

高等学校教材

DAXUE WULI

大学物理 (上)

黄仙山 主编



合肥工业大学出版社
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

高等学校教材

大学物理

(上)

主 编 黄仙山

副主编 何贤美 夏金德 韩玉峰

参 编 (按姓氏笔画排序)

丁成祥 马建军 王 东

王 斌 刘 畅 刘 剑

刘厚通 吴建光 邹 勇

唐绪兵 莫绪涛 巢梨花

冀月霞

合肥工业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理/黄仙山主编. —合肥:合肥工业大学出版社,2014.12
ISBN 978-7-5650-2019-3

I. ①大… II. ①黄… III. ①物理学—高等学校—教材 IV. ①04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 261248 号

大学物理(上、下)

黄仙山 主编

责任编辑 汤礼广 王路生

出 版	合肥工业大学出版社	版 次	2014 年 12 月第 1 版
地 址	合肥市屯溪路 193 号	印 次	2015 年 2 月第 1 次印刷
邮 编	230009	开 本	710 毫米×1000 毫米 1/16
电 话	理工编辑部:0551-62903087	印 张	32.75
	市场营销部:0551-62903198	字 数	600 千字
网 址	www.hfutpress.com.cn	印 刷	合肥星光印务有限责任公司
E-mail	hfutpress@163.com	发 行	全国新华书店

ISBN 978-7-5650-2019-3

定价: 68.00 元(上册 38.00 元、下册 30.00 元)

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社市场营销部联系调换。

本书中物理量的名称、符号和单位

量的名称	符号	单位名称	单位代号	备注
长度	L, S	米	m	
面积	S	平方米	m^2	
体积	V	立方米	m^3	1L(升) = 10^{-3}m^3
时间	t	秒	s	
位移	$s, \Delta r$	米	m	
速度	v, u	米每秒	m/s	
加速度	a	米每二次方秒	m/s^2	
角位移	θ	弧度	rad	
角速度	ω	弧度每秒	rad/s	
角加速度	β	弧度每二次方秒	rad/s^2	
质量	m	千克	kg	
力	F	牛顿	N	$1\text{N} = 1\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$
重力	G	牛顿	N	
功	W, A	焦耳	J	$1\text{J} = 1\text{N} \cdot \text{m}$
能量	E, W	焦耳	J	
动能	E_k	焦耳	J	
势能	E_p	焦耳	J	
功率	P	瓦特	W	$1\text{W} = 1\text{J/s}$
摩擦因数	μ			
动量	p	千克米每秒	$\text{kg} \cdot \text{m/s}$	
冲量	I	牛顿秒	$\text{N} \cdot \text{s}$	
力矩	M	牛顿米	$\text{N} \cdot \text{m}$	
转动惯量	J, I	千克二次方米	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	
角动量(动量矩)	L	千克二次方米每秒	$\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$	
压强	p	帕斯卡	Pa	$1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$

(续表)

量的名称	符号	单位名称	单位代号	备注
热力学温度	T	开尔文	K	
摄氏温度	t	摄氏度		$t = T - 273.15$
摩尔质量	M	千克每摩尔	kg/mol	
分子质量	m_0	千克	kg	
分子有效直径	d	米	m	
分子平均自由程	$\bar{\lambda}$	米	m	
分子平均碰撞频率	$\bar{Z}$	次每秒	1/s	
分子数密度	n	每立方米	1/m ³	
热量	Q	焦耳	J	
比热容	c	焦耳每千克开尔文	J/(kg · K)	
质量热容	C	焦耳每开尔文	J/K	
定容摩尔热容	$C_{V,m}$	焦耳每摩尔开尔文	J/(mol · K)	
定压摩尔热容	$C_{p,m}$	焦耳每摩尔开尔文	J/(mol · K)	
比热容比	γ			
黏度	η	帕秒	Pa · s	
热导率	k	瓦每米开尔文	W/(m · K)	
扩散系数	D	二次方米每秒	m ² /s	
熵	S	焦耳每开尔文	J/K	
电流	I	安培	A	
电荷量	Q, q	库仑	C	
电荷线密度	λ	库仑每米	C/m	
电荷面密度	σ	库仑每平方米	C/m ²	
电荷体密度	ρ	库仑每立方米	C/m ³	
电场强度	E	伏特每米	V/m, N/C	
电势	U	伏特	V	1 V/m = 1 N/C
电势差、电压	U	伏特	V	
电容率	ϵ	法拉每米	F/m	
真空电容率	ϵ_0	法拉每米	F/m	

(续表)

量的名称	符号	单位名称	单位代号	备注
相对电容率	ϵ_r			
电偶极矩	p, p_e	库仑米	$C \cdot m$	
电极化强度	P	库仑每平方米	C/m^2	
电极化率	χ_e			
电位移	D	库仑每平方米	C/m^2	
电位移通量		库仑	C	
电容	C	法拉	F	$1F=1C/V$
电流密度	j	安培每平方米	A/m^2	
电动势	ϵ	伏特	V	
电阻	R	欧姆	Ω	$=1V/A$
电导	G	西门子	S	$1S=1A/V$
电阻率	ρ	欧姆米	$\Omega \cdot m$	
电导率	γ	西门子每米	S/m	
磁感应强度	B	特斯拉	T	$1T=1Wb/m^2$
磁导率	μ	亨利每米	H/m	
真空磁导率	μ_0	亨利每米	H/m	
相对磁导率	μ_r			
磁通量	Φ	韦伯	Wb	$1Wb=1V \cdot s$
磁化强度	M	安培每米	A/m	
磁化率	χ_m			
磁场强度	H	安培每米	A/m	
线圈的磁矩	P_m	安培平方米	$A \cdot m^2$	
自感	L	亨利	H	$1H=1Wb/A$
互感	M	亨利	H	
电场能量	W_e	焦耳	J	
磁场能量	W_m	焦耳	J	
磁能密度	w_m	焦耳每立方米	J/m^3	

前 言

大学物理是大学低年级各专业的一门重要的基础课。它的主要任务是为工程应用型人才的成长较系统地打下必需的物理学基础,同时培养学生初步学习科学理论的学习方法和研究解决实际问题的基本方法,增强学生学习其他专业知识的能力,开阔学生视野,激发学生探索和创新的欲望,提高学生的综合素质。

为适应教学改革的新形势,进一步提高大学物理课程的教学质量,选择合适的教材就显得至关重要。为此,安徽工业大学应用物理系教师,结合自己多年的教学经验并吸收当前国内外大学物理课程教材编写的许多长处,集体编写了这本《大学物理》(上、下)教材。

本教材按照 120 学时设计(供选择),分为上下两册,共有 18 章。上册主要内容有力学、气体动理论和热力学基础、机械振动、机械波和波动光学等。下册主要内容有电磁学、狭义相对论和量子力学基础等。全书内容一般按照大多数高校的课堂教学顺序进行编排,这也与学生的认识过程以及物理规律的表现基本一致。

编者的初衷是为一般工科院校的大学本科生提供一套难度适中、深入浅出、篇幅不大、易教易学的大学物理教材,但在编写过程中,编者充分体会到了实现这一目标的困难与艰辛。令编者自豪的是,在困难面前,编者不仅没有止步,而且对本教材的编写还进行了适当地探索和创新。

首先,本教材对力学中质点运动学和质点动力学的内容进行了浓缩,原因是大学新生在学习大学物理之前已经在中学上了五年的物理课,再加上多年的应试教育和题海战术训练,给他们中间的许多人造成了物理课“概念抽象、内容繁多、题目难解、上课枯燥”的印象。正是出于此原因,因此本教材在力学部分中对学生已烂熟于心的力学概念不再用浩繁篇幅加以论述,而是大胆进行了简化;另外,将微积分、矢量运算等高等数学工具应用于力学概念和定理的表述,尽量做到令人有耳目一新之感。

其次,本教材打破以往大多数《大学物理》教材将电磁学放在上册的惯例,

取而代之的是机械振动、机械波和波动光学。因为这些内容虽各自独立,可相互间又紧密联系,因此与上册内容放在一起,易教易学;另外,编者在多年的教学过程中还发现如果将电磁学安排在上册,学生在学习这部分内容时由于还没有掌握足够的高等数学知识,因此往往对微积分的学习会产生畏惧心理,再加上电磁学概念晦涩,从而会让有些学生丧失学习热情。

本教材的最大特点是思路清晰,表达准确,深入浅出,能让学生乐于阅读。本书在讲解物理学中的基本概念和基本原理时,力求避免使用一些艰涩的术语和复杂的公式;对重要的概念和原理,几乎都配有例题。为了便于教学,编者将可以作为选讲内容和适合学生自学的内容,在书目中特意用“*”标出;另外,还为各章配有一定量的思考题和习题,并提供了参考答案。

本教材的编写凝聚了安徽工业大学大学物理教研室绝大部分一线教师的心血。本教材编写分工如下:第1~3章,刘畅;第4章,丁成祥;第5章,刘剑、冀月霞;第6章,马建军;第7章,邹勇;第8章,王斌;第9~10章,莫绪涛;第11章,何贤美;第12章,吴建光;第13章,王东;第14~15章,夏金德;第16章,巢梨花;第17章,刘厚通;第18章,唐绪兵;各章后的习题和答案,韩玉峰。全书由黄仙山统稿。

最后,感谢安徽工业大学招生办主任张清教授对本书的编写工作提出了许多宝贵意见,感谢安徽工业大学数理学院副院长孙文斌同志对本书的编写工作给予的大力支持,在此也对在编写过程中给予各种帮助的其他同仁表示诚挚的谢意。另外,还要感谢合肥工业大学出版社的编辑,他们为本书的顺利出版付出了同样的辛勤劳动。

教学是一门艺术,编写出好教材则可让这门艺术大放光彩。本书的成功编写是我们大学物理教研室的教师对多年教学实践的经验总结和对教学创新的有益尝试。鉴于编者水平有限、编写时间仓促,本书难免存在疏漏和不当之处,敬请读者给予批评指正。

编 者

目 录

上 册

经典力学篇

第 1 章 质点运动学	(2)
§ 1-1 质点 参考系 坐标系	(2)
§ 1-2 位矢与位移	(4)
§ 1-3 速度	(6)
§ 1-4 加速度	(8)
§ 1-5 圆周运动	(12)
§ 1-6 质点的相对运动	(16)
本章小结	(17)
习题	(19)
第 2 章 质点动力学	(21)
§ 2-1 牛顿定律	(21)
§ 2-2 动量和动量守恒	(27)
§ 2-3 功与能量	(33)
本章小结	(43)
习题	(45)
第 3 章 刚体的转动	(47)
§ 3-1 刚体的转动的描述	(47)

§ 3-2 刚体的转动动能与转动惯量	(50)
§ 3-3 角动量 角动量定理和力矩 刚体转动定律	(58)
§ 3-4 角动量守恒及应用	(64)
§ 3-5 刚体转动中的功与能量	(68)
本章小结	(71)
习题	(73)

热 力 学 篇

第 4 章 气体运动理论	(77)
§ 4-1 温度、平衡态、热量的概念	(77)
§ 4-2 分子运动论	(80)
§ 4-3 气体的压强	(83)
§ 4-4 温度的统计解释	(86)
§ 4-5 内能、能量均分定理	(90)
§ 4-6 麦克斯韦速率分布律	(95)
* § 4-7 麦克斯韦速度分布律和玻尔兹曼分布	(101)
* § 4-8 气体分子的平均碰撞频率和自由程	(103)
* § 4-9 气体中的输运过程简介	(105)
§ 4-10 附录:利用麦克斯韦速率分布计算速率统计平均值所用到的 积分	(112)
本章小结	(113)
习题	(116)
第 5 章 热力学基础	(118)
§ 5-1 功 热量 准静态过程	(118)
§ 5-2 热力学第一定律	(121)
§ 5-3 循环过程 卡诺循环	(127)
§ 5-4 热力学第二定律	(133)
本章小结	(140)
习题	(143)

振动波动篇

第 6 章 机械振动	(147)
§ 6-1 简谐振动的特征	(147)
§ 6-2 简谐振动的描述	(150)
§ 6-3 简谐振动的能量	(156)
§ 6-4 简谐振动的合成	(158)
§ 6-5 阻尼振动 受迫振动 共振	(164)
本章小结	(168)
习题	(171)
第 7 章 机械波	(173)
§ 7-1 机械波的形成与传播	(173)
§ 7-2 平面简谐波的波动方程	(178)
§ 7-3 波的能量	(186)
§ 7-4 惠更斯原理 波的叠加与干涉	(191)
§ 7-5 驻波	(198)
§ 7-6 多普勒效应	(205)
本章小结	(210)
习题	(212)

波动光学篇

第 8 章 光的干涉	(217)
§ 8-1 光源 光波 光的相干性	(217)
§ 8-2 光波的叠加 光程与光程差	(221)
§ 8-3 分波阵面干涉	(226)
§ 8-4 分振幅干涉	(232)
§ 8-5 迈克尔逊干涉仪	(241)

* § 8-6 光的时间和空间相干性	(243)
本章小结	(244)
习题	(246)
第 9 章 光的衍射	(249)
§ 9-1 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理	(249)
§ 9-2 单缝夫琅禾费衍射	(251)
§ 9-3 衍射光栅	(256)
§ 9-4 圆孔衍射 光学仪器的分辨率	(261)
本章小结	(265)
习题	(266)
第 10 章 光的偏振	(267)
§ 10-1 自然光和偏振光	(267)
§ 10-2 起偏和检偏 马吕斯定律	(269)
§ 10-3 反射与折射时光的偏振 布儒斯特定律	(271)
§ 10-4 光的双折射	(273)
§ 10-5 旋光现象	(276)
本章小结	(277)
习题	(278)
上册习题参考答案	(280)

经典力学篇

作为最古老和最完美的物理学分支,力学的发展经历了整个人类文明的发展历史,许多伟大历史人物的名字与她紧密相连。公元前 200 多年的古希腊数学家、物理学家阿基米德创立了最早的力学——静态力学,被誉为“力学之父”。力学成为一门真正意义上的近代科学则始于 17 世纪伽利略论述惯性运动,继而牛顿以著名的三个定律奠定经典的牛顿力学。经典力学所研究的对象是物体的机械运动,它有严谨的理论体系和完备的研究方法,如观察实验现象、分析和综合实验结果、建立物理模型、应用数学方程、做出推论和预言、实践检验和结果校正等。经典力学作为最完善的科学理论一直正确了大约 300 年时间,直到 20 世纪初科学家们才在高速和微观领域发现了它的局限性,从而在这两个领域它分别被相对论和量子力学所取代。经历了 100 多年的发展,人类文明虽然在科学领域的成就已经远远超越了牛顿经典力学时代,例如广义相对论理论和粒子的标准模型,但是在大多数的工程技术领域,人们仍然生活在牛顿力学时代,例如在机械制造、土木建筑、航空航天等工程技术中,经典力学依然是必不可少的重要理论基础。

本篇主要讲述质点力学和部分刚体力学,重点阐释动量、角动量和能量等概念及相应的守恒定律。

第 1 章 质点运动学

质点的运动学从几何的角度(不涉及物体本身的物理性质和加在物体上的力)描述和研究质点的空间位置随时间的变化规律。本章主要阐述质点的运动方程、轨迹、位移、速度、加速度等物理量的概念,以及圆周运动和相对运动这两种运动形式,这些都随所选参考系的不同而异。本章为第 2 章质点动力学和第 3 章刚体的转动提供必备的理论基础,同时也是物理学研究一切物质运动的基础。

§1-1 质点 参考系 坐标系

1. 质点

实际物体的运动状况总是比较复杂的,一个重要的原因是实际的物体具有一定的形状和大小,而且物体的形状和大小在运动过程中还会变化。不过在某些情况,运动物体的大小形状并不起主要作用,例如当你手中的物体下落的时候,它一方面受到重力的作用,另一方面还受到空气阻力的作用,空气阻力是与物体的几何形状和速度相关的,但是当物体是重的金属球或者流线体时,阻力起到的作用很小,运动情况主要取决于重力。这时候,物体的运动状况就可以看作与其大小形状无关。又比如,我们观察地球的运动,地球一方面在绕太阳沿椭圆轨道运动,另一方面还在自转。由于自转,地球上各点的运动情况并不完全相同,但是考虑到地球到太阳的平均距离是地球直径的 12000 多倍,所以在研究地球公转的时候,地球上各点的运动情况可以基本看作是相同的,这里就可以不考虑地球的大小和形状了。

类似的例子还有很多,从这类例子中我们可以概括出一个结论:在某些问题中,当物体的大小形状与所研究的问题无关或者影响很小时,为了能够抓住主要因素,掌握物体运动的基本情况,有必要忽略物体的大小和形状,把物体看

成只有质量而无大小和形状的点,这种理想化、抽象化了的对象,在物理学中被称为质点。

几何学中的点不具有任何空间大小,而任何实际物体都有一定大小,因此绝对的质点在实际中是不存在的,它只能是一种理想化模型。应当指出,在研究实际物理问题的时候,在一定条件下引入理想化模型代替实际物体作为研究对象,这种方法是经常采用的。在本书中读者还会接触到如刚体、理想气体、点电荷等理想化模型。

本篇前2章的内容都是属于可以用质点模型处理的力学问题范围,通过分析质点的运动就可以弄清楚整个物体的运动,因此研究质点的运动是研究一切物体运动的基础。

2. 参考系

宇宙间万物都在不停地运动,即使是平常看似静止的物体(如道路、房屋),也在随着地球一起转动,并随地球绕太阳运动,而太阳又绕着银河系的中心转动,银河系又相对其他星系在不停地运动。可见,运动是绝对的,而静止只是相对的,绝对的静止是不存在的。

当我们出门乘坐火车的时候,我们会观察到车厢是静止不动的,而窗外的树木却在向后运动,而站在地面的人们则看到地面的树木是静止的,而车厢则是在运动。从这个生活中的小例子说明,所选择的参考物体不同,观察结果就会不一样,这种同一物体对于不同参考物体运动状态不同的性质,被称为运动描述的相对性(不要小看它,爱因斯坦关于运动相对性的思考导致了狭义相对论的诞生),因此在研究和描述任何物体运动的时候,首先必须选定一个物体作为参考,这个被选定作为参考的物体,称为参考系。最常见的参考系是地面参考系,我们研究物体在地面上的运动可以选择地面或者与地面保持相对静止的物体作为参考系,但有时候则未必如此,例如我们要研究火星的公转运动规律时,太阳则是我们应该选择的参考系。因此参考系的选择可以是任意的,主要由问题的性质和研究的方便决定。

3. 坐标系

有了参考系之后,为了定量地描述运动,还需要选择一个固定的坐标系,我们常用的坐标系有直角坐标系、极坐标系、球坐标系和自然坐标系等。有些坐标系我们已经很熟悉了,有些则相对陌生。对于那些相对陌生的坐标系,我们会在后面章节使用到时再介绍。

§1-2 位矢与位移

1. 质点的位置矢量

通常用位置矢量(简称位矢) $\boldsymbol{r}$ 来确定质点的空间位置,它是从参考点(通常是坐标原点)指到质点所在位置的一个有向线段。在图 1-1 中,质点 P 在直角坐标系中的位置,既可以用空间坐标 x, y, z 来表示 $P(x, y, z)$,也可以用一个位矢 $\boldsymbol{r}$ 来表示。如果用 $\boldsymbol{i}, \boldsymbol{j}, \boldsymbol{k}$ 表示 Ox 轴、 Oy 轴、 Oz 轴的单位矢量,那么两者之间的关系可以写成

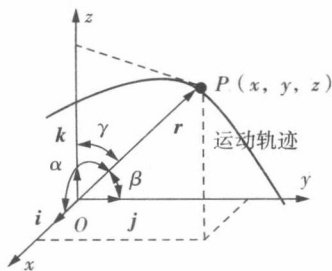


图 1-1 质点的位置矢量

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

其值(大小)等于

$$r = |\boldsymbol{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1-2)$$

它表示 P 点到 O 点的距离;位矢 $\boldsymbol{r}$ 的方向由其与 x, y, z 轴夹角的三个余弦值来确定:

$$\cos\alpha = \frac{x}{r}, \cos\beta = \frac{y}{r}, \cos\gamma = \frac{z}{r} \quad (1-3)$$

根据式(1-2)和式(1-3),可以得到

$$\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma = 1 \quad (1-4)$$

因此只要知道其中任意两个角度就可以求出第三个,只要方位与距离都知道, P 点的位置也就确定了。

2. 质点的运动方程

质点运动时,它相对于坐标原点 O 的位矢 $\boldsymbol{r}$ 在随时间变化,因此质点的坐标 x, y, z 和位矢 $\boldsymbol{r}$ 是时间 t 的函数。该函数式可以写作

$$x = x(t) \quad y = y(t) \quad z = z(t) \quad (1-5)$$

或

$$\boldsymbol{r}(t) = x(t)\boldsymbol{i} + y(t)\boldsymbol{j} + z(t)\boldsymbol{k} \quad (1-6)$$

上式都表示质点的运动方程,两者是等效的,从式(1-5)中可以看到质点的运动可以看作在 x 方向、 y 方向和 z 方向的三个相互独立的分运动的叠加,这样的叠加原理被称为运动的独立性原理。知道了质点的运动方程,就能确定质点在任一时刻的位置,从而确定质点的运动规律。式(1-6)也称为质点运动轨迹的参数方程,从中消去参数 t 便可以得到运动轨迹的正交坐标方程(简称轨迹方程)

$$f(x, y, z) = 0 \quad (1-7)$$

如果质点的运动轨迹是直线,则其运动就是直线运动;如果运动轨迹是曲线,则其运动就是曲线运动。作为对质点运动规律研究的重要任务之一就是找出各种具体运动所遵循的运动方程。

3. 质点的位移

假设质点沿图1-2所示的曲线运动,在 t 时刻质点位于 P_1 点,位矢为 $\mathbf{r}_1$,在 $t+\Delta t$ 时刻质点位于 P_2 点,位矢为 $\mathbf{r}_2$,则从 P_1 点指向 P_2 点的矢量 $\Delta\mathbf{r}$ 称为质点在 Δt 时间内的位移,即

$$\Delta\mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 \quad (1-8)$$

若用单位矢量来表示,位移可以写作

$$\Delta\mathbf{r} = (x_2\mathbf{i} + y_2\mathbf{j} + z_2\mathbf{k}) - (x_1\mathbf{i} + y_1\mathbf{j} + z_1\mathbf{k}) \quad (1-9)$$

或

$$\Delta\mathbf{r} = (x_2 - x_1)\mathbf{i} + (y_2 - y_1)\mathbf{j} + (z_2 - z_1)\mathbf{k} \quad (1-10)$$

式中坐标 (x_1, y_1, z_1) 相应于位矢 $\mathbf{r}_1$;坐标 (x_2, y_2, z_2) 相应于位矢 $\mathbf{r}_2$,还可以将 $(x_2 - x_1)$ 代为 Δx , $(y_2 - y_1)$ 代为 Δy , $(z_2 - z_1)$ 代为 Δz ,得

$$\Delta\mathbf{r} = \Delta x\mathbf{i} + \Delta y\mathbf{j} + \Delta z\mathbf{k} \quad (1-11)$$

符号 Δ 表示该物理量的变化量或者增量,即相应物理量的末值减去初值。

关于位移的概念有以下几点需要注意:

① 位移 $\Delta\mathbf{r}$ 是矢量,它是由起点位置指向终点位置的矢量,大小为起点 P_1 到终点 P_2 的距离,记做 $|\Delta\mathbf{r}| = |\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1|$,这一数量一般不等于 Δr , Δr 表示位矢大小的增量,即 $\Delta r = |\mathbf{r}_2| - |\mathbf{r}_1|$ 。

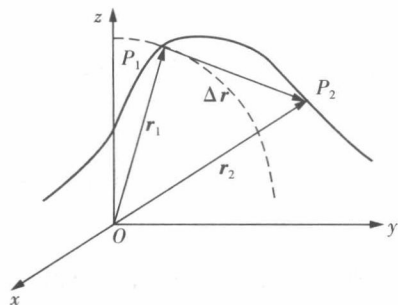


图1-2 质点的位移