

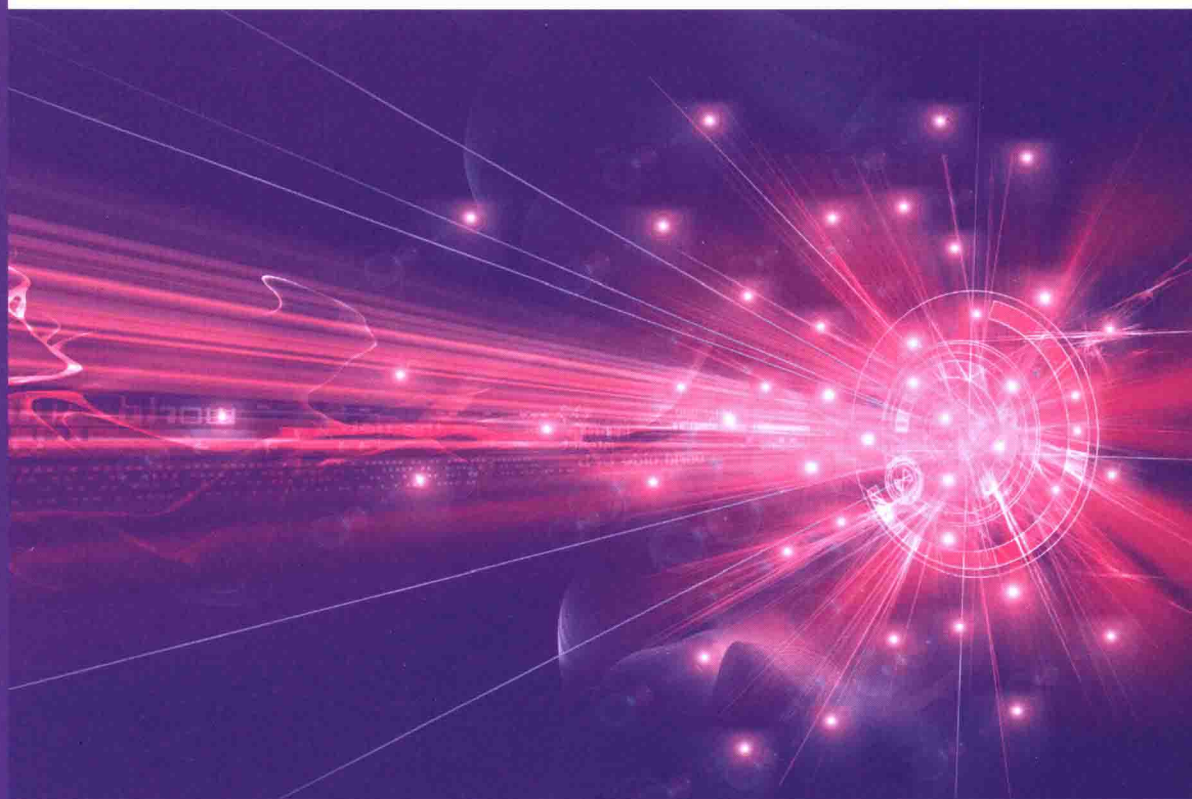
普通高等教育“十二五”规划教材

University Physics

大学物理教程

(上册)

| 唐娜斯 陈悦 张红卫 编著 |



国防工业出版社
National Defense Industry Press

普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理教程

(上册)

唐娜斯 陈悦 张红卫 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书根据独立学院近年来大学物理课程的实际教学情况,结合三本和大专院校着重培养应用型人才的特点,在充分借鉴了国内外优秀教材的基础上编著而成。内容上简化了《理工科非物理专业类专业大学物理课程教学基本要求(讨论稿)》的部分B类内容,弱化对公式来源过程的推导,降低数学上的运算,同时加强了对A类内容、公式和概念的理解与实际应用。本书分上、下两册,上册包括力学、振动与波动、气体动理论和热力学基础,下册包括电磁学、光学、相对论和量子物理。

本书可作为高等学校尤其是独立学院或大专院校理工科非物理专业的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理教程. 上册/唐娜斯,陈悦,张红卫编著. —北京:
国防工业出版社,2015.4
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-118-09968-3

I. ①大... II. ①唐... ②陈... ③张... III. ①物理
学—高等学校—教材 IV. ①04

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第054514号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 9¼ 字数 205 千字

2015年4月第1版第1次印刷 印数 1—4000册 定价 21.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

序 言

物理学是研究物质运动最一般规律和物质基本结构的学科。物理学的发展极大地推动了近代工业和科学技术的创新革命,同时促进了人类社会文明的进步。作为自然科学的带头学科,物理学研究大至宇宙、小至基本粒子等一切物质最基本的运动形式和规律。近些年来,随着教学改革不断深入,“大学物理”课程日渐被看作是一门为学生树立科学世界观、增强学生综合能力的素质教育课程。

独立学院是我国高等教育在办学模式上的一种新的尝试,它是公办高等院校教学资源与社会资金有机结合的产物。目前,大学物理学教材版本较多,但主要针对独立学院学生的教材相对较少,因此很有必要针对该层次的学生编写配套的教材。本着“夯实基础,注重专业衔接”的原则,在借鉴了一些国家级优秀教材的教学内容基础上,我们编写出了符合独立学院教学规律的这套教学用书。

本书的主要特点是:结合三本和大专院校着重培养应用型人才的特点,简化《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求》的部分B类内容,弱化了对公式来源过程的推导,降低了数学上的运算,同时加强了对A类内容、公式和概念的理解与实际应用。本书针对独立学院学生基础相对薄弱的特点,挑选出难度适中的例题和习题,让学生在课内学习和课后自学时更容易理解与掌握。在一些重要的章节中增加了和实际生活紧密相关的物理现象,可以有效激发学生的学习兴趣。全书的教学内容可以根据本校的教学实际进行调整,适用于120课时以下的课程教学。本书适合作为独立学院和专科类院校的物理学课程主讲教材或教学参考书,也可以作为物理爱好者的参考用书。

全书共分为上、下两册。上册主要由唐娜斯、陈悦、张红卫编著;下册主要由高礼静、刘津升编著。

致同学们

当初学者们第一次拿起这本物理学教程,部分同学初看会觉得很有熟悉感,力学、热学、光学和电磁学的部分内容已经在高中接触过,但是仔细一看书上的公式和习题会觉得茫然,不理解也不会做题。这是因为中学学习的是物理中最基础的内容,用的都是最简单的运算,而在大学物理中将接触其本质和更加普适的形式,使用全新的数学工具——微积分和矢量,内容与中学物理初看雷同,其实有了一个很大的飞跃。

高中物理与大学物理不仅仅在方法和数学工具有很大的不同,内容上也有很大的区别。例如,中学力学学的是最简单的一维直线运动,大学物理将扩展成为二维、三维曲线运动,无需再像中学那样去背诵那些令人“烦恼”的公式,我们只需要利用最基本的牛顿运动定律动力学矢量式就能推导出直线运动和曲线运动情况下的所有表达式。在电磁

学方面,中学介绍的大多是均匀电场和磁场,而这里我们将详细介绍包含均匀场在内的更一般的电磁现象。在光学中,和中学里利用几何光学研究透镜成像的方法不同,我们将重点介绍波动光学的知识,并用来解释生活中常见的光的波动现象。总之,希望同学们不要在继续使用以前学习物理的方法,以一个初学者的心态去面对,这样你会发现一个全新的、不一样的物理学之美。

“判天地之美,析万物之理”。大学物理是自然科学的基础学科,在理工类专业课的学习前,都会要求学好大学物理。基础课和专业课的关系就如“走”和“跑”的关系,不会走,怎么能跑?除此之外,物理学也是一门普适教育的课程,可以增强大学生的知识面,同时具有科学的价值观和世界观。即使进入到社会,从日常生活到高新技术领域,你们会发现前面学习的这些科学知识原来无所不在。

通过大学物理的学习,我们希望能提高同学们各方面的能力。

(1) 获取知识和应用知识的能力——大学物理比高中物理学习内容多,信息量大,与数学结合紧密,需要学生学会独立阅读书本内容,自学参考书和文献知识,紧密结合高等数学中微积分和矢量代数,提高自学能力和应用能力。

(2) 科学思维的能力——能够运用物理学的理论和观点,通过分析综合、演绎归纳、科学抽象、类比联想等方法正确分析、研究和计算遇到的一些物理问题;能根据单位(量纲)分析、数量级估算、极端情况和特例讨论等,进行定性思考或半定量估算,并判断结果的合理性。

(3) 解决问题的能力——对一些较为简单的实际问题,能够根据问题的性质以及实际需要,抓住主要因素,进行合理的简化,建立相应的物理模型,并用物理语言进行描述,运用所学的物理理论和研究方法,加以解决。

希望同学们在学习过程中注意以下素质的培养。

(1) 科学素质——追求真理的理想和献身科学的精神,树立学生现代科学的自然观、宇宙观和辩证唯物主义世界观,使学生具有科学的成败观和探索科学疑难问题的信心与勇气,培养学生严谨求实的科学态度和坚忍不拔的科学品格。

(2) 创新精神——激发学生求知热情、探索精神和创新欲望,使学生善于思考,勇于实践,敢于向旧观念挑战。

(3) 应用精神——通过理论知识的教学和实验课的学习,能将学到的理论知识应用到实际的生产生活中。

由于作者学术水平有限,书中难免存在不妥之处,希望老师和同学们在使用过程中多提宝贵意见,我们将在以后的再版中不断完善。

编著者
2014年11月

目 录

第 1 章 质点运动学	1
1.1 质点运动的描述	1
1.1.1 参考系、坐标系和质点	1
1.1.2 位置矢量、运动方程、轨迹方程和位移	4
1.1.3 速度	5
1.1.4 加速度	7
1.2 运动的两类问题以及运动学应用	8
1.3 圆周运动	13
1.3.1 自然坐标系	13
1.3.2 圆周运动的切向加速度及法向加速度	13
1.3.3 圆周运动的角量描述	15
1.4 相对运动	18
习题	19
第 2 章 质点动力学	21
2.1 牛顿运动定律	21
2.1.1 牛顿第一定律	21
2.1.2 牛顿第二定律	22
2.1.3 牛顿第三定律	23
2.1.4 牛顿运动定律的适用范围	24
2.2 几种常见的力和基本的自然力	24
2.2.1 常见的力	24
2.2.2 基本力	26
2.3 牛顿运动定律的应用举例	26
2.4 非惯性参考系、惯性力	29
2.4.1 非惯性参考系	29
2.4.2 惯性力	29
习题	30

第3章 运动的守恒量和守恒定律	31
3.1 质点和质点系的动量定理	31
3.1.1 质点的动量定理	31
3.1.2 质点系的动量定理	33
3.2 动量守恒定律	34
3.3 功、能量和动能定理	36
3.3.1 功	36
3.3.2 功率	37
3.3.3 质点的动能定理	37
3.4 保守力与非保守力、势能	39
3.4.1 万有引力、重力、弹性力的功及其特点	39
3.4.2 保守力和非保守力	40
3.4.3 势能	41
3.5 功能原理、机械能守恒定律	41
3.5.1 质点系的动能定理	42
3.5.2 质点系的功能原理	42
3.5.3 机械能守恒定律	43
3.6 质点的角动量和角动量守恒定律	44
3.6.1 角动量	44
3.6.2 角动量守恒	45
3.7 能量守恒定律	47
3.8 碰撞	48
习题	49
第4章 刚体的转动	51
4.1 定轴转动的运动学描述	51
4.1.1 转动	51
4.1.2 定轴转动的角速度和角加速度	52
4.2 刚体转动定律	54
4.2.1 力矩	54
4.2.2 刚体转动定律、转动惯量	55
4.2.3 转动定律的应用	57
4.3 力矩的功、刚体动能定理	57
4.3.1 力矩的功	57
4.3.2 转动刚体的动能	58
4.3.3 动能定理、机械能守恒定律	58

4.4	角动量定理、角动量守恒定律	60
4.4.1	角动量	60
4.4.2	角动量定理	61
4.4.3	角动量守恒定律	61
	习题	63
第5章	机械振动	66
5.1	简谐运动	66
5.1.1	简谐运动	66
5.1.2	振幅	68
5.1.3	周期、频率	68
5.1.4	相位	68
5.1.5	常数 φ 和 φ_0 的确定	69
5.2	旋转矢量	70
5.3	简谐运动的能量	73
5.4	一维简谐振动的合成、拍现象	74
5.4.1	同方向同频率简谐振动的合成	74
5.4.2	多个同方向同频率简谐振动的合成	76
5.4.3	两个同方向、不同频率的简谐振动的合成、拍现象	76
5.5	阻尼振动、受迫振动和共振	78
5.5.1	阻尼振动	78
5.5.2	受迫振动	79
5.5.3	共振	80
第6章	机械波	82
6.1	机械波的产生和传播	82
6.1.1	机械波的形成	82
6.1.2	波长、周期和波速	83
6.1.3	波线、波面	84
6.2	平面简谐波的波函数	84
6.2.1	平面简谐波的波函数	84
6.2.2	波函数的物理含义	86
6.3	波的能量与能流	90
6.3.1	波动能量的传播	90
6.3.2	声强级、超声波和次声波	91
6.4	惠更斯原理、波的干涉	92
6.4.1	惠更斯原理	92

6.4.2	波的干涉	93
6.5	驻波	96
6.5.1	驻波的形成	96
6.5.2	驻波方程	96
6.6	多普勒效应	99
第7章	气体分子运动论	102
7.1	气体分子运动的特征	102
7.1.1	物质的微观模型	102
7.1.2	气体分子热运动特点	102
7.1.3	统计规律性	103
7.2	理想气体物态方程	103
7.2.1	物态参量	103
7.2.2	平衡态和平衡过程	103
7.2.3	理想气体物态方程	104
7.3	理想气体的压强公式和温度公式	104
7.3.1	基本假设	104
7.3.2	压强公式的推导	105
7.3.3	温度公式	106
7.4	能量均分定理、理想气体的内能	106
7.4.1	分子的自由度	106
7.4.2	能量按自由度均分定理	106
7.4.3	理想气体的内能	107
	习题	107
第8章	热力学基础	109
8.1	功、热量和内能	109
8.1.1	平衡过程	109
8.1.2	气体做功	109
8.1.3	热量	110
8.1.4	理想气体内能	111
8.2	热力学第一定律	111
8.2.1	改变内能的两种方法	111
8.2.2	热力学第一定律	111
8.3	理想气体的等值过程	112
8.3.1	等体过程	112
8.3.2	等压过程	112

8.3.3	等温过程	113
8.3.4	绝热过程	114
8.4	循环过程、热机	115
8.4.1	热机	115
8.4.2	循环过程、循环效率	115
8.4.3	卡诺循环	117
8.5	热力学第二定律、卡诺定理	118
8.5.1	自然界过程进行的方向	118
8.5.2	热力学第二定律	118
8.5.3	卡诺定理	119
8.6	热力学第二定律的统计意义	119
8.6.1	热力学概率	119
8.6.2	熵	121
	习题	121
附录一	国际单位制 (SI) 和我国法定计量单位	124
附录二	矢量基础	127
附录三	常用物理量的单位和量纲	133
附录四	常用物理基本常数表	134
	习题答案	135
	参考文献	138

第1章 质点运动学

运动学是从几何的角度(指不涉及物体本身的物理性质和加在物体上的力)描述和研究物体位置随时间的变化规律的力学分支,是以研究质点和刚体这两个简化模型的运动为基础,并进一步研究变形体(弹性体、流体等)的运动。运动学是力学的基础,是其他力学分支的理论基础,也是自然科学和工程技术必需的基础知识。

1.1 质点运动的描述

世界上一切物质都处于永恒的运动状态之中,宇宙间的任何物体都在永不停息地运动着。运动和物质是不可分割的,运动是物质存在的形式。其中,机械运动是最简单、最基本的运动。力学就是研究物体机械运动的规律及其应用的学科。

高中质点运动的描述只限于直线和平面,不能应用在三维空间上,不具有通用性,并且是用标量来描述物体的运动。现在我们将用矢量来描述质点的运动,用微积分的方法来解运动学问题。

描述物体的运动分为几个基本步骤:①选择模型,本章继续学习质点模型;②选择参考系;③在参考系上选择合适的坐标系(本章重点学习直角坐标系和自然坐标系);④描述物体运动的物理量和物理量之间的关系。

1.1.1 参考系、坐标系和质点

1. 参考系

运动的绝对性:运动是绝对的,指事实上万事万物都是运动的,大到星球,小到物质内的原子、分子,都在不断地运动的,并没有真正静止的物体。

运动的相对性:一辆汽车在公路上行驶,坐在汽车里的人坐着不动,觉得自己是静止的,而地面上的人看到汽车上的人在跟随车运动(图1-1)。为什么地面上的人认为汽车上的人在运动,而汽车上的人认为自己是静止的呢?这是因为车上的人选择相对自身静

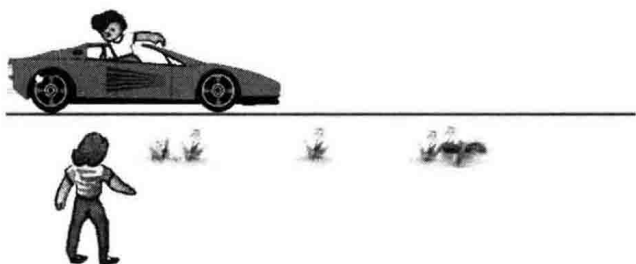


图1-1 运动的相对性

止的车为参照物,觉得自己是静止的;而地面的人选择地面为参照物觉得车上的人是运动的。因此,选择不同的参照物对同一物体的运动情况有不同的描述。

在研究物体的运动时,选来作为参考的另外的物体叫做**参考系**(reference frame), 又称**参照系**。用来做参考系的物体都是假定不动的,被研究的物体是运动还是静止,都是相对于参考系而言的。参考系的选取具有任意性,但应以观察方便和描述尽可能简单为原则。比较不同的运动时,应该选择同一参考系。同一运动选择不同的参考系,观察结果一般不同。运动是相对的,指因为选取参考系的不同,同一个物体有不同的运动形式。

2. 坐标系

为了说明质点的位置、运动的快慢、方向等,必须选取**坐标系**(coordinate system)。在参考系中,为确定空间一点的位置,按规定方法选取的有次序的一组数据,叫做“坐标”。在某一问题中规定坐标的方法,就是该问题所用的坐标系。坐标系的种类很多,常用的坐标系有自然坐标系(图 1-2)、平面极坐标系(图 1-3)、球面坐标系(或称球坐标系)(图 1-4)、直角坐标系(图 1-5)和柱面坐标系(或称柱坐标系)。其中,大家最熟悉的是直角坐标系,也称为正交坐标系。

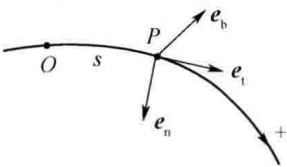


图 1-2 自然坐标系

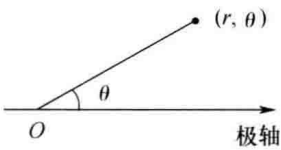


图 1-3 平面极坐标系

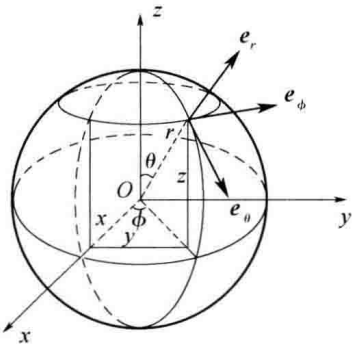


图 1-4 球面坐标系

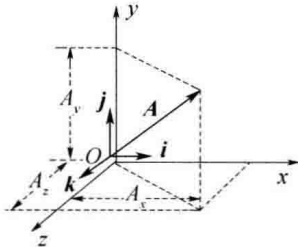


图 1-5 直角坐标系

直角坐标系为右手系,我们定义三个单位矢量(大小为 1 的矢量), i (x 轴方向)、 j (y 轴方向)、 k (z 轴方向),任意矢量 A 在直角坐标系中可以表示为

$$A = A_x i + A_y j + A_z k$$

矢量的大小为

$$|A| = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}$$

i 、 j 、 k 这三个单位矢量满足如下关系:

标积:

$$\mathbf{i} \cdot \mathbf{i} = \mathbf{j} \cdot \mathbf{j} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{k} = 1$$

$$\mathbf{i} \cdot \mathbf{j} = \mathbf{j} \cdot \mathbf{k} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{i} = 0$$

矢积:

$$\mathbf{i} \times \mathbf{i} = \mathbf{j} \times \mathbf{j} = \mathbf{k} \times \mathbf{k} = 0$$

$$\begin{cases} \mathbf{i} \times \mathbf{j} = -\mathbf{j} \times \mathbf{i} = \mathbf{k} \\ \mathbf{j} \times \mathbf{k} = -\mathbf{k} \times \mathbf{j} = \mathbf{i} \\ \mathbf{k} \times \mathbf{i} = -\mathbf{i} \times \mathbf{k} = \mathbf{j} \end{cases}$$

说明直角坐标系是右手系, $\mathbf{i}$ 、 $\mathbf{j}$ 、 $\mathbf{k}$ 三个单位矢量满足右手螺旋法则, 如图 1-6 所示。

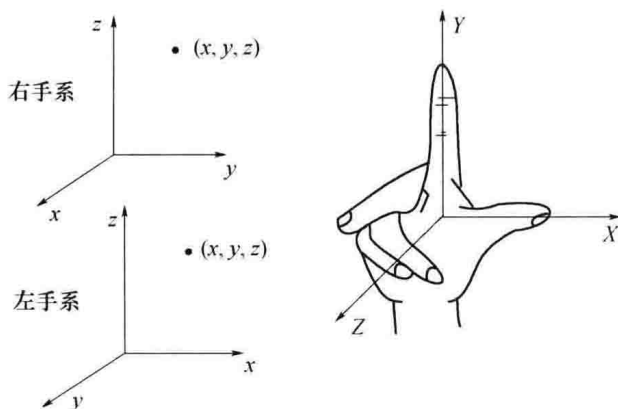


图 1-6 右手螺旋法则和右手系

注:(1) 参考系、坐标系是任意选择的,视处理问题方便而定。其中直角坐标系和极坐标系可以描述一维、二维和三维。球坐标系和柱坐标系一般描述三维物体,自然坐标系只能描述二维物体。

(2) 矢量和标量的印刷体用粗体和非粗体区分。例如,在 $\mathbf{A} = A_x \mathbf{i} + A_y \mathbf{j} + A_z \mathbf{k}$ 中, $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{i}$ 、 $\mathbf{j}$ 、 $\mathbf{k}$ 这几个粗体表示矢量, A_x 、 A_y 、 A_z 非粗体表示标量。由于在手写矢量时不能用粗体和非粗体区分,所以矢量的标准书写格式是在矢量上加箭头。例如, $\mathbf{A} = A_x \mathbf{i} + A_y \mathbf{j} + A_z \mathbf{k}$ 手写时应该写为 $\vec{A} = A_x \vec{i} + A_y \vec{j} + A_z \vec{k}$ 。

(3) 同一个物理量在不同坐标系中大小相同,但公式形式会不相同。

3. 质点

在某些情况下,我们忽略物体的大小和形状,而把它看作一个具有质量、占据空间位置的物体,这样的物体称为质点 (mass point)。质点是一种理想模型,而不真实存在 (物理中有很多理想模型),物体能否视为质点是有条件的、相对的。可视为质点的运动物体有以下两种情况:①运动物体的形状和大小跟所研究的问题相比可忽略不计,如研究地球绕太阳的公转,可把地球当作一质点。②做平动 (平动时候质点所有质量元具有相同的速度和加速度) 的物体,由于物体上各点的运动情况相同,可以用一个点代表整个物体的运动。如果有转动,质点模型就不再适用,详见第 4 章。

1.1.2 位置矢量、运动方程、轨迹方程和位移

1. 位置矢量

定义:由坐标原点到质点所在位置的矢量称为位置矢量(position vector),简称位矢或径矢。

如图 1-7 所示,在直角坐标系中,一般情况下质点 P 的位矢 $\mathbf{r}$ 表示为

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

位矢的国际单位制单位为 m,大小为

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

$\mathbf{r}$ 方向可由方向余弦确定:

$$\cos\alpha = \frac{x}{r}, \cos\beta = \frac{y}{r}, \cos\gamma = \frac{z}{r} \quad (1-3)$$

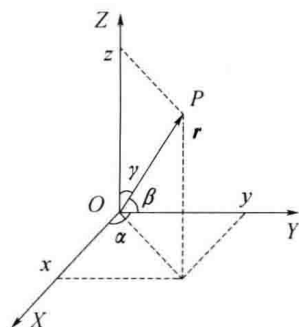


图 1-7 位置矢量

二维时,位矢 $\mathbf{r}$ 表示为

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j}$$

位矢大小为

$$r = |\mathbf{r}| = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (1-4)$$

$\mathbf{r}$ 方向可由方向余弦确定:

$$\cos\alpha = \frac{x}{r}, \cos\beta = \frac{y}{r} \text{ 或 } \tan\beta = \frac{y}{x}$$

一维时:位矢 $\mathbf{r}$ 表示为

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i}$$

位矢大小为

$$r = |\mathbf{r}| = x \quad (1-5)$$

一维时,位矢可以用标量 x 表示,用正、负号表示方向。

2. 运动方程

质点的位置坐标与时间的函数关系,称为运动方程(kinematic equation)。

(1) 矢量式:

$$\mathbf{r}(t) = x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j} + z(t)\mathbf{k} \quad (1-6)$$

(2) 分量式:

$$x = x(t), y = y(t), z = z(t) \quad (1-7)$$

运动学方程:表示质点位置随时间变化的关系,即

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$$

用直角坐标分量表示为

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases} \quad (1-8)$$

用极坐标分量表示为

$$\begin{cases} r = r(t) \\ \varphi = \varphi(t) \end{cases} \quad (1-9)$$

在自然坐标系中表示为

$$s = s(t) \quad (1-10)$$

3. 轨迹方程(又称轨道方程)

轨迹方程(orbit equation)就是与几何轨迹对应的代数描述。若将运动方程 $\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases}$

中时间 t 消去,则 y 是 x, z 的函数,即 $y = f(x, z)$,称为质点运动的轨迹方程。

4. 位移

以平面运动为例,取直角坐标系,如图 1-8 所示。

设 $t, t + \Delta t$ 时刻质点位矢分别为 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$,则 Δt 时间间隔内位矢变化为

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 = \mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t) \quad (1-11)$$

式中: $\Delta \mathbf{r}$ 为该时间间隔内质点的位移(displacement)(m)。

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 = (x_2 - x_1)\mathbf{i} + (y_2 - y_1)\mathbf{j} + (z_2 - z_1)\mathbf{k} \quad (1-12)$$

其大小为

$$|\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (1-13)$$

注意:(1) $\Delta \mathbf{r}$ 与 $\mathbf{r}$ 二者均为矢量,前者是过程量,后者为瞬时量。

(2) $\Delta \mathbf{r}$ 与 Δs ($A \rightarrow B$ 路程)二者均为过程量,前者是矢量,后者是标量。一般情况下, $|\Delta \mathbf{r}| \neq \Delta s$ 。当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $|\Delta \mathbf{r}| = \Delta s$, 表示为 $|\mathrm{d}\mathbf{r}| = \mathrm{d}s$ 。

(3) $\Delta \mathbf{r}$ 与 Δr ,前者为矢量,后者为标量。 $|\Delta \mathbf{r}| = |\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1|$,而 $\Delta r = \Delta |\mathbf{r}| = |\mathbf{r}_2| - |\mathbf{r}_1| = r_2 - r_1$,所以 $|\Delta \mathbf{r}| \neq \Delta r$ 。

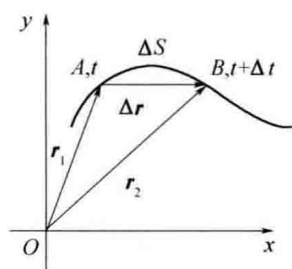


图 1-8 位移

1.1.3 速度

为了描述质点运动的快慢及方向,引进了速度(velocity)的概念。速度表示物体运动的快慢程度。速度是矢量,有大小和方向,国际单位制单位为 m/s。

1. 平均速度

平均速度指位移与时间的比值。平均速度是矢量,方向为位移的方向。其计算公式为

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1-14)$$

式中: $\bar{\mathbf{v}}$ 为 $t \rightarrow t + \Delta t$ 时间间隔内质点的平均速度。

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \mathbf{i} + \frac{\Delta y}{\Delta t} \mathbf{j} + \frac{\Delta z}{\Delta t} \mathbf{k} = \bar{v}_x \mathbf{i} + \bar{v}_y \mathbf{j} + \bar{v}_z \mathbf{k} \quad (1-15)$$

$\bar{\mathbf{v}}$ 与 $\Delta \mathbf{r}$ 的方向相同。

注意:(1) 平均速度反映一段时间内物体运动的平均快慢程度,它与一段位移或一段时间相对应。

(2) 在变速直线运动中,平均速度的大小与选定的时间或位移有关,不同时间段内或不同位移上的平均速度一般不同,必须指明求出的平均速度是对应哪段时间内或哪段位移的平均速度,不指明对应的过程的平均速度是没有意义的。

(3) 平均速度是矢量,其方向与一段时间 Δt 内发生的位移方向相同,与运动方向不一定相同。

(4) 平均速度不是瞬时速度的平均值,是位移与时间的比值。

2. 瞬时速度

平均速度粗略地描述了质点的运动情况。为了描述质点运动的细节,引进了瞬时速度,即

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1-16)$$

式中: $\mathbf{v}$ 为质点在 t 时刻的瞬时速度,简称速度,且

$$\boxed{\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}} \quad (1-17)$$

质点的速度等于位矢对时间的一阶导数。速度是描述质点运动快慢和方向的物理量,等于位矢对时间的微分,同时也等于加速度对时间的积分,即

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{dx}{dt} \mathbf{i} + \frac{dy}{dt} \mathbf{j} + \frac{dz}{dt} \mathbf{k} = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} + v_z \mathbf{k} \quad (1-18)$$

式中: $v_x = \frac{dx}{dt}$, $v_y = \frac{dy}{dt}$, $v_z = \frac{dz}{dt}$ 。 v_x 、 v_y 、 v_z 分别为 $\mathbf{v}$ 在 x 、 y 、 z 轴方向的速度分量。 $\mathbf{v}$ 的大小为

$$|\mathbf{v}| = \left| \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right| = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dz}{dt} \right)^2} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1-19)$$

3. 平均速率与瞬时速率

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{t \rightarrow t + \Delta t \text{ 内路程}}{\Delta t} \quad (\text{图 1-8})$$

式中: $\bar{v}$ 为质点在 $t \rightarrow t + \Delta t$ 时间段内得平均速率。为了描述运动的细节,引进了瞬时速率,即

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}$$

式中: v 为 t 时刻质点的瞬时速率,简称速率(m/s)。

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时(图 1-8), $\Delta \mathbf{r} = d\mathbf{r}$, $\Delta s = ds$, 有 $|d\mathbf{r}| = ds$ 。

可知

$$v = \frac{ds}{dt} = \frac{|d\mathbf{r}|}{dt} = \left| \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right| = |\mathbf{v}| \quad (1-20)$$

此式说明,速率就是路程对时间的一阶导数(区别于速度是位矢对时间的一阶导数),瞬时速率等于瞬时速度的大小,等于位矢对时间一阶导数的大小。

速率的定义式为

$$v = \frac{ds}{dt} \quad (1-21)$$

注意:(1) 平均速率 $\bar{v}$ 与平均速度 $\bar{\mathbf{v}}$ 二者均为过程量;前者为标量,后者为矢量。

(2) 速率 v 与速度 $\mathbf{v}$ 二者均为瞬时量;前者为标量,后者为矢量。

1.1.4 加速度

为了描述质点速度变化的快慢,引进了加速度的概念,其国际单位制单位为 m/s^2 。

1. 平均加速度

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1}{\Delta t} \quad (\text{图 } 1-9)$$

式中: $\bar{\mathbf{a}}$ 为 $t \rightarrow t + \Delta t$ 时间间隔内质点的平均加速度。

2. 瞬时加速度

为了描述质点运动速度变化的细节,引进了瞬时加速度,即

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{\mathbf{a}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt}$$

式中: $\mathbf{a}$ 为质点在 t 时刻的瞬时加速度,简称加速度,且

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} \quad (1-22)$$

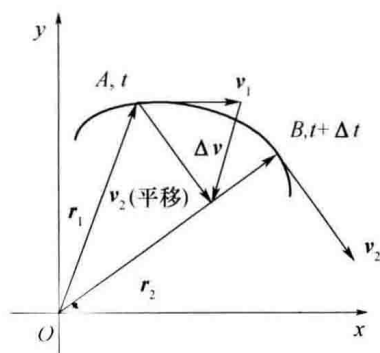


图 1-9 平均加速度

加速度等于速度对时间的一阶导数或位矢对时间的二阶导数。

在直角坐标系中展开,得

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{dv_x}{dt}\mathbf{i} + \frac{dv_y}{dt}\mathbf{j} + \frac{dv_z}{dt}\mathbf{k} = \frac{d^2x}{dt^2}\mathbf{i} + \frac{d^2y}{dt^2}\mathbf{j} + \frac{d^2z}{dt^2}\mathbf{k} \quad (1-23)$$

式中: $a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$, $a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2}$, $a_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2z}{dt^2}$, a_x 、 a_y 、 a_z 分别称为 $\mathbf{a}$ 在 x 、 y 、 z 轴上的分量。

$\mathbf{a}$ 的大小为

$$|\mathbf{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} = \sqrt{\left(\frac{dv_x}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dv_y}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dv_z}{dt}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{d^2x}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)^2}$$

注意: $\mathbf{a}$ 沿 $\bar{\mathbf{v}}$ 的极限方向,一般情况下 $\mathbf{a}$ 与 $\mathbf{v}$ 方向不同(如不计空气阻力的斜上抛运