



普通高等教育“十三五”规划教材

# 大学物理

(上册)

主编 王金凤

 中国石油大学出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

# 大学物理

(上册)

王金凤 主编

华中师范大学出版社

## 内 容 简 介

本书的编写参照了教育部理工类物理基础课程教学基本要求,内容包括力学、机械振动、机械波和热学部分。此书吸取了许多同类教材的优点,采纳了大量教学实践中的建议,简单明了、难度适中,注重学生科学思维方法的培养及分析、解决问题能力的提高。

本书可作为普通高等院校、独立学院、应用技术型民办高校的本科教学用书,或作为自学或自考用书。

## 新出图证(鄂)字 10 号

### 图书在版编目(CIP)数据

大学物理.上册/王金凤主编. —武汉:华中师范大学出版社,2019. 1  
(普通高等教育“十三五”规划教材)  
ISBN 978-7-5622-8460-4

I. ①大… II. ①王… III. ①物理学—高等学校—教材 IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 002490 号

## 大学物理(上册)

© 王金凤 主编

编辑室:第二编辑室

责任编辑:苏 睿

出版发行:华中师范大学出版社

邮 编:430079

邮购电话:027-67861321

网址:<http://press.ccnu.edu.cn>

印刷:湖北新华印务有限公司

开本:787mm×1092mm 1/16

版次:2019年1月第1版

印数:1—3000

电 话:027-67867362

责任校对:罗 艺 封面设计:罗明波

社址:湖北省武汉市珞喻路 152 号

销售电话:027-67863426/67861549

传 真:027-67863291

电子信箱:[press@mail.ccnu.edu.cn](mailto:press@mail.ccnu.edu.cn)

督印:王兴平

印 张:14.75 字数:300千字

印 次:2019年1月第1次印刷

定 价:36.00元

敬告读者:欢迎举报盗版,请打举报电话 027-67861321

# 前 言

物理学是研究物质结构、性质、运动和相互作用基本规律的科学,是人类认识自然、改造自然和推动社会进步的动力和源泉。物理学作为一门基础科学,可以使人们很好地认识世界、了解自然。同时,它对人们改造自然,推动社会发展也起着极其重要的作用。

物理学的发展密切影响着工业、农业等领域的发展,也同人类文明的进步息息相关。从电话的发明到当代互联网络的实时通信,从蒸汽机车的成功制造到磁悬浮列车的投入运行,从晶体管的发明到高速计算机技术的成熟等,这些无不体现着物理学对社会进步与人类文明的贡献。

大学物理是高等院校理工科各专业的重要基础课,掌握一点物理学知识是大学生综合素质培养的重要组成部分。基于国家对新时代高等院校培养应用型人才的基本要求和民办院校教学的现状,我们编写了这套《大学物理》教材。

本套教材内容体系简明清晰,基本概念透彻易懂,原理公式准确明了,避免了艰深、晦涩的内容。编写时,在保证物理学理论体系的科学性、完整性、系统性的前提下,我们还着重凸显了“加强基础,提高能力,削枝强干,突出主线”等特点,具体表现为:

1. 内容选取尽量照顾不同专业的需求,广而不深,与民办高校应用型人才培养目标相契合。
2. 内容呈现由浅入深,由易到难,由具体到抽象,图文结合,注重直观性,通俗易懂,便于自学。
3. 论述和演练力求简洁明了,尽量避免或简化复杂的数学推导,尽可能地凸显物理学本质。
4. 强化对物理学概念、定律和定理的理解,着重对解决问题的思路和方法的阐述。
5. 实例丰富,不仅向学生传授物理学知识,还强调对学生学习兴趣、学习能力、思维方式的培养。

本套教材分上、下两册,上册包括力学、机械振动、机械波和热学等内容,下册包

括电学、磁学、光学等内容。

本套教材由武汉华夏理工学院组织编写。在编写过程中,我们参考了市场上大量的优质资料和相关文献,在许多方面深受启发;方华为、薛霞、朱凌、陶波林、向旭、王国标、潘麒祺、陈庆晓、方小为在编写过程中也给我们提供了很大的支持和帮助;在此,对这些文献资料的作者,对所有参与这项编写工作的人员一并表示衷心的感谢。

由于水平有限,加之时间仓促,教材中难免存在诸多不妥之处,恳请广大专家、读者批评指正。

编者  
2018年11月

# 目 录

<b>第 1 章 质点运动学</b> .....	1
1.1 质点运动的描述 .....	1
1.1.1 质点 .....	1
1.1.2 参考系 坐标系 .....	1
1.1.3 位置矢量与运动方程 .....	2
1.1.4 位移与路程 .....	4
1.1.5 速度 .....	6
1.1.6 加速度 .....	10
1.2 质点运动学的两类问题 .....	15
1.2.1 第一类问题 .....	15
1.2.2 第二类问题 .....	16
1.3 圆周运动 .....	19
1.4 相对运动 .....	23
习题 1 .....	26
<b>第 2 章 牛顿运动定律</b> .....	28
2.1 牛顿运动定律 .....	28
2.1.1 牛顿第一定律 惯性参考系 .....	28
2.1.2 牛顿第二定律 .....	29
2.1.3 牛顿第三定律 .....	30
2.2 常见的几种力 .....	31
2.2.1 重力 .....	31
2.2.2 弹力 .....	31
2.2.3 摩擦力 .....	33
2.2.4 万有引力 .....	34
2.3 牛顿运动定律的应用 .....	34
2.4 惯性力 .....	37
习题 2 .....	38

<b>第 3 章 能量与动量</b> .....	40
3.1 功 势能 .....	40
3.1.1 功 功率 .....	40
3.1.2 保守力做功 .....	43
3.1.3 势能 .....	45
3.2 质点与质点系的动能定理 机械能守恒 .....	47
3.2.1 质点的动能定理 .....	47
3.2.2 质点系的动能定理 .....	50
3.2.3 质点系的功能原理 .....	50
3.2.4 机械能守恒定律 .....	52
3.2.5 能量守恒定律 .....	52
3.3 冲量 动量 动量守恒 .....	53
3.3.1 冲量 .....	53
3.3.2 质点的动量定理 .....	54
3.3.3 质点系的动量定理 .....	56
3.3.4 动量守恒定律 .....	59
习题 3 .....	60
<b>第 4 章 刚体力学</b> .....	63
4.1 刚体的基本运动 .....	63
4.1.1 刚体 .....	63
4.1.2 刚体的平动 .....	63
4.1.3 刚体定轴转动的描述 .....	64
4.2 力矩 转动惯量 刚体定轴转动定律 .....	68
4.2.1 力矩 .....	68
4.2.2 刚体的转动惯量 .....	70
4.2.3 刚体的定轴转动定律 .....	74
4.3 角动量定理 角动量守恒定律 .....	77
4.3.1 质点的角动量 .....	77
4.3.2 质点的角动量定理 .....	79
4.3.3 质点的角动量守恒定律 .....	80
4.3.4 刚体定轴转动的角动量 .....	81
4.3.5 刚体定轴转动的角动量定理 .....	82
4.3.6 刚体定轴转动的角动量守恒 .....	82

4.4 刚体定轴转动的功和能·····	85
4.4.1 力矩的功·····	85
4.4.2 刚体定轴转动动能·····	86
4.4.3 刚体绕定轴转动的动能定理·····	87
4.4.4 刚体的重力势能·····	89
4.4.5 刚体定轴转动的机械能守恒定律·····	89
习题 4 ·····	92
<b>第 5 章 狭义相对论的力学基础</b> ·····	<b>95</b>
5.1 伽利略变换 经典力学时空观与相对性原理·····	95
5.1.1 伽利略坐标变换式·····	95
5.1.2 经典力学(牛顿力学)时空观·····	96
5.1.3 经典力学相对性原理·····	97
5.2 迈克尔逊—莫雷实验·····	98
5.3 狭义相对论基本假设 洛伦兹变换 ·····	100
5.3.1 爱因斯坦狭义相对论的基本假设 ·····	100
5.3.2 洛伦兹变换式 ·····	101
5.3.3 相对论速度变换式 ·····	104
5.4 狭义相对论的同时性 长度与时间 ·····	107
5.4.1 同时性的相对性 ·····	107
5.4.2 长度的相对性 ·····	109
5.4.3 时间膨胀 ·····	111
5.4.4 光的多普勒效应 ·····	113
5.4.5 海军卫星 ·····	114
5.5 狭义相对论的动力学基础 ·····	115
5.5.1 狭义相对论的质—速关系 ·····	115
5.5.2 狭义相对论力学的基本方程 ·····	118
5.5.3 狭义相对论的质量与能量的关系 ·····	118
5.5.4 狭义相对论中的动量与能量的关系 ·····	120
习题 5 ·····	123
<b>第 6 章 机械振动</b> ·····	<b>124</b>
6.1 简谐振动 ·····	124
6.1.1 简谐振动的描述 ·····	124
6.1.2 描述简谐振动的特征量 ·····	126

6.1.3	简谐振动的旋转矢量法 .....	130
6.1.4	简谐振动的能量 .....	133
6.2	简谐振动的合成 .....	135
6.2.1	同方向、同频率简谐振动的合成 .....	135
6.2.2	两个同方向、不同频率的简谐振动的合成 .....	138
6.2.3	两个相互垂直的、同频率的简谐振动的合成 .....	139
6.2.4	两个相互垂直的、频率不同的简谐振动的合成 .....	141
6.3	阻尼振动 受迫振动 共振 .....	142
6.3.1	阻尼振动 .....	142
6.3.2	受迫振动 共振 .....	142
	习题 6 .....	143
<b>第 7 章</b>	<b>机械波</b> .....	<b>146</b>
7.1	机械波的产生与传播 .....	146
7.1.1	机械波的形成 .....	146
7.1.2	横波与纵波 .....	146
7.1.3	波面与波线 .....	147
7.1.4	描述波的物理量 .....	148
7.2	平面简谐振动的描述 .....	148
7.2.1	平面简谐振动的波函数 .....	148
7.2.2	波函数的物理意义 .....	150
7.3	波的能量 .....	157
7.3.1	波的能量和能量密度 .....	157
7.3.2	能量密度 .....	158
7.3.3	波的能流密度 .....	158
7.4	波的衍射 .....	159
7.4.1	惠更斯原理 .....	159
7.4.2	波的衍射 .....	160
7.5	波的干涉 驻波 .....	161
7.5.1	波的叠加原理 .....	161
7.5.2	波的干涉 .....	162
7.5.3	驻波 .....	166
7.5.4	半波损失 .....	168
7.6	声波 超声波 次声波及应用 .....	170
7.6.1	声波 .....	170

7.6.2 超声波 .....	171
7.6.3 次声波 .....	171
习题7 .....	172
<b>第8章 气体动理论</b> .....	<b>175</b>
8.1 平衡态 理想气体物态方程 .....	175
8.1.1 气体动理论的基本观点 .....	175
8.1.2 平衡态 气体的状态参数 .....	176
8.1.3 理想气体的状态方程 .....	178
8.2 理想气体的压强与温度 .....	179
8.2.1 理想气体的微观模型 .....	179
8.2.2 平衡态的统计假设 .....	179
8.2.3 理想气体的压强公式 .....	180
8.2.4 理想气体的温度 .....	182
8.3 能量均分定理 理想气体的内能 .....	183
8.3.1 自由度 .....	183
8.3.2 能量均分定理 .....	184
8.3.3 理想气体的内能 .....	185
8.4 麦克斯韦速率分布律 .....	186
8.4.1 麦克斯韦速率分布律 .....	186
8.4.2 三种统计速率 .....	188
习题8 .....	192
<b>第9章 热力学基础</b> .....	<b>194</b>
9.1 功 热量 内能 .....	194
9.1.1 准静态过程 .....	194
9.1.2 功 .....	194
9.1.3 热量 .....	195
9.1.4 内能 .....	196
9.2 热力学第一定律及应用 .....	196
9.2.1 热力学第一定律 .....	196
9.2.2 等容过程 .....	197
9.2.3 等压过程 .....	198
9.2.4 等温过程 .....	200
9.2.5 绝热过程 .....	202

---

9.2.6 绝热线与等温线 .....	203
9.3 循环过程 .....	204
9.3.1 循环过程 .....	204
9.3.2 热机效率 .....	205
9.3.3 制冷系数 .....	206
9.3.4 卡诺循环 .....	207
9.4 热力学第二定律 .....	210
9.4.1 热力学第二定律 .....	210
9.4.2 可逆过程与不可逆过程 .....	212
9.4.3 卡诺定理 .....	212
9.4.4 热力学第二定律的统计意义 .....	213
9.5 熵 熵增加原理 .....	214
9.5.1 克劳修斯等式 熵 .....	214
9.5.2 熵增加原理 .....	216
习题 9 .....	217
<b>习题参考答案</b> .....	<b>220</b>
<b>参考文献</b> .....	<b>226</b>

# 第 1 章 质点运动学

物理学是研究物质运动中最普遍、最基本运动形式的基本规律的学科。自然界的一切物质都处于永恒的运动中。物质运动的形式是多种多样的,其中机械运动是最简单、最基本的运动。机械运动是指一个物体相对于另一个物体的位置,或者一个物体的某些部分相对于其他部分的位置,随时间而变化的过程。力学对机械运动规律的研究与其他科学一样,可以划分为两个阶段:对机械运动的描述和得到机械运动的本质规律。根据阶段的不同,力学划分为运动学和动力学。运动学是描述物体运动的力学分支学科,它告诉大家物体是怎么运动的。动力学是关于物体运动本质规律的力学分支学科,它告诉大家物体为什么是这样运动的。在运动学中,物体的运动状态是用位置矢量和速度来描述的,而物体运动的变化则用加速度来描述。通过速度和加速度等概念的建立,加深对运动的相对性、瞬间性、矢量性和叠加性等基本性质的认识。

## 1.1 质点运动的描述

### 1.1.1 质点

一般来说,物体运动时其各部分位置的变化是不同的。当物体的大小、形状对所研究的问题影响不大时,可以将问题简单化,突出“物体具有质量”这个要素,用一个只有质量的点来代替物体,这样的点称为**质点**。质点是一个理想的模型,它忽略了物体的大小和形状。例如,研究地球绕太阳的运动时,由于地球离太阳的距离( $r \approx 1.5 \times 10^8 \text{ km}$ )比地球的半径( $R \approx 6.4 \times 10^3 \text{ km}$ )大得多,因此地球上各点相对太阳的运动可视为相同的,这时,可把地球当作质点。但是如果我们讨论的是地球或分子的自转,就不能把它们当作质点来处理,因为质点是无从考虑自转的。

在一般的情况下,实际物体通过无限小分割(微分),总可以使每个微元无限小而可以当成质点,整个物体就可以看成是由无限多个质点组成的。因此,任何物体都能看作质点的集合。所以讨论质点的运动规律,也就构成了讨论任何复杂物体运动规律的基础。

### 1.1.2 参考系 坐标系

我们知道,运动是普遍的、绝对的,而对运动的描述是相对的。质点在空间的位置,都是相对于某个参照物体而言的。为描述质点运动而选定的参照物体,称为**参考**

系。当选用不同的参考系时,对同一物体运动情况的描述不同。例如,站在运动的船上的人手中拿着一个物体,在同船的人看来物体是不动的,但岸上的人看到物体和船一起运动。如果船上的人把手松开,同船的人看到物体沿直线自由落下,而岸上的人却看到物体做平抛运动。所以,描述物体运动时,首先必须明确所用的参考系,参考系一般是根据问题的性质和研究的方便来选取的。例如,研究地球的运动,可以选取太阳为参考系;研究汽车的运动,可以选取地面为参考系。

参考系选定后,为了定量地描述物体相对于参考系的位置,应在参考系上选一原点,并建立适当的坐标系。通常采用直角坐标系,有时根据需要也可以用其他坐标系,如球坐标系、自然坐标系等。坐标系实质上是由实物构成的参考系的数学抽象,在讨论运动的一般性问题时,人们往往给出坐标系而不必具体指明它所参照的物体。

### 1.1.3 位置矢量与运动方程

#### 1. 位置矢量

要描述质点的运动,即质点位置的变化,首先要描述质点位置。决定质点的位置有两个因素:距离和方向。在最一般的情况下可以这样来描述:当确定了坐标系后(此时参照系也是确定了的),由坐标原点指向质点  $P$  的矢量来确定质点的位置。这个矢量称为位置矢量,简称为位矢,常用  $r$  来表示。

例如,图 1-1 表示一个空间直角坐标系,设在某时刻有一质点位于点  $P$ ,则该时刻质点的位置矢量为从坐标原点  $O$  指向点  $P$  的有向线段  $OP$ ,记为  $r$ ,这个矢量就可以表示点  $P$  相对于坐标原点  $O$  的距离大小与方位。

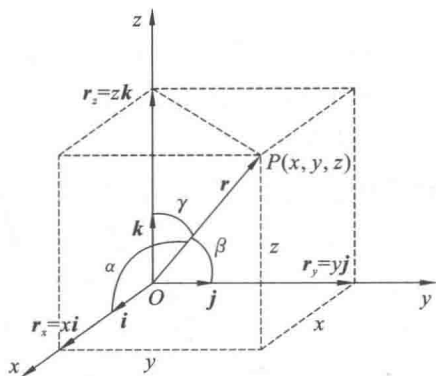


图 1-1 三维空间中的位矢

$i, j, k$  表示沿直角坐标系  $x, y, z$  正方向的单位矢量,  $x, y, z$  表示位矢  $r$  在三个坐标轴上的投影值分量,即点  $P$  的位置坐标,则位矢  $r$  的矢量式可表示为

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

表示成分量式为

$$r_x = x, \quad r_y = y, \quad r_z = z, \quad (1-2)$$

即  $r_x = xi$ 、 $r_y = yj$ 、 $r_z = zk$ ，是位矢  $r$  的三个分矢量。

利用位矢  $r$  的分量  $x$ 、 $y$ 、 $z$ ，便可求得位矢的大小和方向。位矢的大小表示质点所在位置点  $P$  与参考点  $O$  之间的距离，用  $|r|$  表示，可写为

$$r = |r| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}。 \quad (1-3)$$

位矢的方向自  $O$  指向  $P$ ，表示点  $P$  相对于参考点  $O$  的方位，由下式确定：

$$\cos\alpha = \frac{x}{r}, \quad \cos\beta = \frac{y}{r}, \quad \cos\gamma = \frac{z}{r}, \quad (1-4)$$

式中， $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  分别是位矢  $r$  与三个坐标轴正方向所形成的夹角（称为方向角），其余弦称为位矢  $r$  的方向余弦。

由图 1-1 中的几何关系容易证明它们之间满足如下关系式：

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

当质点在二维空间即在平面内运动时，可建立平面直角坐标系（图 1-2），某时刻质点位于  $P$  点，它的位矢写为

$$r = xi + yj, \quad (1-5)$$

位矢的大小为

$$r = |r| = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (1-6)$$

位矢的方向余弦为

$$\cos\alpha = \frac{x}{r}, \quad \cos\beta = \frac{y}{r}。 \quad (1-7)$$

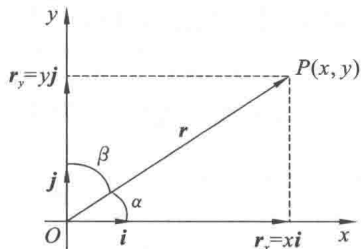


图 1-2 二维空间中的位矢

质点在二维平面运动时，位矢的方向还可用位矢  $r$  与  $x$  轴的夹角  $\alpha$  表示，即

$$\alpha = \arctan \frac{y}{x}。 \quad (1-8)$$

位矢的单位在国际单位制 (SI) 中，是米 (m)，有时也可用其他单位，如千米 (km) 等。

## 2. 运动方程 轨迹方程

质点运动时，其位矢  $r$  随时间而变，也即是说，位矢  $r$  是时间  $t$  的函数，即

$$r = r(t)。 \quad (1-9)$$

式(1-9)描述了质点空间位矢随时间的变化,称为质点的**运动方程**。它是一个矢量函数,也就是说位矢  $\mathbf{r}$  的大小和方向都是自变量  $t$  的函数。根据运动方程,可以确定任意时刻质点的位矢。与此同时,在所选取的直角坐标系  $Oxyz$  中,位矢  $\mathbf{r}$  沿各坐标轴的分量  $x$ 、 $y$ 、 $z$  也随时间变化,它们也是时间  $t$  的函数,即

$$x=x(t), \quad y=y(t), \quad z=z(t)。 \quad (1-10)$$

式(1-10)是运动方程(1-9)的**分量式**,也称**分运动式**。在任何一个具体问题中,式(1-10)中的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  都是具体的函数。例如,对  $Oxy$  平面内的平抛运动,质点的位矢  $\mathbf{r}=v_0\mathbf{i}+\frac{1}{2}gt^2\mathbf{j}$ ,其分量式为  $x=v_0t$ ,  $y=\frac{1}{2}gt^2$ 。运动方程表示质点位置随时间的变化规律,由它可以确定质点在任意时刻  $t$  的位矢  $\mathbf{r}$ 。质点运动方程包含了质点运动中的全部信息,是解决质点运动学问题的关键所在。式(1-9)和式(1-10)都能等效地描述质点位矢随时间的变化情况,于是运动方程还可以写为

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

当质点在二维平面运动时,建立平面直角坐标系  $Oxy$ ,此时运动方程记为

$$\mathbf{r}=\mathbf{r}(t)=x(t)\mathbf{i}+y(t)\mathbf{j}, \quad (1-12)$$

其分量式为

$$x=x(t), \quad y=y(t)。 \quad (1-13)$$

质点运动时所经过的空间点的集合称为质点运动的**轨迹**(或**轨迹曲线**)。描述轨迹曲线的数学方程称为**轨迹方程**。在运动方程的分量式中消去时间项  $t$  就得到轨迹方程。由数学原理,运动方程的分量式也就可以称为质点运动轨迹的参数方程,记为

$$f(x, y, z)=0。 \quad (1-14)$$

质点运动的轨迹若为直线则称为**直线运动**,若为曲线则称为**曲线运动**。例如,圆的轨迹方程为  $x^2+y^2=R^2$ ,椭圆的轨迹方程为  $\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}=1$ 。

### 1.1.4 位移与路程

#### 1. 位移

研究质点的运动,不仅要知道它在某个时刻的位置,还需要知道它在某段时间内位置的变化,如图 1-3 所示。

在空间直角坐标系  $Oxyz$  中, $t$  时刻物体位于  $P_1$  处,位矢为  $\mathbf{r}_1$ ,经过  $\Delta t$  时间间隔质点位于  $P_2$  处,位矢为  $\mathbf{r}_2$ 。从  $P_1$  点到  $P_2$  点作一条有向线段,即矢量  $\mathbf{P}_1\mathbf{P}_2$ ,按照矢量相减的三角形法则可知, $\mathbf{P}_1\mathbf{P}_2$  是在  $\Delta t$  时间间隔内**位矢的增量**,它描述了质点在  $\Delta t$  这段时间内的位置变动,称为**位移矢量**,简称**位移**,记为  $\Delta\mathbf{r}$ 。即

$$\Delta\mathbf{r}=\mathbf{r}_2-\mathbf{r}_1, \quad (1-15)$$

在直角坐标系里写为

$$\begin{aligned}
 \Delta \mathbf{r} &= \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 = (x_2 \mathbf{i} + y_2 \mathbf{j} + z_2 \mathbf{k}) - (x_1 \mathbf{i} + y_1 \mathbf{j} + z_1 \mathbf{k}) \\
 &= (x_2 - x_1) \mathbf{i} + (y_2 - y_1) \mathbf{j} + (z_2 - z_1) \mathbf{k} \\
 &= \Delta x \mathbf{i} + \Delta y \mathbf{j} + \Delta z \mathbf{k},
 \end{aligned} \tag{1-16}$$

其中,  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$  是在  $\Delta t$  时间间隔内, 质点位置坐标分别沿三个坐标轴的增量, 也就是位移矢量在各坐标轴上的分量的增量。用它们可以求得位移矢量的大小  $|\Delta \mathbf{r}|$ , 即

$$|\Delta \mathbf{r}| = |\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1| = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}. \tag{1-17}$$

位移的方向用它的三个方向余弦来表示, 这一点和式(1-4)类似。

通常, 在一个无穷小的时间  $dt$  内, 质点在三维空间和二维空间中的位移分别表示为

$$d\mathbf{r} = dx \mathbf{i} + dy \mathbf{j} + dz \mathbf{k} \quad \text{与} \quad d\mathbf{r} = dx \mathbf{i} + dy \mathbf{j}. \tag{1-18}$$

需要指出的是, 在物理学中, 位移的大小应记为  $|\Delta \mathbf{r}|$ , 而不能写成  $\Delta r$ 。  $\Delta r$  表示的是在  $\Delta t$  这段时间间隔内位矢大小的增量。例如圆周运动, 若以圆心为坐标原点, 则质点到原点  $O$  的距离  $R$  是一个常量, 即有  $\Delta r = 0$ , 但是质点位移的大小  $|\Delta \mathbf{r}|$  则不一定为零。

由图 1-3 可以看出,  $|\Delta \mathbf{r}| = P_1 P_2$ , 取  $OM = OP_1$ , 则  $\Delta r$  的表示式为  $\Delta r = |\mathbf{r}_2| - |\mathbf{r}_1| = OP_2 - OP_1 = MP_2$ 。显然  $P_1 P_2$  和  $MP_2$  一般不相等, 即一般情况下  $|\Delta \mathbf{r}| \neq \Delta r$ , 同样, 一般情况下,  $|d\mathbf{r}| \neq dr$ 。

## 2. 路程与位移的区别

质点运动过程中经过的轨迹长度称为路程。常用  $s$  或  $\Delta s$  表示。位移是描述质点位置变化的物理量, 并非质点所经过的路程。路程只有大小, 没有符号, 更没有方向, 这一点容易和位移区别, 而且在一般情况下, 路程与位移的大小  $|\Delta \mathbf{r}|$  也不相等。如图 1-3, 在  $t$  到  $t + \Delta t$  这段时间里, 质点路程  $\Delta s$  为  $P_1$  与  $P_2$  两点之间的弧长  $\widehat{P_1 P_2}$ , 而位移的大小  $|\Delta \mathbf{r}|$  为  $P_1$  与  $P_2$  之间的直线长度  $P_1 P_2$ 。所以, 位移和路程是两个不同的概念。当质点沿某一闭合路径回到原来的起始位置时, 其位移为零, 但路程不为零。但是在  $\Delta t \rightarrow 0$  时, 路程等于位移的大小:  $ds = |d\mathbf{r}|$ 。

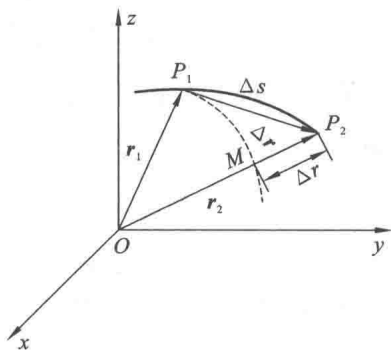


图 1-3 位移  $\Delta \mathbf{r}$ 、路程  $\Delta s$  与位矢大小增量  $\Delta r$

**例 1-1** 有一质点做直线运动,其运动方程为  $x=2+2t-t^2$  (SI)。求:从  $t=0$  到  $t=4$  s 时间间隔内,质点位移的大小和它走过的路程。

**解** 位移大小为

$$|\Delta x| = |x|_{t=4} - |x|_{t=0} = 8 \text{ m}.$$

将  $x$  对时间  $t$  求一阶导数:

$$\frac{dx}{dt} = 2 - 2t = 0,$$

由此可得  $t=1$  s,即质点从  $t=0$  到  $t=1$  s 内沿  $x$  正向运动,然后沿反向运动。分段计算:

$$|\Delta x_1| = |x|_{t=1} - |x|_{t=0} = 1 \text{ m},$$

$$|\Delta x_2| = |x|_{t=4} - |x|_{t=1} = 9 \text{ m},$$

路程为

$$|\Delta x_1| + |\Delta x_2| = 10 \text{ m}.$$

### 1.1.5 速度

研究质点的运动,不仅要知道质点在各个时刻的位置,还要知道质点位置变化的快慢和方向。**速度**就是描述质点运动快慢和方向的物理量。

#### 1. 平均速度

质点在  $t$  到  $t+\Delta t$  时间间隔内完成了位移  $\Delta \mathbf{r}$ ,为了表征质点在这段时间内运动的快慢和方向,把质点发生的位移  $\Delta \mathbf{r}$  与所经历的时间  $\Delta t$  之比定义为质点在该时间间隔内的**平均速度**,常用  $\bar{\mathbf{v}}$  表示,即

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}. \quad (1-19)$$

如图 1-4 所示,在  $t$  时刻,质点位于  $P$  点,位矢为  $\mathbf{r}_1 = \mathbf{r}(t)$ ;在  $t+\Delta t$  时刻,质点运动到  $Q$  点,位矢为  $\mathbf{r}_2 = \mathbf{r}(t+\Delta t)$ ,则质点从  $P$  点运动到  $Q$  点的平均速度

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{r}(t+\Delta t) - \mathbf{r}(t)}{t_2 - t_1}. \quad (1-20)$$

从式(1-20)可以看出,平均速度是一个矢量,其方向与位移  $\Delta \mathbf{r}$  的方向相同,其大小等于质点在  $\Delta t$  时间内位置矢量大小的平均变化率,即  $|\bar{\mathbf{v}}| = \left| \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \right| = \frac{|\Delta \mathbf{r}|}{\Delta t}$ 。在 SI 中,其大小的单位为:米/秒,用符号 m/s 表示。

#### 2. 瞬时速度

平均速度描述的是质点在  $t$  到  $t+\Delta t$  时间间隔内位矢的平均变化率,显然它只能粗略地描述质点在某段时间间隔内质点位置变化的快慢和方向。若要精确地描述质点在某一时刻(或者说在相应的某一位置)运动的快慢和方向,应该使所取的时间间隔  $\Delta t$  尽量短并趋近于零。由图 1-5 可知,时间间隔  $\Delta t$  取得越小,质点的平均速度