



工业和信息化普通高等教育“十三五”
规划教材

大学物理

李建新 刘栓江 主编
王磊 孙兆楼 吴洁 朱登雷 副主编

本书提供微课视频

扫描二维码即可观看



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



工业和信息化部普通高等教育“十三五”
规划教材

大学物理

李建新 刘栓江 主编

王磊 孙兆楼 吴洁 朱登雷 副主编

人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理 / 李建新, 刘栓江主编. — 北京: 人民
邮电出版社, 2017.8
ISBN 978-7-115-45920-6

I. ①大… II. ①李… ②刘… 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(2017)第198285号

内 容 提 要

本书是参照教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2010年版)编写而成的。内容包括:绪论、质点运动学、质点动力学、刚体力学、流体力学基础、振动、波、声波、气体动理论、热力学概论、静电场、稳恒电流、稳恒磁场、物质的磁性、电磁感应、波动光学、激光技术原理、原子与原子核、物理方法、附录共20部分。

本书注重教学内容的系统性与实用性的结合,力求做到简明扼要又重点突出,适合70学时左右的大学物理课程教学需求。在每章后配有相应的思考题和习题,在书中插入了一些物理现象的实验演示视频,通过使用手机扫描二维码即可观看。

本书可作为高等院校理工科类本科学生的大学物理课程教材,也可供专科院校、职业技术学院等选用。

-
- ◆ 主 编 李建新 刘栓江
副 主 编 王 磊 孙兆楼 吴 洁 朱登雷
责任编辑 邹文波
责任印制 陈 犇
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京鑫正大印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 16.75 2017年8月第1版
字数: 377千字 2017年8月北京第1次印刷
-

定价: 44.00 元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

广告经营许可证: 京东工商广登字 20170147 号

前 言

本书是参照教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2010年版),并结合一般理工院校专业的特点和现在学生的实际情况编写而成的。

以物理学基础知识为内容的大学物理课程,它所包含的经典物理学、近代物理学和物理学在科学技术上应用的初步知识等都是高素质人才所必备的,是学习掌握其他自然科学和工程技术的基础。除此之外,大学物理课程还有一个越来越重要的作用,就是帮助学生建立科学的世界观,进行科学能力和科学方法的训练。

本书内容有:绪论、力学、热学、电磁学、光学、原子原子核、物理方法和附录。考虑到目前许多高等院校应用型教学改革现状,我们注意了以下几个方面。

1. 在内容编排和选材上,既考虑到基本物理理论及内容的选择,同时又增加了一些实用型的内容。注意了起点低,终点高,由浅入深,通过教材内容、思考题和习题,使学生能够较为容易地掌握所学知识,并为今后的学习打下一定的知识基础。

2. 本书还特别注意了物理方法的引导和总结,力求使学生通过学习本书后,不但能掌握相关知识,而且能掌握相关方法,为今后的学习和实践提供较好的指导。

3. 本书特别增加了流体力学基础、激光技术原理等内容,可作为相关专业的选讲内容,也可供学生自学。

4. 为方便开展双语教学,本书还给出了物理名词对应的英文词汇。

5. 在书中适当位置插入了一些物理现象的实验演示视频,通过使用手机扫描二维码即可观看,以激发学生的学习兴趣,帮助学生对物理知识的正确理解和掌握。

本书由李建新、刘栓江担任主编并负责全书统稿,王磊、孙兆楼、吴洁、朱登雷担任副主编。各作者分工如下:李建新编写第一、二、三、五章,计约 8.3 万字;刘栓江编写绪论、第四、六、七章、附录,计约 5.4 万字;王磊编写第八、十、十六章,计约 7.6 万字;孙兆楼编写第十四、十五章,计约 6.4 万字;吴洁编写第九、十二、十三、十八章,计约 6.3 万字;朱登雷编写第十一、十七章,计约 3.1 万字。

由于我们的水平和教学经验有限,书中难免会存在缺点和不足之处,在此诚恳地希望读者批评指正。

编 者

2017年5月

目 录

绪论	1
第一章 质点运动学	3
第一节 参考系与质点	3
第二节 质点运动的描述	4
第三节 抛体运动	9
第四节 圆周运动	10
思考题一	12
习题一	13
第二章 质点动力学	15
第一节 牛顿运动定律	15
第二节 力的积累作用 功与冲量	16
第三节 保守力做功 势能	19
第四节 动量守恒定律	21
第五节 能量守恒定律	24
思考题二	25
习题二	26
第三章 刚体力学	28
第一节 刚体的平动和转动	28
第二节 刚体的定轴转动	29
第三节 转动定理和转动惯量	31
第四节 刚体定轴转动的动能定理	35
第五节 角动量及角动量守恒定律	37
思考题三	40
习题三	40
第四章 流体力学基础	42
第一节 流体动力学的基本概念	42
第二节 伯努利方程及其应用	44
第三节 流体的粘滞性	49
思考题四	50

习题四	50
第五章 振动	51
第一节 简谐振动	51
第二节 简谐振动的能量	55
第三节 简谐振动的合成	57
第四节 阻尼振动 受迫振动 共振	63
思考题五	66
习题五	68
第六章 波	70
第一节 波的基本概念	70
第二节 平面简谐波的波方程和波的能量	73
第三节 波的叠加原理和惠更斯原理	79
第四节 波的干涉	80
第五节 驻波	81
思考题六	84
习题六	85
第七章 声波	88
第一节 声波	88
第二节 超声波及其应用	91
习题七	95
第八章 气体动理论	96
第一节 气体动理论的基本观点	96
第二节 理想气体及其状态描述	97
第三节 理想气体的压强公式	99
第四节 温度的宏观及微观意义	101
第五节 麦克斯韦速率分布律	102
第六节 能量按自由度均分定理	104
思考题八	106
习题八	107
第九章 热力学概论	108
第一节 热力学第一定律	108
第二节 理想气体的摩尔热容	110
第三节 热力学第一定律应用于理想气体	111
第四节 循环 卡诺循环	114
第五节 宏观过程的方向性	119
思考题九	122

习题九	122
第十章 静电场	124
第一节 电荷 库仑定律	124
第二节 电场 电场强度	126
第三节 高斯定理	131
第四节 静电场的环路定理 电势	138
第五节 静电场中的金属导体	143
第六节 静电场中电介质的极化	145
第七节 电容和电容器	146
第八节 静电场的能量	149
思考题十	151
习题十	152
第十一章 稳恒电流	154
第一节 稳恒电流 电流密度	154
第二节 电动势	155
第三节 闭合电路和一段含源电路的欧姆定律	157
第四节 基尔霍夫定律	159
思考题十一	161
习题十一	161
第十二章 稳恒磁场	163
第一节 磁场	163
第二节 毕奥-萨伐尔定律及其应用	166
第三节 安培环路定理及其应用	167
第四节 磁场对运动电荷的作用	171
第五节 磁场对载流导线的作用	172
思考题十二	174
习题十二	174
第十三章 物质的磁性	177
第一节 磁介质	177
第二节 磁场强度 磁介质中的安培环路定律	178
第三节 铁磁质	180
思考题十三	182
习题十三	182
第十四章 电磁感应	183
第一节 电磁感应现象	183
第二节 自感现象和互感现象	189

第三节 磁场的能量	192
第四节 涡流和趋肤效应	194
思考题十四	197
习题十四	199
第十五章 波动光学	201
第一节 光的相干性 杨氏双缝实验	201
第二节 光程和光程差 薄膜干涉	204
第三节 劈尖的干涉 牛顿环	208
第四节 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理	212
第五节 单缝衍射 光学仪器分辨率	213
第六节 衍射光栅	217
第七节 X射线的衍射	218
第八节 自然光和偏振光	220
第九节 偏振光的获得	221
思考题十五	225
习题十五	226
第十六章 激光技术原理	228
第一节 激光	228
第二节 激光的特性及应用	231
第三节 常用激光器	233
第四节 全息照相	235
习题十六	237
第十七章 原子与原子核	239
第一节 原子模型	239
第二节 实物粒子的波粒二象性	242
第三节 原子核	243
第四节 放射性衰变	246
第五节 原子能及其和平利用	248
习题十七	251
第十八章 物理方法	252
第一节 科学方法与物理学	252
第二节 物理学研究方法	253
第三节 物理方法与工程技术研究	257
习题十八	259
附录 常用的重要物理常量	260

绪 论

从有文字记载的人类思想史的最初篇章开始，人们便一直在寻找各种途径，谋求对已知的那些纷繁迷乱的事件加以整理，赋予某种秩序。自然科学就是这种谋求秩序的做法之一，并在近几个世纪形成了系统的研究方法。这些方法包括观察的技术，推理和预言的法则，设计实验的思想以及交流实验结果和理论结果的途径等。所有这些都称为科学方法。

物理学是重要的自然科学分支之一。物理学研究宇宙间物质存在的各种主要的基本形式，它们的性质、运动和转化以及内部结构，从而认识这些结构的组元及其相互作用、运动和转化的基本规律。物理学的各分支学科是按物质的不同存在形式和不同运动形式划分的。客观世界是一个内部存在着普遍联系的统一体。物理学家力图寻找一切物理现象的基本规律，从而去统一地理解一切物理现象。

经典力学研究宏观物体的低速机械运动的现象和规律。宏观是相对原子等微观粒子而言的，低速是相对光速而言的。热学研究热的产生和传导，研究物质处于热状态下的性质和这些性质如何随着热状态的变化而变化。经典电磁学研究宏观电磁现象和客观物体的电磁性质。光学研究光的性质及其和物质的各种相互作用，光是电磁波。

对高速运动现象的研究建立了狭义相对论，对原子内部运动状态的研究导致了量子力学的诞生。原子和原子核物理的研究不仅成功地解释了元素周期性、化学键等重大课题，而且使人们对原子及原子核的性质、内部结构、内部受激状态、衰变过程、裂变过程以及它们之间的反应过程等有了较深入的认识。

物理学是精密科学。物理现象的有序性和规律性是以一定的原理、定律和定理来反映的，物理原理、定律和定理则表征了该物理现象中若干物理量之间的关系，物理量之间的关系则是用数学运算来表示的。从数学角度而言，物理量大致可分成标量和矢量两种。标量计算遵从代数运算法则，矢量运算遵从平行四边形法则。

物理学实验都是可以重复和再现的。物理学的定律和理论都是以实验观测结果为依据，然后又被实验所验证的。引入或定义物理量，必须做到两点，一是规定一种测定这个物理量的方法或标准，二是给它规定一种度量的单位。目前国际上已选定了7个物理量作为基本量，规定了它们的测量方法和单位。这些量是质量、长度、时间、电流、热力学温度、光强度和物质的量，在此基础上建立了国际单位制（SI）。物理学中的其他量的单位，都是基本单位的导出单位。

面对比较复杂的现象或过程，为了分析方便，抓住主要矛盾，物理学常常采用理想模型进行简化。通过对模型的分析，从中得到现象或过程的基本规律。然后，将所得的规律再带回到实验中去，与实验结果相比较，观察其正确程度，并进行必要的修正。如质点、刚体、理想气体、光线、点电荷等都是成功的理想模型。

由于物理学所研究的物质运动普遍地存在于复杂运动形态之中，是深刻认识复杂运动的起点或途径，因而物理学也成为自然科学和技术科学中多个学科的理论基础或支柱。同时，由于物理学与自然科学其他领域和技术越来越广泛地结合，从而促成了一个又一个新兴学科的出现。物理学也总是以其特有的方式推动着人类社会的发展。

学习物理学必须正确理解物理理论和概念，掌握现象和过程的物理图象，弄清定律和定理的条件、适用范围和应用方法。通过物理课程的学习，学生可以在科学实验能力、计算能力和抽象思维能力等方面得到严格训练，从而提高提出问题、分析问题和解决问题的本领。

第一章 质点运动学

本章作为力学的第一章，给出了描述物体运动的前提和方法，介绍了参考系、坐标系、质点等重要概念，定义了位移、速度、加速度等表示物体运动状态的物理量，并具体分析了几种常见的运动形式。

第一节 参考系与质点

物体的运动都是相对于一定参照物的运动。

一、参考系

确定物体的位置需要参考物，描述物体位置的变化也必然需要参考物。这种为描述物体的位置及其运动而选定的物体（或物体组）叫做参考系（frame of reference）。

在描述物体的运动之前要首先确定参考系。被选作参考系的物体，是观察者认为“静止”的物体，是观察者的观察角度或立足之处。同一物体的运动，因选择的参考系不同，观察的结果也不同。如观察无风天雨滴的运动。以地球为参考系（在地面上观察），雨滴竖直向下运动；以行进的车辆为参考系（在行进的车上观察），雨滴倾斜向后运动。

要想定量描述物体的运动，仅有参考系是不够的，还需要在参考系上建立适当的坐标系（system of coordinates）。在坐标系中，物体的位置由坐标定量地确定。常用的坐标系有直角坐标系、极坐标系、球坐标系等。具体描述物体的运动规律时，可根据具体情况选择坐标系形式。选择的坐标系不同，仅影响到描述物体运动所用的参数，对物体的运动性质及规律无任何影响。不过坐标系选择得适当，可以简化计算，便于描述。由于坐标系是固定于参考系上的，因此坐标系的实质是参考系的数学抽象。

二、质点

实际物体的运动往往是复杂的，影响运动的因素也是很多的。但是，在这诸多因素中，有些对物体的运动起着主要的、决定的作用，有些则是次要的、微不足道的。我们在处理实际问题时，如果将所有因素不加区分地统统考虑，就难以把握问题的实质，甚至使问题变得不可解。因此，在研究实际物体的运动时，要分清问题中的主要因素、次要因素，根据问题性质，忽略一些次要因素，将研究对象简单化、理想化、抽象化。经过这样处理的研究对象称作物理模型。

质点是力学中一个极为重要的物理模型。研究物体运动时，如果物体的大小、形状可

以忽略,同时,所研究的问题又不涉及物体的转动与形变,这种情况下,我们就可以用一个没有大小、没有形状的“点”来代替实际物体。在物体的机械运动中,由于质量起着很重要的作用,因此我们使这个“点”保留质量。这就是质点 (particle)。

一个物体能否被抽象为质点,首先要根据所研究问题的性质而定。研究地球绕太阳的公转时,可以将地球看成质点;研究地球自转时,就不能把它看成质点了,因为点是谈不上自转的。另外,物体能否被看成质点,还要看问题要求的精确度。将实际物体抽象为质点,等于忽略了许多对物体运动影响的因素,这必然会带来理论与实际的误差,如果这一误差导致计算结果不满足问题要求的精确度,就不能使用质点模型了。这时,可以根据问题需要,选择新的物理模型。

第二节 质点运动的描述

选定参考系,并建立相应坐标系之后,就可以在坐标系中对质点的运动做定量描述了。

一、质点的运动学方程

如图 1-1 所示,选择某物为参考系,并在参考系上建立坐标系 $O-xyz$ 。设质点位于空间的 P 点上,则 P 点的位置可用坐标 x 、 y 、 z 表示,即 $P(x, y, z)$ 。除此之外,力学中还常采用矢量表示法, P 点的位置由自坐标原点 O 至 P 点所引的矢量 r 表示(见图 1-1)。矢量的大小等于 P 点和坐标原点间的距离 r ,方向由 O 指向 P 。这个矢量称为质点的位置矢量 (position

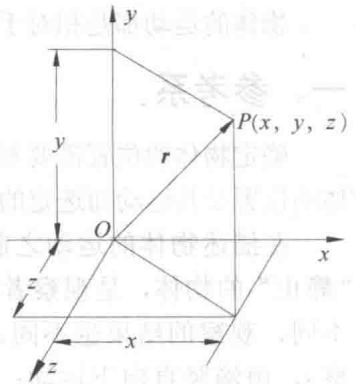


图 1-1 空间直角坐标系

vector), 简称位矢或矢径。描述质点的空间位置,用坐标和用位置矢量是一致的。由图 1-1 可以看出,坐标 x 、 y 、 z 是矢量 r 在直角坐标系 3 个坐标轴上的投影。因此,在直角坐标系中位置矢量的正交分解式为

$$\mathbf{r} = xi + yj + zk \quad (1-1)$$

i 、 j 、 k 分别为 x 、 y 、 z 轴方向的单位矢量。位置矢量的大小为

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

它表明了质点距坐标原点的距离。质点相对原点的方位,用位置矢量的方向余弦表示。它们分别是

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

α 、 β 、 γ 分别为 r 与 x 、 y 、 z 坐标轴的夹角。 $\cos \alpha$ 、 $\cos \beta$ 、 $\cos \gamma$ 之间有如下关系

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1 \quad (1-4)$$

质点运动时,它的位置不断地随时间变化,因此它的位置矢量 r 是时间 t 的函数,即

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

式(1-5)称为质点的运动学方程(kinematical equation)。在直角坐标系中,运动学方程的正交分解式为

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

质点的运动学方程,描述了质点的运动规律。根据它可求得质点在任意时刻的位置及运动状态。

因为质点的位置还可以用坐标表示,所以它的运动学方程还有下面的标量形式

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

质点运动时描出的轨迹称为质点的运动轨迹。在坐标系中它是质点位置矢量的矢端画出的曲线。式(1-7)是以时间 t 为参数的质点轨迹的参数方程,消去参数,便可得出质点的轨迹方程。例如,当质点在平面上运动时,其运动学方程的标量形式为

$$x=x(t) \quad y=y(t)$$

消去参数 t ,得到轨迹方程为

$$y=y(x) \quad (1-8)$$

二、位移和路程

质点运动时,其位置矢量随时间不断变化。为表示质点位置的变化情况,我们定义一个新的物理量——位移矢量。如图1-2所示,质点沿某曲线运动。 t 时刻位于 A 点,位置矢量为 $\mathbf{r}(t)$;经过 Δt 时间,质点运动到 B 点,位置矢量为 $\mathbf{r}(t+\Delta t)$ 。定义:由始点 A 到终点 B 的有向线段 \overline{AB} 叫作质点在这一运动过程中的位移矢量,简称位移(displacement)。由图1-2可以看出,质点在某一运动过程中的位移等于它在该过程中位置矢量的增量,记作 $\Delta\mathbf{r}$ 。即

$$\Delta\mathbf{r}=\mathbf{r}(t+\Delta t)-\mathbf{r}(t) \quad (1-9)$$

在直角坐标系中位置矢量可用正交分解式表示,

$$\mathbf{r}(t)=x(t)\mathbf{i}+y(t)\mathbf{j}+z(t)\mathbf{k} \quad (1-10)$$

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

由式(1-9)、式(1-10)和式(1-11)可得到质点的位移为

$$\Delta\mathbf{r}=\Delta x\mathbf{i}+\Delta y\mathbf{j}+\Delta z\mathbf{k} \quad (1-12)$$

其中, Δx 、 Δy 、 Δz 是位移矢量在 x 、 y 、 z 轴上的投影,它们分别为

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= x(t+\Delta t) - x(t) \\ \Delta y &= y(t+\Delta t) - y(t) \\ \Delta z &= z(t+\Delta t) - z(t) \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

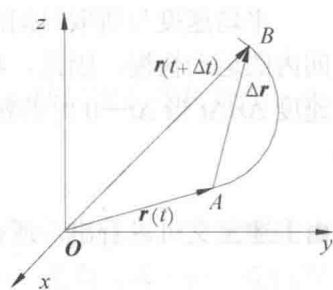


图1-2 位移

三、速度和速率

1. 平均速度和平均速率

在图 1-2 中, 质点在 Δt 时间内的位移为 $\Delta \mathbf{r}$, 定义质点的位移 $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}(t+\Delta t) - \mathbf{r}(t)$ 与发生这一位移的时间间隔 Δt 之比为质点在这段时间内的平均速度, 记作 $\bar{\mathbf{v}}$ 。即

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

由式 (1-14) 可以看出, 平均速度是一矢量, 它的方向与位移矢量 $\Delta \mathbf{r}$ 的方向相同。它描述了质点在 Δt 的时间内位置变化的方向及平均快慢程度。

为了描述质点沿轨迹运动的快慢程度, 我们还定义了另外一个物理量——平均速率。把质点经过的路程 Δs 与所用时间 Δt 的比值定义为质点在时间 Δt 内的平均速率。

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1-15)$$

因为路程是标量, 所以平均速率也是标量。平均速率和平均速度是两个不同的概念。一般情况下, 因为 $\Delta s \neq |\Delta \mathbf{r}|$, 所以平均速率和平均速度的绝对值也不相等。平均速度和平均速率的单位相同, 在国际单位中为米/秒 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

2. 瞬时速度与瞬时速率

平均速度与所取时间间隔有关, 时间间隔越短, 平均速度越能真实反映质点在相应时间内的运动快慢。因此, 我们定义质点在 t 时刻的瞬时速度: 它等于 t 至 $t+\Delta t$ 时间内平均速度 $\Delta \mathbf{r}/\Delta t$ 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时的极限, 记作 \mathbf{v} 。即

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

由上述定义可以看出, 质点的瞬时速度等于位置矢量对时间的一阶导数, 即

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

我们通常所说的质点运动速度, 就是指它的瞬时速度。瞬时速度是矢量, 在直角坐标系中它可以用正交分解式表示

$$\mathbf{v} = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} + v_z \mathbf{k} \quad (1-18)$$

由式 (1-17) 可得

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{dx}{dt} \mathbf{i} + \frac{dy}{dt} \mathbf{j} + \frac{dz}{dt} \mathbf{k} \quad (1-19)$$

对比式 (1-18) 与式 (1-19), 可得

$$v_x = \frac{dx}{dt}, v_y = \frac{dy}{dt}, v_z = \frac{dz}{dt} \quad (1-20)$$

上式表明, 瞬时速度在坐标轴上的投影等于相应位置坐标对时间的一阶导数。

瞬时速度是一矢量, 它的方向用方向余弦表示,

$$\cos \alpha = \frac{v_x}{v}, \quad \cos \beta = \frac{v_y}{v}, \quad \cos \gamma = \frac{v_z}{v} \quad (1-21)$$

由定义式(1-16)可以看出,瞬时速度的方向是当 Δt 趋于零时,位移 Δr 的极限方向。如图1-3所示,质点沿曲线运动时,在 Δt 时间内,质点由A点运动到B点,位移为 Δr 。当所取时间间隔 Δt 逐渐缩小时,B点逐渐向A点靠近,图中依次用 B' 、 B'' 表示。与此同时,位移相应地减小为 $\Delta r'$ 、 $\Delta r''$ 。当 Δt 趋近于零时,位移的方向趋近于曲线在A点的切线方向。因此,质点沿曲线运动时,其瞬时速度的方向沿质点所在位置曲线的切线,指向质点的前进方向。瞬时速度的大小等于

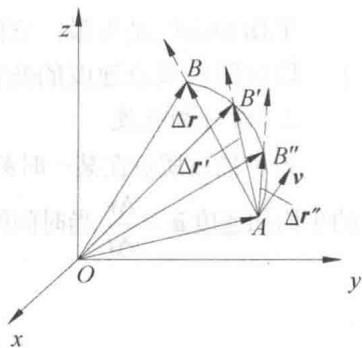


图1-3 瞬时速度

$$v = |\mathbf{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1-22)$$

瞬时速度的大小称做瞬时速率。由瞬时速度的定义可得

$$v = |\mathbf{v}| = \left| \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right| = \frac{ds}{dt} \left| \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \right| \quad (1-23)$$

瞬时速度和瞬时速率的单位相同,在国际单位制中为米/秒($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。

今后,在不致引起混淆的地方,将瞬时速度简称为速度(velocity),瞬时速率简称为速率(speed)。

四、平均加速度和瞬时加速度

质点运动时,速度的大小和方向都可能发生变化,为描述速度随时间的变化情况,我们引入平均加速度和瞬时加速度的概念。

1. 平均加速度

如图1-4(a)所示,设 t 时刻质点位于A点,速度为 $\mathbf{v}(t)$,经 Δt 时间后,它运动到B点,速度变为 $\mathbf{v}(t+\Delta t)$ 。 Δt 时间内质点的速度增量 $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}(t+\Delta t) - \mathbf{v}(t)$,见图1-4(b)。我们将速度增量 $\Delta \mathbf{v}$ 与发生这一增量所用的时间 Δt 之比 $\Delta \mathbf{v}/\Delta t$ 定义为这段时间内的平均加速度,记作 $\bar{\mathbf{a}}$,即

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} \quad (1-24)$$

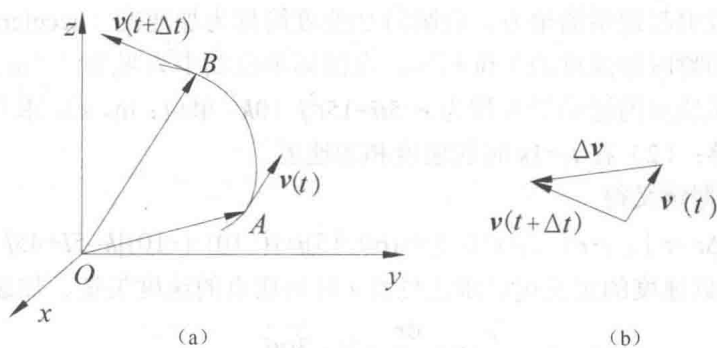


图1-4 加速度

平均加速度是矢量，它的方向与 Δt 时间内速度增量 $\Delta \mathbf{v}$ 的方向相同。平均加速度反映了一段时间内质点速度的变化方向和变化的平均快慢程度。

2. 瞬时加速度

为了描述质点在某一时刻速度的变化情况，还需定义瞬时加速度。质点在 t 到 $t+\Delta t$ 时间内的平均加速度 $\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}$ 当时间间隔 Δt 趋于零时的极限值叫做 t 时刻的瞬时加速度，记作 \mathbf{a} 。即

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} \quad (1-25)$$

上式表明，瞬时加速度等于速度矢量对时间的一阶导数。根据式 (1-17)，速度矢量是位置矢量对时间的一阶导数，因此瞬时加速度又等于位置矢量对时间的二阶导数。即

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} \quad (1-26)$$

瞬时加速度是矢量，在直角坐标系中它可以表示为

$$\mathbf{a} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} + a_z \mathbf{k} \quad (1-27)$$

其中

$$\begin{aligned} a_x &= \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2 x}{dt^2} \\ a_y &= \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2 y}{dt^2} \\ a_z &= \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2 z}{dt^2} \end{aligned} \quad (1-28)$$

瞬时加速度在坐标轴上的投影等于相应位置坐标对时间的二阶导数。

表示瞬时加速度方向的方向余弦为

$$\cos \alpha = \frac{a_x}{a} \quad \cos \beta = \frac{a_y}{a} \quad \cos \gamma = \frac{a_z}{a} \quad (1-29)$$

由瞬时加速度的定义式 (1-25) 可以看出，它的方向是当 Δt 趋于零时速度增量 $\Delta \mathbf{v}$ 的极限方向。

今后，在不致引起混淆的地方，将瞬时加速度简称为加速度 (acceleration)。

平均加速度和瞬时加速度的单位相同，在国际单位制中为米/秒² (m·s⁻²)。

例题 已知某质点的运动学方程为 $\mathbf{r} = 5t\mathbf{i} + 15t^2\mathbf{j} - 10t\mathbf{k}$ (单位: m, s)，求 (1) $t_1=1\text{s}$ 到 $t_2=2\text{s}$ 时间内质点的位移；(2) 在 $t_1=1\text{s}$ 时的速度和加速度。

解 (1) 根据定义得

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r} \Big|_{t=2} - \mathbf{r} \Big|_{t=1} = (10-5)\mathbf{i} + (60-15)\mathbf{j} + [(-10)-(-10)]\mathbf{k} = 5\mathbf{i} + 45\mathbf{j}$$

(2) 根据速度的定义可以求出任意 t 时刻质点的速度矢量、加速度矢量为

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = 5\mathbf{i} + 30t\mathbf{j}$$

$$\boldsymbol{a} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = 30\boldsymbol{j}$$

将 $t=1\text{s}$ 代入, 即可求出该时刻质点的速度、加速度

$$\boldsymbol{v} = 5\boldsymbol{i} + (30 \times 1)\boldsymbol{j} = 5\boldsymbol{i} + 30\boldsymbol{j} \quad \boldsymbol{a} = 30\boldsymbol{j}$$

它们的大小为

$$v = \sqrt{5^2 + 30^2} = 30.41 \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \quad a = 30 \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$$

速度矢量的方向余弦为

$$\cos \alpha = \frac{5}{30.41} = 0.164 \quad \cos \beta = \frac{30}{30.41} = 0.987 \quad \cos \gamma = \frac{0}{30.41} = 0$$

质点运动的加速度与时间无关, 等于恒量, $a=30\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$, 方向沿 y 轴方向。

第三节 抛体运动

当质点的抛出速度方向不在竖直方向时, 如果忽略空气阻力, 由于重力作用, 质点将在初速度与重力加速度决定的平面内作二维曲线运动。运动过程中它的加速度是恒定的, 即重力加速度。由此可见, 抛体运动 (projectile motion) 的实质是匀变速运动, 但由于质点初速度方向与加速度的方向不在同一直线上, 因此它不是匀变速直线运动。根据 $\Delta\boldsymbol{r}$ 、 \boldsymbol{v} 、 \boldsymbol{a} 的定义及定积分的知识, 在已知加速度及初始条件的情况下, 就可以确定质点的运动规律, 求出它的运动学方程。下面我们分步解决这一问题。

一、抛体的运动方程

如图 1-5 所示, 建立坐标系, 取抛出点为坐标原点, x 轴在水平方向, y 轴竖直向上。设质点以初速 \boldsymbol{v}_0 抛出, \boldsymbol{v}_0 的方向与 x 轴成 α 角, 由以上条件可得, 在坐标系中, $t=t_0=0$ 时的初始条件为

$$x_0=0, \quad y_0=0 \quad (1-30)$$

和

$$v_{0x}=v_0\cos\alpha, \quad v_{0y}=v_0\sin\alpha \quad (1-31)$$

加速度在两坐标轴上的投影为

$$a_x=0, \quad a_y=-g \quad (1-32)$$

由式 (1-31) 和式 (1-32), 利用定积分可分别求出速度矢量在 x 、 y 轴上的投影。

$$v_x = v_{0x} + \int_0^t a_x dt = v_0 \cos \alpha \quad (1-33)$$

$$v_y = v_{0y} + \int_0^t a_y dt = v_0 \sin \alpha - gt \quad (1-34)$$

在已知速度矢量的基础上, 利用积分可进一步求出质点的运动学方程。由式 (1-33) 和式

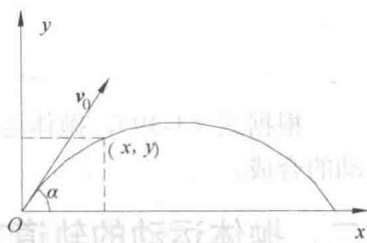


图 1-5 抛体运动