



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学物理学

(上册)

第二版

上海交通大学物理教研室 编

AXUE WULIXUE

上海交通大学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学物理学

(上册)

第二版

上海交通大学物理教研室 编

上海交通大学出版社

21 世纪高等学校教材

编审委员会

顾 问： 韩正之

执行主任： 百 文

副 主 任：	胡敬群	高 景	靳全勤	张华隆
	蒋凤瑛	冯 颖	普杰信	程全洲
	潘群娜	杨裕根	徐祖茂	曹天守
	宓一鸣	姜献峰	李 敏	李湘梅
	闫洪亮	陈树平	包奇金宝	刘克成
	白丽媛	戴 兵	张占山	张红梅

前 言

根据 2004 年教育部新颁发的“非物理类理工学科大学物理课程教学基本要求”，为了适应物理学和科学技术的发展，结合多年的教学实践，我们编写了这套大学物理教材。在编写过程中，我们借鉴了部分国内外新版优秀教材，力求贯彻理论体系少而精、理论联系实际的原则，做到在加强理论基础的叙述、加强对学生分析与解决实际问题能力培养的同时，增加对近代和现代物理学知识、观点的介绍。在教材编写过程中，我们注重把培养学生具有科学的思维能力、辩证分析的能力和科学的研究方法作为目标。同时，我们还注重加强工科大学生的科学素养的培养，拓宽学生的科学视野。

本书采用国际单位制。书中物理量的名称和表示符号尽量采用国家现行标准。

本书分为上下两册，上册包括：力学、狭义相对论、机械振动、机械波、平衡态理论和热力学基础。下册包括：电磁学、波动光学和量子物理学。

目录中带 * 的内容可以作为选讲内容，也适合学生自学。

本书由高景主编。参加编写工作的有：李铜忠（第 1、2、3、4、5、6 章和第 24 章），孙迺疆（第 7、8 章），董占海（第 9、10 章和第 21、22、23 章），袁晓忠（第 11、12、13、14、15、16、17 章），高景（第 18、19、20 章）。张炽伟老师编写了全书各章的思考题和习题。刘敏绘制了除照片外的所有插图。

由于编者水平有限，编写时间较仓促，书中错误之处在所难免。我们衷心希望广大读者提出宝贵意见。

上海交通大学物理教研室

目 录

第 1 章 质点运动学	1
1.1 质点运动学基本概念	1
1.1.1 参考系	1
1.1.2 坐标系	2
1.1.3 空间和时间	3
1.1.4 质点	3
1.1.5 质点的位置坐标和位置矢量	4
1.1.6 运动方程与轨道	5
1.2 质点的位移和速度	6
1.2.1 质点的位移	6
1.2.2 速度	7
1.2.3 速度的分量形式	8
1.3 质点的加速度	11
1.3.1 加速度定义	11
1.3.2 加速度的分量形式	12
1.3.3 圆周运动	15
1.3.4 运动学的两类问题	16
1.4 运动描述的相对性	19
1.4.1 运动描述的相对性	19
1.4.2 伽利略变换	20
习题 1	22
思考题 1	23
第 2 章 质点运动定律	25
2.1 牛顿运动定律	25
2.1.1 牛顿运动三定律	25
2.1.2 相互作用与力	30
2.1.3 牛顿定律的应用	36

2 大学物理学(上册)

2.2 力学相对性原理 非惯性参考系	41
2.2.1 惯性参考系和非惯性参考系	41
2.2.2 力学相对性原理	42
*2.2.3 非惯性系与惯性力	43
习题 2	47
思考题 2	48
第 3 章 机械能和功	51
3.1 动能和动能定理	51
3.1.1 力的功	52
3.1.2 动能定理	55
3.2 保守力做功与势能	59
3.2.1 保守力与耗散力	59
3.2.2 势能	62
3.2.3 由势能函数确定保守力场	64
3.3 功能原理 能量守恒定律	65
3.3.1 质点系的动能定理	65
3.3.2 功能原理	67
3.3.3 能量转换和守恒定律	68
3.3.4 机械能守恒定律	69
习题 3	72
思考题 3	74
第 4 章 动量和角动量	75
4.1 动量定理与动量守恒定律	76
4.1.1 质点的动量定理	76
4.1.2 质点系的动量定理	79
4.1.3 动量守恒定律	80
*4.2 质心与质心运动定理	83
4.2.1 质心	83
4.2.2 质心运动定理	85
4.3 碰撞问题	89
4.3.1 (完全)弹性碰撞	90
4.3.2 完全非弹性碰撞	90

4.4 角动量与角动量定理	92
4.4.1 质点对轴线的角动量定理	93
4.4.2 质点对点的角动量定理	95
习题4	98
思考题4	100
第5章 刚体力学基础	102
5.1 刚体的运动及描述	102
5.1.1 刚体的自由度	102
5.1.2 刚体运动的基本形式	103
5.1.3 刚体定轴转动的运动学描述	104
5.2 刚体的定轴转动	105
5.2.1 外力矩及对转轴的分量	105
5.2.2 定轴转动刚体的角动量	105
5.2.3 刚体定轴转动定律	106
5.2.4 刚体定轴转动角动量定理和角动量守恒定律	106
5.3 转动惯量的计算	111
5.3.1 刚体的转动惯量及计算	111
5.3.2 平行轴定理	112
5.4 定轴转动中的功能关系	114
5.4.1 刚体定轴转动的动能	114
5.4.2 力矩的功	115
5.4.3 刚体定轴转动的动能定理	115
5.4.4 刚体的重力势能	116
5.4.5 刚体定轴转动的功能原理与机械能守恒定律	116
习题5	117
思考题5	120
第6章 狭义相对论基础	122
6.1 牛顿时空观和力学相对性原理	122
6.1.1 伽利略坐标变换	122
6.1.2 牛顿的绝对时空观	123
6.1.3 力学相对性原理	124
6.2 狭义相对论基本假设与洛伦兹变换	125

4 大学物理学(上册)

6.2.1 牛顿时空观的困难	125
6.2.2 狭义相对论的基本假设	127
6.2.3 洛伦兹坐标变换	127
6.3 狭义相对论的时空观	129
6.3.1 同时性的相对性	130
6.3.2 时间间隔的相对性	130
6.3.3 空间间隔的相对性	132
6.3.4 因果律的绝对性	134
6.4 洛伦兹速度变换公式	135
6.5 相对论动力学	137
6.5.1 相对论动量和质量	137
6.5.2 相对论动力学方程	140
6.5.3 相对论能量	142
6.5.4 相对论的动量能量关系式	145
6.5.5 光子	146
习题 6	146
思考题 6	147
第 7 章 机械振动	149
7.1 简谐振动	149
7.1.1 弹簧振子的运动	149
7.1.2 简谐振动的频率、振幅和相位	151
7.1.3 简谐振动的旋转矢量表示法	153
7.1.4 简谐振动的能量	156
7.1.5 阻尼振动和受迫振动	158
7.2 简谐振动的合成	162
7.2.1 同方向、同频率的两个简谐振动的合成	162
7.2.2 同方向、相近频率的两个简谐振动的合成 拍	164
7.2.3 相互垂直的简谐振动的合成	166
习题 7	168
思考题 7	169
第 8 章 机械波	171
8.1 机械波的产生和传播	171

8.1.1	机械波的形成	171
8.1.2	周期性机械波 横波与纵波	172
8.1.3	波长 频率与波速的关系	173
8.1.4	球面波和平面波	173
8.2	平面简谐波	174
8.2.1	平面简谐波的波动式	175
8.2.2	波动方程	177
8.3	波的能量 波的强度	180
8.3.1	波的能量	180
8.3.2	波的强度	182
8.3.3	声强级	183
8.4	惠更斯原理	184
8.4.1	波的衍射	185
8.4.2	波的反射和折射	186
8.5	波的叠加原理 波的干涉 驻波	187
8.5.1	波的干涉	187
8.5.2	驻波	190
8.5.3	两端固定弦中的驻波	191
8.5.4	半波损失	192
8.6	多普勒效应	193
8.6.1	波源静止,观察者运动	193
8.6.2	波源运动,观察者静止	194
8.6.3	波源和观察者都运动	195
	习题 8	195
	思考题 8	197

第 9 章 平衡态与分子热运动的统计规律 199

9.1	热力学平衡态	200
9.1.1	平衡态	200
9.1.2	状态参量	201
9.2	热力学第零定律 温度	201
9.2.1	热平衡 热力学第零定律	201
9.2.2	温度	202
9.2.3	温标	202

9.2.4 理想气体的状态方程	205
9.3 压强和温度的统计意义	206
9.3.1 理想气体微观模型及统计假设	206
9.3.2 压强公式	207
9.3.3 温度公式	208
9.4 分子热运动的速度和速率统计分布规律	210
9.4.1 分子的速率分布函数	210
*9.4.2 分子的速度分布函数	212
*9.4.3 分子的速度和速率分布律	212
*9.4.4 分子的速率分布率实验	216
9.5 分子热运动能量统计分布规律	217
9.5.1 玻耳兹曼能量分布律	217
9.5.2 重力场中的气体分子	218
9.5.3 能量按自由度均分定理	219
9.5.4 理想气体的内能	221
9.6 涨落现象	222
9.7 气体内的输运过程	222
9.7.1 气体内三种输运过程的宏观规律	223
9.7.2 分子的平均自由程	224
9.7.3 输运过程的微观解释	226
9.8 相变	227
9.8.1 等温相变	227
9.8.2 相图	228
9.8.3 真实气体 范德瓦尔斯方程	229
习题9	232
思考题9	234
第10章 热力学定律	236
10.1 准静态过程 功 内能和热量	236
10.1.1 准静态过程	236
10.1.2 准静态过程的功	237
10.1.3 内能	238
10.1.4 热量	239
10.2 热力学第一定律 热容量	239

10.2.1 热力学第一定律	239
10.2.2 热容	240
10.2.3 热力学第一定律对理想气体的应用	240
10.3 循环过程	247
10.3.1 循环过程	247
10.3.2 几个特殊的循环过程	249
10.4 热力学第二定律	252
10.4.1 热力学第二定律的开尔文表述和克劳修斯表述	253
10.4.2 可逆过程和不可逆过程	253
10.4.3 热力学第二定律的核心内容和统计意义	254
10.4.4 卡诺定理	255
10.5 熵(Entropy)	257
10.5.1 克劳修斯等式与不等式	257
10.5.2 态函数熵	258
10.5.3 熵(差)的计算	259
10.5.4 温熵图	262
10.6 熵增加原理	263
* 10.7 熵和熵增加原理的统计意义	264
10.7.1 热力学几率	264
10.7.2 玻耳兹曼关系	266
10.7.3 热寂说	267
习题 10	267
思考题 10	271
参考答案	273

第 1 章 质点运动学

自然界中的物质都处于不停的运动和变化之中。物质的运动形式多种多样,最为简单的是物质的机械运动,牛顿力学(经典力学)就是研究物质的机械运动的学科。

考虑到物体的实际形状和大小时,对物体运动的描述将是相当复杂的,因为我们需要同时考虑物体的大小和形状的变化,还要考虑物体的整体平移和整体转动。物理学中一个非常重要的方法就是对于实际系统,需要找出问题的主要方面,把实际问题进行简化,建立一定的理想模型,在理想模型的基础上研究问题,这是物理学研究问题的基本方法,即所谓的从复杂到简单的方法。

物体上所有的点的运动都是相同的,我们就可以用其中的一个点的运动来替代对物体的整体运动的描述,这就是质点这个理想模型的物理基础。研究物体的运动时,可以把物体看成是所有质量都集中在一个几何点上。而对真实的物体,可以通过数学上的无穷切割方法,把它分成无穷多个小的质量元,每一个质量元可以看成是一个质点,则一个真实的物体可以看成是无穷多个质点组成的质点系。因此,真实物体的运动可以看成是该质点系的运动。这种方法即所谓的从简单到复杂的方法。

对于质点的运动问题,通常可分为两个方面:一是单纯地描述质点随着时间的变化而在空间的运动情况,主要讨论如质点在空间的位置、运动轨道、运动速度、加速度等的描述,称为运动学;二是考虑物体间的相互作用,以及由此引起物体运动状态变化的规律,称为动力学。

本章我们将首先讨论对物体运动的基本描述,引入描述物质运动的基本物理思想和方法,讨论质点的运动学问题。下一章我们讨论物体间相互作用规律以及运动状态的变化与物体间相互作用的关系,即牛顿运动定律。

1.1 质点运动学基本概念

1.1.1 参考系

在地面上,我们看到的空间是静止的,大部分物体也是静止不动的,只有部分物体在运动,比如在高速公路上飞驰的汽车。这样的观测事实是建立在我们与地

面相对静止的这个基础上的。也就是说,我们看到的所谓静止的物体是相对于地面没有运动,而所谓运动的物体是相对于地面有运动。但当我们处于相对于地面运动的汽车上时,原来相对于地面没有运动的那些物体看起来就处于运动之中。这时,汽车相对于我们来讲就处于静止状态。这就是说,在自然界里物质的运动是永恒的,而静止是相对的。

在错综复杂的运动中,要观察物体的运动,我们只能先选择一个或一些相对静止的物体作为参考,然后研究该物体相对于这些物体的运动。这些被选作参考的物体称为参考系。要研究高速公路上汽车的运动,可以选择高速公路作为参考系。要研究火箭的运动,可以选地面为参考系,而要研究地球卫星的运动,我们通常选择地心为参考系。如果研究对象是太阳系中运动的飞船,可以选择太阳为参考系。在运动学中,原则上讲,参考系可任选,但要以描述起来方便为原则。不同参考系中,对同一物体运动的描述(如轨迹、速度等)是不同的,这就是运动描述的相对性。比如,在相对于地面匀速直线运动的车厢里,有一个自由下落的物体,若以车厢为参考系,物体的运动是直线运动。如果以地面为参考系,物体的运动就是曲线运动。而如果以在空中做高难度飞行特技表演的飞机上发动机的某个高速旋转的机械部件为参考系,该物体运动的描述将极其复杂。所以,要方便地描述一个物体的运动,需要选择一个合适的参考系,使我们对该物体运动的描述尽量简单。这正是建立在物体运动是相对的这个事实的基础上的。

人们常用的参考系包括:太阳参考系(太阳-恒星参考系)、地心参考系(地球-行星参考系)、地面参考系(或实验室参考系)和质心参考系。

1.1.2 坐标系

要定量地描述物体相对于参考系的运动规律,还需要在参考系上选择一个相对于该参考系静止的坐标系。坐标系实际上是参考系的数学抽象(两者相对静止),即由固结在参考系上的一组有刻度的射线、曲线或角度来表示。原则上说,在同一个参考系上,坐标系可以任意选择,但我们应以描述起来方便和数学规律简单为原则。在同一参考系中,用不同的坐标系描述同一物体的运动时,其数学表述是不同的,这与坐标系的选择有关。亦即当选择不同坐标系时,同一物体运动规律描述的数学形式的复杂程度是不同的。应该选择合适的坐标系以便能得到相对简单的物体运动规律。常用的坐标系有直角坐标系、平面极坐标系、球坐标系、柱坐标系和自然坐标系等。直角坐标系最为简单,它由三条相互垂直的坐标轴(x 轴、 y 轴和 z 轴)构成。对于运动学问题,根据问题的不同,我们可以选择不同的坐标系。

1.1.3 空间和时间

物质的运动发生在空间和时间之中,要在参考系中定量地描述物质的运动就需要测量空间的间隔和时间的间隔。因此研究物质的运动,必然要涉及空间和时间两个概念。空间和时间也是物理学研究的对象。人们对时间和空间的认识是从对周围物质世界和物质运动的知觉开始的,空间反映了物质的广延性,是与物体的体积和物体位置的变化联系在一起。时间所反映的是物理事件发生的顺序性和持续性。牛顿认为,空间和时间是独立于物质和物质运动的客观存在。随着科学的进步,人们的时空观经历了从牛顿的绝对时空观到爱因斯坦的相对论时空观的转变,从时空的有限与无限的哲学思辨到可以用科学的手段来探索时空的阶段。从现今人们对空间(和时间)的认识来讲,空间(和时间)同物质及物质的运动是密切相关的。我们不能想象离开了物质的空间(和时间)的存在。

目前人们使用的时间单位是1967年10月第13届国际计量大会上关于秒的定义:“1秒(s)是铯-133原子基态的两个超精细能级在零磁场中跃迁所对应的辐射的9 192 631 770个周期的持续时间”。而长度单位是1983年10月第17届国际计量大会上关于米的定义:“1米(m)是光在真空中(1/299 792 485)s时间间隔内所经路径的长度”。

目前,人们可量度的空间范围可从宇宙范围的尺度 10^{27} m到微观粒子的尺度 10^{-28} m,从宇宙的年龄 10^{18} s到微观粒子的最短寿命 10^{-24} s。根据已知的物理理论,极端的空间和时间间隔为普朗克长度(10^{-35} m)和普朗克时间(10^{-43} s)。也就是说,小于普朗克时空间隔时,空间和时间的概念就不再适用了。

1.1.4 质点

一般来说,在讨论实际物体的运动时,物体的大小和形状都要考虑。因为物体内部的各个部分的运动情况往往不同,即物体各部分之间还有相对运动,比如物体运动过程的形变等。但在物体的一些运动过程中,比如木块沿斜面的下滑过程,木块各部分的运动情况是完全一样的。这时我们就可以把木块看成是质点。木块的运动就可以用质点的运动来替代。

在很多情况下,比如高速公路上运动的汽车,汽车的各个部分的运动是不同的,车轮的转动,发动机零件的高速运转等运动各不相同。但是,如果我们只对汽车的整体运动感兴趣的话,汽车各部分的运动就与考虑的问题无关,因此我们仍可以把汽车看成是一个质点。另外,从运动学的角度来看,如果物体的大小和它的运动范围相比很小时,也可以不考虑物体的大小和形状对运动问题的影响。比如,当只研究地球绕太阳的公转规律时,因为地球的线度与地球公转轨道相比还

不到万分之一,尽管地球上各点的运动各不相同,我们仍可以不考虑地球的自转,且可以把地球看成是质点。但是,即使对同一个研究对象,能否把它看成质点,要根据研究的问题来定。比如,同样对于地球,当我们要研究地球表面的潮汐运动规律时,就必须考虑太阳和月球对地球表面不同地方海水的引力作用规律,这时,就不能把地球看成质点。

总之,当物体的大小、形状可忽略(如只研究地球公转)时,或运动过程中,物体各部分运动相同(如物体平动)时,我们可以把物体抽象成一个“点”,该“点”具有与物体相同的质量。这样的“点”称为质点。在质点的基础上,当我们需要考虑真实物体的运动(比如物体的形变、转动等)问题时,就可以把真实物体看成是由无穷多质点构成的集合。用对该集合运动的描述来替代相应物体的运动。

1.1.5 质点的位置坐标和位置矢量

在运动学中,要描述一个质点的运动,首先要确定质点在任意时刻的空间位置。确定质点的空间位置通常有两种办法。对某个参考系,首先选定一个坐标系。

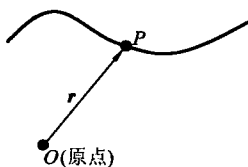


图 1-1

我们可以用质点的位置坐标或位置矢量来描述质点的空间位置。位置坐标是中学物理中常用的用坐标来描述质点空间位置的方法。位置矢量是用矢量来描述质点的空间位置该矢量由坐标原点指向质点的位置,以 r 表示,简称位矢,如图 1-1 所示。在国际单位制中,位矢大小的单位为米(m),与长度单位相同。

1. 直角坐标系

在直角坐标系中,质点的位置矢量如图 1-2 所示。

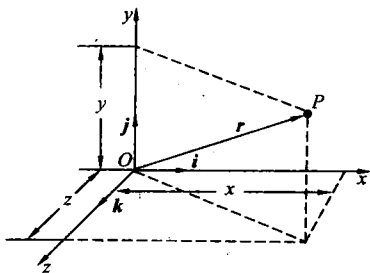


图 1-2

$$\mathbf{r} = \overrightarrow{OP}, \quad (1-1)$$

用分量形式可表示为

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}, \quad (1-2)$$

式中 $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 分别为沿 x, y, z 轴正方向的单位矢量。

位矢的大小为

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

位矢的方向可以由三个方向余弦来表示:

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

式中 α, β, γ 分别是位置矢量与 x, y, z 轴的夹角。

方向余弦满足以下关系：

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

其中只有两个是独立的。

2. 平面极坐标系

质点的平面运动可以用极坐标系来描述。质点的坐标为 r 和 θ , 如图 1-3 所示。位置矢量可表示为

$$\mathbf{r} = r\mathbf{e}_r, \quad (1-3)$$

式中 \mathbf{e}_r 为径向单位矢量；图中 \mathbf{e}_θ 为横向单位矢量。

随着质点的运动，质点在不同位置的 \mathbf{e}_r 和 \mathbf{e}_θ 的大小虽然不变（永远等于 1），但是它们的方向均可能不同，与质点的 θ 坐标有关。

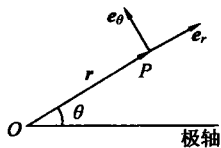


图 1-3

1.1.6 运动方程与轨道

当质点运动时，质点的位置与运动时间 (t) 有关，位置矢量满足一定的函数关系：

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t), \quad (1-4)$$

式(1-4)称为质点运动方程，它包含了质点运动的所有信息。

1. 直角坐标系中

因为

$$\mathbf{r}(t) = x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j} + z(t)\mathbf{k},$$

运动方程可以写成如下三个分量方程：

$$\begin{cases} x = x(t), \\ y = y(t), \\ z = z(t). \end{cases} \quad (1-5)$$

比如，一个质点的运动方程可以写为

$$\begin{cases} x = r \cos \omega t, \\ y = r \sin \omega t. \end{cases}$$

如果从中消去时间参量，可以得到质点运动时的空间坐标间的关系

$$x^2 + y^2 = r^2,$$

这就是质点运动时的轨道方程。

2. 平面极坐标系中

$$\mathbf{r}(t) = r(t)\mathbf{e}_r(t),$$

运动方程可以写成如下两个分量方程:

$$\begin{cases} r = r(t), \\ \theta = \theta(t). \end{cases} \quad (1-6)$$

知道了运动方程,就能够确定任意时刻质点的位置,从而完全确定质点的运动。

需要说明的是,运动方程之所以可以在具体坐标系写成分量形式,实际上是建立在运动的可叠加性基础上的。例如平抛物体时,物体的运动可以分解为在水平方向上的匀速直线运动和竖直方向上的匀加速直线运动。

1.2 质点的位移和速度

1.2.1 质点的位移

设质点沿如图 1-4 所示的轨道运动。在 Δt 时间内,质点从 A 运动到 B,则 \overline{AB} 即定义为在 Δt 时间内质点的位移。由图可知位移与初、末时刻位置矢量的关系:

$$\Delta \mathbf{r} = \overline{AB} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A. \quad (1-7)$$

位移 $\Delta \mathbf{r}$ 表示质点在 t 时刻和 $t + \Delta t$ 时刻位置间的距离和 Δt 时间内的运动方向,反映了 Δt 时间内质点的位置改变,亦即 Δt 时间内质点的位置矢量的增量。

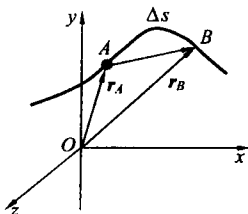


图 1-4

在直角坐标系中:

$$\mathbf{r}_A = x_A \mathbf{i} + y_A \mathbf{j} + z_A \mathbf{k},$$

$$\mathbf{r}_B = x_B \mathbf{i} + y_B \mathbf{j} + z_B \mathbf{k},$$

$$\begin{aligned} \text{则 } \Delta \mathbf{r} &= (x_B - x_A) \mathbf{i} + (y_B - y_A) \mathbf{j} + (z_B - z_A) \mathbf{k} \\ &= \Delta x \mathbf{i} + \Delta y \mathbf{j} + \Delta z \mathbf{k}. \end{aligned}$$

位移的性质如下:

(1) 矢量性。如图 1-5 所示,即在 $\Delta t_1 + \Delta t_2$ 时间内质点总位移满足矢量叠加性质,即

$$\overline{AC} = \overline{AB} + \overline{BC}.$$

(2) 位移与路程 Δs 的不同:①位移为矢量,路程(图 1-4 中 A, B 间的轨道曲线长度)为标量;②两者的大小一般不同,即