高等工程专科及自考教材

物理学

上册

第二版

黄月霞 叶英模 钟亮佩 编

华南理工大学出版社

高等工程专科及自考教材

物　理　学

（上　册）

（第二版）

黄月霞　叶英模　钟亮佩　编

华南理工大学出版社

图书在版编目（CIP）数据

物理学（上册）/黄月霞　钟亮佩　叶英模编. —广州：华南理工大学出版社，1995.8
ISBN 7-5623-0823-3

Ⅰ.物…
Ⅱ.①黄…②钟…③叶…
Ⅲ.物理学
Ⅳ.O4

华南理工大学出版社出版发行
责任编辑　江厚祥
（广州五山　邮码510641）
开本：850×1168　1/32　印张：8.5　字数：228千
各地新华书店经销
广东省佛冈县印刷厂印装
1986年4月第1版　1995年8月第2版　1995年8月第2次印刷
印数：10001—20000
定价：8.00元

前　　言

物理学是一门基础科学，它所研究的是物质世界最基本、最普遍的运动规律。物理学的内容非常广泛，包括了从分子、原子、基本粒子……等非常非常小的微观世界，直到浩瀚无垠的非常非常大的宇宙世界，都在物理学的研究范畴中。

物理学的基本概念、基本规律和基本方法，渗透到各门科学技术和工程技术领域中。物理学的每一个新发现，或是在理论上的每一次新突破，都促进了科学技术和工程技术的进一步发展，而新技术的发展和生产力的提高，又向物理学提出了更新的研究课题，促进物理学的发展。当前如信息科学、等离子体技术、激光技术、超导技术、工程热物理技术……等尖端技术，都是在物理学的基础上发展起来的理工交叉的边缘学科。可见，科学技术与工程技术等实践性学科和物理学关系密切。

作为高等工程教育的一门重要基础理论课程，学习物理学不仅要掌握物理学知识，还需掌握研究物理学的科学方法和思维方法，为今后学习专业知识及近代科学技术打下必要的物理基础。本教材是根据工程专科层次的教学要求而对内容适当取舍。

本教材分上、下两册编写，具体分工：力学、原子的量子理论（黄月霞）；机械振动和机械波、热学、光学、波粒二象性（叶英模）；电磁学、相对论（钟亮佩）。黄月霞负责全书统稿工作。由于编者水平所限，书中如有不当之处，恳请读者提出宝贵意见。

编　者

1994年7月

目　录

第一篇　力　学

第二篇　机械振动和机械波

第三篇　热　学

第一篇 力 学

在物质的各种各样、千变万化的运动形式中，最简单也是最普遍的一种运动形式是机械运动，机械运动就是物体空间位置的变化。比如地球绕着太阳的运行，汽车在公路的行驶，鸟儿在天空的飞翔，机器的运转，弹簧的伸缩，钟摆的摆动，河水的流动，等等，都是机械运动常见的例子。由于物体的机械运动总是受着物体间相互作用力的约束和影响，所以研究机械运动特点和规律的学科就称为力学。

人们在日常生活和生产实践中经常接触到机械运动，所以力学是自然科学中最早发展起来的学科之一。根据所讨论的目的不同，一般把力学分为三部分：静力学，只讨论物体在平衡状态时相互作用力的关系；运动学，讨论物体的空间位置如何随着时间而变化的规律；动力学，讨论物体之间的相互作用，以及在这些作用下物体的运动如何变化的规律。静力学有时又可以作为物体所受合外力为零的特殊情况而纳入动力学范畴内。本书只讨论运动学和动力学两部分。

任何物质运动都包含着机械运动，所以力学的基本概念和基本规律在其他科学技术部门中有广泛的应用，也是学习以后物理学各部分的必要知识基础。

第一章　质点运动学

本章讨论力学中最简单、最基本的情况——质点运动学。首先介绍机械运动的基本概念以及描述机械运动的基本物理量，着重说明它们的矢量性和瞬时性；然后讨论几种最常见也是最基本的运动形式，着重说明它们的特点和规律。

§1-1　参考系和坐标系　质点

一、参考系

宇宙万物都在不停地运动着。说房子是静止的，这是以地面为标准来看房子的缘故，如果从太阳上来看房子，它是以每秒大约29.8公里的速度跟着地球绕太阳运动。太阳也不是静止不动的，它带着九大行星和众多小卫星在银河系遨游，整个银河系也是在巨大的宇宙空间中飘荡着。自然界没有绝对静止不动的物体，一切物体都在不停地运动着，这叫做运动的绝对性。所谓坐地日行八万里，指的就是这个意思，“坐地”看起来是静止的，但又“日行八万里”，就是因为地球每日自转一周，即使坐着不动的人也跟随地球在空间转动了一周，这说明世间一切物体都在不停地运动。

既然宇宙万物都在运动，为什么我们说有的物体是运动的，有的物体却又是静止的？原来人们在识别物体的运动时，总是相对于另一个物体来认识的。例如我们坐在行驶着的火车里，会看到车窗外的房屋、树木纷纷向后退，而车厢内的东西却静止不动，其实这时我们是把这些物体都相对于火车的位置是否有变化而认识的；

同样，我们看到人造卫星相对于天上的月亮、星星的位置不断地改变，就知道卫星在运动。所以，当我们说到某个物体的位置时总是指这个物体相对于另一个物体的位置而言.孤立地讲一个物体的位置是没有确定的意义的。因此，我们研究一个物体的运动，总要参考和对照另一个物体(或一些彼此相对静止的物体)来确定它在每个时刻的位置，被我们选作参考和对照的一个(或一些)物体，就叫做参考系。相对参考系有位置变化的物体，我们就说它在运动；相对参考系位置不变化的物体，我们就说它是静止的。

由于选取的参考系不同，对同一个物体的运动描述就会有不同的结论。例如，选取地球作为参考系，认为房子是静止的，若选取太阳为参考系，房子是运动的；又如站在地面上的人(以地面或房屋为参考系)，看到树木是静止的，而坐在行驶中的火车上的人(以火车为参考系)却看到树木是往后运动的。一个物体的运动，在不同的参考系看来，它的运动的描述就有不同，这叫做运动描述的相对性。由于运动描述的相对性，我们在说明某个物体的运动情况时，必须明确地指出它是相对于哪一个参考系来说的。

在研究运动学问题时，参考系的选择可以任意，主要看问题的性质和研究的方便来决定。例如研究人造地球卫星的运行，最方便是选择地球作为参考系；研究地球绕太阳的公转，自然最方便是选择太阳为参考系了；而研究地面上物体的运动时，若不作特殊说明，都选地面或在地面上静止的物体为参考系。

二、坐标系

参考系选定以后，为了能够从数量上来定量表示物体相对于参考系的位置，还必须在参考系上建立适当的坐标系。

坐标系的选择，也是要看问题的性质和研究的方便来决定，最常采用的是三维直角坐标系。例如，为了描述飞机在空中飞行时相对于地面的运动情况，就可以在地面选一个点为坐标原点 O，X 轴

和 Y 轴在地面，Z 轴表示高度，如图 1-1 所示，飞机的位置就可以用 x、y、z 三个坐标值来确定。

如果我们所研究的物体运动限于在一个平面内进行或限于在一条直线上进行，那么三个坐标轴可以简化为两个坐标轴或一个坐标轴就足可以确定物体在空间的位置，例如抛射体运动，常用 X 轴和 Y 轴表示，而直线运动就用 X 轴表示。

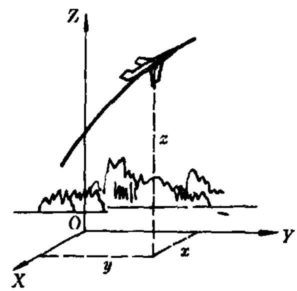

图 1-1

三、质点

参考系和坐标系选定以后，我们就有可能描写物体的运动规律。但是，由于物体都有一定的形状和大小，在运动时，物体上各点的运动情况不一定相同。例如，当飞轮在转动时，飞轮边缘上的点和靠近轴心处的点位置变化快慢就不相同；又例如用力把一个弹簧拉长后放手让它自由收缩，那么弹簧上每一圈在收缩时位置变化的快慢也不会相同的。所以，要详细描写物体的运动，仍然不是一件容易的事情。但是，在一些问题的讨论中，却可以把物体简化成没有形状和大小而只有质量的一个点来处理，这样只有质量的点就称为质点。

在什么情况下可以把物体当作一个质点来处理？有两种情况：一种情况是物体的形状和大小对运动的描述无关，例如一辆汽车沿着一段笔直公路行驶时，如果我们只想研究汽车行驶的快慢情况，显然车上各点的运动快慢都是完全相同的，那么只要知道了任何一点的运动，就等于知道了整辆汽车的运动，所以这时就可以不考虑汽车的具体形状和大小，而把它看作是一个点。另一种情况

是物体的形状和大小对运动的描述只有轻微的影响，例如计算地球绕太阳的公转轨道时，由于地球的平均半径（大约 6.4×10^3 km）比地球离太阳的平均距离（大约 1.5×10^8 km）小得多，通常就可以忽略地球的形状和大小，也把它当作一个点来处理。可见，一个物体能否看作质点，不在于物体的大小，而应根据讨论问题的性质来决定。在一般情况下，只要所讨论的问题不涉及物体的转动或者物体内各部分没有相对运动时，都可以把物体当作一个质点。

质点，是从具体的物体抽象出来的理想化模型。由于实际的物体都可以看作是无数个质点组成的，如果知道了各个质点的运动情况，只要运用适当的数学方法（例如叠加法、积分法），就可以研究整个物体的运动，所以，质点运动学是研究物体机械运动的基础。如无特殊声明，以下的讨论都把物体抽象为质点来处理。

§1-2 位置矢量

要描述一个质点的运动，首先要确定每一时刻质点在空间的位置。质点的位置，除了前节所讲的可以用直角坐标系中的三个坐标 x、y、z 来表示外，还可以用一个矢量来表示。

一、位置矢量

设物体在空间的位置为P点，如图 1-2 所示，则P 点的位置可以用一个从坐标原点O指向P点的矢量$\overrightarrow{OP}$来表示，$\overrightarrow{OP}$ 的大小表示P点与O点的距离，而$\overrightarrow{OP}$的方向表示P点相对于O点的方位。这

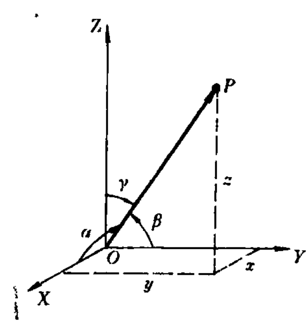

图 1-2

样一个表示质点在空间位置的矢量，就称为位置矢量，简称位矢或径矢，通常以字母 $\boldsymbol{r}(=\overrightarrow{OP})$ 表示。

既然用坐标 x、y、z 和位置矢量都可以表示 P 点的位置，可见两者必具有确定的转换关系：

$$\boldsymbol{r}=x\boldsymbol{i}+y\boldsymbol{j}+z\boldsymbol{k} \tag{1-1}$$

其中 $\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$、$\boldsymbol{k}$ 分别是 X 轴、Y 轴、Z 轴的单位矢量。亦即坐标 x、y、z 分别是位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 在三个坐标轴上的投影分量，于是

$\boldsymbol{r}$ 的大小 $r=\sqrt{x^2+y^2+z^2}$

$\boldsymbol{r}$ 的方向用三个方向余弦表示

$$\cos\alpha=\frac{x}{r}$$

$$\cos\beta=\frac{y}{r}$$

$$\cos\gamma=\frac{z}{r}$$

式中 α、β、γ 分别表示位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 和 X 轴、Y 轴、Z 轴之间的夹角，参看图 1-2。从图中还可见三个方向余弦满足

$$\cos^2\alpha+\cos^2\beta+\cos^2\gamma=1$$

所以三个方向余弦中只有两个是独立的，只要知道其中两个，例如 α 和 β，就可以完全决定 $\boldsymbol{r}$ 的方向。

【例 1-1】 已知质点 A 的位置矢量 $\boldsymbol{r}=4\boldsymbol{i}+7\boldsymbol{j}+12\boldsymbol{k}$ (m)。

(1) 按一定比例在直角坐标系中画出 $\boldsymbol{r}$；

(2) 求 A 点与坐标原点的距离以及 $\boldsymbol{r}$ 和各坐标轴的夹角。

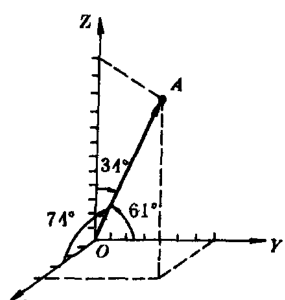

图 1-3

解

$$r=\sqrt{x^2+y^2+z^2}$$

$$=\sqrt{4^2+7^2+12^2}=14.46\ \text{(m)}$$

$$\alpha=\cos^{-1}\frac{x}{r}=\cos^{-1}\frac{4}{14.46}=73.9°$$

$$\beta=\cos^{-1}\frac{y}{r}=\cos^{-1}\frac{7}{14.46}=61.0°$$

$$\gamma=\cos^{-1}\frac{z}{r}=\cos^{-1}\frac{12}{14.46}=33.9°$$

二、运动方程和轨道方程

当质点在运动时，它的位置时时刻刻都不相同，所以一般来说，无论位置矢量或是坐标都将随着时间而变化，亦即 $\boldsymbol{r}$ 和 x、y、z 都是时间 t 的函数。表示质点在运动过程中位置随时间变化的函数式就称为质点的运动方程。可以写作

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(t) \tag{1-2}$$

或

$$\begin{cases} x=x(t) \\ y=y(t) \\ z=z(t) \end{cases} \tag{1-3}$$

由于 x、y、z 就是 $\boldsymbol{r}$ 在直角坐标系中的三个投影分量，所以通常也把(1-3)式称作(1-2)式的分量式。

知道了运动方程，就能确定任一时刻质点的位置，从而就能知道该质点运动的特点和规律，不仅可以知道它过去曾经怎样运动，而且可以预言它将来会怎样运动。力学的主要任务之一，正是根据各种问题的具体条件，求解物体的运动方程。

质点运动时在空间所经过的路径称为运动轨道，表示运动轨道的方程称为轨道方程。从 $\boldsymbol{r}$ 的三个分量式中消去时间参数 t，就可以得到质点的轨道方程。

运动方程和轨道方程是密切相关的，但却不能等同，应区分清楚。首先，运动方程表示空间和时间的函数关系，而轨道方程只是空间坐标之间的函数关系，所以知道了运动方程就可以知道不同

时刻 t 质点具体在空间的位置，若只知道轨道方程，就只能知道质点曾经运动过的路线或将要运动的路线；其次，从运动方程的坐标分量可以求出轨道方程，但反过来却不可以从轨道方程求出运动方程。

根据轨道的形状，通常把质点运动分为两大类：如果质点的运动轨道是一条直线，就称为直线运动；如果质点的运动轨道是一条曲线，就称为曲线运动。

【例 1-2】 已知质点运动时位置的坐标是

$$x = 2\cos\pi t,\ y = 3\sin\pi t,\ z = 0$$

求质点在任意时刻的位置矢量和轨道方程。(式中 x、y 的单位为 m，t 的单位为 s)

解 根据位置矢量与坐标分量的关系得

$$\boldsymbol{r} = 2\cos\pi t\boldsymbol{i} + 3\sin\pi t\boldsymbol{j}$$

从 x、y 两式中消去 t 后可得轨道方程：

$$\frac{x^2}{2^2} + \frac{y^2}{3^2} = 1,\quad z = 0$$

可以看到，质点是在 $z = 0$ 的 XY 平面内沿着一椭圆轨道运动，椭圆的长半轴 3m 沿 Y 轴方向，短半轴 2m 沿 X 轴方向，椭圆中心在坐标原点。

§1-3 位　移

运动着的质点，其位置在轨道上连续变化，如图1-4表示运动轨道的一部分。在时刻 t，质点在 A 点处，这时的位置矢量为 $\boldsymbol{r}_1$；在时刻 $t+\Delta t$，质点运动到 B 点处，这时的位置矢量为 $\boldsymbol{r}_2$。如何表示在 Δt 这段时间间隔内质点位置的变化呢？

质点位置的变化包含两个方面的意义：一是位置移动了多长的一段距离；二是位置向那个方向移动。可见，要完整地表示出质点位置的变化，就需要用一个矢量。表示质点位置变化的矢量就称为位移。而且规定：从质点的初位置 A 指向末位置 B 的矢量 $\overrightarrow{AB}$ 就

是在 Δt 时间内质点的位移。

位移是矢量，它的大小表示末位置与初位置的距离，它的方向表示末位置相对于初位置的方位。

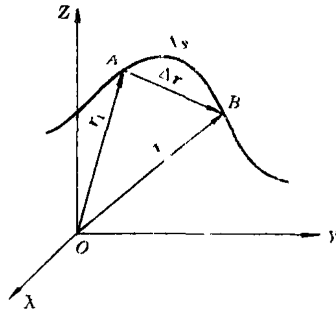

图 1 1

根据矢量运算法则，从图1-4可以看出位移$\overrightarrow{AB}$等于质点在 A、B 两处的位置矢量的增量 $\Delta \boldsymbol{r}$，即

$$\overrightarrow{AB} = \boldsymbol{r}_2 - \boldsymbol{r}_1 = \Delta \boldsymbol{r} \tag{1-4}$$

所以，如果给定 $\boldsymbol{r}_1$ 和 $\boldsymbol{r}_2$，则位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 就可以运用矢量运算法则计算。设

$$\boldsymbol{r}_1 = x_1\boldsymbol{i} + y_1\boldsymbol{j} + z_1\boldsymbol{k}$$

$$\boldsymbol{r}_2 = x_2\boldsymbol{i} + y_2\boldsymbol{j} + z_2\boldsymbol{k}$$

所以

$$\begin{aligned}\Delta \boldsymbol{r} &= \boldsymbol{r}_2 - \boldsymbol{r}_1 \\ &= (x_2\boldsymbol{i} + y_2\boldsymbol{j} + z_2\boldsymbol{k}) - (x_1\boldsymbol{i} + y_1\boldsymbol{j} + z_1\boldsymbol{k}) \\ &= (x_2 - x_1)\boldsymbol{i} + (y_2 - y_1)\boldsymbol{j} + (z_2 - z_1)\boldsymbol{k} \\ &= \Delta x\boldsymbol{i} + \Delta y\boldsymbol{j} + \Delta z\boldsymbol{k}\end{aligned} \tag{1-5}$$

于是 $\Delta \boldsymbol{r}$ 的大小

$$\Delta r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$$

$\Delta \boldsymbol{r}$ 的方向用三个方向余弦表示

$$\cos\alpha = \frac{\Delta x}{\Delta r}$$

$$\cos\beta = \frac{\Delta y}{\Delta r}$$

$$\cos\gamma = \frac{\Delta z}{\Delta r}$$

α、β、γ 分别是位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 与直角坐标系中三个坐标轴的夹角。

【例1-3】 一个质点在 XOY 平面内运动,从 $\boldsymbol{r}_P = 5\boldsymbol{i} + 3\boldsymbol{j}$ (m) 的 P 点移到 $\boldsymbol{r}_Q = \boldsymbol{i} + 6\boldsymbol{j}$ (m) 的 Q 点,求质点位移的大小及方向。

解 由于质点在 XOY 平面内运动,可设 $z_1 = z_2 = 0$,则位移 $\Delta\boldsymbol{r}$ 的大小

$$\begin{aligned}\Delta r &= \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \\ &= \sqrt{(1-5)^2 + (6-3)^2} \\ &= 5\ (\mathrm{m})\end{aligned}$$

$$\alpha = \cos^{-1}\frac{\Delta x}{\Delta r} = \cos^{-1}\frac{-4}{5} = 143.13°$$

$$\beta = \cos^{-1}\frac{\Delta y}{\Delta r} = \cos^{-1}\frac{3}{5} = 53.13°$$

计算结果表明 α 和 β 满足 $\cos^2\alpha + \cos^2\beta = 1$,所以,在一个平面内的矢量只需用一个方向余弦就可以表示出矢量的方向。

必须指出,位移并不是质点实际所经历的路程,例如在图1-4中,质点是沿着弧形路线 $\widehat{AB}$ 从 A 点运动到 B 点的,因此,要严格区分位移和路程是两个完全不相同的概念:位移 $\Delta\boldsymbol{r}$ 是矢量,有方向,它表示 Δt 时间内质点位置的变化,它的大小等于直线$\overline{AB}$ 的长度;而路程 Δs 是标量,没有方向,它表示 Δt 时间内质点沿着运动轨道所走过路径的长度,即曲线$\widehat{AB}$ 的长度。一般来说,位移的大小 Δr 和路程 Δs 并不相等,比如一个质点沿着一个半径为 R 的圆形轨道运动了一周又回到开始的位置,它的位移为零,而路程却是 $2\pi R$。不过,当所考虑的是物体在极短时间间隔内的运动时,即 $\Delta t \to 0$,位移的大小和所走过的路程可视作相等。

最后,还需指出一点:位移和路程不仅意义不同,而且在描述质点的运动中所起的作用也不同。由于路程没有方向,所以从 Δs 的数值只能知道质点在时刻 t 从 A 点算起走过了长度为 Δs 的一段路,但是,对于质点究竟是向那个方向运动,在 $t + \Delta t$ 时刻又会到达哪一个位置,实在是一无所知的,所以 Δs 不能确切反映质点在 $t \to t + \Delta t$ 这段时间内位置变化的情况。虽然位移并不是质点实际运动的路径,但只要知道了 t 时刻质点是在 A 点,就能从 $\Delta\boldsymbol{r}$ 的数