

# 大学物理学

第一册

姚亮 国宗明 主编

南京大学出版社

## 前 言

本书根据《高等工业学校物理课程基本要求》(1987年高等教育出版社)并参照高等师范院校和综合大学非物理专业《普通物理学教学大纲》(1980年人民教育出版社)编写而成。全书共分三册,第一册包括力学和分子物理及热力学,第二册为电磁学,第三册为光学和近代物理学。

大学物理学是理工科各专业的一门重要基础课。在编写本书时,我们既重视教材的科学性、系统性、先进性,也重视其可读性,力求深入浅出、语言精炼畅达;既重视知识的传授,也重视能力的培养,力求在讲清楚基本概念、基本规律的基础上,注意讲清楚分析问题的思路和解决问题的方法;既重视便于教师的讲授,也重视有利于学生的学习,力求符合认识过程和思维规律。

本书采用国际单位制(SI),对于某些物理量的其它常用单位,仅给出它与相应的国际单位的换算关系。各章均配有习题,编排于各章的末尾,其答案一律附于各分册的最后。

本书的编写工作是在高文渊主持下进行的,参加本书编写的同志均长期从事于大学物理学的教学,书中自然反映了他们的部分教学经验。但由于我们的水平有限,时间仓促,谬误之处在所难免,敬请读者批评和指正,并深表谢意。

编 者

1990年元月

## 绪 论

物理学和其它自然科学一样，是研究自然界物质运动客观规律的科学。我们周围所有的客观实在都是物质，除大至日月星辰的天体，小到原子、电子的微观粒子等一类的实物是物质外，电磁场、引力场等也是物质。一切物质都在不断地运动着、变化着，自然界的一切现象都是物质运动的表现。自然界诸多物质各种不同的运动形式，既遵从共同的普遍规律（如能量守恒和转换定律），又都有其各自的独特规律。对各种不同的运动形式的研究，就形成了自然科学的各个不同的学科。

物理学是研究物质的最基本、最普遍的运动形式和各种运动形式间的相互转化以及物质的基本结构的自然科学。这些最普遍的运动形式包括机械运动、分子热运动、电磁运动、微观粒子运动等，它们都普遍地存在于其他高级的、复杂的运动形式之中。而研究高级的、更加复杂的运动形态，包括研究一切现代科学技术，都离不开物理学的知识，因此，我们说物理学是一门基础科学。

物理学研究的内容和范围是在不断变化着，物理学的基本理论和方法又不断地向其他研究领域渗透、融合，并把一些部分从物理学中分化出去，成为独立的新学科，随着物理学的广泛应用，它与其他学科的结合，还出现了一系列边缘学科，如化学物理学、物理化学、天体物理学、地球物理学、量子化学、分子生物学等。

物理学的发展与科学技术、生产实践密切相关。生产发展的客观需要是物理学发展的强大动力，而物理学的研究又有力

地推动社会生产力的发展。例如，热力学的研究就曾受到蒸汽机发展的推动，而电磁学的研究又促进了工业电气化，使人类进入到应用电能的时代。尤其是作为现代物理学两大支柱的相对论和量子力学的建立，为二十世纪物理学的进一步发展奠定了坚实的基础，使人类对原子、原子核结构的认识日趋深入、真实，从而成功地实现了对原子核能和人工放射性同位素的广泛应用，并促进了半导体、激光等新兴技术的迅速发展。现代物理学已成为基础科学中发展最快，影响最深的一门学科。一场新的技术革命正在兴起，发展包括信息技术、生物工程、新材料、航空航天等在内的高技术，继续探索自然界的奥秘，将是科技发展的总趋势。与此同时，包括物理学在内的基础科学的研究也必将得到相应的加强和应用。

学习物理学，除了要掌握好物理学的基本理论和基本知识以外，还必须要学会物理学的研究方法。总的说来，物理学的研究方法也遵从实践——理论——实践的认识客观世界的法则。但是，具体地说，物理学理论就是通过观察、实验、抽象、假说等研究方法，并通过实践的检验而建立和发展起来的。

观察和实验是物理学的基本研究方法。观察就是对自然中所发生的某种现象，在不改变自然条件的情况下，按照它原来的样子加以观测研究。历史上不少物理学家的研究工作都是从观察开始的，例如伽利略对落体运动和摆动的研究等。实验是用人工控制的方法，突出主要因素，排除或减低次要因素的作用，把复杂的条件加以简化，使现象重复发生，得以反复观测研究。物理学中也有一些规律是直接从生产实践中总结出来的，但更多的物理定律和理论是建立在大量科学实验的基础上。

在物理研究中往往要提出一种理想模型，如“质点”、“刚体”、“点电荷”等，这是常用的科学抽象方法。它是根据所讨论问题的内容和性质，抓住主要因素，撇开次要的、局部的、偶然的因素，建立一个和实际情况差距不大的模型来进行研究。在定律和理论建立过程中，假说常常起着很重要的作用。所谓假说就是在一定的观察、实验的基础上概括和抽象出来的说明或基本论点。假说在一定的范围内经过不断修正和实验的检验，证明为正确的，便上升为定律或组成理论的一部分。可见，一个正确假说的建立不仅是定律和理论的基础，也是科学认识发展过程中很重要的、必不可少的一个阶段。这样，从观察、实验中总结或抽象出物理定律，再根据相关现象的许多物理定律，再根据相关现象的许多物理定律和正确假设，进一步抽象为系统的物理理论。所以一个能够正确反映客观实在的理论，不仅能够解释已知现象，而且还具有预见性，指导进一步的新的实践，从而显示出理论研究的重要性。

人们研究自然科学的目的，不单纯是反映客观世界，了解物质运动的客观规律，而是为了掌握这些规律来改造自然、发展生产力。我们要实现四个现代化，关键是科学技术的现代化，必须极力提高整个中华民族的科学文化素质，造就一支具有社会主义觉悟的强大的科学技术队伍。为此，在高等学校中，必须加强物理学的教学，不断提高教学质量。作为理工科大学各专业的学生，必须牢固地掌握物理学的基本理论和基本知识，系统地打好必要的物理基础，以便进一步学习和掌握专业知识和近代科学技术，从而使自己成为一名合格的高级工程技术人才，为振兴中华贡献力量。

# 第一册目录

绪论	1
----	---

## 第一篇 力学

<b>第一章 运动学</b>	5
§ 1 质点运动的描述	5
§ 2 质点运动的直角坐标表示法	9
§ 3 质点运动的自然坐标表示法	17
§ 4 相对运动	22
§ 5 刚体定轴转动的描述	25
习题	34
<b>第二章 质点动力学</b>	39
§ 1 牛顿运动定律	39
§ 2 惯性系和非惯性系	54
§ 3 动量定理	60
§ 4 动量守恒定律	67
§ 5 动能定理	73
§ 6 功能原理 机械能守恒定律	82
§ 7 能量转化及守恒定律	92
§ 8 碰撞	94
习题	100
<b>第三章 刚体定轴转动动力学</b>	114
§ 1 刚体平动动力学	114
§ 2 转动动能 转动惯量	115
§ 3 力矩 转动定律	122

§ 4	力矩的功	129
§ 5	动量矩 动量矩定理 动量矩守恒定律	132
	习题	142
<b>第四章</b>	<b>振动学基础</b>	149
§ 1	简谐振动	149
§ 2	简谐振动的图示方法	155
§ 3	单摆与复摆	162
§ 4	简谐振动的能量	166
§ 5	简谐振动的合成	169
§ 6	阻尼振动与受迫振动	180
	习题	186
<b>第五章</b>	<b>波动学基础</b>	191
§ 1	机械波在媒质中的传播	191
§ 2	平面简谐波与波动方程	196
§ 3	波的能量 能流密度	204
§ 4	惠更斯原理及应用	209
§ 5	波的迭加原理 波的干涉	213
§ 6	驻波	217
§ 7	多普勒效应	224
	习题	229

## 第二篇 分子物理学和热力学

<b>第六章</b>	<b>分子运动论</b>	234
§ 1	理想气体的状态方程	234
§ 2	分子运动论的基本概念	236
§ 3	理想气体的压强、温度的微观意义	238
§ 4	麦克斯韦速率分布律	244

§ 5	波耳兹曼分布律	250
§ 6	能量按自由度均分定理	252
§ 7	气体内分子的平均自由程和平均碰撞频率	257
§ 8	气体内迁移现象	260
§ 9	实际气体	269
	习题	278
<b>第七章 热力学</b>		281
§ 1	热力学第一定律 准静态过程	281
§ 2	热力学第一定律在理想气体准静态过程中 的应用	286
§ 3	循环过程 卡诺循环	297
§ 4	热力学第二定律	303
§ 5	卡诺定理	307
§ 6	熵 熵增加原理	310
	习题	317
<b>附录</b>		
I	矢量	323
I	单位制和量纲	330
II	常用物理常数表	336
<b>习题参考答案</b>		337



# 第一篇 力 学

## 力学的研究对象

自然界的一切物质都是在不断地运动着、变化着。在物质的各种各样、千变万化的运动中，有一类是我们在生产和生活中经常遇到的，即物体之间或物体内各部分之间的相对位置随时间的变化。例如，天体的运行、机器的运转、车辆的行驶、流体的流动，这种运动称为机械运动。它是一种最简单、最基本的物质运动形式。物理学中研究机械运动的规律及其应用的部分称为力学。而在力学中所提到的运动，都是指机械运动。

在物理学中，为了便于抓住本质，解决问题，往往在科学分析的基础上，突出事物中与问题有关的主要矛盾，将一些影响不大的次要因素加以忽略，在一定的条件下引入抽象化、理想化的模型做为研究对象。力学中将考察的物体抽象为质点、刚体和质点系等三种理想模型。

## 质点

任何实际物体都有一定的大小和形状，它们在运动中可以同时有旋转、变形等，在运动的物体上，各点位置的变化一般也各不相同。这样，要想精确地描述物体的运动并非容易。但是在某种情况下，物体的形状和大小与所研究的问题无关或者是起的作用很少，是次要因素，这样，为了研究问题的方便起见，可以忽略其大小和形状，抽象为只具有质量而没有形状和大小的一点——质点。例如地球绕太阳公转的平均半径大约是地球平均半径的二万三千倍，所以在研究地球绕太阳公转时，地球的大小和形状实际上可以不予考虑，就可认为地球上各点的

运动规律相同，而把它视为质点。但是在研究地球自转时，地球上各点的运动情况大不相同，就不能把它视为质点。又如研究车辆整体的运动时，可以忽略其本身的大小和形状，而视为质点，但研究车辆的车轮滚动时就不能当作质点。由此可见，一个物体是否可以当作质点来对待，完全取决于力学问题的性质，而不能单纯看物体的实际大小，即使是一个极小的原子，在研究其内部结构时，也不能看作为质点。质点是实际物体简化了的科学的理想模型。

### 刚体

物体在运动过程中，由于某些因素的作用，总是要发生形变的。如果物体的形变与所研究的问题无关或关系不大，就可以不予考虑。这样，就把仅具有一定的大小和形状，任何情况下不发生形变的物体称为刚体。刚体和质点一样，是物理学中又一个理想模型。一个物体是否能够看成是刚体，同样应根据问题的具体情况而定。例如，研究地球的自转时，可把它看成刚体，但在研究地球的内部结构或地震波的产生和传播时，就不能视其为刚体。如果研究火车的轮子在轨道上滚动而不考虑其形变时，就可把轮子看成刚体，但在研究应该用什么材料制造火车轮子时，就不能视其为刚体了。

### 质点系

质点系是相互间有一定（几何的或力学的）联系的一些质点的总称，有时也称为力学系统，简称系统。如果设想把一个刚体划分为许多极小的部分（质元），并把每一小部分视为质点，那末，刚体又可以看成是各质点间距离保持不变的质点系。

### 参照系

自然界中一切物体都在不断地运动着、变化着，绝对静止

不变的物体是不存在的,即使是最简单的机械运动,物体的位置变化也是如此。车辆的运动、云层的飘移、河水的流动都是相对于地面有位置的变化;看起来是“静止”在地面上的建筑物也随着地球的自转和公转一起运动;所谓恒星,也不是绝对静止的,据天文观测,太阳系以每秒20公里的速率朝武仙星座运动,太阳系又在绕着银河系中心快速旋转着,而我们所在的银河系整体也还朝麒麟星座方向奔驰。这些事实表明:运动是物体存在的形式,运动是绝对的,而“静止”只有相对的意义。

然而,我们在描述物体运动时,总得选择另一个运动的物体或几个虽在运动而相互间保持静止的物体群作为依据,这些被选用作依据的物体或物体群,称为**参照系**(或参考系)。例如,研究地球等行星的运行,常选太阳作为参照系;研究火车或其他物体在地面上的运动,常选地球作为参照系,而考察火车中乘客的运动,则常选火车车厢作为参照系。一旦参照系选定后,如果物体相对于参照系的位置在变化,则说明物体相对于该参照系在运动;反之,则说明物体相对于该参照系是静止的。

在不同的参照系中,描述同一物体的运动的情况是不同的,这叫作运动描述的相对性。从描述运动的角度来看,参照系的选择是任意的,要看问题的性质和研究的方便。

### **坐标系**

为了定量地描述物体相对于参照系的位置变化规律,还需要选择一个坐标系固定在参照系上。应当指出,参照系和坐标系是两个不同的概念。就描述物体的位置变化来说,坐标系起刻度标尺的作用,它实质上是参照系的数学抽象。最常用的坐标系是直角坐标系。有时为了研究问题的方便,还使用自然坐标系、平面极坐标系、球面坐标系等。参照系确定以后,所描

述的某个物体运动的快慢、轨道的形状等也随之而确定了，至于坐标系的类型、坐标原点的位置、坐标轴的方向的不同选择，那只是描述运动所用的参数不同而已，对物体运动的性质并无影响。不过坐标系若选择得当，则可以简化计算或者更便于描述。

### **运动学和动力学**

按研究问题的性质，一般把力学分为运动学、动力学和静力学三部分。运动学的任务是描述所研究物体的运动和物体运动的各运动学量之间及它们随时间变化的关系，而并不涉及到引起运动变化的原因。动力学则要研究物体间的相互作用对物体运动的影响，即要讨论在力的作用下物体运动的规律。静力学是研究在力的作用下物体获得平衡的问题，如果将静力学作为动力学的一个特殊情况来处理，力学则包含运动学和动力学两部分。

# 第一章 运 动 学

## § 1. 质点运动的描述

### 位置矢量

为了描述质点的运动，首先必须确切地表示出质点的位置。如图 1—1—1 所示，设  $t$  时刻质点位于  $P$  点，可用由坐标原点  $O$  指向  $P$  点的有向线段  $\overrightarrow{OP}$  来表示这一位置。矢量  $\overrightarrow{OP}$  既反映出质点到  $O$  点的距离，又表明了质点相对于  $O$  点的方位，因此， $\overrightarrow{OP}$  叫做位置矢量或矢径，通常用  $r$  来表示。

位置矢量不仅与参照系的选择有关，就是在同一参照系中，位置矢量也随着参照点的不同而各异，如图 1—1—1 所示。

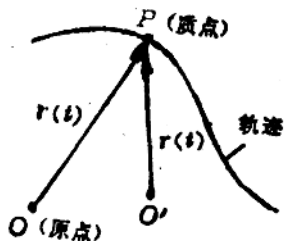


图 1—1—1

### 运动方程

质点在运动过程中，其位置随时间而改变，因之矢径  $r$  的大小和方向也将随时间而变化，即  $r$  是  $t$  的函数，为

$$r = r(t) \quad (1-1-1)$$

上式称为质点的运动方程。只要给出  $r(t)$  函数的形式，质点在任何时刻的位置就可以确定了。因此，它是描述质点运动规律的重要方程。

### 轨迹

在运动过程中，质点在空间所经过的路径，即矢径端点在空间所描绘的曲线，叫做质点运动的轨迹或轨道。轨迹是直线的运动叫做直线运动，是曲线者叫做曲线运动。

### 位移

运动质点的位置在其轨迹上是连续变化的。如图1-1-2所示，设 $t$ 时刻质点位于 $P$ 点，其矢径为 $r(t)$ ，经过 $\Delta t$ 的时间，质点沿其轨迹运动到了 $Q$ 点，与之相应的矢径为 $r(t + \Delta t)$ 。为了描述质点在 $\Delta t$ 时间内位置变化的情况，而从初位置 $P$ 到末位置 $Q$ 作一矢量 $\overrightarrow{PQ}$ ，叫作质点在 $\Delta t$ 时间内的位移矢量，简称位移。由图可见，位移 $\overrightarrow{PQ}$ 等于质点在 $\Delta t$ 时间内矢径的增量，即

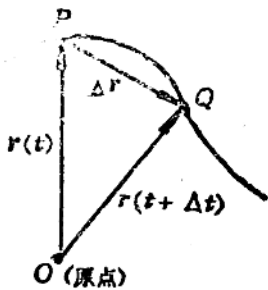


图1-1-2

$$\overrightarrow{PQ} = \Delta r = r(t + \Delta t) - r(t) \quad (1-1-2)$$

值得注意的是：位移是矢量，它不仅反映了在所给定的时间内质点位置变化的大小，也反映了位置变化的方向。而路程是质点在给定的时间内所描画的轨迹的长度，是标量。它们是两个不同的概念。

### 速度

研究质点的运动规律，不仅要知道质点的位移，还应知道质点位置变化的快慢。设在 $\Delta t$ 时间内质点的位移是 $\Delta r$ ，则 $\Delta r$ 与 $\Delta t$ 之比称为质点在 $\Delta t$ 时间内的平均速度，即

$$\bar{v} = \frac{\Delta r}{\Delta t} \quad (1-1-3)$$

平均速度 $\bar{v}$ 也是矢量，它的方向与位移方向相同，如图1-1-1

—3 所示。

平均速度只能粗略地描述质点的运动情况，即它只反映在所给定时间内位移的平均变化。显然， $\Delta t$  取得越短，相应的平均速度就越接近于质点在  $P$  点的运动情况。当  $\Delta t$  趋近于零时，比值  $\Delta r / \Delta t$  的极限值叫做质点在  $P$  点的瞬时速度，简称速度，记作  $v$ ，即

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{dr}{dt} \quad (1-1-4)$$

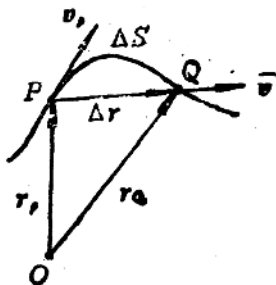


图1-1-3

可见，质点在  $t$  时刻的速度等于位置矢量对时间的导数。速度是矢量，其大小  $v$  称为速率。当  $\Delta t \rightarrow 0$  时， $|\Delta r| = \Delta S$ ，因此有

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta r|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{dS}{dt} \quad (1-1-5)$$

可见，速度的大小即速率是描述质点运动快慢的物理量。

由图 1-1-3 可知，速度的方向是由位移  $\Delta r$  的极限方向决定的，当  $\Delta t \rightarrow 0$  时， $\Delta r$  趋近于  $P$  点的切线方向，因此，质点在任意时刻的速度方向总是与该时刻质点所在处的轨道相切，指向质点的前进方向。

### 加速度

当质点运动时，速度的大小和方向一般都要发生变化。为了描述质点的运动速度随时间变化的情况，我们引入加速度这一物理量。

设  $t$  时刻质点位于  $P$  点，速度为  $v$ ，在  $t + \Delta t$  时刻质点运动到  $Q$  点，速度为  $v_0$ ，在  $\Delta t$  时间间隔内，速度的增量为  $\Delta v =$

$v_0 - v_p$ ，如图 1—1—4 所示。比值  $\Delta v / \Delta t$  叫做  $\Delta t$  时间内的平均加速度，即

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (1-1-6)$$

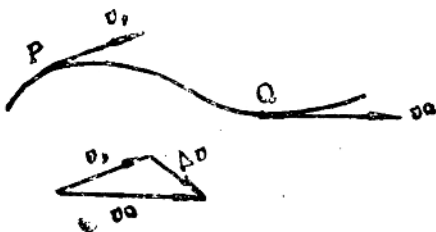


图1—1—4

平均加速度  $\bar{a}$  也是矢量，它的方向与  $\Delta v$  方向相同。平均加速度只能粗略地描述  $\Delta t$  时间内速度平均变化的情况，并不能精确地反映出质点在  $t$  时刻的速度变化情况。 $\Delta t$  取得越短，相应的平均加速度就越接近于  $t$  时刻速度变化的实际情况。因此，我们把当  $\Delta t \rightarrow 0$  时平均加速度  $\Delta v / \Delta t$  的极限定义为质点在  $t$  时刻的瞬时加速度，记为  $a$ ，即

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 r}{dt^2} \quad (1-1-7)$$

可见，质点在  $t$  时刻的加速度等于速度对时间的导数，即速度对时间的变化率。也可以说，加速度等于位置矢量对时间的二阶导数。加速度是一个矢量，其大小为



$$a = |a| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = \left| \frac{dv}{dt} \right| \quad (1-1-8)$$

必须注意：①加速度只与速度变化有关，而与速度无关。这意味着加速度的方向是速度变化  $dv$  的方向，而不是  $v$  的方向；加速度的大小并不反映速度的大小。②速度变化  $dv$  包含其大小和方向两个因素，即只要速度的大小和方向之一发生变化，就会产生加速度。③加速度不是速度的增加，而是速度的变化率。

在SI（国际单位制）中，位置矢量、位移和路程的单位都是米（ $m$ ）；速度的单位是米·秒<sup>-1</sup>（ $m \cdot s^{-1}$ ）；加速度的单位是米·秒<sup>-2</sup>（ $m \cdot s^{-2}$ ）。

前面我们已经介绍了描述质点运动的四个基本物理量：位置矢量、位移、速度和加速度。而质点运动学的主要内容就是要了解质点的运动状况和质点运动所通过的路径等。这样，我们就可以把质点运动学归纳为两大类问题：一类是已知质点的运动方程而求质点在任意时刻的位置、速度和加速度；另一类是已知质点加速度（或速度）与时间的函数关系和初始条件而求质点在任意时刻的速度、位置和运动方程。

## § 2 质点运动的直角坐标表示法

### 直角坐标表示法

在直角坐标系  $OXYZ$  中，各坐标轴正方向的单位矢量分别为  $i$ 、 $j$ 、 $k$ ，如图 1—2—1 所示，若  $P$  点的矢径  $r$  在各轴上的投影分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$ ，则矢径可表示为：

$$r = xi + yj + zk \quad (1-2-1)$$

其大小或称矢径的模为：