

WULIXUEGAILUN

物理学概论



祝家清
湖北教育出版社

WULIXUE

GAILUN

物理学概论

祝家清 湖北教育出版社



物理学概论

(上册)

祝家清

湖北教育出版社出版、发行 新华书店湖北发行所经销

武汉大学出版社印刷总厂印刷

850×1168毫米32开本 16.5印张 8插页 458 000字

1989年5月第1版 1989年5月第1次印刷

印数: 1-1 900

ISBN 7-5351-0340-5/O·4

定 价: 6.35元

内 容 提 要

本书分上、下二册，共四篇。第一篇为力学，第二篇为热学基础；第三篇为电磁学；第四篇为波动物理学。

本书是根据理科院校非物理专业对物理的特殊要求以及在华中师范大学数学等专业讲授物理课程讲义的基础上编写而成的，在运用高等数学分析和处理物理问题、用数学语言表达物理思想等方面作了一些尝试。

本书可作为理科院校非物理专业物理课程的教材，也可作为工、农、医科院校物理学课程的教材及教学参考书，还可供师专、中专师生和中学教师参考。

J41/242/15

前 言

高等院校非物理专业对物理学有着特殊的要求，这不仅反映在教学内容的取舍方面，而且还反映在专业的特殊性方面。虽然如此，物理学作为一门科学有它自身的规律性，它的基本原理不仅是各学科的理论基础，也是现代科学技术的基础。因此，掌握物理学的基本理论是科学发展的需要。

本书根据理科院校非物理专业对物理的特殊要求以及在华中师范大学数学专业讲授物理课程的基础上写成讲义，又经多次试用（在数学专业和化学专业）和反复修改编写而成。全书分上、下两册，共四篇。第一篇为力学，第二篇为热学基础，第三篇为电磁学，第四篇为波动物理学。

在编写过程中，本书重视基本概念、基本定律及基本理论的论述和分析，注意到如何分析和处理物理问题的方法，并注意到怎样借助于用高等数学解决物理问题，学会用数学语言来表达物理思想；还注意到把基本理论的学习和现代对基本理论的研究及技术的发展结合起来，以便给读者以启迪。

教材的内容注重数学推导，这样既加深了对物理概念的理解，又能领会到其本质的含义；另一方面，既能把抽象的数学变成具体的物理模型，又能使读者领悟到用数学处理物理问题的简洁性。

近年来，鉴于中学物理的教学水平和教学质量逐渐提高，本书中有很多概念都不是高中物理知识的重复，而是作为教材的起点，所以本书具有一定的深度，其中注有*号者，在教学中可以

不讲，这并不影响整个教学的进程。为便于自学，本书叙述较详尽，并配有适量的例题，每章后边附有思考题和习题。习题由易到难，可酌情选用。

本书初稿曾在华中师范大学数学系1982级、1984级本科生和1982级本科函授生以及化学系1985级、1986级本科生中作为物理学教材试用过，还在武汉教育学院1984级数学本科生中使用过。在使用过程中，老师们和同学们都提出了宝贵意见，在此表示衷心感谢。

限于本人的水平和经验，书中的错误和缺点在所难免，诚恳期望广大教师和读者予以批评指正。

祝家清

1987年11月 于武昌

目 录

第一篇 力 学

第一章 质点运动学	1
§ 1—1 参照系与坐标系	2
§ 1—2 质点及运动方程	2
§ 1—3 质点在直线运动中的速度和加速度	6
§ 1—4 质点的曲线运动	10
§ 1—5 抛体运动	21
§ 1—6 圆周运动	26
§ 1—7 相对运动	32
思考题	36
习 题	36
第二章 质点动力学	40
§ 2—1 牛顿第一定律	40
§ 2—2 牛顿第二定律	41
§ 2—3 力学单位制	45
§ 2—4 牛顿第三定律	50
§ 2—5 力的种类	52
§ 2—6 牛顿定律的应用	59
§ 2—7 非惯性参照系 惯性力	74
思考题	80
习 题	82
第三章 动量	86
§ 3—1 动量 冲量 动量定理	86
§ 3—2 动量守恒定律	92
§ 3—3 质心及运动定律	93

§ 3—4 火箭飞行原理	99
思考题	103
习题	104
第四章 功和能	108
§ 4—1 功与功率	108
§ 4—2 动能定理	119
§ 4—3 势能	121
§ 4—4 机械能守恒定律	131
§ 4—5 功能原理	138
§ 4—6 碰撞	142
思考题	156
习题	157
第五章 刚体的转动	162
§ 5—1 刚体运动学	162
§ 5—2 刚体绕定轴转动动力学	171
§ 5—3 转动惯量的计算	181
§ 5—4 角动量守恒	189
§ 5—5 刚体定轴转动的动能和功	191
* § 5—6 回转仪	198
思考题	201
习题	202
第六章 万有引力	207
§ 6—1 万有引力定律	207
§ 6—2 万有引力势能	220
§ 6—3 行星运动	223
§ 6—4 人造星体	229
§ 6—5 万有引力场	241
思考题	243
习题	243
第七章 狭义相对论	245

§ 7—1	牛顿力学的时空观	246
§ 7—2	狭义相对论的基本原理	249
§ 7—3	洛伦兹变换	251
§ 7—4	狭义相对论的时空观	255
§ 7—5	相对论动力学	266
§ 7—6	广义相对论简介	278
思考题		282
习题		282

第二篇 热学基础

第八章	分子物理学	285
§ 8—1	平衡态 状态参量	285
§ 8—2	温度	287
§ 8—3	气体的状态方程	290
§ 8—4	理想气体的压强	297
§ 8—5	温度的统计解释	301
§ 8—6	分子力	304
§ 8—7	范德瓦耳斯气体的压强	307
§ 8—8	气体分子热运动速率的统计分布	310
§ 8—9	玻尔兹曼分布	320
思考题		322
习题		324
第九章	热力学	328
§ 9—1	热力学过程	328
§ 9—2	功	330
§ 9—3	热量	333
§ 9—4	热力学第一定律	335
§ 9—5	能量按自由度均分定理	339
§ 9—6	热力学第一定律对理想气体的应用	346
§ 9—7	热力学循环和卡诺循环	353

§ 9—8 热力学第二定律 熵	360
思考题	368
习题	369

第三篇 电 磁 学

第十章 真空中静止电荷的电场	374
§ 10—1 电荷	374
§ 10—2 库仑定律	376
§ 10—3 电场及电场强度	380
§ 10—4 高斯定理	389
§ 10—5 电位	405
思考题	424
习题	425
第十一章 静电场中的导体和电介质	429
§ 11—1 静电场中的导体	429
§ 11—2 电容及电容器	437
§ 11—3 电介质的极化	446
§ 11—4 介质中的高斯定理 电位移 D	457
§ 11—5 电场能量 能量密度	464
思考题	466
习题	468
第十二章 稳恒电流	472
§ 12—1 电流强度 电流密度	472
§ 12—2 欧姆定律	476
§ 12—3 电功率 焦耳定律	481
§ 12—4 电源 电动势	483
§ 12—5 闭合电路和一段含源电路的欧姆定律	485
§ 12—6 基尔霍夫定律	491
§ 12—7 RC 串联电路的过渡过程	503
思考题	511

习 题	514
第十三章 稳恒电流的 磁 场	521
§ 13—1 基本磁现象	521
§ 13—2 磁场 磁感应强度	524
§ 13—3 毕奥—沙伐尔—拉普拉斯定律	529
§ 13—4 磁通量 磁场的高斯定理	534
§ 13—5 安培环路定理	536
§ 13—6 电流与磁场以及电流与电流间的相互作用	546
* § 13—7 磁场的矢势(矢量位)	552
思考题	558
习 题	560
附录 I 常用物理常数	565
附录 II 国际单位制(SI)的基本量	566
附录 III 诸行星的特征数据	567
附录 IV 国际制(SI)词冠	568
附录 V 积分表	568
附录 VI 误差函数简表	569
附录 VII 电和磁的单位	570
附录 VIII 高斯函数简表	572
附录 IX 矢量恒等式	572
习题答案	573

第一篇 力 学

力学是研究物质机械运动的科学。机械运动是物体对物体或物体各部分之间的相对位置变化的运动，它是一种简单的运动形式。

由于物体的运动离不开空间和时间，因此，空间和时间是力学中的基本概念。牛顿力学是以空间、时间、质量和力等基本概念和一些实验定律为基础而建立起来的。

传统的物理学是从力学开始的，这不仅因为力学是研究简单的机械运动，而且还因为力学是理论科学和应用科学的基石。例如，能量概念对于研究宇宙的演化以及“基本”粒子的性质都是有用的，而能量守恒是普遍遵从的规律。现代技术发展到自动化，力学原理也是不可少的，它为自动控制提供了理论依据。

牛顿力学的基本定律是从生活经验、生产实践的观察和实验中总结出来的，因而它是正确的。但是，当物体的运动速度接近光速时，牛顿力学对于许多物理现象已显得无能为力了。

廿世纪建立了相对论力学，确立了牛顿力学是相对论力学的极限形式。

第一章 质点运动学

在质点运动学中，描述质点运动的物理量是位移、速度和加速度，它们都是矢量。这些矢量的形式取决于坐标系的选择。本

章将分别描述这三个矢量在直角坐标系、极坐标系和自然坐标系中的形式。

§ 1-1 参照系与坐标系

宇宙间的一切物体都在永不停息的运动中，绝对静止的物体是不存在的。如何确定物体是否运动？这就要选择另一物体作为参考，这个被选作参考的物体称为参考系或参照系。

同一物体的运动，因所选参照系的不同，观察的结果也是不同的。也就是说，在不同参照系中观察同一物体的运动，描述运动的状态是不同的。例如在匀速且直线航行的轮船上，甲板上的人放开手中的石子，船上的人看石子是自由落体运动，即为直线运动；而岸上的人看石子则作平抛运动。

所以，我们在研究物体运动时，必须首先明确物体运动是相对什么参照系而言的。一旦确定了参照系，物体的运动状态就确定了。参照系如何选择呢？要视物体的运动性质以及是否便于描述来确定。当我们研究地面上的物体运动时，如不特别指明，多以地球为参照系；如果研究地球的运动，多以太阳为参照系。

为了定量描述物体相对于参照系的位置变化，必须要在参照系上建立坐标系，坐标系固定在参照系上。通常所选择的坐标系有直角坐标系、极坐标系或其他坐标系。至于选择什么样的坐标系？原点设在何处？以及坐标轴的指向如何？这只是说明描述物体运动所选用的空间坐标的参数不同，而对物体运动性质并无任何影响。不过，正确选择坐标系、原点、以及坐标轴的指向，可以简化其计算。

坐标系是固定在参照系上的，因此坐标系实质上是参照系的数学抽象，指明了坐标系也就指明了参照系。

§ 1-2 质点及运动方程

一、质点

研究物体的运动时，除了存在一些次要的因素以外，会发现某些因素起着根本性的或决定性的作用。例如，地球绕着太阳运动，决定性的因素是地球与太阳之间的万有引力，至于月球绕地球的运动以及其他恒星对地球的作用，则是次要的因素。

对于所研究的对象，应当抓住主要的、起决定作用的因素，而避开那些在问题中只起偶然作用或不起实际作用的因素。这样一来，较为复杂的实际对象就简化成一种理想化、抽象化了的东西——模型。

力学中的一个极其重要的模型是质点。如果物体的大小与问题中的其他物体的线度相比很小，该物体的大小和形状就不起作用或只起次要作用，因而可忽略不计。这样就可以把整个物体看成没有大小和形状的几何点，同时它又具有整个物体的质量。

是否所有物体的运动都可以看作质点的运动呢？否。这要根据所研究物体的运动性质决定。例如我们研究地球自转时，就不能把地球看成质点；但是研究地球绕太阳公转时，由于地球的直径（约 13×10^6 米）比起它至太阳的距离（约 15×10^9 米）小得多，可以忽略不计，这样，又可以把地球看成质点。

若将质点概念加以推广，也会使问题简化。当我们研究某一物体运动时，常常需要把物体分成许多部分来研究。若每一部分小到其中各点的运动接近相同，那么这些微小部分就可以分别看作为质点。显然，若已知物体各质点的运动状态，则可以将整个物体看作为所有质点的组合，于是整个物体的运动状态就完全确定了。

二、质点的运动方程

选取参照系并确定坐标系以后，质点在空间的位置可以精确地量度。但要精确地描述质点的运动，除了空间的概念以外，还需要引入时间的概念。质点在运动时，它在空间的位置是随时间

而改变的，也就是说，它的坐标是时间的函数，即

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t) \quad (1-1)$$

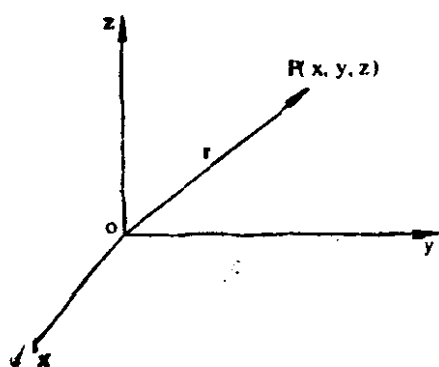


图 1—1 位置矢量

我们可以用一个特殊的矢量来描述一质点相对于给定坐标系原点的位置，它从原点出发，指向所研究的那一点，如图 1—1 所示的 P 点，这个矢量称为位置矢量（有时简称矢径），且用 r 表示，可以写为

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

式中 i, j, k 分别表示 x, y, z 方向的单位矢量，通常称式 (1—1) 和式 (1—2) 为质点的运动方程。因为它给出任意时刻质点的空间位置，表示了质点的运动规律。质点在空间运动所描绘的曲线称为轨迹，所以式 (1—1) 和式 (1—2) 也可以看作是质点轨迹的参数方程。参数方程可由式 (1—1) 消除时间 t 而得到，一般可以有如下三组中的任意一组：

$$\begin{cases} f(x, y) = 0, \\ \varphi(x, z) = 0, \end{cases} \begin{cases} F(y, z) = 0, \\ f(x, y) = 0, \end{cases} \begin{cases} \varphi(x, z) = 0, \\ F(y, z) = 0. \end{cases}$$

每一方程都表示一柱面，因此，两个柱面的交线就是质点的轨迹。

质点的运动方程有如下的重要特性：运动方程中的 $x(t), y(t), z(t)$ 是单值函数，这是因为在某一时刻的质点只可能占据一个位置；该单值函数又是连续的，这是因为质点的位置不可能是间断的，当然轨迹也是连续的。

如果质点在 xy 平面上运动，则质点的运动方程为

$$x = x(t), \quad y = y(t) \quad (1-3)$$

假如选取平面极坐标，那么质点的运动方程为

$$r = r(t), \quad \theta = \theta(t) \quad (1-4)$$

三、位移

研究质点的运动，不仅要知道它的位置，更重要的是要知道它的位置变化。假定在空间的质点从 P_1 (矢径为 $\mathbf{r}_1$) 运动到 P_2 (矢径为 $\mathbf{r}_2$)，那么位移 P_1P_2 也是一个矢量，它的大小规定为 P_1 到 P_2 的直线距离，方向为 P_1 指向 P_2 ，如图1—2所示。用矢量可以很简洁的表示出这个位移：

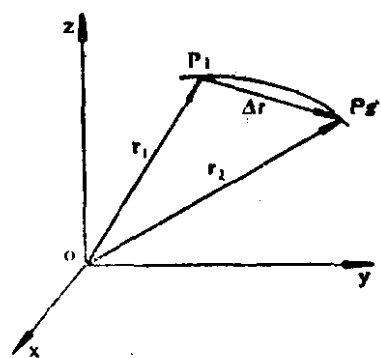


图 1—2 位移矢量

$$\overrightarrow{P_1P_2} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 = \Delta \mathbf{r} \quad (1-5)$$

位移也可以用坐标值的差表示：

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

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

所以位移 $\Delta \mathbf{r}$ 可以分解为沿着坐标轴的三个分位移 (坐标值之差)，即

$$\Delta \mathbf{r} = (x_2 - x_1)\mathbf{i} + (y_2 - y_1)\mathbf{j} + (z_2 - z_1)\mathbf{k} \quad (1-6)$$

位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的大小为

$$|\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (1-7)$$

位移的方向余弦为

$$\cos \alpha = \frac{x_2 - x_1}{|\Delta \mathbf{r}|}, \quad \cos \beta = \frac{y_2 - y_1}{|\Delta \mathbf{r}|}, \quad \cos \gamma = \frac{z_2 - z_1}{|\Delta \mathbf{r}|} \quad (1-8)$$

必须注意：位移矢量 (或位移) 与数学上的矢量是不相同的，前者与长度单位相联系，而后者则是一个纯数；位移和质点经历

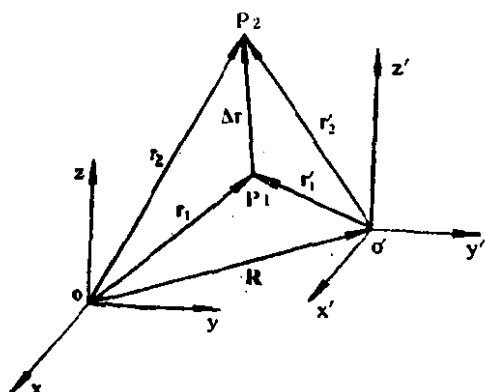


图 1—3 位移矢量与坐标系选择无关 量 $\Delta \mathbf{r}$ 与坐标系的选择无关。

的路程长度 (或路程) 也是不同的。位移总是末了时刻的矢径减去开始时刻的矢径，而路程则是实际所经历的路程长度，前者是矢量，后者是标量。位置矢量 $\mathbf{r}$ 依赖于坐标系的选择，而位移矢

这可由图 1—3 所示得到证明, 即

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 = (\mathbf{r}'_2 + \mathbf{R}) - (\mathbf{r}'_1 + \mathbf{R}) = \mathbf{r}'_2 - \mathbf{r}'_1$$

§ 1-3 质点在直线运动中的速度和加速度

一、速度

质点沿直线运动, 质点的位置不断发生变化. 设质点在时刻 t_1 时坐标为 x_1 , 在时刻 t_2 时坐标为 x_2 , 则质点在时间间隔 $\Delta t = t_2 - t_1$ 内完成了位移 $\Delta x \mathbf{i} = (x_2 - x_1) \mathbf{i}$. 比值 $\frac{\Delta x \mathbf{i}}{\Delta t}$ 叫做质点在时间间隔 Δt 内的平均速度, 用 $\mathbf{v}$ 表示, 即

$$\mathbf{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \mathbf{i} \quad (1-9)$$

一般说来, 平均速度只能反映质点在这段时间间隔内的平均快慢, 同时平均速度随所选的时间间隔的不同而不同. 因此, 提到平均速度, 必须要指明是哪一段时间内的平均速度, 所以平均速度不能反映运动的真实情况.

要精确描述质点的运动, 必须要知道质点在各个瞬时的快慢和质点的运动方向. “快慢”的含义, 是根据质点在一段时间内所运行路程的长短来判断的. 也就是说, 快慢是就一定时间间隔来判断的. 显然, 质点在某个瞬时的快慢就没有意义了. 这个矛盾只有借助于极限的概念, 才能得到解决. 通常把平均速度的极限值叫做瞬时速度 $\mathbf{v}$,

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} \mathbf{i} = \frac{dx}{dt} \mathbf{i} \quad (1-10)$$

必须注意, Δt 只能趋于零, 但不能等于零. 虽然这一段时间间隔极短, 但终究还是有限的时间间隔, 决非瞬时, 所以快慢也就有意义了. $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ 仍然表示这段极短时间内的平均速度, 而 $\Delta t \rightarrow 0$, 表示在这段极短的时间内质点运动快慢存在着极微小的改