大学物理

上册

University Physics

黄亦斌　主编

熊小华　燕　安　马善钧　余晓光　副主编

高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

大学物理

上册

Daxue Wuli

黄亦斌　主编

熊小华　燕　安　马善钧　余晓光　副主编

高等教育出版社·北京

HIGHER EDUCATION PRESS　BEIJING

内容简介

本书根据《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2010 年版)编写而成。本书立足于物理学的知识体系，力图将物理学的思想和内容进行深入浅出的论述，兼顾知识的逻辑性和内容的可读性，具有鲜明的特色。

本书分为上、下两册，上册包括力学和光学两部分，下册包括电磁学、热学和近代物理三部分。本书可作为理工科非物理类专业的大学物理课程教材，也可供相关人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理．上册／黄亦斌主编．--北京：高等教育出版社，2012.9
ISBN 978-7-04-035714-1

Ⅰ.①大… Ⅱ.①黄… 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(2012)第 168840 号

策划编辑 程福平　责任编辑 张海雁　封面设计 于 涛　版式设计 马敬茹
插图绘制 尹 莉　责任校对 杨雪莲　责任印制 毛斯璐

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社　　址	北京市西城区德外大街 4 号	网　　址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印　　刷	国防工业出版社印刷厂	网上订购	http://www.landraco.com
开　　本	787 mm×960 mm 1/16		http://www.landraco.com.cn
印　　张	10.5	版　　次	2012 年 9 月第 1 版
字　　数	180 千字	印　　次	2012 年 9 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定　　价	17.10 元

物 料 号　35714-00

序

物理学是研究物质基本结构和运动普遍规律的学科。从古希腊起，人类就开始了对自然界的观察和思考，作为物理学前身的自然哲学也就发端了。这期间，除了一些闪光的哲学结论(如原子论)外，古希腊人还早就为我们准备好了日后作为科学两大基础之一的公理化体系，这就是欧几里得的《几何原本》。经过漫长而黑暗的中世纪，伽利略又引入了作为科学另一基础的实验手段，物理学这才真正独立于自然哲学而开始逐渐成长起来。

自此，伽利略、开普勒、牛顿等人建立了经典力学，卡诺、焦耳、开尔文、克劳修斯、麦克斯韦、玻耳兹曼等人建立了关于热现象的热力学和统计理论，库仑、奥斯特、安培、法拉第、麦克斯韦等人建立了电磁理论，又有20世纪爱因斯坦独创狭义相对论和广义相对论，普朗克、爱因斯坦、玻尔、德布罗意、海森伯、薛定谔、玻恩、狄拉克等人创立量子理论。物理学不仅为解释自然界的普遍规律提供了详尽的理论，同时又极大地促进了各种技术革命。热机、电力与无线电、核能、晶体管与集成电路、激光、计算机等技术莫不与物理学构成水乳交融的关系。至于其他学科，如数学、化学、材料、生物、天文和地质等，跟物理学也都息息相关。说物理学是各自然科学和工程技术之母并不为过。

针对非物理专业的学生，黄亦斌博士主编的《大学物理》一书对物理学的基本思想和内容给出了深入浅出的论述，是一本有特色的佳作。黄亦斌博士对物理学基础有着全面、深入的掌握。他在引力理论和粒子物理这两大理论物理方向都做过研究工作。有了这些领域的知识积累，就可以从更高的角度看待和研究大学物理的教学。他的课能够做到深入浅出，有理论深度，同时兼顾可接受性，让学生感受到科学的魅力和自己的激情，在师生中口碑很好。同时，由于对教学内容的深入理解，他不断提出新的见解和处理方法，已在国内高校物理教学研究方面的权威杂志《大学物理》上发表论文9篇，这反映了他的水平和功底。相信黄亦斌主编的这本教材能为更多院校采用，并且和他的讲课一样，受到好评。

基于以上理由，本人非常乐意为黄亦斌博士主编的这本《大学物理》作序，相信他今后在物理教育方面一定会做出更出色的成绩。

王永久

2012年4月20日

前　言

本书是为理工科非物理类专业编写的大学物理教材，立足于物理学的知识框架，力图将几百年来物理学的思想和内容给以深入浅出的论述。本书包括力学、光学、电磁学、热学、近代物理等几大部分，对其中的核心和重要内容进行了详细阐述。

一本教材能否吸引学生的兴趣，关键还是在于内容的可读性。有了兴趣，学生才会跟着教师和教材的引导，逐步培养各种能力。另一方面，知识的逻辑性又是教材知识体系的根本所在。本书兼顾逻辑性和可读性，在基本框架不动的基础上，力求写出自己的特色。由于其对象是非物理专业的学生，故在写作时注意深度的把握，不过分强调较难知识的论述，而把重心放在基础知识和核心知识上。本书在体系上也注意适当予以安排，以保证学生能顺利掌握教材内容。例如，在讲完“振动和波”后，紧接着安排光学内容，这样有助于学生接着波的概念继续学习。在热学部分，由于统计物理部分相对较难，故把热力学部分放在前面。本书又强调了一些较为现代、而学生又力所能及的观念，如熵和相对论。

本书还有一些特色。在力学部分，本书强调力学的核心内容是研究力与物体运动的关系，并在多处回应这一提纲挈领的论断。热力学第二定律部分在写法上有较大改动，进行了一些新的尝试。学生通常较难掌握麦克斯韦分布律，本书在讲解之前对分布概念进行了充分阐述，使得学生能明显感受到难度降低。相对论部分通常采用以洛伦兹变换为起点的学院式讲授方式，这种方式起点较高，比较抽象，不利于学生掌握相对论的核心内容。本书则以物理图像为纲，逐步阐述，在适当时机得到洛伦兹变换，有利于降低难度而让学生更好地掌握相对论时空观。本书的许多表格和小结也体现了本书的特色，有利于学生对知识的掌握，只要学生认真阅读就会发现。

总之，我们希望本书能够在众多的大学物理教材中展现自己的特色，为物理教学做出自己的贡献。

黄亦斌

2012 年 3 月 10 日

目　录

第 1 章　质点运动学

自然界的一切物质都处于永不停止的运动和变化中. 尽管物质的运动形式千变万化，但最简单、最基本，人们又最熟悉的运动是机械运动. 而在机械运动中，质点的运动又是最为基本的运动形式. 本章将先研究质点的运动学问题.

1.1　质点　坐标系

1.1.1　质点

宇宙中的一切物体，大到行星、恒星，小到分子、原子、基本粒子，都有一定的形状、大小和内部结构. 通常当物体运动时，物体的各个部分的位置改变不尽相同. 然而，当我们研究物体运动时，如果只考虑物体的整体运动情况，或者物体的大小和形状在物体运动中产生的影响可以忽略不计时，我们就可以把这个物体看作一个点.

把一个物体看作一个只有质量没有体积和形状的理想物体，这个理想物体就称为**质点**. 例如，绕太阳公转的地球，当我们只研究地球的公转轨道时，就可以将地球看作质点. 又如，在地球表面运动的汽车，当我们只研究汽车沿公路的运动情况时，也可以将汽车看作质点. 但如果是想研究地球的自转，或者汽车的轮胎打滑轨迹，二者就不能看作质点了. 所以，物体是否能够看成质点，主要由所研究的运动的性质决定，即取决于我们研究问题的角度.

质点是一种理想模型. 任何实际的物体都有一定的体积，无论物体多么小，只具有质量，而没有体积形状的物体是没有的.

人们在研究气体分子运动、天体运动等问题时，把气体分子和天体看作质点都能够正确地解决有关它们的各种问题，这证明了引入质点概念的合理性和正确性. 另一方面，质点运动也是研究物体运动的基础. 任何物体都可以看作是由无数个质点组成的，从理论上讲，当物体上每一个质点的运动情况分析清楚了，整个物体的运动情况也就清楚了.

1.1.2 空间

任何物质的存在和运动都是在一定的空间中进行的. 空间是物质的广延性质的反映，是与物体的体积和物体位置的变化紧密联系在一起的. 从物理学发展的历史看，人们对空间的认识主要有两个阶段，即早期的牛顿绝对时空观的绝对空间概念和爱因斯坦相对论时空观的相对空间概念. 牛顿在《自然哲学的数学原理》中说："绝对空间，就其本性来说，与任何外在的情况无关，始终保持着相似和不变." 绝对空间概念认为空间是独立的客观存在，不依赖于物质的存在形式和运动，但相对空间概念认为空间是与物质的存在形式和物质的运动相联系的，空间的特性受物质和物质运动的影响，没有物质和物质运动的空间是无意义的.

目前人们已经探知的空间范围，小到最小的微观粒子的线度10^{-15} m，大到宇宙范围的尺度10^{26} m. 物理理论指出，空间尺度是有下限的，最小的空间尺度是普朗克长度，约为10^{-35} m. 小于这个长度范围，现有的空间概念就可能不再适用了. 表 1.1 给出了一些典型的空间尺度.

表 1.1 一些典型的空间尺度

已观测到的宇宙范围	10^{26} m
星系团半径	10^{23} m
银河系半径	7.6×10^{22} m
星系间距离	2×10^{22} m
太阳到最近恒星的距离	4×10^{16} m
太阳到冥王星的距离	10^{12} m
太阳到地球的距离	1.5×10^{11} m
地球半径	10^{6} m
无线电中波波长	10^{3} m
核动力航空母舰长	3×10^{2} m
成人高度	1.7×10^{0} m
尘埃	10^{-3} m
细胞直径	10^{-6} m
细菌线度	10^{-9} m
原子线度	10^{-10} m
核子的线度	10^{-15} m
普朗克长度	10^{-35} m

1.1.3 时间

任何物质的存在和运动都具有持续性和顺序性. 反映物理事件持续性和顺序性的概念，就是时间. 在牛顿的绝对时空观中，时间也是不依赖于物质而独立存在的. 牛顿在《自然哲学的数学原理》中说："绝对的、真正的和数学的时间自身在流逝着，并且由于它的本性而均匀地、同任何一种外界事物无关地流逝着." 然而，随着科学的发展，这种观点被认为是不正确的. 爱因斯坦相对论时空观指出，时间是与物质的存在形式和运动紧密相联系的.

目前度量的时间范围，短至最短的微观粒子寿命10^{-25} s，长至宇宙年龄10^{18} s. 物理理论指出，时间间隔也是有下限的，其值为普朗克时间10^{-43} s. 当时间间隔小于普朗克时间，现有的时间概念就可能不再适用了. 表 1.2 给出了一些典型的时间间隔.

表 1.2 一些典型物理现象的时间间隔

宇宙年龄	10^{18} s
太阳系年龄	1.4×10^{17} s
原始人	10^{13} s
最早文字记录	1.6×10^{11} s
人的平均寿命	10^{9} s
地球公转周期	3.2×10^{7} s
地球自转周期	8.6×10^{4} s
太阳光传到地球的时间	5×10^{2} s
人的心脏跳动周期	1 s
中频声波周期	10^{-3} s
中频无线电波周期	10^{-6} s
π^+介子的平均寿命	10^{-9} s
分子转动周期	10^{-12} s
原子振动周期	10^{-15} s
光穿越原子的时间	10^{-18} s
核振动周期	10^{-21} s
Z^0粒子的寿命	10^{-25} s
普朗克时间	10^{-43} s

1.1.4 参考系和坐标系

在自然界中，物质的运动是绝对的，但对物质运动的描述却是相对的. 同样的一个运动，处于不同运动状态的观测者看到的将是不同的结果. 例如在作匀速直线运动的火车车厢内，一个物体自由下落. 对车厢中的观测者，它是在作直线运动；但对地面上的观测者，它是在作平抛运动. 因此，在描述研究对象的机械运动时，必须选定一个标准物体(或几个相对静止的物体)作为参考，而这个被选作标准的物体或物体系，就是**参考系**.

参考系的选择可以是任意的，对同一物体的运动选择不同的参考系，描述结果一般是不同的. 一般以对问题的描述、研究和求解最为方便和简洁为基本原则. 通常研究地面上的物体运动，选择地面或地面上的物体作为参考系最为方便. 当研究人造地球卫星的运动时，选择地心系更方便. 而研究行星的运动时，则应该选择太阳作为参考系. 对该问题的进一步讨论见第2章.

选择了参考系，只能定性地研究物体运动. 要想定量地描述物体的运动，就必须在参考系上建立一套度量系统或标尺，来对物体的运动进行测量. 这种带有度量系统的参考系称为**坐标系**. 在物理理论中，常用的坐标系是直角坐标系. 此外，根据所研究的问题的不同，还有平面极坐标系、柱面坐标系、球面坐标系和自然坐标系等.

选择不同的坐标系，得到的描述物体运动的变量和方程可能不同，但运动性质是不会改变的. 坐标系选择的恰当与否，只会影响求解的过程(有时坐标系选择不恰当会导致问题难以求解)，不会改变物体运动的本性.

1.2 位置矢量 运动方程

1.2.1 位置矢量

在选定的坐标系中，为了表示质点的运动，采用**位置矢量**(简称**位矢**)描述质点运动的瞬时位置. 从坐标系的原点到质点所在瞬时位置的有向线段称为位矢，用矢量 $\boldsymbol{r}$ 表示. 参看图1.1，在直角坐标系 $Oxyz$ 中，质点 P 的位置可用它在坐标系中的三个坐标 x、y、z 来确定，坐标 x、y、z 就是位矢 $\boldsymbol{r}$ 在三个坐标轴上的分量.

在直角坐标系中，位矢 $\boldsymbol{r}$ 可以写为

$$\boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j} + z\boldsymbol{k} \tag{1.1}$$

式中 $\boldsymbol{i}$, $\boldsymbol{j}$, $\boldsymbol{k}$ 分别表示沿 x、y、z 轴正方向的单位矢量. 位矢 $\boldsymbol{r}$ 的大小为

$$r = |\boldsymbol{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \tag{1.2}$$

位矢的方向余弦是

$$\cos\alpha = \frac{x}{r}, \quad \cos\beta = \frac{y}{r}, \quad \cos\gamma = \frac{z}{r} \tag{1.3}$$

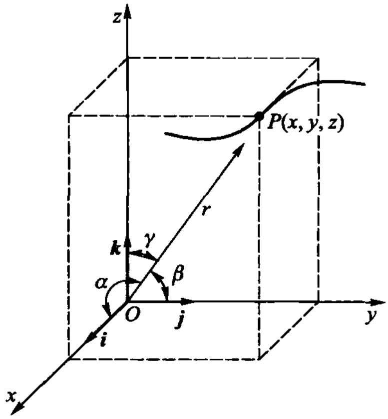

图 1.1 直角坐标系中的位矢

1.2.2 位移

如图 1.2(a)所示，设质点沿曲线轨道 ab 运动. 在时刻 t，质点在 a 处，在时刻 $t+\Delta t$，质点到达 b 处. a、b 两点的位矢分别用 $\boldsymbol{r}_1$ 和 $\boldsymbol{r}_2$ 表示，则在时间间隔 Δt 内，质点位矢的变化

$$\Delta\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}_2 - \boldsymbol{r}_1 \tag{1.4}$$

就称为**位移**. 位移是描述物体位置改变的大小和方向的物理量，图中就是由起始位置 a 指向终止位置 b 的一个矢量，它的运算是按三角形定则或平行四边形定则进行的.

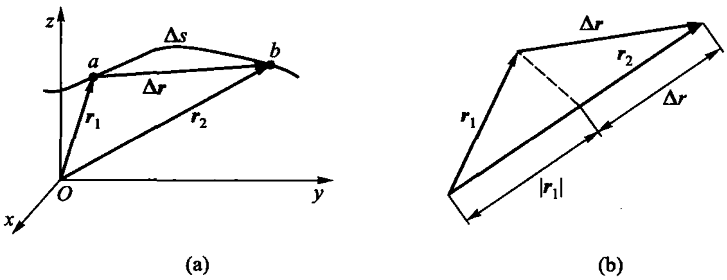

图 1.2 质点的位移

有两点要注意. 首先，**位矢改变的大小**(即位移的模) $|\Delta\boldsymbol{r}|$ 与**位矢大小的改变** Δr 是不同的，$\Delta r \equiv |\boldsymbol{r}_2| - |\boldsymbol{r}_1| \neq |\Delta\boldsymbol{r}| \equiv |\boldsymbol{r}_2 - \boldsymbol{r}_1|$，如图 1.2(b)所示. 其次，位移表示物体位置的改变，并不是物体实际所经历的路程. 在图 1.2(a)中，位移是有向线段 $\overrightarrow{ab}$，它的大小 $|\Delta\boldsymbol{r}|$ 为直线 ab 的长度. 而路程是指物体实际所经过的轨道的长度，它是一个标量，一般用 Δs 表示，在图中即曲线 ab 的长度. 通常 $|\Delta\boldsymbol{r}|$ 与 Δs 不一定相同(除非是直线运动)，当 Δt 较小时，二者近似相等，而当 Δt 趋近于零时，可以有 $|\mathrm{d}\boldsymbol{r}| = \mathrm{d}s$.

以上两点可以总结为下面的公式:

$$\Delta r \neq |\Delta\boldsymbol{r}| \approx \Delta s, \quad \mathrm{d}r \neq |\mathrm{d}\boldsymbol{r}| = \mathrm{d}s \tag{1.5}$$

1.2.3 运动方程

质点在空间的运动就是质点的空间位置随时间变化的过程. 质点的位矢 $\boldsymbol{r}$ 以及坐标 x、y、z 都是时间 t 的函数，而表示运动过程的具体函数式就称为**运动方程**①，可以表示为

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(t) \tag{1.6}$$

或

$$x=x(t),\ y=y(t),\ z=z(t) \tag{1.7}$$

知道了质点的运动方程，就能确定任一时刻质点的位置，从而确定质点的运动. 如果从质点的运动方程(1.7)式中消去时间 t，就可以得到质点三个坐标之间一种函数关系，称为质点的**轨道方程**.

力学的主要研究任务之一，就是根据各种问题的具体条件，求解质点的运动方程.

1.3 速度 加速度

1.3.1 速度

研究质点的运动，不仅要知道质点的位移，还必须知道质点在多长一段时间内通过这段位移，即要知道质点运动的快慢程度.

位移 $\Delta\boldsymbol{r}$ 和发生这段位移所经历的时间之比叫做质点在这一段时间内的**平均速度**，记为$\overline{\boldsymbol{v}}$，有

$$\overline{\boldsymbol{v}}=\frac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t} \tag{1.8}$$

平均速度也是矢量，它的方向就是位移的方向. 平均速度依赖于过程，图 1.3 中绘出了多个过程.

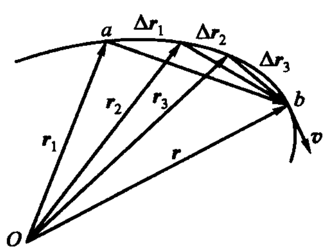

图 1.3 平均速度的极限

平均速度粗略地描写了 Δt 这段时间内物体的运动快慢和运动方向，这种描写是不细致的. 要得到细致描写，必须采用极限方式. 在图 1.3 中，当质点从 a 点趋向 b 点的过程中，对于不同的位置可以得到不同平均速度：

① 严格来说，这应该称为“运动函数”才合适，但“运动方程”的说法已经被大家所广泛使用.

$$\frac{\Delta \boldsymbol{r}_1}{\Delta t_1},\ \frac{\Delta \boldsymbol{r}_2}{\Delta t_2},\ \frac{\Delta \boldsymbol{r}_3}{\Delta t_3},\ \cdots$$

虽然 Δt 在不断减小，但同时 $|\Delta \boldsymbol{r}|$ 也在不断减小，所以比值通常不会浮动很大. 而且，质点越接近 b 点（Δt 越小）时，平均速度越能反映质点在 b 点的运动情况. 于是，Δt 趋于零时比值 $\Delta \boldsymbol{r}/\Delta t$ 的极限就应该准确反映质点在 b 点的运动情况. (1.8)式的极限，即质点位矢对时间的变化率，叫做质点在时刻 t 的**瞬时速度**，简称**速度**，记为 $\boldsymbol{v}$. 于是

$$\boldsymbol{v} = \lim_{\Delta t \to 0} \overline{\boldsymbol{v}} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t} \tag{1.9}$$

速度的方向，就是当 Δt 趋于零时，位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 的方向. 由图 1.3 可以看出，当 Δt 趋于零时，a 点向 b 点趋近，位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 的方向就趋于运动轨道在 b 点的切线方向. 所以，质点在某时刻的**速度方向就是质点所在处轨道的切线方向**.

在实际运用中，有时仅需要考虑速度的大小，这时人们也常采用**速率**这个物理量. 速率是速度的大小，是一个标量，它不考虑质点运动的方向. 故有

$$v = |\boldsymbol{v}| = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{|\Delta \boldsymbol{r}|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t} \tag{1.10}$$

需要注意的是，由于位矢改变的大小 $|\Delta \boldsymbol{r}|$ 与位矢大小的改变 Δr 一般不相等[见(1.5)式]，因此，

$$v = \left|\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}\right| \neq \frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t} \tag{1.11}$$

在直角坐标系中，将(1.1)式代入(1.9)式，并考虑到三个坐标轴的单位矢量为常矢量，不随时间改变，因此有

$$\boldsymbol{v} = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i} + \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j} + \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{k} \tag{1.12}$$

也就是说，速度 $\boldsymbol{v} = v_x\boldsymbol{i} + v_y\boldsymbol{j} + v_z\boldsymbol{k}$ 的三个分量分别为①

$$v_x = \dot{x} = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t},\quad v_y = \dot{y} = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t},\quad v_z = \dot{z} = \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t} \tag{1.13}$$

速度的模（大小）可以计算为

$$v = |\boldsymbol{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2} \tag{1.14}$$

速度的 SI 单位是 m/s. 表 1.3 给出了一些实际的速率.

表 1.3 一些实际的速率

光在真空中的速率	c = 299 792 458 m/s（精确值）
粒子加速器中的电子速率	0.999 999 98 c

① 时间导数有时又用加点来表示.

续表

类星体的退行(最快的)速率	2.7×10^{8} m/s
太阳在银河系中绕银河系中心的运动速率	3.0×10^{5} m/s
地球公转速率	3.0×10^{4} m/s
人造地球卫星的速率	7.9×10^{3} m/s
现代歼击机的速率	约 9×10^{2} m/s
子弹离开枪口的速率	约 7×10^{2} m/s
空气分子热运动的平均速率(0 ℃)	4.5×10^{2} m/s
空气中的声速(0 ℃)	3.3×10^{2} m/s
机动赛车运动速率	10^{2} m/s
猎豹奔跑速率	2.8×10 m/s
百米世界纪录	1.029×10 m/s
大陆板块移动速率	约10^{-9} m/s

1.3.2 加速度

当质点的运动速度随时间改变时，常常需要了解速度矢量变化的情况. 这个变化可以是运动快慢的变化，也可以是运动方向的变化. 一般情况下，速度的方向和大小都可以变化. 速度矢量变化的快慢用**加速度**表示. 如图 1.4 所示，在时刻 t，质点位于 a 点，速度为$\boldsymbol{v}_a$，在时刻 $t+\Delta t$，质点位于 b 点，速度为$\boldsymbol{v}_b$，则在时间 Δt 内，质点速度的增量为

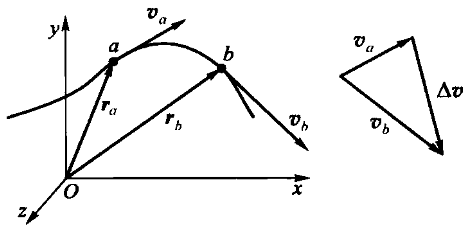

图 1.4 速度的增量

$$\Delta\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}_b-\boldsymbol{v}_a \tag{1.15}$$

类似平均速度的定义，可以定义时间 Δt 内的平均加速度为

$$\overline{\boldsymbol{a}}=\frac{\Delta\boldsymbol{v}}{\Delta t} \tag{1.16}$$

平均加速度只是反映在时间 Δt 内速度的平均变化率. 为了准确描述质点在某一时刻的速度变化快慢，必须引入瞬时加速度的概念. 当时间间隔 Δt 趋于零时，(1.16)式表示的平均加速度的极限，即速度对时间的变化率，称为质点在时刻 t 的**瞬时加速度**，简称**加速度**：

$$\boldsymbol{a}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t^2} \tag{1.17}$$

加速度也是矢量. 质点运动速度的大小和方向的改变，都会引起加速度. 在直角坐标系中，将速度的表示式(1.12)代入上式，有

$$\boldsymbol{a}=\frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i}+\frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j}+\frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{k} \tag{1.18}$$

也就是说，加速度的三个分量分别为

$$a_x=\frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}=\ddot{x},\quad a_y=\frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2}=\ddot{y},\quad a_z=\frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}^2z}{\mathrm{d}t^2}=\ddot{z} \tag{1.19}$$

加速度的大小可用下式计算：

$$a=|\boldsymbol{a}|=\sqrt{a_x^2+a_y^2+a_z^2} \tag{1.20}$$

加速度的 SI 单位是 $\mathrm{m/s^2}$. 表 1.4 给出了一些实际的加速度.

表 1.4 一些实际的加速度

超级离心机中粒子的加速度	$3\times10^6\ \mathrm{m/s^2}$
步枪子弹在枪膛中的加速度	约 $5\times10^5\ \mathrm{m/s^2}$
使人发晕的加速度	约 $7\times10\ \mathrm{m/s^2}$
地球表面重力加速度	$9.8\ \mathrm{m/s^2}$
汽车制动加速度	约 $8\ \mathrm{m/s^2}$
月球表面重力加速度	$1.7\ \mathrm{m/s^2}$
地球公转的加速度	$6\times10^{-3}\ \mathrm{m/s^2}$
太阳绕银河系中心转动的加速度	约 $3\times10^{-10}\ \mathrm{m/s^2}$

例 1.1 如图 1.5 所示，人造地球卫星在绕地球的平面轨道内作匀速圆周运动，角速度为 ω，卫星距地球球心的距离为 r，试求：(1) 在平面直角坐标系中，卫星任一时刻的位矢、速度和加速度；(2) 当 $r=5\times10^7$ m，$\omega=7.3\times10^{-5}$ rad/s，卫星的速率和加速度的大小.

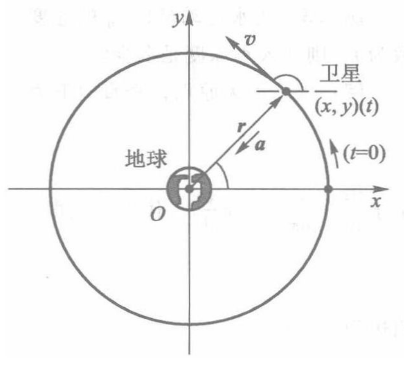

图 1.5 例 1.1 图

解：(1) 如图所示，选择以地心为坐标原点的平面直角坐标系，卫星在任意一点的坐标为

$$x=r\cos\omega t,\quad y=r\sin\omega t$$

任意时刻 t 的位矢为

$$\boldsymbol{r}=r\cos\omega t\boldsymbol{i}+r\sin\omega t\boldsymbol{j}$$