高等学校教学参考书

物理学

第一册

缪　源等编

高等教育出版社

高等学校教学参考书

物　理　学

第一册

缪　源　等编

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是为数学系学生学习"物理学"课程编写的教学用书，全书共分为三册。第一册内容包括质点运动学、牛顿运动定律、守恒定律与质点的运动、刚体的运动、振动和机械波。全书内容注意结合数学系学生的特点，同时较普通物理内容略有延伸。为了方便读者，书中已将若干超出普通物理内容的较难部分排成小字。读者即使越过这些内容，亦不会影响对后续内容的理解。

本书可作为综合性大学及高等师范院校数学系物理学课程的教学用书，亦可供相近专业学生学习物理学时参考。

高等学校教学参考书

物 理 学

第 一 册

缪 源 等编

高等教育出版社出版

新华书店上海发行所发行

商务印书馆上海印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 11.75 字数 280,000

1987 年 5 月第 1 版 1987 年 5 月第 1 次印刷

印数 0,001—3,400

书号 13010·01258 定价 2.40 元

编 者 前 言

这是一本“中级”物理教材，其中不仅讨论了普通物理课程的基本内容，并且涉及到理论物理学的一些初步概念。由于这个缘故再称它为普通物理学已不再适宜，因此我们取名为“物理学”。它是我们为数学系的物理课程编写的教材，然而我们还希望它对其它专业欲将普通物理和理论物理联系起来学习的学生也有一定的参考价值。

虽然本书涉及到一些理论物理学的内容，不可避免地要使用矢量分析等较多的数学知识，但是本书只要求读者事先具备一定的微积分知识，所用到的其它数学知识在书中都作了必要的讲解。这样做是为了适应数学系教学计划的要求，我们相信这样对于其它初学者来说，这样做也是比较方便的。

本书侧重于对物理学基本理论和公式的讨论，为了避免某些初学者初次阅读本书时一下子遇到较多的数学或较难的内容而感到困惑，我们将若干较难的内容排成小字体，读者可以越过这些内容也不会影响对后面的内容的理解。

我们是在1977年苏州会议上接受编写本书任务的，由沈世武、马光群、叶权书、叶蓉华、郭玉珂与高美娟等几位同志担任编写工作，冯璧华、何永蓉两位同志选编了一部分习题。本书的初稿曾由程濬、冯致光和吴维瑛三位同志审阅，梁昆淼同志也曾审阅了部分内容。后来，由我担任主编工作，对初稿作了修改。本书修改后的初稿的大部分内容曾在1978年上海审稿会议上由武汉大学、吉林大学、复旦大学、西北大学、北京师范大学、上海师范

大学、云南大学、开封师范大学和南开大学的同志们审阅，到会的同志们提出了许多宝贵的修改意见。虽然本书初稿在这次审稿会上基本上得到了认可，然而我们深深感到本书成稿过于仓促、特别是因为参加编写本书的多数同志过去都没有讲授过数学系的物理课程，对数学系的特点以及苏州会议的精神缺乏足够的认识和了解，对于如何编写这样一本教材更是缺乏经验，因此我们决定先在我校数学系试用，所以一直未向出版社交稿。从1979年至1982年，本书初稿脱稿后，先后经马光群，叶权书、高美娟、万春华、张光华等几位同志试用，提出了许多修改意见，由我执笔逐年作了不少修改。1982年暑假后，我自己也担任了这门课程的教学，使用了这本书的初稿。在使用过程中，我深深感到本书内容较广泛，参加编写的同志又多，加之缺乏经验，各部分之间自然不免有种种不尽统一的地方。为了加强本书各部分之间的内在联系，大家又责成我来统一修改定稿，这对于我确是一个困难的任务，实在不是我的能力能够胜任的。我虽然力图保持原稿各部分的主要内容和原有风貌，但要大体做到全书的统一，并较好地体现苏州会议的精神，最终还是不得不对原稿作了较大的改动。虽然我们深知本书还存在不少问题，但是由于这种类型的物理教材在我国还不多见，我们希望它能对某些读者有一定的参考价值。

本书最后的文稿由郭玉珂同志负责整理。习题的答案过去曾经马玉章同志校核，最后又经曹伶华同志核对。

缪　源　1984年1月16日

于南京大学

目　录

引　言

物理学是研究机械运动、热、电磁、光等种种宏观物理运动形态以及微观客体运动形态和结构的一门自然科学。

人们通常将物理学划分为实验物理学及理论物理学两部分，但是从根本上来说，物理学同许多自然科学一样仍是一门实验科学。一切物理定律、原理、假说和理论都来自人们的生产实践和实验研究。任何精致的原理和理论不论看起来是如何美妙，如果实验检验表明它不能符合客观实际，那么这个理论就很难成立。这是物理理论与数学理论的一个重要差异(虽然数学家也决不可能随意地去构造一个数学理论)，习惯于数学研究方法的初学物理的学生对此应当时时加以注意。

物理学是一门精确的自然科学，它研究物理运动形态的种种量的关系和规律。由于这个原因，物理学的定律和理论通常都以数学作为工具和语言，并按照物理对象的不同性质而具有不同的数学形式。在研究物理学的规律和理论时自然应当尽力透过其数学形式而认识其物理本质，并建立具体的物理图像。然而另一方面又应当善于应用适当的数学形式来表达和研究种种不同的物理对象和规律。只有在所研究的物理规律用恰当的数学形式来表述时，所表述的内容才能是简洁明快的，从而我们才可能清晰地表达和揭露其物理本质。甚至在某些情形下，不采用相应的适当的数学形式要正确地表述所研究的物理规律几乎是不可能的。由此可以看出，善于采用适当的数学形式来研究物理是何等地重要。

由于物理运动形态是物质世界的基本运动形态，它是其它诸如化学的、生物的、地质的等等物质运动形态的基础，因而物理学

与其它自然科学学科有着密切的联系。它们之间还存在着纵横交错的种种边缘学科，如生物物理学、化学物理学、地球物理学等等。其中有些边缘学科正是现今迅速发展的前沿分支学科。物理学的发展不但为其它自然科学学科及边缘学科分支的顺利发展奠定了基础，而且也为科学技术和生产的迅速发展不断地开辟道路。随着物理学的发展，科学技术与人类生活和生产的面貌正在发生日新月异的变化，而科学技术与生产的发展又为物理学的发展提供了崭新的研究手段和研究课题，反过来又极大地推动了物理学的发展。但是，在与物理学有着密切联系的种种学科中，数学却占有一个特殊的地位。空间、时间以及物质的种种物理属性的量的变化乃是物质运动变化的表现形式，而空间和种种量的属性正是数学的研究对象。正是由于这个缘故，物理学才不能不以数学作为它的工具和语言，对于不同的物理对象才不能不去寻找与之相适应的数学形式。正是由于这个缘故，物理学才在数学的发展史中成为数学发展的最主要的推动力量，而且现在仍然在对数学的进一步发展继续产生着重要的影响。且不去谈十七世纪机械运动的研究对于函数概念的引入以及微积分的发现所起的推动作用，就拿十八世纪来说，正如美国数学家 M. 克莱因在其《古今数学思想》一书中所指出的："十八世纪的数学工作，远较其他世纪更为直接地受到物理问题的激励。实际上，可以说工作的目标不是数学，而是求解物理问题；数学是达到物理目的一种方法。Laplace（虽然也许是一种极端的情况）确实认为数学只是物理的一个工具，而且他自己所关心的完全是数学对天文学的价值"（中译本第二册 374—375 页）。至于十九世纪，克莱因指出："十九世纪的数学家起先都关心自然界的研究，因而物理学就必然成为数学工作的主要启示。最伟大的人物、如 Gauss、Riemann、Fourier、Hamilton，Jacobi 和 Poincaré；次一级的知名人物，如

Christoffel、Lipschitz、Du Bois-Reymond、Beltrami，以及上百个其它人物，都直接在物理问题和由物理研究所提出的数学问题上工作着。甚至被公认为纯粹数学家的人，譬如 Weierstrass，也研究物理问题。事实上，在物理问题为数学研究提供意见和方向方面，这一世纪比以往任何一个世纪都多，一些高度复杂的数学，正是为了处理这些物理问题而创造出来的”(同书第四册112页)。由此可以清楚地看出，物理学与数学之间的关系是何等的密切；由此也可以清楚地看到，为了深刻地了解和掌握古典数学理论，了解一些基本的物理理论是绝对必要的，否则就不可能很好地了解这些数学理论之产生和发展的背景，自然也就不能深刻理解这些数学理论。有一位数学家曾说过："如果有人教一种抽象理论而不说明它是从什么抽象的，这将成为一种精神游戏，它既不能恢复与现实的关系，而且由于对起源缺乏了解，也不能使这游戏朝着大家赞同的'有意义的'方向继续发展下去。"另一方面，学习与研究一些物理理论还会给研究数学的学生提供一个应用所学到的数学知识的很好的机会，从这个意义上来说对于研究数学也将是一个极其有益的帮助。诚然，随着数学发展的日益成熟而引起的研究数学本身内在逻辑的需要产生了许多近代的所谓"纯数学"的分支，然而近代数学与近代物理学仍然有着密切的联系，并且彼此之间仍然起着重要的推动作用。但由于这些物理理论已远远超出了本书所能涉及的范围，本书也就仅仅涉及到经典数学的一些基本内容，象黎曼几何、泛函分析、拓扑以及其它近代数学的内容自然不是本书所能涉及的了。

第一章　质点运动学

要研究机械运动的基本规律，首先需要确切地描述物体作机械运动时的运动情况。运动学研究的就是如何描绘物体的机械运动，需要那些量来描述它，以及这些量随时间变化的关系。

§1-1　参　照　系

我们知道，要说明一个物体的位置或位置的变化，总需要选择另一些物体作为参照。例如，当我们要指明一个物体在房间中的位置时，我们说这物体离东墙多少距离，离南墙多少距离，离地面多高，这里我们是以房屋（墙壁和地板）作为描述物体位置的参照物。又例如，当我们要指明某地的地理位置时，我们说它在东经几度几分几秒，北纬几度几分几秒，这时被选作参照物的则是地球。这些被选为描述物体位置的参照物通常称为参照系。离开任何参照物来确定物体的位置和位置的变化，显然是不可能的，所以说物体的位置和运动只能相对于参照系而确定。

相对于不同的参照系，同一物体的运动其表现往往是不同的。例如，相对于地面匀速运动着的车厢中的自由落体，以车厢为参照系时，它作直线运动，以地面为参照系，则是抛物线运动，如果以太阳为参照系、则将是更为复杂的曲线运动。这个事实说明，物体的运动本身固然是一个确定的，绝对的客观存在，它相对于参照系的表现却要因参照系不同而各异。由于这个缘故，我们在描述物体运动的时候，必需指明它是相对于那一个参照系而言的。

在运动学中，参照系原则上可以任意选择，究竟如何选取，主要看问题的性质和研究的方便。例如，研究物体在地面上的运动，

最方便的就是选择地球作为参照系。要研究太阳系中行星的运动，则选择太阳作参照系比较方便。

§1-2 质　点

物体的运动实际上总是很复杂的，但是我们往往可以将问题加以简化。例如，在研究地球绕太阳的公转时，由于地球与太阳之间的距离(约为1.5×10^8千米)比地球的半径(约为6370千米)大得多，我们完全可以忽略地球的大小和形状把它近似地看成一个没有体积的“点”。从这个例子可以清楚地看出，如果物体的大小，形状在所研究的问题中不起作用或所起的作用很小，可以忽略不计时，我们就可用一个没有体积大小，因而也谈不上什么形状的“点”来代替它。但是，应该注意，由于物体的质量，在机械运动中起很重要的作用，所以不能忘记这个“点”还应具有质量。这样的理想化的物体——具有质量的点——称为质点。绝对的质点实际上是不存在的。质点只是现实物体的一个理想“模型”。但是、当我们以适当的模型来代替一个实际对象的时候，由于抓住了事物主要的、决定的因素，所以能够更深刻地反映问题的本质。

当然，把一个物体看作一个质点是有条件的。例如，同样是一个地球，当研究的是它的自转的时候，我们自然不再能把它看作一个质点了。由此可见，同一个物体在不同的问题中有时可用质点这个理想化模型来代替，有时则不能。

由于质点是一个没有体积的点，所以它的位置和位置变化的描述最为简单，因此可以说质点的运动是最简单的机械运动，又是最基本的机械运动，是研究一切机械运动的基础，因为当我们进一步研究复杂物体的运动时，可以把这个复杂物体看成是由许许多多质点组成的，从而把它的运动归结为这些质点的运动。

§1-3 质点的直线运动 直线运动的速度和加速度

质点的运动可以按它的轨迹分为直线运动和曲线运动。这一节我们讨论比较简单的直线运动。

一、直线运动坐标轴

如果一个质点相对于参照系运动的轨迹是条直线，我们就说它相对于这个参照系作直线运动。作直线运动的质点相对于参照系的位置，只须指出它在直线上的位置就可以了。为了确切地表明质点在直线上的位置，我们可以在这条直线上指定一个参照点 O，然后指出质点在这参照点 O 的那一边并且离它多远，这个参照点 O 称为原点。如果在这直线上规定一个正指向，还可以用"+"或"−"号来简洁地表明质点在原点的那一边。带有原点及指向的直线，就是坐标轴，我们不妨称它为 x 轴。质点与原点之间的距离冠以"+"或"−"号称为质点的坐标，可以记作 x。由此可见，坐标 x 确切地表明了质点在直线上的位置，从而也就表明了质点相对于参照系的位置。

当质点运动时，它的坐标 x 随时间 t 而变化。因此质点的坐标 x 是时间 t 的函数。

$$x=x(t) \tag{1-3-1}$$

这个函数关系详尽地描述了质点在该直线上的运动情况。

二、直线运动的速度

质点运动的快慢，由速度这个量来描述。我们称质点移动的路程 Δs 与通过这段路程所需的时间 Δt 的比值为质点在这段时间内的平均速度 $\overline{V}$，即

$$\overline{V}=\frac{\Delta s}{\Delta t} \tag{1-3-2}$$

这是因为质点在这段时间内运动的快慢往往不相同，上式只

反映了质点在这段时间内的快慢。例如，就百米赛跑来说，运动员在整个过程中跑的快慢是有变化的，在起跑阶段他要有一个从慢到快的加速过程，而在冲刺阶段他又相对地要跑得比较快些，因此，如果某人跑一百米的成绩是 12.5 秒，他跑一百米的平均速度是 $\frac{100}{12.5}=8$ 米/秒，决不意味着他每秒钟都是跑 8 米。

如果用坐标 x 来描述质点的位置，那么平均速度 $\bar{V}$ 就可以用坐标的变化表示出来，设质点在时刻 $t=t_1$ 到 $t=t_2$ 这一段时间内，质点的坐标从 $x=x_1$ 变为 $x=x_2$(图 1-3-1)，那么，质点移动的距离就是 $\Delta x=x_2-x_1$，通过这段距离的时间就是 $\Delta t_1=t_2-t_1$，因而质点在这段时间内的平均速度 $\bar{V}$ 就等于

$$\bar{V}=\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{x_2-x_1}{t_2-t_1} \tag{1-3-3}$$

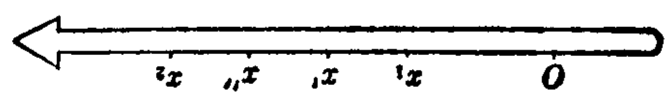

图 1-3-1

为了比较精确地描述质点运动快慢的情况，我们可以将时间间隔取得比较短，例如，我们可以将 t_1 到 t_2 这段时间再划分成几段，譬如说，将它再划分成三段如图 1-3-1 所示，$\Delta_1 t=t'-t_1$，$\Delta_2 t=t''-t'$ 和 $\Delta_3 t=t_2-t''$，并分别标出这三段时间内的平均速度 $\bar{V}_1$，$\bar{V}_2$ 和 $\bar{V}_3$，这样一来，对质点在时刻 t_1 到 t_2 这段时间内运动快慢情况的描述就比较精确些了。

然而，这毕竟也还只是三小段时间内的平均快慢，在各小段时间内运动快慢的细致变化还是不能详尽地反映出来。为了更精确地反映质点的快慢，可以将时间间隔划分得更短，但是不论我们将时间间隔划分得怎么短，我们总是只能描述那段时间的平均快慢。因此，为了精确地描述质点运动的细致情况，就需要描述质点在各个瞬时的快慢。但是按照“快慢”一词的本来含义，质点运动的快慢

只有根据它在一段时间内移动的路程长短才能判断，怎样才能描述瞬时的快慢呢？极限的概念帮助我们解决了这个问题。

现在我们就来说明怎样描述质点在某一时刻 t 的瞬时快慢。设在这时刻 t 质点经过坐标为 x 的点，经过很短的一段时间 Δt，在这时刻 $t+\Delta t$ 质点经过坐标为 $x+\Delta x$ 的点。那么，根据前面的讨论，我们可以求得质点在这很短的时间 Δt 内的平均速度 $\overline{V}$，它反映质点在这很短的时间内的平均快慢。但是，虽然它只反映平均快慢，可是由于时间 Δt 很短，因而在这段时间内快慢的变化也就很小，所求的平均速度也就相当接近于质点在时刻 t 的瞬时快慢。时间间隔 Δt 取得愈短，这段时间内快慢的变化就愈小，相应的平均速度就愈接近于质点在时刻 t 的瞬时快慢，由此可见，当时间间隔 $\Delta t\to 0$ 时，平均速度 $\overline{V}=\dfrac{\Delta x}{\Delta t}$ 的极限值就精确地反映了质点在时刻 t 的瞬时快慢，称为质点在时刻 t 的瞬时速度，或者简单地称为质点在时刻 t 的速度，记作 V，即

$$\boxed{V=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{dx}{dt}} \qquad (1\text{-}3\text{-}4)$$

考虑到坐标 x 是时间 t 的函数（从物理条件可知，它当然是一个连续函数），这种差商的极限在数学上正是“导数”或“微商”，记作 dx/dt，或在字母 x 的上方加一点“·”记作 $\dot{x}$，因此质点速度 V 的定义公式(1-3-4)可以写成

$$V=\frac{dx}{dt}=\dot{x} \qquad (1\text{-}3\text{-}5)$$

可见，速度 V 是坐标 x 随时间 t 的变化率。不难看出，V 的正负则表明质点是沿 x 轴的正向或反向运动。

物理学和数学是密切联系的，前面引入的质点这一物理概念利用了几何学中“点”的概念，而现在速度这一物理概念又需应用

数学中微商的概念。正是为了适应力学研究的需要，牛顿与莱布尼兹才发现了微积分的运算方法，为微积分的发展奠定了基础。

顺便指出：质点在某一时刻的速度只是表明了质点在该时刻的运动快慢。因此，一个质点在某时刻的速度为 3 米/秒，决不可理解为过了一秒钟后这个质点真的就移动了 3 米。一般地说质点运动的快慢可能是随时间变化的，所以一秒钟后这个质点移动的距离不会是 3 米。仅仅当质点保持这样的快慢不变，亦即在匀速运动的情况下，它才在一秒钟后移动了 3 米。

三、直线运动的加速度

质点运动的速度一般也是随时间变化的，而且变化的快慢也往往不相同。拿汽车到站来说、常常要经过十多秒钟才使汽车的速度以每秒十多米逐渐减小到零，而当紧急刹车时则在不到一秒钟的时间内就完成了这个过程。在研究物体的运动规律时人们发现，不但需要用这个物理量——速度来描述物体的运动状态——运动的快慢，还需要引进一个物理量来描述物体运动状态的变化——速度变化的快慢，这种物理量就是加速度。与引入速度概念的过程相似，我们先要引进平均加速度的概念，任意一段时间内速度的改变量 ΔV 与这段时间 Δt 的比值，称为质点在这一段时间内的平均加速度 $\bar{a}$，即

$$\bar{a}=\frac{\Delta V}{\Delta t} \qquad (1-3-6)$$

设质点沿 Ox 轴作直线运动、如图 1-3-2 所示，在某一时刻 t_1 速度为 V_1，经过一段时间后，在时刻 t_2 速度改变为 V_2，那么质点在这段时间内的平均加速度 $\bar{a}$ 就等于

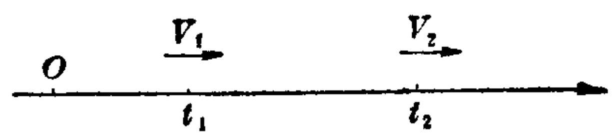

图 1-3-2

$$\bar{a}=\frac{V_2-V_1}{t_2-t_1} \tag{1-3-7}$$

由于速度 V 可以取负值，因此 $\bar{a}>0$ 表示速度的代数值增大(注意：不是绝对值！)，$\bar{a}<0$ 则表示速度的代数值减小。

为了精确地描述质点运动的速度变化情况，我们需要利用极限的概念从平均加速度过渡到瞬时加速度，与瞬时速度概念完全相似，我们称时刻 t 附近的时间间隔 $\Delta t\to 0$ 时，平均加速度的极限值为质点在该时刻 t 的瞬时加速度 a，或者就简单地称为加速度 a：

$$a=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta V}{\Delta t}=\frac{dV}{dt} \tag{1-3-8}$$

由于速度 V 是坐标 x 随时间 t 的变化率，所以上式又可写成

$$a=\frac{dV}{dt}=\frac{d}{dt}\left(\frac{dx}{dt}\right)=\frac{d^2x}{dt^2}=\ddot{x} \tag{1-3-9}$$

四、坐标、速度及加速度之间的关系

前面已经指出质点的坐标随时间变化的函数关系，也详尽地描述了质点在直线上的运动情况。因此，只要知道了质点在各个时刻的坐标 $x(t)$，质点运动的情况就完全确定了、质点在各个时刻的速度 $V(t)$，和加速度 $a(t)$ 当然也就确定了。的确，利用(1-3-5)式和(1-3-9)式，我们就能用微分法从坐标函数 $x(t)$ 求出质点在各个时刻的速度 $V(t)$ 和加速度 $a(t)$。

反之，如果我们已经知道质点各时刻的速度 $V(t)$ 或加速度 $a(t)$，也能求得质点在各个时刻的坐标 $x(t)$。现在来讨论如何从速度 $V(t)$ 求坐标 $x(t)$。

因为 $V(t)$ 是 $x(t)$ 对 t 的微商，因此从 $V(t)$ 求 $x(t)$ 的问题就归结为寻求这样一个函数，其微商为 $V(t)$，这件事在数学上是容易做到的，这样的函数就是 $V(t)$ 的原函数，也就是不定积分：