



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学物理教程

(第2版)

陈信义 主编

清华大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学物理教程

(第2版)

陈信义 主编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书包括 12 章,分别讲述质点力学,刚体力学,狭义相对论,静电场,静电场中的导体和电介质,恒定电流的磁场,电磁感应 位移电流 电磁波,气体动理论,热力学基础,振动和波动,波动光学,量子物理基础等方面的内容。

本书的内容紧紧围绕大学物理课程的基本要求,难度适中,物理概念清晰,论述深入浅出。书中概念的引入明确而完整,并有少量的技术应用和理论扩展,力求简明而不简单,深入而不深奥。本书可作为一般工程技术类专业和经济管理类专业的大学物理教材。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

大学物理教程/陈信义主编.—2版.—北京:清华大学出版社,2008.9
ISBN 978-7-302-18235-1

I. 大… II. 陈… III. 物理学—高等学校—教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 112006 号

责任编辑:朱红莲

责任校对:刘玉霞

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社总机:010-62770175

投稿咨询:010-62772015

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

邮购热线:010-62786544

客户服务:010-62776969

印 刷 者:北京市清华园胶印厂

装 订 者:三河市溧源装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印张:22.5

字数:538 千字

版 次:2008 年 9 月第 2 版

印次:2008 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:32.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:028938-01

前 言

本套教程自出版以来,被许多院校选为大学物理课程的教材,基本体现了编者的初衷:难度合适、深入浅出、篇幅不大、易教易学。根据广大教师和读者反映的情况和提出的建议,以及编者使用本书在清华大学授课的经验,对原书的部分内容做了修订。

这次修订改变了气体动理论中统计分布律的讲法,强调了玻耳兹曼分布律的应用,增加了计算熵的例题,补充了刚体的平面平行运动和电子的自旋等内容。为了不增加篇幅和学时,删减了原书中一些不是很基础的内容和习题,去掉了每章后面的思考题,扩大了带“*”的选学部分,并由原来的上、下两册合并成一册出版。虽然有些章节的改动较大,但仍保留原书的结构和风格。整个修订工作由陈信义完成。

清华大学李复教授认真审阅了修订后的书稿,提出了许多中肯的修改建议。书稿曾作为校内讲义在清华大学试用,环境科学与工程系的同学们以学生的角度反映了许多宝贵的意见。编者对此表示诚挚的谢意。还要衷心感谢广大教师和读者指出本书第1版中出现的一些错误。由于编者水平所限,修订后仍不免有错误和疏漏,恳请批评指正。

编 者

2008年5月

第 1 版前言

本套教程分上、下两册,共有 12 章。编者的初衷,是为一般工程技术类专业和经济管理类专业的大学本科生提供一套难度合适、深入浅出、篇幅不大、易教易学的大学物理教材。在编写的过程中,编者充分体会到实现这一目标的困难和艰辛。

讲什么,怎样讲,这是编写教材所面临的核心问题。本书内容的选取紧紧围绕大学物理课程的基本要求,并以工程技术,特别是新技术中广泛应用的基本物理原理为依据。全书上册为力学和电磁学,下册为热学、振动和波动、波动光学和近代物理。在具有整体性和系统性的基础上,章节的编排适当考虑了教学上的方便。例如,振动和波虽属力学,但因它们是波动光学的基础,所以放在波动光学之前介绍。本书不承担介绍物理科学前沿和新技术应用的任务,而把这方面的工作留给相关的专业课程、学术报告和科普书籍去完成。对于超出大学物理课程基本要求和物理原理在技术上的应用,则只是点到为止。

在讲法上避免或简化复杂的数学推导,突出物理本质,建立鲜明的物理图像;概念的引入力求明确和完整;对基本内容中的难点和疑点,均作深入浅出的剖析,并配备了足够数量的具有针对性的例题。

在编写过程中,适量地引用了相关的物理学史资料,其中包括重要的物理实验和有关科学家的思想和贡献。这样可增强物理学理论的真实感和生动感,有助于学生形成科学的学习方法和研究方法,有利于激发学生的学习兴趣和培养学生的创新能力。

本套教程是为 70~100 学时大学物理课程编写的,对于一般程度的工科学生,全书内容可以用 100 学时讲完;如果学时较少,例如 80 学时左右,则可省略带“*”的选学部分不讲。虽然带“*”部分所占篇幅不大,但在教学中会占用较多学时。经过适当裁减后,这套教程也可用于面向经济管理类专业 70 学时左右的大学物理课程。

参加编写的 5 位教师,都具有多年讲授大学物理和理论物理的教学经验,在编写过程中编者进行了多次认真的讨论,并互相修改书稿。因此,全书体现了各位编者的教学经验和风格,同时也具有较好的整体性和系统性。

陈信义编写了第 1、3、10、12 章,韩宝亮编写了第 2、4、5、6 章,唐洪学编写了第 7、8、9、11 章,李蕴才和李家强分别参与了第 1、2 章和第 11 章的编写,并参加了讨论和书稿的修改。受清华大学出版社委托,陈信义组织了编写讨论会和互相修改书稿的工作。

编者感谢高炳坤教授审阅了部分书稿,并提出了宝贵的意见。感谢各校关心本套教程的教师与同行,编者真诚地希望听到广大读者的批评和建议。

编 者

2005 年 5 月

目 录

第 1 章 质点力学	1
1.1 质点运动的描述	1
1.1.1 位矢和位移	1
1.1.2 速度	2
1.1.3 加速度	3
1.1.4 运动的相对性	5
1.1.5 几种基本运动	6
1.2 牛顿力学的基本定律	10
1.2.1 牛顿运动定律	10
1.2.2 惯性参考系和伽利略相对性原理	11
1.2.3 用牛顿定律解题	12
1.2.4 万有引力定律 惯性质量和引力质量	14
* 1.2.5 非惯性参考系和惯性力	15
1.3 动量变化定理和动量守恒	17
1.3.1 冲量和质点动量变化定理	17
1.3.2 质点系动量变化定理	18
1.3.3 动量守恒定律	19
* 1.3.4 火箭水平推进速度	20
1.3.5 质心和质心运动定理	21
1.4 功和能量	22
1.4.1 功和质点动能变化定理	22
1.4.2 质点系动能变化定理	23
1.4.3 保守力和势能	24
1.4.4 机械能变化定理	26
* 1.4.5 理想流体和伯努利方程	26
1.4.6 机械能守恒定律	28
1.5 角动量变化定理和角动量守恒	30
1.5.1 质点的角动量	30
1.5.2 质点角动量变化定理	30
1.5.3 质点系角动量变化定理和角动量守恒定律	32
本章提要	33
习题	34

第 2 章 刚体力学	38
2.1 刚体的定轴转动和平面平行运动	38
2.1.1 刚体的定轴转动	38
2.1.2 刚体定轴转动定理 转动惯量 力矩	39
2.1.3 刚体的平面平行运动	40
2.2 转动惯量的计算 平行轴定理	41
2.3 用刚体转动定理解题	43
2.4 刚体转动的功和能	46
2.4.1 转动动能	46
2.4.2 刚体的重力势能	46
2.4.3 力矩做功	46
2.4.4 刚体定轴转动的动能变化定理	47
2.4.5 运动刚体的机械能守恒	47
2.5 定轴转动刚体的角动量守恒	48
* 2.6 进动和陀螺仪	50
本章提要	50
习题	51
第 3 章 狭义相对论	55
3.1 狭义相对论的建立	55
3.1.1 时空变换	55
3.1.2 绝对时空观和伽利略变换	56
3.1.3 狭义相对论的基本假设	56
3.2 洛伦兹变换	58
3.3 时间延缓和长度收缩	61
3.3.1 同时性的相对性	61
3.3.2 时间延缓	62
3.3.3 长度收缩	64
3.4 相对论速度变换	66
3.5 相对论动力学基础	67
3.5.1 动量和质量	68
3.5.2 质能关系	69
* 3.5.3 能量和动量关系	71
* 3.5.4 能量和动量守恒	72
* 3.6 广义相对论简介	73
本章提要	74
习题	75

第 4 章 静电场	77
4.1 电荷和库仑定律	77
4.1.1 电荷	77
4.1.2 库仑定律	78
4.2 电场和电场强度	79
4.2.1 电场	79
4.2.2 电场强度	79
4.2.3 电场强度的计算	80
4.3 电通量和高斯定理	84
4.3.1 电场线和电通量	84
4.3.2 高斯定理	86
4.3.3 用高斯定理求电场	87
4.4 静电场的环路定理和电势	89
4.4.1 静电场的保守性	89
4.4.2 静电场的环路定理	90
4.4.3 电势	90
4.4.4 由电势求电场强度	93
本章提要	94
习题	95
第 5 章 静电场中的导体和电介质	99
5.1 静电场中的导体	99
5.1.1 导体的静电平衡	99
5.1.2 静电平衡导体上的电荷分布	99
5.1.3 静电平衡导体表面附近的电场	100
5.1.4 静电屏蔽	102
5.2 电容和电容器	103
5.2.1 孤立导体的电容	103
5.2.2 电容器的电容	103
5.2.3 电容器的串并联	104
5.3 静电场中的电介质	105
5.3.1 电介质的极化	105
5.3.2 极化强度和极化电荷	106
5.3.3 电介质的极化规律	107
5.3.4 有介质时的高斯定理	107
5.3.5 用有介质时的高斯定理求电场	108
5.4 静电场的能量	109

* 5.5	几种各向异性电介质介绍	111
	本章提要	112
	习题	112
第 6 章	稳恒电流的磁场	116
6.1	电流密度和稳恒电流	116
6.1.1	电流密度矢量	116
6.1.2	稳恒电流	117
6.1.3	欧姆定律的微分形式	118
6.2	磁感应强度和毕奥-萨伐尔定律	119
6.2.1	基本磁现象	119
6.2.2	磁感应强度	120
6.2.3	毕奥-萨伐尔定律	121
6.2.4	用毕奥-萨伐尔定律求磁场	122
6.3	安培环路定理	124
6.3.1	安培环路定理的表述	124
6.3.2	用安培环路定理求磁场	125
6.4	安培力 磁矩 洛伦兹力	128
6.4.1	安培力	128
6.4.2	磁场对载流线圈的力矩 磁矩	129
6.4.3	洛伦兹力	131
6.4.4	带电粒子在磁场中的运动	131
6.4.5	霍尔效应	132
6.5	磁场中的磁介质	133
6.5.1	磁介质的磁化	133
6.5.2	磁化强度和磁化电流	134
6.5.3	有介质时的安培环路定理	134
6.5.4	磁介质的磁化规律	135
6.5.5	用有介质时的安培环路定理求磁场	135
* 6.6	铁磁质	136
	本章提要	138
	习题	138
第 7 章	电磁感应 位移电流 电磁波	143
7.1	电磁感应	143
7.1.1	电动势	143
7.1.2	电磁感应现象	144
7.1.3	法拉第电磁感应定律	144

* 7.1.4 电磁感应定律和磁通连续定理	146
7.2 动生电动势 感生电动势 感生电场	146
7.2.1 动生电动势	147
7.2.2 感生电动势和感生电场	148
7.3 互感和自感	150
7.3.1 互感	150
7.3.2 自感	151
7.3.3 磁场的能量	151
7.4 麦克斯韦方程组和电磁波	152
7.4.1 位移电流和普遍情况下的安培环路定理	152
7.4.2 麦克斯韦方程组	154
7.4.3 电磁波	155
本章提要	156
习题	157
第 8 章 气体动理论	160
8.1 理想气体和平衡态	160
8.1.1 理想气体	160
8.1.2 平衡态	160
8.1.3 理想气体的状态方程	161
8.2 理想气体的压强和温度	162
8.2.1 理想气体的微观假设	162
8.2.2 统计平均值	162
8.2.3 理想气体的压强	163
8.2.4 理想气体的温度	164
* 8.2.5 光子气体的压强	165
8.3 能量均分定理 理想气体的内能	166
8.3.1 自由度	166
8.3.2 能量均分定理	166
8.3.3 理想气体的内能	167
8.4 分子按空间位置的分布	168
8.4.1 大气压随高度的变化	168
8.4.2 大气密度随高度的变化	169
8.4.3 分子按空间位置的分布规律	169
8.5 麦克斯韦分布律	170
8.5.1 麦克斯韦速度分布律	170
8.5.2 麦克斯韦速率分布律	171
8.5.3 平均速率 方均根速率	172

8.6	相空间和玻耳兹曼分布律	173
8.6.1	相空间和分布函数	173
8.6.2	玻耳兹曼分布律	174
* 8.6.3	能量均分定理的证明	175
8.6.4	简谐振子的平均能量	176
* 8.7	实际气体和范德瓦耳斯方程	177
8.7.1	实际气体等温线	177
8.7.2	分子力	178
8.7.3	范德瓦耳斯方程	178
8.8	平均自由程和输运过程	180
8.8.1	平均自由程	180
* 8.8.2	输运过程	181
	本章附录	183
	本章提要	184
	习题	185
第9章	热力学基础	187
9.1	热力学第一定律	187
9.1.1	热力学第一定律的表述	187
9.1.2	准静态过程	187
9.1.3	ΔE 、 A 和 Q 的计算	188
9.2	理想气体的典型过程和热容	189
9.2.1	等体过程和摩尔定体热容	189
9.2.2	等压过程和摩尔定压热容	189
9.2.3	等温过程	190
9.2.4	绝热过程	191
9.3	循环过程和卡诺循环	193
9.3.1	循环过程和热机效率	193
9.3.2	可逆过程和不可逆过程	194
9.3.3	卡诺循环和卡诺定理	195
9.4	热力学第二定律	198
9.4.1	热力学第二定律的宏观表述	198
9.4.2	微观态和等概率假设	199
9.4.3	热力学第二定律的微观意义	200
9.5	熵和熵增加原理	201
9.5.1	玻耳兹曼熵	201
9.5.2	熵增加原理	202
9.5.3	克劳修斯熵	202

9.5.4	理想气体的熵	204
	本章提要	207
	习题	208
第 10 章	振动和波动	211
10.1	简谐振动	211
10.1.1	简谐振动的描述	211
10.1.2	旋转矢量图和复数表示	214
10.1.3	简谐振动的能量	215
10.2	两个简谐振动的合成	217
10.2.1	同方向、同频率简谐振动的合成	217
10.2.2	同方向、不同频率简谐振动的合成	218
10.2.3	互相垂直的同频率简谐振动的合成	219
*10.2.4	互相垂直的不同频率简谐振动的合成	220
*10.3	阻尼振动 受迫振动 共振	220
10.3.1	阻尼振动	220
10.3.2	受迫振动	221
10.3.3	共振	222
10.3.4	品质因数	223
10.4	简谐波	223
10.4.1	简谐波的产生	224
10.4.2	简谐波的波函数	224
10.4.3	简谐波的能量	226
10.5	惠更斯原理和波的传播方向	228
10.5.1	惠更斯原理	228
10.5.2	波的衍射	228
10.5.3	波的反射和折射	229
10.6	波的叠加 干涉 驻波	230
10.6.1	波的叠加原理	230
10.6.2	波的干涉	230
10.6.3	驻波	230
10.6.4	半波损失	232
10.6.5	简正模式	232
10.7	多普勒效应	233
10.7.1	机械波的多普勒效应	233
*10.7.2	电磁波的多普勒效应	235
*10.7.3	冲击波	236
*10.8	波动方程和波速	237

10.8.1	波动方程	237
10.8.2	波速	237
	本章提要	238
	习题	240
第 11 章	波动光学	243
11.1	光源发光机理 杨氏双缝干涉	243
11.1.1	光源发光机理	243
11.1.2	杨氏双缝干涉	244
11.1.3	半波损失的实验验证	246
11.2	相位差和光程	247
11.2.1	两束光在相遇点的相位差	247
11.2.2	光程和费马原理	247
11.2.3	透镜物像之间的等光程性	247
11.3	厚度均匀薄膜干涉——等倾干涉	249
11.3.1	等倾干涉条纹	249
11.3.2	增透膜和增反膜	251
11.4	厚度不均匀薄膜干涉——等厚干涉	252
11.4.1	劈尖薄膜干涉	252
11.4.2	牛顿环	254
* 11.4.3	迈克耳孙干涉仪	255
11.5	单缝衍射和半波带法	256
11.5.1	惠更斯-菲涅耳原理	256
11.5.2	夫琅禾费单缝衍射	257
11.5.3	菲涅耳半波带法	257
11.6	圆孔衍射和光学仪器的分辨率	259
11.6.1	夫琅禾费圆孔衍射	259
11.6.2	光学仪器的分辨率	260
11.7	光栅和光栅衍射	261
11.7.1	光栅	262
11.7.2	光栅衍射	262
11.7.3	缺级现象	263
* 11.7.4	晶体对 X 射线的衍射	265
11.8	光的偏振	266
11.8.1	光的偏振状态	267
11.8.2	偏振片	268
11.8.3	反射光和折射光的偏振	269

* 11.9	双折射	269
11.9.1	双折射现象	269
11.9.2	波片	271
11.9.3	起偏棱镜	273
11.9.4	偏振光的干涉	273
	本章提要	274
	习题	275
第 12 章	量子物理基础	277
12.1	黑体辐射和能量子假设	277
12.1.1	热辐射	277
12.1.2	黑体和黑体辐射	278
12.1.3	普朗克黑体辐射公式和能量子假设	280
12.2	光的粒子性	281
12.2.1	光电效应和爱因斯坦光量子理论	281
12.2.2	康普顿效应	284
12.2.3	光的波粒二象性	286
12.3	粒子的波动性 概率波 波函数	286
12.3.1	粒子的波动性	286
12.3.2	概率波	287
12.3.3	波函数	289
12.3.4	自由粒子波函数	290
12.4	不确定度关系	291
12.5	薛定谔方程和能量本征方程	294
12.5.1	自由粒子薛定谔方程	294
12.5.2	薛定谔方程和哈密顿量	294
12.5.3	能量本征方程和定态	295
12.6	一维势场中的粒子	297
12.6.1	无限深方势阱中的粒子	297
12.6.2	简谐振子	299
12.6.3	隧道效应	301
12.7	动量和轨道角动量	303
12.7.1	动量	303
12.7.2	轨道角动量	303
* 12.7.3	分子的转动能级	306
12.8	电子的自旋	306
12.8.1	磁矩与角动量的关系	307
12.8.2	施特恩-盖拉赫实验	307

12.8.3 电子自旋的表达·····	308
12.9 氢原子·····	309
12.9.1 径向方程·····	309
12.9.2 能级和本征波函数·····	309
12.9.3 电子的概率分布·····	311
12.9.4 原子的电子壳层结构·····	312
本章提要·····	316
习题·····	317
数值表·····	320
习题答案·····	322
索引·····	334

牛顿(I. Newton)力学研究宏观物体的低速机械运动。低速是指物体的运动速度远小于真空中的光速,机械运动是指物体的位置或形状随时间的变化。牛顿力学是物理学、天文学和许多工程学的基础,其中的概念、原理和研究方法,在物理学的其他分支或其他学科中常常被直接引用。

在不涉及转动和形变的许多力学问题中,可以不考虑物体的形状和尺寸大小的影响,而用一个具有一定质量的点,即质点来代表物体。例如,在研究地球绕太阳公转时,由于地球半径比地球与太阳之间的距离小得多,则可用质点代表地球。但在研究地球的自转或地震现象时,就不能再把地球看成质点。质点只是一个物理模型,实际上是不存在的。

本章介绍质点力学,它包括质点运动学和质点动力学。质点运动学主要是描述质点的运动状态,而不涉及引起运动和改变运动状态的原因;质点动力学则研究在力的作用下质点的运动状态是如何变化的。

本书采用国际单位制(SI)。

1.1 质点运动的描述

1.1.1 位矢和位移

质点的运动是指它的位置随时间的变化,而位置总是相对其他物体而言的。因此为描述质点的运动,必须选定参照物体,这些被选定的参照物体称为参考系。应该指出,参照物体只能是一些实际的物体,即静止质量不等于零的物体。光子的静止质量等于零,是不能作参考系的。

在运动学中参考系可以任意选取,但参考系不同对运动的描述也就不同。例如,在匀速运动的车厢内观察到有一个物体自由下落,但在地面上看,该物体却作平抛运动。这说明运动是相对的。

为定量地表示质点相对某一参考系的位置,在数学上还要在参考系中建立坐标系,直角坐标系是一种常用的坐标系。图 1.1 表示一个固定于某一参考系中的直角坐标系,图中 i, j, k 是三个坐标轴方向的单位矢量,它们的长度恒为 1。

在图 1.1 中,设质点在 t 时刻运动到 P 点,质点的位置可用 P 点的坐标表示。即

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t) \quad (1.1)$$

上式称为质点的运动函数,它描述质点的位置随时间的变化情况。运动质点所经过的路径叫轨道,把(1.1)式中的时间 t 消去,得到的曲线方程就是质点的轨道方程。

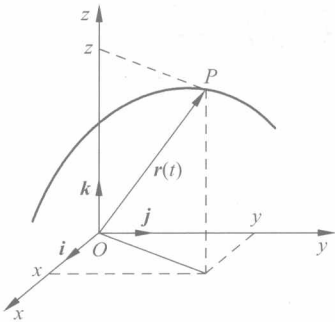


图 1.1 坐标和位矢

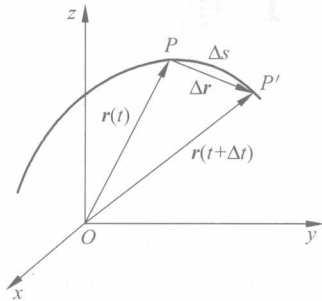


图 1.2 位移和路程

质点的位置也可以用从原点 O 引向 P 点的矢量 \boldsymbol{r} 表示, 矢量 \boldsymbol{r} 叫做质点的位置矢量, 简称位矢。在质点运动过程中, 位矢 \boldsymbol{r} 的端点所形成的曲线就是质点的轨道。由于 $x(t)$ 、 $y(t)$ 、 $z(t)$ 代表 t 时刻 P 点的坐标, 所以有

$$\boldsymbol{r} = x(t)\boldsymbol{i} + y(t)\boldsymbol{j} + z(t)\boldsymbol{k} \quad (1.2)$$

上式称做位矢在直角坐标系中的分量式, $x(t)$ 、 $y(t)$ 、 $z(t)$ 叫做位矢在直角坐标系中的分量。

通常把(1.2)式写成

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t) \quad (1.3)$$

这是运动函数的矢量形式。

在一段时间内运动质点位矢的增量, 称为质点在这段时间内的位移。如图 1.2 所示, 如果质点在 t 时刻的位矢为 $\boldsymbol{r}(t)$, 经过 Δt 时间后变成 $\boldsymbol{r}(t + \Delta t)$, 则质点的位移

$$\Delta \boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t + \Delta t) - \boldsymbol{r}(t) \quad (1.4)$$

位移是一个矢量, 其大小 $|\Delta \boldsymbol{r}|$ 等于线段 PP' 的长度, 方向是由 P 点指向 P' 点。一般地说 $|\Delta \boldsymbol{r}| \neq \Delta r$, 因为 $\Delta \boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t + \Delta t) - \boldsymbol{r}(t)$, 它只是位矢大小的增量。

在图 1.2 中, Δs 代表质点沿轨道从 P 点到 P' 点所经过的路程。在一般情况下 $|\Delta \boldsymbol{r}| \neq \Delta s$, 但是当 Δt 趋于零时, $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} |\Delta \boldsymbol{r}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta s$, 因此 $|\mathrm{d}\boldsymbol{r}| = \mathrm{d}s$ 。

1.1.2 速度

质点的位移与发生位移的时间间隔之比, 称为质点在这段时间内的平均速度。用 $\bar{\boldsymbol{v}}$ 表示平均速度, 如图 1.3 所示, 有

$$\bar{\boldsymbol{v}} = \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} \quad (1.5)$$

平均速度是一个矢量, 其大小等于 $|\Delta \boldsymbol{r}|/\Delta t$, 方向与位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 相同。平均速度只能粗略地反映质点在 Δt 时间内运动的快慢和方向。

当 Δt 趋于零时, 对平均速度取极限并用 \boldsymbol{v} 表示, 则有

$$\boldsymbol{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t} \quad (1.6)$$

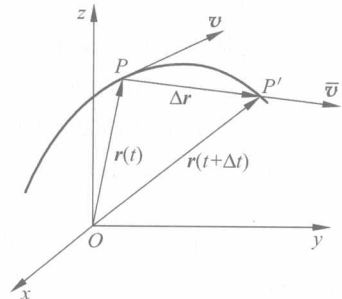


图 1.3 平均速度和瞬时速度