

面向21世纪普通高等教育规划教材

P U T O N G W U L I X U E

普通物理学 (上册)

主 编 王殿元 谢卫军



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

面向 21 世纪普通高等教育规划教材

普通物理学

(上册)

主 编	王殿元	谢卫军		
副主编	罗江龙	聂映中	黄天成	
编 者	王殿元	余里生	余傲秋	罗江龙
	张 逸	胡 华	邹俊生	杨锋涛



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书是根据教育部最新发布的《非物理类理工科大学物理课程教学基本要求(正式报告稿)》,借鉴国内外优秀大学物理教材,由多名富有教学经验的一线教师结合多年教学改革实践编写而成的.在内容编排上,充分保证了新“基本要求”中 A 类知识点,同时对 B 类知识点亦有选择性地适当拓展.

全书分上、下两册,上册包括力学、机械振动和机械波、热学,其中,力学部分增加了流体力学和狭义相对论;下册包括电磁学、光学和近代物理学,其中,光学中增加了几何光学,在近代物理学中增加了核物理与粒子物理简介.每章后面附有习题及阅读材料,书后附有习题的参考答案.

全书思路清晰、语言简练、知识系统、结构合理,重物理思想和物理图像,可读性和趣味性都很强.可作为普通高等院校理科、工科和医科等各专业大学物理课教材,并可兼作函授、夜大、网络教育、高职高专及高等自学考试的教学用书.

图书在版编目(CIP)数据

普通物理学.上册/王殿元,谢卫军主编. —上海:同济大学出版社,2008.8

面向 21 世纪普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-5608-3907-3

I. 普… II. ①王…②谢… III. 普通物理学—高等学校—教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 105034 号

面向 21 世纪普通高等教育规划教材

普通物理学(上册)

主 编 王殿元 谢卫军

责任编辑 张 莉 责任校对 徐春莲 封面设计 潘向葵

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂

开 本 787 mm×960 mm 1/16

印 张 22.25

印 数 1—5100

字 数 445 000

版 次 2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-3907-3/O·324

定 价 33.00 元

前 言

物理学是一门以实验为基础的自然科学,是高等学校理工科各专业学生重要的通识教育必修课之一.该课程所教授的基本概念、基本理论和基本方法是构成学生科学素养的重要组成部分,是一个科学工作者和工程技术人员所必备的基本技能.同时,大学物理课程在培养学生树立科学的世界观,增强学生分析问题和解决问题的能力,培养学生的探索精神和创新意识等方面,具有其他课程不能替代的重要作用.

本书是根据教育部最新发布的《非物理类理工学科大学物理课程教学基本要求(正式报告稿)》(以下简称“基本要求”),借鉴国内外优秀大学物理教材,结合多年教学改革与实践经验,由多名富有教学经验的一线教师编写而成的.总的说来,本书在编写过程中力求做到以下几点:

(1) 在内容编排上,充分保证了新“基本要求”中 A 类知识点,特别是重要章节,不惜重墨缕述;同时对 B 类知识点,亦根据需要,有选择性地作适当拓展.

(2) 在内容叙述上,重物理学基本知识、基本概念、基本原理和定律的清晰阐述以及物理图像的明确揭示;而轻定理和定律的复杂数学推导.旨在使读者从中领会一些物理学的思想和方法.

(3) 在阅读材料选择上,以联系工程技术实际和科技前沿为原则,反映近代物理成就及其在科学和技术领域中的应用,力求激发学生对物理等自然学科的兴趣.

(4) 适当考虑到双语教学的需要,在书中首次出现的重要物理名词加了英文注释,以适应不同高校教师和学生的需要.

全书分上、下两册出版,上册包括第 1 篇力学,第 2 篇机械振动和机械波,第 3 篇热学;下册包括第 4 篇电磁学,第 5 篇光学和第 6 篇近代物理学.书中除每章之后的阅读材料供学生选读外,凡冠有 * 号的章节可供教师根据课时数和专业的需要选用.

本书由王殿元、谢卫军主编,罗江龙、聂映中、黄天成副主编,参加编写的人员有王殿元、余里生、余傲秋、罗江龙、张逸、胡华、邹俊生和杨锋涛.

在本书的编写的过程中,得到作者单位领导们的大力支持.同时,在编写时参阅了有关书籍和文献,在此一并表示诚挚的谢意.

由于本书的编写比较仓促,也限于编者的学术水平,书中难免存在错漏之处,望老师和同学们在使用过程中多提宝贵意见,我们将在今后的再版中加以纠正,使教材日趋完善.

编 者

2008年6月

目 录

前言

第1篇 力 学

1 质点运动学	2
1.1 参考系 时间和空间	2
1.1.1 参考系 坐标系	2
1.1.2 时间	2
1.1.3 长度的测量	3
1.2 质点运动的描述	4
1.2.1 质点	4
1.2.2 位置矢量 运动方程	4
1.2.3 位移和路程	5
1.2.4 速度和速率	6
1.2.5 加速度	7
1.2.6 运动学中的两类问题	7
1.3 质点运动几种典型形式	10
1.3.1 匀速直线运动	10
1.3.2 匀变速直线运动	11
1.3.3 抛体运动	12
1.3.4 自然坐标系 圆周运动	14
1.4 相对运动	19
阅读材料(1) 伽利略的科学成就	21
习题1	23
 2 牛顿定律	25
2.1 牛顿定律	25
2.1.1 牛顿第一定律	25
2.1.2 牛顿第二定律	26
2.1.3 牛顿第三定律	27
2.2 物理量的单位和量纲	27

2.3 几种常见的力	28
2.3.1 万有引力 重力	28
2.3.2 弹性力	29
2.3.3 摩擦力	30
2.4 牛顿定律的应用	30
* 2.5 非惯性系 惯性力	34
2.5.1 伽利略相对性原理	34
2.5.2 平动加速参考系 平动惯性力	35
2.5.3 匀速转动参考系 惯性离心力 科里奥利力	36
阅读材料(2) 失重、微重力和超重	36
习题 2	37
3 动量和动量守恒定律	41
3.1 质点和质点系的动量定理	41
3.1.1 冲量 质点的动量定理	41
3.1.2 质点系的动量定理	42
3.2 动量守恒定律	44
3.2.1 动量守恒定律	44
* 3.2.2 火箭的运动	46
* 3.3 质心 质心运动定理	48
3.3.1 质心	48
3.3.2 质心运动定理	49
3.3.3 质心系	50
阅读材料(3) 宇宙飞船	50
习题 3	51
4 功和能	54
4.1 功 功率	54
4.1.1 功	54
4.1.2 功率	58
4.2 动能 动能定理	59
4.2.1 质点的动能定理	59
4.2.2 质点系的动能定理	61
4.3 保守力和非保守力	63
4.3.1 保守力	63

4.3.2 非保守力	65
4.4 势能 势能曲线	65
4.4.1 势能	65
4.4.2 力学中几种常见的势能	66
4.4.3 势能曲线	67
4.5 功能原理 机械能守恒定律	68
4.5.1 质点系的功能原理	68
4.5.2 机械能守恒定律	72
4.5.3 宇宙速度	75
4.6 能量守恒定律	77
阅读材料(4) 能源的开发与利用	77
习题4	80
5 角动量 角动量守恒定律	84
5.1 力矩 角动量	84
5.1.1 质点受力的力矩	84
5.1.2 质点角动量	85
5.1.3 质点系的角动量	85
5.2 质点角动量定理与角动量守恒定律	86
5.2.1 质点角动量定理	86
5.2.2 质点角动量守恒定律	87
5.3 质点系的角动量定理与角动量守恒定律	88
5.3.1 质点系的角动量定理	88
5.3.2 质点系的角动量守恒定律	89
阅读材料(5) 对称性与守恒定律	90
习题5	95
6 刚体的转动	97
6.1 刚体运动的描述	97
6.1.1 刚体	97
6.1.2 刚体的自由度	97
6.1.3 刚体运动的几种形式	98
6.2 刚体定轴转动的描述	99
6.3 定轴转动定理 转动惯量	102
6.3.1 定轴转动定律	102

6.3.2	刚体定轴转动定律的应用	104
6.3.3	转动惯量的计算	106
6.4	定轴转动刚体的角动量定理与角动量守恒定律	111
6.4.1	定轴转动刚体的角动量定理	111
6.4.2	定轴转动刚体的角动量守恒定律	112
6.5	力矩的功 刚体定轴转动的动能定理	115
6.5.1	刚体定轴转动动能与力矩的功	115
6.5.2	刚体定轴转动的动能定理	116
6.6	刚体的势能	118
* 6.7	刚体的进动	121
	阅读材料(6) 拉莫尔进动	123
	习题 6	126
7	流体力学简介	130
7.1	流体静力学	130
7.1.1	静止流体内的压强	131
7.1.2	液体的表面张力	131
7.2	理想流体的定常流动	131
7.2.1	定常流动	131
7.2.2	连续性方程	132
7.2.3	伯努利方程	132
7.2.4	伯努利方程的应用	133
7.3	黏滞流体的流动	134
7.3.1	流体的黏滞性	134
7.3.2	黏滞流体的运动规律	135
	阅读材料(7) 血液的流动	136
	习题 7	137
8	狭义相对论	139
8.1	相对论产生的背景	139
8.1.1	牛顿力学的时空观	140
8.1.2	爱因斯坦的两个基本假设	143
8.2	爱因斯坦的时空观	144
8.2.1	同时性的相对性	144
8.2.2	时间延缓	146

8.2.3 长度收缩	148
8.3 洛伦兹变换和速度的合成	152
8.3.1 洛伦兹变换	152
8.3.2 速度的变换	155
8.4 几个经典佯谬	157
8.4.1 因果关系	157
8.4.2 孪生子效应	158
8.4.3 高速物体的视觉效应	159
8.5 相对论力学中的牛顿第二定律	161
8.5.1 相对论质量和动量	162
8.5.2 力和加速度的关系	164
8.6 相对论能量	167
8.6.1 相对论动能	167
8.6.2 质能关系	168
8.6.3 能量和动量的关系	171
阅读材料(8) 星系的诞生与演化	171
习题 8	173

第 2 篇 机械振动和机械波

9 机械振动	176
9.1 简谐运动	176
9.1.1 简谐运动的特征及其运动方程	176
9.1.2 描述简谐运动的基本物理量	178
9.2 简谐运动的旋转矢量法	183
9.2.1 旋转矢量法	183
9.2.2 旋转矢量图的应用	185
9.3 单摆和复摆	187
9.3.1 单摆	187
9.3.2 复摆	188
9.4 简谐运动的能量	190
9.5 简谐运动的合成	192
9.5.1 两个同方向同频率的简谐运动的合成	192
9.5.2 两个同方向不同频率的简谐运动的合成 拍	195
* 9.5.3 两个相互垂直的简谐运动的合成	196
* 9.6 阻尼振动 受迫振动 共振	199

9.6.1 阻尼振动	199
9.6.2 受迫振动	201
9.6.3 共振	203
阅读材料(9) 混沌与物理	204
习题 9	208
10 机械波	212
10.1 机械波的产生和传播	212
10.1.1 机械波的形成	212
10.1.2 横波与纵波	212
10.1.3 波长 波的周期和频率 波速	214
10.1.4 波的几何表示法	216
10.2 平面简谐波的波函数	217
10.2.1 平面简谐波的波函数	217
10.2.2 波函数的物理意义	220
* 10.2.3 波动微分方程	225
10.3 波的能量	226
10.3.1 波动能量的传播	226
10.3.2 能流和能流密度	228
10.4 惠更斯原理 波的衍射、反射和折射	230
10.4.1 惠更斯原理	230
10.4.2 波的衍射	231
10.4.3 波的反射和折射	232
10.5 波的干涉	233
10.5.1 波的叠加原理	233
10.5.2 波的干涉	234
10.6 驻波	237
10.6.1 驻波的形成	237
10.6.2 驻波方程	238
10.6.3 驻波的能量	241
10.6.4 半波损失	241
10.7 多普勒效应	243
* 10.8 声波	247
10.8.1 声强和声强级	248

10.8.2 声压	250
阅读材料(10) 次声波 超声波 冲击波	251
习题 10	253

第3篇 热 学

11 热力学基础	258
11.1 平衡态 理想气体物态方程 热力学第零定律	258
11.1.1 状态参量	258
11.1.2 平衡态	259
11.1.3 理想气体的物态方程	259
11.1.4 热力学第零定律	260
11.2 热力学第一定律	261
11.2.1 准静态过程	261
11.2.2 功	262
11.2.3 热量	263
11.2.4 热力学第一定律	264
11.3 热力学第一定律的应用	265
11.3.1 理想气体的等体过程 气体定体摩尔热容	265
11.3.2 理想气体的等压过程 气体定压摩尔热容	267
11.3.3 理想气体的等温过程	268
11.3.4 绝热过程 多方过程	270
11.4 循环过程 卡诺循环	276
11.4.1 循环过程	276
11.4.2 热机和制冷机	277
11.4.3 卡诺循环	280
11.5 热力学第二定律 卡诺定理	283
11.5.1 热力学第二定律	283
11.5.2 实际过程的不可逆性	285
11.5.3 卡诺定理	286
11.6 熵 熵增加原理	287
11.6.1 熵	287
11.6.2 熵变的计算	289
11.6.3 熵增加原理	291
阅读材料(11) 永动机幻想的破灭	292

习题 11	294
12 气体动理论	298
12.1 气体动理论基本观点与方法	298
12.1.1 物质微观结构的观点	298
12.1.2 统计规律与统计方法	299
12.2 气体分子的统计分布律	302
12.2.1 麦克斯韦速率分布律	302
* 12.2.2 玻耳兹曼分布律	306
12.3 气体宏观性质的微观解释	308
12.3.1 理想气体的微观模型	308
12.3.2 理想气体压强的微观实质	309
12.3.3 温度的微观实质	311
* 12.3.4 实际气体的范德瓦耳斯方程	312
12.4 热运动能量的统计规律	315
12.4.1 分子自由度	316
12.4.2 能量按自由度均分定理	316
12.4.3 理想气体的内能和热容	317
12.5 气体内输运现象及微观机制	320
12.5.1 分子的平均自由程	320
* 12.5.2 黏滞现象及微观解释	323
* 12.5.3 热传导现象及微观解释	324
* 12.5.4 扩散现象及微观解释	325
* 12.5.5 三种输运现象的比较	326
12.6 热力学第二定律和熵的统计意义	326
12.6.1 宏观态与微观态	326
12.6.2 热力学第二定律的微观解释	328
12.6.3 熵的微观实质	329
阅读材料(12) 低温技术简介	330
习题 12	333
习题参考答案	334
参考文献	343

第 1 篇 力 学

一切物质都在不断地运动、变化着,绝对不动的物质是不存在的.在物质的各种运动形式中,最普遍而又最基本的一种运动形式是一个物体相对于另一个物体(或一个物体的某一部分相对于另一部分)的空间位置的改变,这种运动形式称为机械运动(mechanical motion).例如,车辆的奔驰、机器的运转、空气的流动、星体的运行,等等,都是机械运动.在机械运动中,位置的变化可以很巨大,也可以相当微小.

物体的机械运动遵循一定的客观规律.力学(mechanics)就是研究物体机械运动及其规律的学科.力学的历史悠久,是人类最早建立的学科之一.早在公元前 3 世纪,古希腊物理学家阿基米德就研究了杠杆原理、浮力定律等内容;意大利艺术家、物理学家达·芬奇(Leonardo de Vinci, 1452—1519)研究了力的平衡,初步形成了力矩的概念;波兰天文学家哥白尼(Mikołaj kopernik, 1473—1543)提出了日心说,引起了宇宙观的大革命;开普勒(Kopler Johannes, 1571—1630)根据哥白尼的学说及天文观察资料建立起行星运动三定律;近代物理学先驱伽利略(Galileo Galilei, 1564—1642)准确提出速度和加速度的概念,正确地指出了抛体和斜面运动的规律,他还提出了惯性定律,把力的作用同物体运动状态的变化联系起来,从而奠定了动力学的基础;英国物理学家牛顿(Isaac Newton, 1642—1727)在总结前人研究的基础上,提出了动力学的三个基本定律和万有引力定律,建立了整个经典力学的基础.而欧勒(Leonhard Euler, 1707—1783)和拉格朗日(Joseph Louis Lagrange, 1736—1813)等人在前人研究的基础上,进一步使力学沿分析的方向发展,成为一门严密、完整的数理科学.20 世纪初,相对论和量子力学的相继建立,解决了经典力学所不能解决的高速(接近光速)运动和微观粒子运动的问题.

力学的研究内容是力与物体运动的关系.通常把力学分为运动学(kinematics)、动力学(dynamics)和静力学(statics),运动学研究的是物体在运动过程中位置与时间的关系;动力学研究的是物体的运动与物体间相互作用的内在联系和规律;静力学则是研究物体在力的作用下处于平衡的规律,以及如何建立各种力学的平衡条件.

力学是物理学的起点,也是整个物理学的“基石”,因此,掌握力学知识对学好物理学的其他内容是极其重要的.

1 质点运动学

质点运动学是从几何的观点研究和描述作机械运动的物体在空间的位置随时间变化而变化的关系,并不涉及运动发生的原因.本章在引入参考系、坐标系、质点等概念的基础上,定义了描述质点运动的物理量,如位置矢量、位移、速度和加速度等,进而讨论这些量随时间的变化关系,最后还介绍了相对运动.

1.1 参考系 时间和空间

1.1.1 参考系 坐标系

自然界中所有的物体都在不停地运动着,绝对静止的物体是没有的,这就是运动的绝对性;同时,运动还具有相对性.描述一个物体的运动时,首先选定某一物体作为参考物体,选定的参考物体不同,运动的描述也就可能不同,这种被选作参考的物体称为参考物.与参考物固连的空间称为参考空间.而参考空间和与之固连的钟的组合称为参考系(reference system).但习惯上,常把参考物简称为参考系,并不特别指出与之相连的参考空间和钟.参考系选定后,为了定量地描述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(coordinate system).因此,坐标系是参考系的数学表示.尽管坐标系的选取是完全任意的,然而一旦选定坐标系,物体运动的描述便随之确定.常用的坐标系有直角坐标系(又称笛卡儿坐标系)、平面极坐标系、球坐标系和柱坐标系等.本书中若不特别指明,我们均采用直角坐标系.需要说明的是,物体的运动状态与选择的参考系密切相关(运动是相对的),而与选取何种类型的坐标系无关.同时必须注意,求解运动学问题时,需将各类物理量变换到同一参考系中分析求解.

1.1.2 时间

描写物体的运动,要用到时间(time)和空间(space)这两个概念.虽然在生活中我们对时间和空间已经比较熟悉,但是要问你什么是时间,什么是空间,却又不容易找到恰当的答案.所谓时间,是用以表述事件之间的先后顺序性和持续性,空间是用以表述事物相互之间的位形.尽管对时间和空间没有“严格”的理论定义,但这并不影响二者在物理中的使用.因为,物理学是一门基于实验的科学,首要应考虑的问题不是它们的定义,而是了解它们是怎样量度的.

一切周期运动都可以用来量度时间. 太阳的升起和降落表示天(日), 四季的循环表示年, 月亮的盈亏是农历的月, 这些均已为我们所熟悉, 因而年、月、日一直是世界各民族计量时间的单位和标准. 日晷仪就是古代用来测量时间的工具(图 1-1). 为了更精细地量度时间, 我国古代将 1 日分为 10 时, 1 时分为 10 刻; 又将 1 日分为 12 个辰; 近代将 1 日分为 24 个小时, 1 小时分为 60 分钟, 1 分钟分为 60 秒.

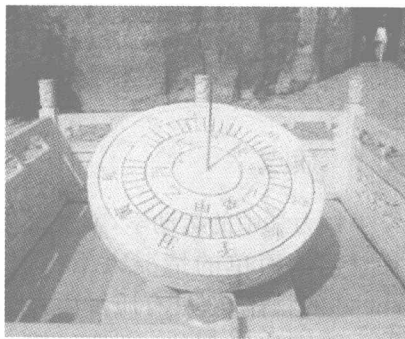


图 1-1 日晷仪

目前, 国际通用的时间单位是秒(s). 1967 年 10 月在第十三届国际度量衡会议上决定采用原子的跃迁辐射作为计时标准, 规定 1 秒为位于海平面上的 ^{133}Cs 原子的基态的两个超精细能级在零磁场中跃迁辐射的周期 T 的 9 192 631 770 倍. 此时间标准称为原子时.

在自然界中, 任何的现象都有一个时间尺度. 如宇宙的年龄大约是 6×10^{17} s, 即 200 亿年; 地球自转一周约为 8.64×10^4 s; μ 子的寿命是 2×10^{-6} s; 一个分子里的一个原子完成一次典型的振动需要 $10^{-14} \sim 10^{-13}$ s. 目前, 物理学中涉及的最长时间是 10^{38} s, 它是质子寿命的下限, 涉及的最小的时间是 10^{-43} s, 称为普朗克时间. 普朗克时间被认为是最小的时间, 比普朗克时间还要小的范围内, 时间的概念可能就不再适用了.

1.1.3 长度的测量

长度(length)是空间的一个基本性质. 对于长度的测量, 在古代常常以人体的某部分作为单位和标准, 这显然不能取作统一的标准. 以客观存在的不变事物作为长度的标准是一种必然的趋势. 目前国际通用的长度单位是米, 用符号 m 表示. 1960 年以前, 用铂铱米尺作为标准尺, 规定米的大小. 1960 年以后, 改用光的波长作为标准. 在第十一届国际计量大会上规定, 1 米等于 ^{86}Kr 原子 $2p_{10}$ 和 $5d_5$ 能级之间跃迁辐射在真空中波长的 1 650 763. 73 倍. 1983 年, 第十七届国际计量大会上又通过了米的新定义: 米是光在真空中 $1/299\,792\,458$ s 的时间间隔内所传播的路程长度. 按这种新的定义, 光速是一个固定的常数, 从而将长度标准和时间标准统一了起来, 并使长度计量的精度提高到与时间计量相同的精度.

目前, 物理学中涉及的最大长度是 10^{28} m, 它是宇宙曲率半径的下限; 已达到的最小长度为 10^{-20} s, 它是弱电统一的特征尺度. 普朗克长度约为 10^{-35} s, 被认为是最小的长度, 意思是说, 在比普朗克长度更小的范围内, 长度的概念可能就不再适用了.

1.2 质点运动的描述

1.2.1 质点

牛顿力学中的运动学,就是研究如何描述物体位置随时间的变化.研究问题往往总是从简单的情况入手,我们首先讨论一种被称为质点(mass point, particle)的物体,即具有质量而大小为几何点的物体.我们知道,任何实际物体都有一定的大小、形状和内部结构,没有任何一个真实物体与质点等价.但是,当我们仅考察物体的整体运动,物体本身的大小比所考察运动的线度又小得多时,就可以不计物体各部分运动情况的差别而把它看作一个质点.

质点是一种理想的力学模型,它突出了物体具有质量和占有空间位置这两个主要因素,而忽略了形状、大小及内部运动等次要因素.在物理上,这种突出研究对象的主要特征而忽略其次要特征的理想模型是常用的,例如后面将要讨论的刚体、点电荷、理想气体、理想流体等.

1.2.2 位置矢量 运动方程

为了描述质点在空间的位置及其随时间的变化,我们引入位置矢量(position vector)的概念(简称位矢).在一选定的参考系上建立坐标系,从坐标系原点引一条有向线段指向质点所在空间的位置,该有向线段就称为质点在该位置的位矢.如图 1-2 所示,质点 P 在某一时刻位于直角坐标系中的 (x, y, z) 位置,其位矢 $\mathbf{r}$ 可表示为

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

其中的 $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 分别是沿坐标轴 x, y, z 正方向的单位矢量,位矢的大小为

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

其方向由方向余弦确定

$$\cos \alpha = \frac{x}{r}, \cos \beta = \frac{y}{r}, \cos \gamma = \frac{z}{r}. \quad (1-2)$$

式中, α, β, γ 分别是 $\mathbf{r}$ 与 x 轴, y 轴和 z 轴之间的夹角.

当质点运动时,它相对坐标原点 O 的位矢 $\mathbf{r}$ 随时间变化,是时间的函数(图 1-3)记为 $\mathbf{r}(t)$,则有

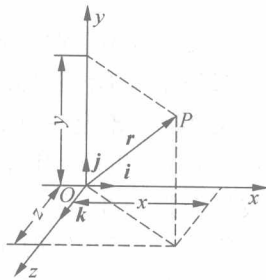


图 1-2 位置矢量