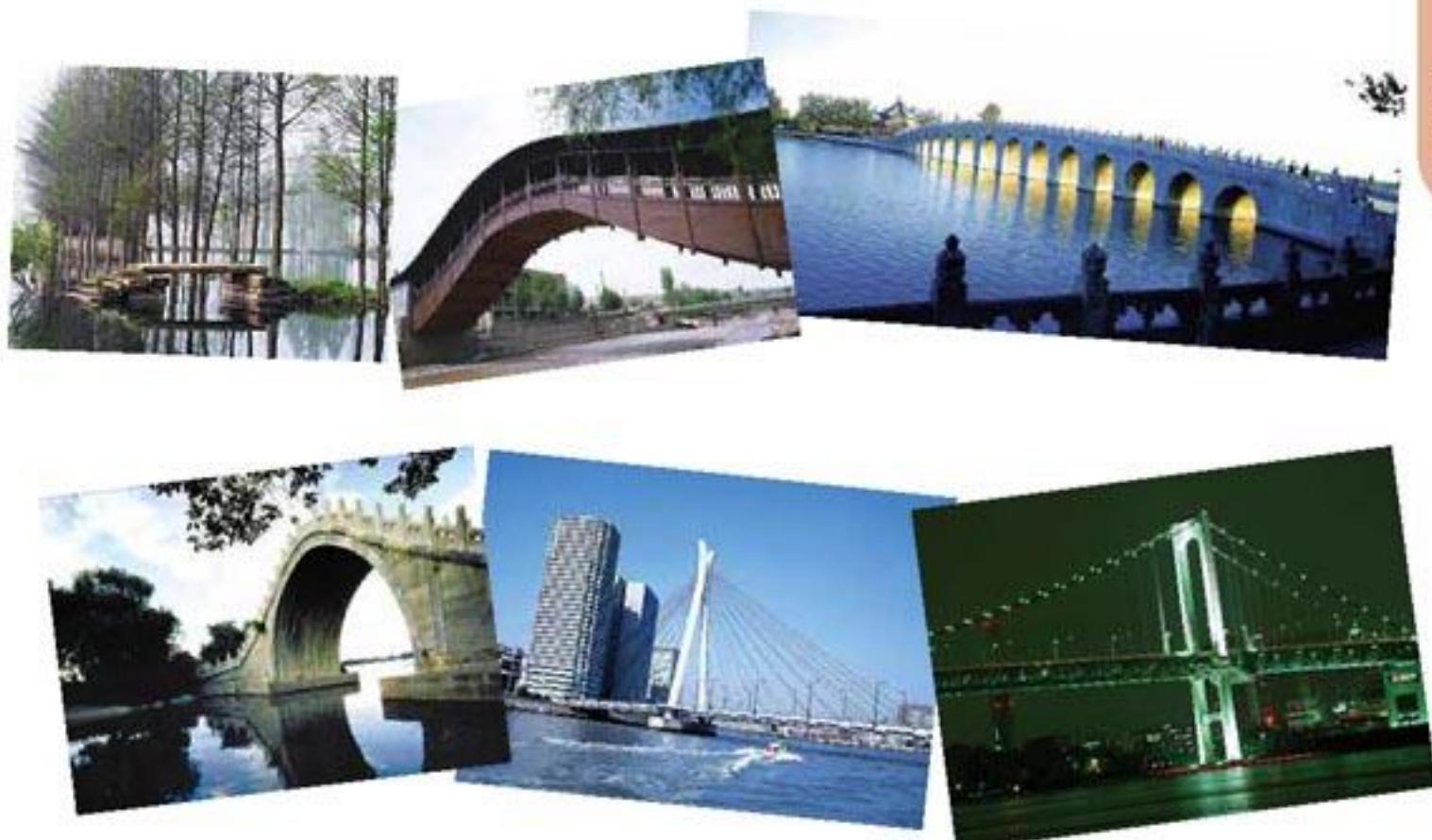
但是教科书只是一种媒介，涉及的问题是有限的。要想更好地学习，提高自己发现问题、综合分析问题和解决问题的能力，就要把眼界放宽，要把自己置身于自然和社会这个大课堂，以智者的眼光去看待周围的世界。这就需要我们在平时的学习和生活中，随时随地留意观察周围的事物，对于不懂的问题，要有问个究竟、探个明白的劲头。

比如说，学过速度、加速度、力、牛顿运动定律后，如果你对各种汽车、火车的加速性能感兴趣，就可以查找一些资料、做一些研究；如果你对各种建筑的结构感兴趣，则可以研究不同建筑风格的区别和原因。研究建筑方面的问题是一件很有趣的事情，建筑风格里面不仅包含着不同的科学道理，更有美学、民俗等方面的知识。下面我们以桥梁为例来看看如何开展这类扩展性的自主探究学习。桥梁的研究只是一个例子，同学们要根据不同类型的问题，按自己认为合适的方式去开展研究。



1

桥梁的研究



图课·1 各种各样的桥梁

课题的得来 在图书、画报、电视里，我们经常看到各种各样的桥梁，如拱桥、斜拉桥、悬索桥等(图课·1)。对于这些桥梁我们可能会有许多问题，比如我们会想：世界上有多少种桥梁？这些桥梁为什么具有不同的形状？这些桥梁为什么有的用木头、石板，有的用钢铁，而有的却用混凝土……对于这些问题，可以根据自己关注点的不同，确定不同的课题。比如我们可以只研究建造桥梁的材料有哪些；也可以研究桥梁的设计有哪些不同。下面就以“桥梁的研究”为题开展我们的研究吧。

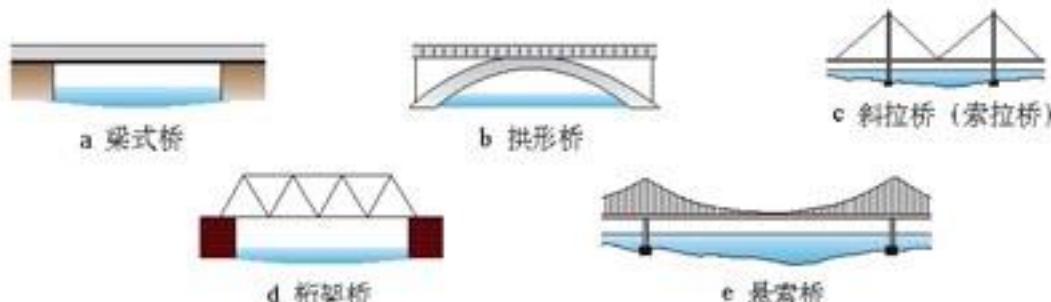
课题的规划 选定了课题，接下来应该规划如何开展研究。

这一课题的研究活动主要是资料查找、学习、分析。我们要广泛借助学校内、社会上(如市、社区图书馆等)以及网络等各种资源，查找相关的资料，最后分析、解决我们头脑中存有疑虑的问题。得出结论后，还应该用实践来检验一下。

初步规划分两部分。首先通过查找资料、请教专家等方式看看桥梁有哪些种类，为什么会有这些不同，以及建桥的材料主要有哪些……然后制作桥梁模型。

课题的实施**第一部分****1. 桥梁有哪些种类?**

通过观察实际的桥梁或照片，我们会发现，桥梁的种类真是多种多样，多姿多彩。仔细观察就会发现，尽管桥梁的样式多种多样，但是它们基本上是图课-2所示的几种类型。



图课-2 几种主要桥梁

2. 为什么有这些不同的设计?

如图课-3所示，人、车辆等通过桥梁时，桥面会弯曲，如果桥面弯曲得太厉害就会发生危险。同样的材料、同样的厚度，桥梁的跨度越大，越易弯曲。为了防止桥面过分地弯曲，可以采取不同的方法来帮助桥面承担重量。

图课-4所示的斜拉桥是一种防止梁式桥弯曲的方法。这种方法使斜拉的绳索或钢索承受部分重量，以减少桥面的弯曲。

其他种类的桥是怎样防止桥面过分弯曲的？请同学们自己来研究(可查找相关的资料)。

3. 建桥的材料及性能。

桥梁是由不同的材料建造的，如石头、木材、混凝土、钢铁等。各种材料性能不同，价格不同。通过资料我们知道，建桥材料的选择主要考虑以下几个因素。

- (1) 材料是否易得？成本多少？
- (2) 防火及防腐蚀性如何？
- (3) 是否坚固？

各种材料的性能、价格的调查请同学们自己来完成。

第二部分**1. 自己设计并制作一个桥梁模型**

要求：制作一个主桥面长为50 cm的桥梁模型。桥的总质量不能超过100 g。

材料：可以使用任何材料，如卡片、纸、绳、铁丝、胶水等。

对于模型的评价，可以用在桥面上放重物的办法，来判断桥梁的坚固性；同时还可以考虑其他因素，如桥的造型是否美观等。



图课-3 简单的梁式桥易弯曲



图课-4 斜拉桥

2. 条件允许时可以开展比赛

目的：建造一个接近实际的桥梁。

要求：由人数相同的小组(如5~10人)，在相同的时间内(如3小时)进行建桥对抗赛。桥面长4~8 m，宽不限。建成的桥至少要能承受一个人的重量。

材料：可用任何材料

评判：可找当地建桥或建筑方面的专家1~2人(找不到的，也可由老师或学生担任)，从桥的坚固程度、性价比、美观、是否有创意等方面综合评比。

课题研究的其他参考选题

1. 各种汽车加速性能的对比研究
2. 观察、分析自行车上增大和减小摩擦的做法
3. 刹车时车轮被抱死的利与弊

.....

.....

.....

课外读物

1.《物理学的进化》，[美]爱因斯坦、[波]英费尔德著，周肇威译，湖南教育出版社1999年8月第1版。

本书是爱因斯坦和波兰物理学家英费尔德合著的科普名著，从伽利略、牛顿时代的经典理论开始到现代物理学，介绍物理学观念的演变情况，指引读者找寻观念世界与现象世界的联系。作者设想本书的读者缺乏数学和物理学知识，因而不引用数学公式，文字通俗，举例浅显，具有较强的可读性。

2.《阿西莫夫最新科学指南》(上)，[美]I.阿西莫夫著，朱岚等译，江苏人民出版社2000年2月第1版。

本书是全面介绍人类以科学的方法为工具，探索宇宙奥秘的科普读物，内容涵盖了各个科学分支。上篇内容为物理科学。在前言中，作者说明了求知欲在科学发展中的作用，简要介绍了古希腊、欧洲文艺复兴时期和现代的科学思想。作者阿西莫夫是世界著名的科普作家。

3.《外星人学物理②》，[匈]Dede Miklos, Isza Sandor著，李琳培译，人民教育出版社1999年1月第1版。

本书是匈牙利高中物理教科书。它把重点放在科学方法上，引导学生通过观察和实验积累经验，在经验事实的基础上建立物理模型，用物理模型解决实际问题、预言未知现象，用新的实验现象检验模型的适用范围、进一步修正模型。在这个框架内介绍物理知识。这套书非常重视科学素质的培养，无论在选材和写法上都与我国中学物理教材有很大差别。“他山之石，可以攻玉”，此书对我国高中生会有很大启发。

4.《物理与头脑相遇的地方》，[美]柯尔著，丘宏义译，长春出版社2002年3月第1版。

本书作者把物理学看做人类文化的一部分，也看做一种生活方式。作者认为，好的文学作品能描述人类感情及行为背后的东西，物理学家也应能够描述自然界神奇万物后面的东西。书中讨论了物理学家所用的许多方法，介绍了他们用这些方法进行探索的尝试。

5.《计算物理基础》第一册，计算物理基础编委会编，人民教育出版社2002年10月第1版。

现在，计算物理与实验物理、理论物理一起已经成为物理学科的三大基础。本书以几个专题为例，介绍了用常用软件处理中学物理问题的方法，为信息技术与学科学习提供了具体的帮助。

6.《高中物理学生实验》，教育部教学仪器研究所主编，人民教育出版社2004年5月第1版。

本书讨论了中学物理实验涉及的误差、有效数字等知识，对常用的器材做了详尽的说明，介绍了很多在中学实验室中可以完成的实验。

后记

根据《基础教育课程改革纲要（试行）》的精神，我们按照《普通高中物理课程标准（实验）》的要求编写了共同必修及其他三个系列的全套教科书。本册经全国中小学教材审定委员会2004年初审通过，供普通高中试用。

这套教科书在编写中，得到了诸多教育界前辈和各学科专家学者的热情帮助和支持。在本套教科书同课程改革实验区的师生见面时，我们特别感谢担任教科书总顾问的丁石孙、许嘉璐、叶至善、顾明远、吕型伟、王梓坤、梁衡、金冲及、白春礼、陶西平同志，感谢担任教科书编写指导委员会主任委员的柳斌同志和编写指导委员会委员的江蓝生、李吉林、杨焕明、顾泠沅、袁行霈等同志。

这套书的编写者以教育部物理课标组的核心成员为基础，由高校教师、中学教师和出版社的编辑人员三结合组成。共同必修部分和三个选修系列的编写小组分别起草，然后全体编写人员反复讨论、相互修改，因此，本书是编写组集体创作的成果。

在本书的编写过程中，由刘彬生、汪维澄、唐挈、李丽娟组成的实验研究小组做了全书所有的实验，检验和改进了书稿中的实验部分；由黄恕伯、李友安、叶柯、毛宗致组成的习题研究小组筛选和设计了全书的“问题与练习”。

张同恂、董振邦、窦国兴、扈剑华、孙昌璞在编写的不同阶段审阅了书稿，提出了重要修改意见。

我们还要感谢使用本套教材的实验区的师生们。希望你们在使用本套教材的过程中，能够及时把意见和建议反馈给我们，对此，我们深表谢意。让我们携起手来，共同完成教材建设工作。

我们的联系方式如下：

电 话：010-58758389

E-mail:jcfk@pep.com.cn

网 址：<http://www.pep.com.cn>

人民教育出版社 课程教材研究所
物理课程教材研究开发中心
2004年5月

谨向为本书提供照片的人士和机构致谢

图3. Corel Corporation / 0-1, Imaginechina / 0-10, 张大昌 / 第一章章首图, Corel Corporation / 1.1-2 右上图, Corel Corporation / 1.1-2 主图, 《人民画报》2003年3月 / 1.1-6, 张大昌 / 1.3-5, Corel Corporation / 1.4-3, 朱京 / 1.4-8, 朱京 / 第二章章首图, 《科学》2003年1月封面 / 2.2-6, Corel Corporation / 2.3-4, 朱京 / 2.5-2, 张大昌 / 2.5-3, 张大昌 / 2.6-1, Corel Corporation / 第三章章首图, Corel Corporation / 3.1-6, 希望出版社《太空知识百科全书》2000年1月第1版 / 3.1-7, 霍晓峰 / 3.2-2, 第一学习社《新编物理图解》 / 3.3-2, 朱京 / 3.3-4, 《人民画报》2003年1月 / 3.3-7, 朱京 / 3.3-8, 石磊 / 3.3-9, 人民画报2003年5月 / 3.4-5, 《人民画报》2003年6月 / 3.4-6, 中国图片网 / 3.5-4, 《人民画报》2003年8月 / 第四章章首图, Digital vision / 4.1-1, 第一学习社《新编物理图解》 / 4.1-2, 丁卫国 / 4.2-1, Corel Corporation / 4.5-4, 朱京 / 4.5-6, 朱京 / 4.7-4, 朱京 / 学生实验, 朱京 / 92页上图, 中国民航出版社《国民科普大课堂》上卷 / 图实-7, 朱京 / 图课1, 中国图片库