



普通高等教育“十二五”规划教材  
大学物理创新教学丛书

# 大学物理学 (上册)

(第二版)

殷勇 余仕成 主编



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理创新教学丛书

# 大学物理学(上册) (第二版)

殷 勇 余仕成 主编

科学出版社

北 京

## 版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

### 内 容 简 介

本书总结了第一版的编写经验,听取了使用过本教材师生的意见和建议,并考虑当前工科学校的教学实际的基础上修订而成。全书简明扼要,注重加强基础理论的同时,突出训练和培养学生科学思维创新能力,拓展学生的学术襟怀和眼光。

全书分上、下两册,内容分五篇。第一篇力学;第二篇电磁学;第三篇波动光学;第四篇热学;第五篇相对论与量子力学基础。

本书可作为高等学校工科、理科、师范等各非物理学专业,以及成人教育相关专业的大学物理课程的教材,也可供自学者学习使用。

#### 图书在版编目(CIP)数据

大学物理学.上册/殷勇,余仕成主编.—2版.—北京:科学出版社,2015.7

(大学物理创新教学丛书)

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-03-045238-2

I. ①大… II. ①殷… ②余… 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(2015)第170159号

责任编辑:王雨舸 / 责任校对:董艳辉

责任印制:高 嵘 / 封面设计:蓝 正

**科学出版社** 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉市首壹印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2010年8月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015年8月第 二 版 印张:21 1/4

2015年8月第一次印刷 字数:526 400

**定价:46.00元**

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 第二版前言

本书第二版与教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会最新《非物理类理工学科大学物理课程教学基本要求》相适应,在第一版基础上,结合五年教材使用细节和情况,编者总结多年教学、教材改革和实践,吸取当前国内外优秀教材的思想和精华,精心修编而成。

同第一版相比,第二版的框架和结构发生了较大的变化,包括篇、章、节等均作了优化,更加符合教学基本要求和课程的教学规律,体系更加逻辑、自然、完整;对部分内容作了增删;对疏漏和不足进行了订正。

本书上册由殷勇、余仕成主编,下册由熊伦、何菊明主编,熊伦、殷勇统稿、定稿。全书各篇章的具体执笔人如下:胡亚联(第1章、第14章),刘培姣、胡亚联(第2章),岑敏锐、胡亚联(第3章),李端勇(第4章、第5章),余仕成、殷勇(第6章),黄河、吴涛(第7章),俎凤霞、徐志立(第8章),熊伦(第9章),汤朝红(第10章),谭荣(第11章),吴锋、张昱(第12章),吴锋、黄淑芳(第13章),何菊明(第15章)。在编写过程中,本书参考和借鉴了近年来国内外出版的物理教材,对于这些教材的作者,本书作者特别致以诚挚的谢意。

本书的出版过程,得到了教学单位和教学管理部门的关心和支持,在此表示衷心感谢。

由于编写时间较紧,编者水平所限,书中疏漏和不足之处在所难免,敬请同仁和师生继续提出宝贵的意见,以便进一步完善。

编者

2015年5月

## 第一版前言

物理学以研究物质世界的基本规律和本质属性为己任。物理学鞭辟入里的分析方法、高屋建瓴的思维模式、辩证唯物的认识论和世界观以及所展现出来的和谐、对称、统一的科学美,使得它自面世以来,就一直是自然科学的带头学科,技术科学的理论基础,是一切工程技术的坚实支柱,是创新思想的源泉。物理学曾经是,现在是,将来也是全球技术和经济发展的主要驱动力。它代表着一整套获得知识、组织知识和运用知识的有效方法和步骤。由于物理学的普遍性、基本性以及与其他学科的相关性,在培养学生科学素质、科学思维方法及科学研究能力,尤其是在培养具有综合能力的创新人才方面起着其他学科不可替代的作用,这也就决定了大学物理学这一课程在高等教育中的地位。

本教材力求与教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委会关于《非物理类理工学科大学物理课程教学基本要求》相适应。它是编者在总结多年教材改革和教学实践的基础上,吸取当前国内出版的面向 21 世纪物理教材的先进思想和优秀教学改革成果,充分考虑一般工科本科院校学生的起点和基础,集多年教学经验编写的。本书以相对稳定的传统教学内容为主,在保持大学物理课程持续发展的同时,紧紧追踪物理科学技术的发展;以现代的视野重新演绎和审视传统物理学的内容,力图在基础的层次上寻找一些前沿内容的根,逻辑地、紧凑地把一些相关的科学发现或科学理论的建立集成到一起,使课程现代化更突出,让学生感受到科学的不断发展和进步,应该如何批判继承;内容由浅入深、广泛严谨,概念清晰准确,使科学思维与创新能力的培养更明显,让学生感受到融会贯通的乐趣;教学内容和体系富有弹性,体系结构科学,选择灵活多样,使分层次组织教学更方便,在深度和广度上更好地适应新一代的大学生起点和基础。本书也力求体现当代杰出物理学家和教育家、诺贝尔物理奖得主理查德·费曼所说的,“科学是一种方法,它教导人们:一些事物是怎样被了解的,什么事情是已知的,现在了解到什么程度(因为没有事情是绝对已知的),如何对待疑问和不确定性,证据服从什么法则,如何去思考事物,做出判断,如何区别真伪和表面现象”,使学生对物理学的内容和方法、工作语言、概念和物理图像、其历史现状和前沿等方面,从整体上有一个全面的了解,使大学物理学成为培养学生科学素质的最有效的基础课。

全书上册由胡亚联、吴锋主编,下册由李端勇、余仕成主编,并负责制定本教材的编写提纲,提出要求。其中第一篇力学,第四篇中的第 14 章、第 15 章、第 16 章和第五篇中的第 17 章由胡亚联进行修改和统稿;第二篇热学、第四篇中的第 12

章、第 13 章和第五篇中的第 18 章由李端勇进行修改和统稿;第三篇电磁学,由余仕成进行修改和统稿。全书各篇章的具体执笔人员如下:胡亚联(第 1 章,第 17 章);刘培姣(第 2 章);岑敏锐、黄祝明(第 3 章);吴锋、张昱(第 4 章);吴锋、黄淑芳(第 5 章);余仕成(第 6 章);殷勇(第 7 章);黄河(第 8 章);吴涛(第 9 章);徐志立(第 10 章);俎凤霞(第 11 章);李端勇(第 12 章,第 13 章);熊伦(第 14 章);汤朝红(第 15 章);谭荣(第 16 章);何菊明(第 18 章)。

本书在编写过程中,参考和借鉴了近年来国内外出版的物理教材,对于这些教材的作者,本书作者特别致以诚挚的谢意。

本书在出版过程中,得到了教学部门和教学管理部门的关心和支持,我们在此表示衷心的感谢。

由于编写时间较紧,编者水平所限,书中疏漏和不足之处难免,我们敬请读者提出宝贵的意见。

编 者

2010 年 5 月

# 目 录

## 第一篇 力 学

<b>第 1 章 质点运动学</b> .....	3
1.1 参考系 质点 .....	3
1.2 质点运动的描述 .....	5
1.3 几种典型的质点运动.....	13
1.4 相对运动.....	22
思考题 .....	24
习题 1 .....	25
阅读材料 .....	26
<b>第 2 章 质点动力学与守恒定律</b> .....	28
2.1 牛顿运动定律和惯性系.....	28
2.2 动量定理和动量守恒定律.....	36
2.3 动能定理和机械能守恒定律.....	44
2.4 角动量和角动量守恒定律.....	61
思考题 .....	68
习题 2 .....	69
阅读材料 .....	71
<b>第 3 章 刚体力学基础</b> .....	72
3.1 刚体与刚体运动的描述.....	72
3.2 刚体的定轴转动定理与转动惯量.....	77
3.3 刚体的角动量定理与角动量守恒定律.....	85
3.4 刚体定轴转动中的功与能.....	90
3.5 刚体的进动与回转效应.....	95
思考题 .....	97
习题 3 .....	99
阅读材料.....	101

<b>第 4 章 振动学基础</b> .....	105
4.1 简谐振动 .....	105
4.2 描述简谐振动的特征量 .....	107
4.3 孤立系统简谐振动的能量 .....	110
4.4 旋转矢量 .....	110
4.5 角谐振动 .....	114
4.6 简谐振动的合成 .....	115
4.7 阻尼振动 受迫振动和共振 .....	121
思考题.....	125
习题 4 .....	125
阅读材料.....	126
<b>第 5 章 波动学基础</b> .....	129
5.1 机械波的产生与传播 .....	129
5.2 平面简谐波的波函数 .....	133
5.3 波的能量 .....	137
5.4 惠更斯原理 .....	140
5.5 波的叠加原理 波的干涉 .....	142
5.6 声波 .....	145
* 5.7 多普勒效应 .....	148
思考题.....	151
习题 5 .....	151
阅读材料.....	152

## 第二篇 电磁学

<b>第 6 章 电荷与电场</b> .....	157
6.1 电荷的基本性质 库仑定律 .....	157
6.2 静电场的描述 .....	162
6.3 静电场的高斯定理 .....	170
6.4 静电场的环路定理和电势 .....	180
6.5 静电场中的导体 .....	192
6.6 静电场中的电介质 .....	198
6.7 电容与电容器 .....	207



---

6.8 静电场的能量 .....	212
思考题 .....	215
习题 6 .....	216
阅读材料 1 .....	219
阅读材料 2 .....	220
<b>第 7 章 电流与磁场</b> .....	<b>227</b>
7.1 稳恒电流 电动势 .....	227
7.2 稳恒磁场的描述 .....	232
7.3 磁场的高斯定理和安培环路定理 .....	241
7.4 磁场对运动电荷的作用 .....	250
7.5 磁场对电流的作用 .....	259
7.6 磁场中的磁介质 .....	267
7.7 铁磁质 .....	277
思考题 .....	280
习题 7 .....	281
阅读材料 1 .....	284
阅读材料 2 .....	285
阅读材料 3 .....	288
<b>第 8 章 电磁场与麦克斯韦方程组</b> .....	<b>290</b>
8.1 电磁感应定律 .....	290
8.2 动生电动势 .....	293
8.3 感生电动势 感生电场 .....	297
8.4 自感 互感 .....	301
8.5 磁场的能量 .....	306
8.6 位移电流 .....	310
8.7 麦克斯韦方程组和电磁波 .....	313
思考题 .....	319
习题 8 .....	320
阅读材料 .....	322
<b>参考答案</b> .....	<b>324</b>
<b>主要参考文献</b> .....	<b>329</b>



第一篇

力学



# 第 1 章 质点运动学

力学是研究物体机械运动规律的一门学科,按其内容可以分为**运动学**(kinematics)和**动力学**(dynamics)。运动学单纯地描述物体在空间的运动情况,即说明它的运动特征以及运动学量(如位置、速度、加速度、轨道)之间的关系,不涉及运动的原因;动力学则讨论物体运动产生的原因和控制运动的方法,物体间相互作用的内在联系,即说明运动的因果规律(如牛顿运动定律、动量定理、动能定理以及守恒定律等)。

本章介绍质点运动学,我们着重阐明三个问题:第一,阐明在运动学中,质点的运动状态用位置矢量和速度矢量共同描述,速度的改变由加速度矢量描述;第二,阐明在运动学中,核心方程是运动方程;第三,阐明在运动学中,运动的定量研究离不开时间和空间。经典力学的时空观是和牛顿运动定律、伽利略坐标变换交织在一起的。通过介绍同一质点的运动描述在不同参考系中的变换——伽利略变换,了解经典力学时空观。

## 1.1 参考系 质点

研究物体的机械运动规律,首先要确定如何描述物体的运动。物体运动的描述,起源于人们对运动物体的观察、归纳、综合,从而抽象出必要的概念,建立对应的理想模型和物理量来定量描述。

### 1.1.1 运动的绝对性和描述的相对性

在自然界中大到地球、太阳和星系,小到分子、原子和各种微观粒子无一不在运动,一切物质均处在永恒不息的运动之中,运动是物质的存在形式,是物质的固有属性,运动和物质是不可分割的。运动的这种普遍性和永恒性又称为**运动的绝对性**。

然而,对物体运动的描述却是相对的。粗看地面上的空间是静止的,静止在地面上的物体似乎是不动的。实际上这是以地面、建筑物等为标志来观察的,由于地球有公转和自转,静止在地面上的物体是跟着地球一起运动的。从今日人们的认识来说,空间和物质是不可分的,不能想象离开了物质是否还有空间以及时间的存在。因此要观察一个物体的运动只能选定另一物体为参考,而能选用的参考的物体很多,彼此的运动又各不相同,于是参考不同的物体来观测同一物体的运动,所获得的图像和结果就会不同,这个事实称为**运动描述的相对性**。

宇宙中没有不运动的物体,所以没有绝对静止的物体可以作为观察其他物体运动的参考。一切运动物体都有被选作参考物的同等地位,可见,正是运动的绝对性才导致了描述运动的相对性。

### 1.1.2 参考系和坐标系

为了观测一个物体的运动,而选作参考的另一物体(或另一组相对静止的物体)称为**参考系**(frame of reference)。

参考系选定后,为了能定量地描述物体的位置和它的运动,还必须在参考系上建立一个适当的**坐标系**(coordinates),把坐标系的原点和轴线固定在参考系中。坐标系实质上是由实物构成的参考系的数学抽象。

原则上选择什么物体作参考系,以及选择哪一种坐标系(直角坐标系、极坐标系、自然坐标系、球坐标系等)是任意的,但是不论从描述运动(运动学)还是从说明运动规律(动力学)来看,应以方便和简洁为目的。一般来说,研究运动学问题时,只要描述方便,参考系可以任意选择。但在考虑动力学问题时,选择参考系就要慎重了,因为一些重要的动力学规律(如牛顿第一、第二定律)只对某类特定的参考系(惯性系)成立。

选择不同的参考系,同一物体的运动情况就不同,对它的描述也就不同。因此,在说明物体的运动时,必须指明所选取的参考系。研究地面上物体的运动,通常都选地面或在地面上静止的物体作参考系。值得注意的是,在选定的参考系上建立不同的坐标系,对同一物体的运动描述是相同的,只是数学表达式有差异。如在匀速直线前进中的火车车厢中作竖直下落运动的小球,从火车这个参考系上看,小球作竖直下落的加速直线运动,从地面上看则是做抛物线运动,这条抛物线可以在直角坐标系中描述,也可在极坐标系中描述。

### 1.1.3 质点和质点系

任何物体都有大小和形状。物体运动时,一般地讲其内部各点位置的变化是不一样的,物体的形状和大小也可能发生变化。因此,物体做一般的机械运动时,物体各部分的运动规律将十分复杂。

物体的运动有两种基本类型:平动和转动。物体平动时,其上各个点的运动情况完全相同,可用任意一个点的运动来代表,物体的大小和形状对于所研究的问题不起作用。因此,如果在研究某一物体运动时,可以忽略其大小和形状,或者可以只考虑其平动,则物体可视为一个只具有质量而没有大小和形状的几何点。这样,一个形状和大小可以不计,但具有一定质量的物体就称为**质点**(mass point)。物体在做转动时,不能把物体视为质点,但其形状没有明显变化,所以在忽略不计物体的形变,或者可以只考虑其转动时,可将物体视为**刚体**(rigid body)。当研究物体的运动既不能忽略物体的大小和形状,又必须考虑形变时,质点、刚体的模型不适用了,这时,可以把物体看成是由若干个有相互作用的质点组成的质点系统,简称**质点系**(system of particles)。

注意:能否将一个物体视为质点由研究问题的性质决定,并不是根据它的绝对大小。只考虑物体的平动时,再大的物体都可视为质点。例如,在研究地球公转时,因日地距离远大于地球的直径,地球上各点间的距离与日地距离相比是微不足道的。所以,在公转中仍能将地球视为质点。反之,即使很小的物体,像分子、原子等,当我们考察它们的转动、振动等问题时,就必须考虑其内部结构,而不能把它们看成质点。

质点、刚体、质点系是从客观实际中经过科学抽象出来的理想模型。以后还要学习线

性谐振子、理想气体、点电荷、电流元等理想模型。在科学研究中,常根据所研究问题的性质,突出主要因素,忽略次要因素,建立理想模型,这是经常采用的一种科学思维方法。可以说,没有合理的模型,理论就寸步难行。

## 1.2 质点运动的描述

### 1.2.1 位置矢量 运动方程

#### 1. 质点的位置矢量

在运动学中,常用一个几何点代表质点,在选定的参考系上建立合适的坐标系后,质点在任一时刻的位置常用位置矢量(position vector),简称位矢(也叫矢径)来描述。位矢是从坐标原点  $O$  指向质点所在处点  $P$  的有向线段(即图 1.2.1 中的  $\overrightarrow{OP}$ ),用矢量  $\boldsymbol{r}$  来表示。显然,质点的位矢其大小和方向不仅与参考系有关,而且与坐标原点  $O$  的选择有关。但当参考系与坐标原点选定后,位矢  $\boldsymbol{r}$  就能指明质点相对坐标原点的距离和方位,亦即确定了质点的空间位置。

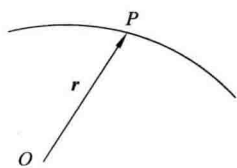


图 1.2.1 位置矢量

质点位矢  $\boldsymbol{r}$  在具体坐标系中可用分量表示出来,从图 1.2.2 中可以看出,质点  $P$  的直角坐标  $x, y, z$  就是位矢  $\boldsymbol{r}$  在直角坐标系  $Oxyz$  中的三个分量(即投影),引入沿着  $x, y, z$  三个坐标轴正方向的单位矢量  $\boldsymbol{i}, \boldsymbol{j}, \boldsymbol{k}$ (它们都是不随时间变化的大小等于 1 的常矢量)后,质点的位矢  $\boldsymbol{r}$  在直角坐标系  $Oxyz$  中可以表示为

$$\boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j} + z\boldsymbol{k} \quad (1.2.1)$$

质点  $P$  距原点  $O$  的距离,即位矢的大小为

$$r = |\boldsymbol{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1.2.2)$$

在 SI 单位制中,长度和距离的单位是米(m)。

质点  $P$  相对原点  $O$  的方位,即位矢的方向可由三个方向余弦

$$\cos\alpha = \frac{x}{r}, \quad \cos\beta = \frac{y}{r}, \quad \cos\gamma = \frac{z}{r} \quad (1.2.3)$$

确定。其中的  $\alpha, \beta, \gamma$  分别是  $\boldsymbol{r}$  与  $Ox, Oy, Oz$  轴间的夹角,如图 1.2.2 所示。

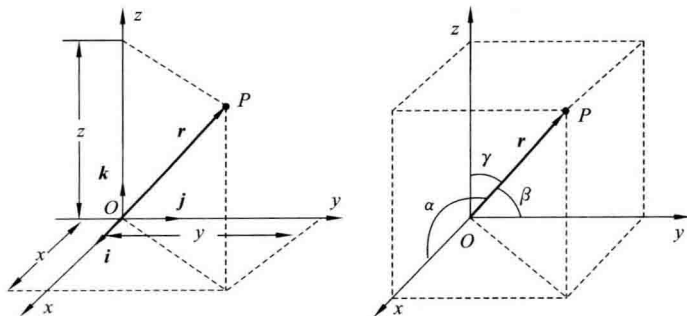


图 1.2.2 直角坐标系下的位置矢量

对于质点仅在  $Oxy$  平面上运动的两维情况,位矢  $\boldsymbol{r}$  可以表示为

$$\boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j} \quad (1.2.4)$$

与  $Ox$  轴的夹角为

$$\varphi = \arctan \frac{y}{x}$$

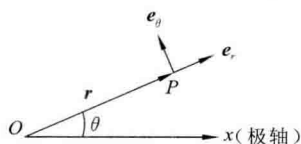


图 1.2.3 平面极坐标系下位置矢量

也可采用平面极坐标系,这时质点的坐标为  $r$  和  $\theta$ , 设以  $\boldsymbol{e}_r$  和  $\boldsymbol{e}_\theta$  代表沿径向(指向  $r$  增大的方向)和横向(同径向垂直指向  $\theta$  角增大的方向)的单位矢量,如图 1.2.3 所示,则质点的位矢可表示为

$$\boldsymbol{r} = r\boldsymbol{e}_r \quad (1.2.5)$$

这里的  $\boldsymbol{e}_r$  和  $\boldsymbol{e}_\theta$  数值虽不变(等于 1),但它们的方向均随质点所在位置而异,即与坐标  $\theta$  有关,不是常矢量。

关于位置矢量  $\boldsymbol{r}$ ,应当明确它有以下三个特点:

- (1) 矢量性。 $\boldsymbol{r}$  是矢量,不仅有大小,而且有方向。
- (2) 瞬时性。质点在运动过程中,不同时刻  $\boldsymbol{r}$  不同,也就是说,位置矢量  $\boldsymbol{r}$  是描写质点在某时刻的位置。
- (3) 相对性。空间某一点的位置矢量,用不同的坐标系来描写,结果是不同的(详见 1.4 节)。

## 2. 质点的运动方程

在质点运动时,它相对坐标原点  $O$  的位矢  $\boldsymbol{r}$  是随时间变化的(图 1.2.4),所以  $\boldsymbol{r}$  是时间的矢量函数,有

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t) = x(t)\boldsymbol{i} + y(t)\boldsymbol{j} + z(t)\boldsymbol{k} \quad (1.2.6)$$

分量式为

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases} \quad (1.2.7)$$

式(1.2.6)是质点的运动方程(equation of motion)的矢量表示式(也称为质点运动的位矢方程),式(1.2.7)

是运动方程的分量式(也称参数方程)。

在平面极坐标系中,位矢方程为

$$\boldsymbol{r} = r(t)\boldsymbol{e}_r(t) \quad (1.2.8)$$

位矢的极坐标分量式为

$$\begin{cases} r = r(t) \\ \theta = \theta(t) \end{cases} \quad (1.2.9)$$

## 3. 质点的运动轨迹

运动质点所经空间各点连成的曲线称为运动轨迹(图 1.2.4 中的  $MN$  曲线)。从

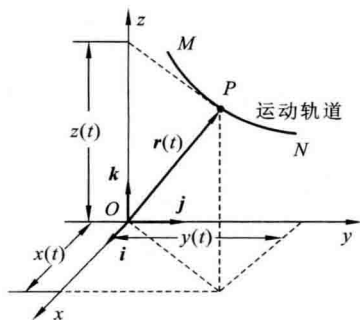


图 1.2.4 运动方程 运动轨道

式(1.2.7)运动方程中消去参变量  $t$ , 便可得到质点在直角坐标系  $Oxyz$  中的**轨迹方程**

$$z = f(x, y) \quad \text{或} \quad f(x, y, z) = 0 \quad (1.2.10)$$

如果轨迹是直线, 就叫直线运动, 如果轨迹是曲线, 就叫曲线运动。

关于运动方程要着重指出两点:

(1) 运动方程的分量式实际上反映了运动的叠加性, 例如, 斜抛运动可分解为水平方向的匀速直线运动和竖直方向的匀加速直线运动, 匀速圆周运动可以分解为相互垂直方向上两个同频率的谐振动等。总之运动既可以叠加, 又可以分解, 位矢的矢量叠加性正好反映了运动的叠加性。

(2) 运动方程描述了质点在任一时刻  $t$  相对于坐标原点的距离和方位, 并包含有质点如何运动的全部信息和全部过程。

## 1.2.2 位移 路程

### 1. 位移

设质点沿轨迹  $MN$  做曲线运动, 如图 1.2.5 所示, 在时刻  $t_1$ , 质点在  $P_1$  处, 其位矢为  $\mathbf{r}_1$ ; 在时刻  $t_2$ , 质点运动到  $P_2$  处, 位矢为  $\mathbf{r}_2$ 。我们把由起始位置  $P_1$  点指向终止位置  $P_2$  点的有向线段  $\overrightarrow{P_1P_2}$  称为质点在时间间隔  $\Delta t$  ( $\Delta t = t_2 - t_1$ ) 内的**位移矢量**, 简称**位移** (displacement), 用  $\Delta \mathbf{r}$  来表示。位移代表质点在两个时刻位置之间的距离和相对方位, 即反映了质点在  $\Delta t$  时间内位置变动的大小和方向。显然, 位移  $\Delta \mathbf{r}$  等于  $\Delta t$  时间内的质点位矢  $\mathbf{r}$  的增量, 此矢量的长度等于从起点到终点的直线长度, 其方向由起点指向终点。按矢量加法, 如图 1.2.5 所示, 有

$$\overrightarrow{P_1P_2} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 = \Delta \mathbf{r} \quad (1.2.11)$$

因为, 在直角坐标系中

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

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

所以

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{r} &= (x_2 - x_1) \mathbf{i} + (y_2 - y_1) \mathbf{j} + (z_2 - z_1) \mathbf{k} \\ &= \Delta x \mathbf{i} + \Delta y \mathbf{j} + \Delta z \mathbf{k} \end{aligned} \quad (1.2.12)$$

其大小, 即位移  $\Delta \mathbf{r}$  的模  $|\Delta \mathbf{r}|$  为

$$|\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (1.2.13)$$

其方向由  $P_1$  指向  $P_2$ , 在 SI 中, 位移的单位为米 (m)。

### 2. 路程

**路程** (distance) 是质点从  $P_1$  到  $P_2$  沿曲线所走过的实际轨迹的长度。如图 1.2.5 所示, 有

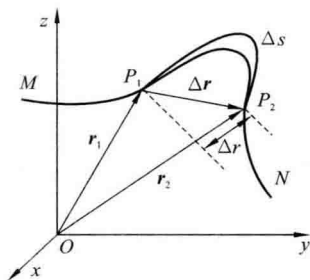


图 1.2.5 位移、路程、位矢大小的增量



$$\Delta s = \overline{P_1 P_2}$$

在这里应指出以下要注意的三点:

(1) 位移  $\Delta r$  和路程  $\Delta s$  不同,位移  $\Delta r$  是矢量,它只反映某段时间内始末质点位置的变化,不涉及质点位置变化过程的细节,其大小虽然等于由  $P_1$  到  $P_2$  的直线距离,但并不意味着质点是从  $P_1$  沿直线移动到  $P_2$ 。路程  $\Delta s$  是标量,涉及质点位置变化过程的细节,而且总有  $\Delta s \geq |\Delta r|$ ,只是在质点做单向直线运动时才有  $\Delta s = |\Delta r|$ 。但是在  $\Delta t \rightarrow 0$  的极限情况下,有  $ds = |dr|$ 。另外,当始末位置  $P_1 P_2$  一定时,位移是唯一确定的,但从  $P_1$  到  $P_2$  可有许许多多不同的路程(图 1.2.5)。

(2) 位移  $\Delta r$  的大小和位矢大小的增量  $\Delta r$  一般是不相等的。即

$$|\Delta r| = |r_2 - r_1| \geq \Delta r = |r_2| - |r_1|$$

只有在  $r_1$  和  $r_2$  方向相同的情况下  $\Delta r$  的大小  $|\Delta r|$  与  $\Delta r$  才相等。这与一个矢量的大小就等于它的模的表示  $A = |A|$  是不同的。

(3) 位移  $\Delta r$  和位矢  $r$  不同,位矢确定某一时刻质点的位置,位移则描述某段时间内始末质点位置的变化。对于相对静止的不同坐标系来说,位矢依赖于坐标系的选择,而位移则与所选取的坐标系无关(图 1.2.6)。

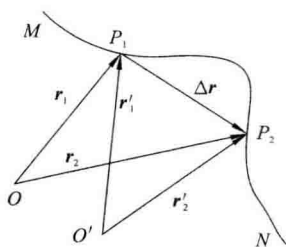


图 1.2.6 对于不同的坐标原点,质点的位矢不同,但位移相同

### 1.2.3 速度 速率

#### 1. 速度

为了说明质点运动的方向和快慢,可以粗略地计算质点在  $\Delta t$  时间内的平均速度,它等于质点在  $\Delta t$  时间内位置矢量的平均变化率,亦即等于  $\Delta r$  与  $\Delta t$  的比值,用  $\bar{v}$  表示

$$\bar{v} = \frac{r_2 - r_1}{\Delta t} = \frac{\Delta r}{\Delta t} \quad (1.2.14)$$

平均速度是矢量,其方向与位移  $\Delta r$  的方向相同,大小为

$$|\bar{v}| = \left| \frac{\Delta r}{\Delta t} \right| = \frac{|\Delta r|}{\Delta t} \quad (1.2.15)$$

因为质点运动的方向和快慢可能时刻在改变着, $\Delta t$  取得越短,近似的程度就越好。为了精确真实地反映出质点在各个瞬时的运动状态,可将时间  $\Delta t$  无限减小,并使之趋近于零,即取式(1.2.14)在  $\Delta t \rightarrow 0$  时的极限值,有

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{dr}{dt} \quad (1.2.16)$$

这样,质点的平均速度就会趋向一个确定的极限矢量,如图 1.2.7 所示。这个极限矢量称为  $t$  时刻质点的瞬时速度,简称速度(velocity)。速度  $v$  是矢量,大小描述质点在  $t$  时刻运动的快慢,方向就是  $t$  时刻质点运动的方向,即点  $P$  所在处的轨道切线方向,并指向质点的运动方向。

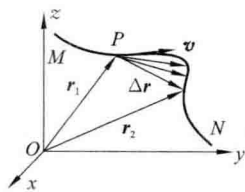


图 1.2.7 质点的平均速度和速度