

# 大学物理

(网络教材)

上 册

主 编 吴王杰

副主编 陆起图

上海科学技术出版社

## 内 容 提 要

本书是作者在多年教学和科研的基础上完成的,它吸取了近年来国内外大学物理教学改革最新成果,是一部将大学物理的教育思想、课程体系、教学内容和教学手段紧密融合在一起的现代化教材。教材内容按教育部制定颁发的本课程的教学基本要求进行取舍,并适当有所拓宽,分上、下两册,上册包括力学(含机械振动和波)、热学,下册包括电磁学、波动光学和近代物理学(含狭义相对论),共五篇 26 章。内容精炼,文字流畅,知识面宽,时代感强,注意培养学生的科学素质。

本书的讲义稿已在解放军理工大学试用了一学年,在试用的过程中进行了反复修改。

本教材现已形成完整系列,除本书的文字版外,电子版《大学物理(网络教材)》已由高等教育出版社出版发行。作为军队院校首批网络课程,本教材还有与之配套的 120 学时远程教学视频节目及电子教案,这些内容已在全军军事训练信息网上发布。

本书最显著的特色是有相应的网络电子版教材,网络电子版采用了先进的媒体技术和教学设计,电子版中的大量演示程序、动画和生动的插图不仅有利于提高教学效果和效率,还有利于提高学生学习的兴趣和激励探索精神。

本书大量运用了制作精良的插图,一改传统教材呆板面貌。本书对习题的形式也进行了改革,习题分选择、填空、计算(或证明)三类,题量适中,便于学生和教师对基本知识的自测和检测。

本书可作为高等院校和远程教育非物理专业的大学物理教材,也可供广大物理教师 and 各类学习大学物理的读者参考。

# 序 言

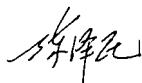
高等学校理工类专业开设大学物理课程,其作用一方面在于较系统地为学生打好必要的物理基础,另一方面,更重要的是使学生初步学习科学的思想方法和研究问题的方法,开阔思路,激发探索和创新精神。

为了实现物理课程教育思想的这一转变,20世纪90年代以来,大学物理课程体系已有了很大的创新,已经出版了部分面向21世纪的新教材,教学内容现代化的程度大为提高。课程体系创新和教学内容现代化需要现代化的教学手段,同时信息技术的发展也为教学手段的现代化创造了条件。近年来已有了大量的电子教案、多媒体课件,它们在教学中发挥着越来越重要的作用。但是,到目前为止还没有一部内容完整的适应教学资源网络化的大学物理教材。解放军理工大学吴王杰等同志吸取了国内外物理教改方面的成果与经验,研制编写的这一套《大学物理(网络教材)》正好填补了这一空缺。这套网络教材既有文字版又有电子版,有配套的电子教案,此外还制成了远程教学视频节目。因此,它既可用于课堂教学,又可用于远程网络教学。

这套教材最显著的特色是,文字版保持了传统教材的优点,电子版中有大量的演示程序、动画和生动的插图。师生们可以上网演示电子版的动画和程序,在演示程序中,学生可以自己设定参数,进行人机交互,有利于培养学生的探索精神。文字版和电子版两种教材形式配合使用,无论是对教还是学,都是一次十分有意义的创新。

我相信这部完整的《大学物理(网络教材)》的出版发行,定将受到广大师生们的欢迎,并对我国大学物理教学有所促进。

清华大学教授



2001年8月10日

# 前 言

当前高等教育面临着教育现代化和教育国际化两大转变,教育思想、教学内容和教学手段现代化是教育现代化的三大重要内容。围绕着教育现代化,高等教育改革从宏观政策环境到具体的课程改革都已发生了巨大变化。

物理学作为所有自然科学中发展最早、最成熟、理论与实验并重的一门量化的学科,在学生的科学素质培养中起着十分重要的作用,因此在物理学的教育思想上要突出培养学生的创造性思维,使之能掌握科学方法,具备独立获取并灵活运用知识的能力。为适应物理教育思想的转变,大学物理的课程体系和教学内容已有了很大的创新。课程体系创新和教学内容现代化呼唤教学手段的现代化,近年来已有了大量的电子教案、多媒体课件,它们在教学中发挥着越来越重要的作用。

我们在多年大学物理教学现代化改革实践中深切体会到,需要有一部将大学物理的教育思想、课程体系、教学内容和教学手段紧密融合在一起的现代化的教材。这样的教材更应重视人的培养,更能反映改革和特色,更加重视效率和效果。在技术平台上,这样的教材还应充分利用现代计算机网络多媒体技术,适应教学资源网络化的要求。基于以上认识,我们编写和研制了军队“九五”重点建设教材《大学物理(网络教材)》。2000年12月2日总参军训部对这部教材进行了评审,高等教育出版社、清华大学、南京大学、上海交通大学、国防科技大学、海军工程大学、后勤工程学院和解放军理工大学的有关专家参加了评审会。评审委员会认为:“该教材是我国第一部系统、完整、新型的大学物理网络教材,其设计思想新颖,媒体技术先进,教学设计恰当,融先进性、科学性、教学适用性和艺术性于一体,有利于提高教学效果和效率。整体来说,这是一部优秀教材,达到国内领先水平。”

《大学物理(网络教材)》现已形成完整系列,除电子版和文字版两个版本之外,还有与之配套的120学时远程教学视频节目、120学时电子教案、习题参考解答等。《大学物理(网络教材)》电子版已由高等教育出版社出版发行,远程教学视频节目已在全军军事训练信息网上发布。

《大学物理(网络教材)》具有以下特色:

## 1. 内容体系

《大学物理(网络教材)》基本上保持传统体系,包括力学(含机械振动和波)、热学、电磁学、波动光学和近代物理学(含狭义相对论)五篇共26章。教学内容按教育部制定颁发的物理课程的教学基本要求进行取舍,并适当有所拓宽,吸收了当前物理教学改革成果,尽量避免和中学物理内容简单重复。牛顿力学的讲述比较简洁,重组并加强了近代物理内容,增加了部分难点内容的叙述,例如,角动量概念的引入、圆柱连滚带滑的运动、对称性、输电电路等效电阻的计算、黑体辐射公式的导出、固体能带的形成、纳米技术等。在整部教材中(除热学外),我们力求用波动的物理图像和研究方法为主线来讲述物理现象,以体现物理世界

的统一性。

另外,教材还结合重要物理概念穿插介绍著名物理学家和物理学史,进行科学方法和科学态度教育,在大学物理教学中体现科学人文思想。

## 2. 组织形式

电子版基于 Web Browser 方式,用户端只要安装了通用的标准浏览器就可以运行程序,对应用平台的安装和使用要求很低,可在 Web 服务器上发布(如因特网、校园网),也可在单机环境下使用。页面设计简洁明快,层次清晰,导航交互简便。文字版在电子版的基础上,大量运用了制作精良的插图。由于使用专业图形软件精心制作,画面清晰、美观,立体感强,一改传统教材的呆板面貌,使得教材充满生气和活力,不仅图文并茂,而且由于插图(大部分插图在电子版中是活动的动画且可以改变参数)的使用,文字讲解大为简练,缩小了篇幅,而学生更易于理解。将电子版和文字版结合起来使用,优势互补,有助于提高教学效率。

## 3. 媒体设计和运用

媒体技术完全立足于网络化环境的需要,媒体设计充分体现教学性,力求融科学性、教学性、艺术性和趣味性于一体。整部教材的媒体(不包括文本)以 JAVA 语言强大的智能性、交互性为主,辅以构思巧妙、富有创意的动画和图像。

(1)设计、编写了 151 个基于 Web 的 JAVA 语言编写的 APPLET 小程序,具有极大的开放性和跨平台性,同时也充分发挥计算机在快速实时计算、图形显示、数据存储等方面的优势,具有极强的智能性和交互性。学生可以自己设定程序参数,进行人机交互,改变物体运动状态或画出相应的运动曲线,探索其中的规律,体现了物理学的实验观察和定量计算的研究风格。例如:振动的叠加,只要改变相位差,就可得到不同的旋转矢量图及相应的合振动;电磁场中,改变电荷(电流)分布,就会显示出不同的电(磁)场分布。而且由于运用动画代替静止的画面,不仅使学生获得更直观、全面的物理图像,更有利于澄清某些模糊概念。例如:角速度矢量;有限大角位移一般不是矢量;椭圆偏振光的电矢量的运动模式等等,都使读者一目了然。

(2)设计、制作了 89 个各类动画。其中有 68 个适应于网络环境的 FLASH 矢量动画。与三维动画和视频动画相比,FLASH 动画不仅文件极小,而且具有无级放大不失真的特点。按鼠标右键,就可弹出快捷菜单,实现对动画的灵活控制。另外,还有 16 个 GIF 格式动画和 5 个 AVI 视频动画。

(3)运用专业工具创作了 286 个优美的三维和平面插图,并全部转换为适应于网络环境的 GIF 格式(文件极小),充分发挥了计算机在显示图形图像上的优势。

151 个用纯 JAVA 语言编写的 APPLET 小程序,68 个控制灵活的 FLASH 矢量动画,21 个 GIF 格式和 AVI 视频动画,286 幅精美的三维和平面插图,50 段语音解说及 50 万文字。所有的媒体素材,仅占约 20 MB 的磁盘空间,特别适应网上教学的需要。

## 4. 开放性

《大学物理(网络教材)》具有开放性,由于《大学物理(网络教材)》中的程序、动画、插图、文字都能以独立的文件提取出来,因此教材作为网络资源提供给教师使用时,教师可以对教材进行二次开发,可根据需要增删内容,可以利用本教材提供的教学资源很快地写出自己的电子教案或利用多媒体开发工具编写多媒体课件。(在利用本教材进行二次开发时请注意知识产权和版权)

## 5. 习题编排

教材的文字版对习题进行了改革。习题分选择、填空、计算(或证明)三类,题量适中,便于学生和教师对基本知识的自测和检测。

《大学物理(网络教材)》得到了中国人民解放军总参谋部军训部、解放军理工大学的大力支持和热情指导,得到了解放军理工大学气象学院在设备、人力、经费等方面的大力支持,得到了教育部高等学校工科物理课程指导委员会专家的十分有益的建议。另外,我们还吸取了近年来大学物理教学改革的最新研究成果,参考了近年来出版的部分优秀大学物理教材,我们对此一并表示诚挚的谢意!

解放军理工大学理学院应用物理教研室韩仙华、孙云志、蒋敏、马石杰等同志为本书选编了部分习题,卞寒清、张小媛、华纯等同志为本书做了大量的文档工作,巴长忠、韩仙华等同志为本书的编写工作给予了大力支持,在此一并表示由衷的感谢!

由于编者水平有限,缺点、错误在所难免,恳请使用本教材的师生不吝提出宝贵的意见。

《大学物理(网络教材)》编写组

2001年7月

## 编写人员名单

- 吴王杰 教授 解放军理工大学气象学院  
(电子版、文字版主编;撰稿、编程、动画、插图)
- 陆起图 教授 解放军理工大学理学院  
(文字版副主编;撰稿)
- 廉 莲 高级工程师 解放军理工大学气象学院  
(动画、插图、配音)
- 刘丽娜 工程师 解放军理工大学气象学院  
(页面编辑)
- 张 晖 助理工程师 解放军理工大学气象学院  
(编程)
- 刘海涛 讲师 解放军理工大学气象学院  
(动画)
- 汪令国 副教授 解放军理工大学气象学院  
(动画)

# 目 录

## 第一篇 力 学

第 1 章 质点运动学.....	( 3 )
1.1 质点的位矢、速度和加速度.....	( 3 )
1.2 抛体运动 .....	( 8 )
1.3 运动叠加原理 .....	(11)
1.4 相对运动 .....	(12)
附录 :伽利略 .....	(16)
习题.....	(17)
第 2 章 牛顿运动定律.....	(21)
2.1 物理学中的力 .....	(21)
2.2 牛顿运动定律 .....	(25)
2.3 非惯性系和惯性力 .....	(29)
2.4 牛顿运动定律典型题解* .....	(35)
2.5 SI 单位制和量纲 .....	(39)
附录 :牛顿 .....	(43)
习题.....	(44)
第 3 章 动量与角动量.....	(49)
3.1 冲量与动量定理 .....	(49)
3.2 动量守恒定律 .....	(51)
3.3 质心与质心运动定理 .....	(55)
3.4 质点的角动量 .....	(58)
3.5 角动量守恒定律 .....	(60)
习题.....	(63)
第 4 章 功和能.....	(67)
4.1 功 .....	(67)
4.2 动能定理 .....	(69)
4.3 保守力和势能 .....	(71)
4.4 机械能守恒定律 .....	(74)
4.5 碰撞.....	(76)
4.6 对称性与守恒定律 .....	(79)

习题.....	(81)
<b>第 5 章 刚体的定轴转动</b> .....	(86)
5.1 刚体的平动、转动和定轴转动.....	(86)
5.2 角位移和角速度 .....	(87)
5.3 刚体的角动量 转动惯量 .....	(89)
5.4 刚体定轴转动定律 .....	(93)
5.5 转动中的功与能 .....	(97)
5.6 对定轴的角动量守恒 .....	(99)
5.7 进动 .....	(102)
习题.....	(104)
<b>第 6 章 机械振动</b> .....	(109)
6.1 简谐振动 .....	(109)
6.2 阻尼振动 .....	(121)
6.3 受迫振动与共振 .....	(123)
6.4 简谐振动的合成 .....	(126)
6.5 耦合振动* .....	(133)
习题.....	(136)
<b>第 7 章 机械波</b> .....	(143)
7.1 横波和纵波 .....	(143)
7.2 运动波源产生的波 .....	(149)
7.3 波的能量 波的能量密度 .....	(155)
7.4 波的干涉 .....	(158)
7.5 驻波 .....	(162)
7.6 波的衍射 .....	(169)
7.7 谐波分析* .....	(171)
7.8 波包、相速和群速* .....	(173)
习题.....	(176)

## 第二篇 热 学

<b>第 8 章 分子运动论</b> .....	(183)
8.1 热力学平衡态和温度 .....	(183)
8.2 分子力和理想气体模型 .....	(185)
8.3 理想气体的压强和温度 .....	(188)
8.4 能量均分定理 .....	(190)
8.5 分子热运动和统计规律 .....	(193)
8.6 麦克斯韦速率分布律 .....	(194)
8.7 气体分子的平均自由程 .....	(199)
8.8 真实气体和范德瓦耳斯方程* .....	(200)

习题.....	(203)
<b>第 9 章 热力学第一定律.....</b>	<b>(208)</b>
9.1 热力学过程 .....	(208)
9.2 热力学第一定律 .....	(210)
9.3 绝热过程与多方过程 .....	(215)
9.4 循环过程 .....	(218)
9.5 卡诺循环 .....	(220)
习题.....	(223)
<b>第 10 章 热力学第二定律 .....</b>	<b>(228)</b>
10.1 可逆过程与不可逆过程.....	(228)
10.2 热力学第二定律.....	(229)
10.3 热力学第二定律的统计意义.....	(231)
10.4 克劳修斯熵公式.....	(233)
10.5 熵增加原理.....	(237)
习题.....	(239)
<b>附录 1 常用物理常量 .....</b>	<b>(241)</b>
<b>附录 2 SI 基本单位 .....</b>	<b>(243)</b>
<b>附录 3 具有专用名称的 SI 导出单位 .....</b>	<b>(244)</b>
<b>附录 4 主要参考书目 .....</b>	<b>(245)</b>

第一篇  
力 学

# 第 1 章 质点运动学

力学是一门十分古老的学问,但力学(以及整个物理学)成为一门科学理论应该说是从 17 世纪伽利略论述惯性运动开始,继而牛顿提出了后来以他名字命名的三个运动定律。现在,以牛顿定律为基础的力学理论称为牛顿力学或经典力学,虽然在 20 世纪初发现了它的局限性,在高速领域为相对论所取代,在微观领域为量子力学所取代,但是在一般的技术领域甚至在航空航天技术中,经典力学仍保持着充沛的活力并起着基础理论的作用。力学篇主要讲述经典力学的基础,包括质点力学、部分刚体力学以及机械振动和机械波,着重阐明动量、角动量和能量诸概念及相应的守恒定律。

在物质多种多样的运动形式中,最简单、最基本的运动是物体之间或物体各部分之间相对位置的变化,这称为机械运动。各种机械及机器的运转、宇宙飞船的航行、流体的流动等都是机械运动。力学就是研究机械运动的规律及其应用的学科,它是许多学科的基础。

在力学中,描述物体的位置如何随时间变化的内容称为运动学。本章主要利用矢量和微积分来研究质点的运动学问题,并介绍了运动的相对性及其描述。

## 1.1 质点的位矢、速度和加速度

### 1.1.1 质点模型和参考系、坐标

在物理学中为了突出问题的本质,对所研究的对象,常要抽象为一定的物理模型。在力学中有质点模型、刚体模型、谐振子模型等。

物体具有一定大小和形状,当它的大小和形状相对于考察其运动的空间范围小得很多而忽略不计时,就可不计物体各部分运动状况的差别,而把整个物体看作一点,这样的物体称为质点。因此,质点模型就是以具有一定质量的点来代表物体。

质点作机械运动时,它的位置随时间改变。位置总是相对的,它只有相对于某个事先选定的其他物体而言,才有明确的意义。这个其他物体或物体系就叫做确定质点位置时用的参考系。在力学中常用到地面参考系和实验室参考系。

要定量地描述质点在某一时刻的位置还需要在参考系上建立适当的坐标系。常用的有笛卡儿坐标系,又称直角坐标系。

### 1.1.2 质点的位矢

为了表示质点在时刻  $t$  的位置  $P$ ,我们从坐标原点  $O$  向此点引一条有向线段  $OP$ ,并记作矢量  $r$ 。 $r$  的方向确定了  $P$  点相对于坐标轴的方位, $r$  的大小(模)就是  $P$  点到原点的距离。方位和距离都确定了, $P$  点的位置也就确定了。用来确定质点位置的这一矢量  $r$  叫做

质点的位置矢量,简称位矢(如图 1.1)。

质点运动时,位矢  $r$  是随时间改变的,我们可以用函数

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t) \quad (1.1.1)$$

来表示。上式就是质点运动方程的矢量表示式。

在直角坐标系中,位矢  $r$  和它在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴三个方向上的分量  $x$ 、 $y$ 、 $z$  之间的关系为

$$\boldsymbol{r} = x(t)\boldsymbol{i} + y(t)\boldsymbol{j} + z(t)\boldsymbol{k} \quad (1.1.2)$$

其中  $\boldsymbol{i}$ 、 $\boldsymbol{j}$  和  $\boldsymbol{k}$  分别为  $x$ 、 $y$  和  $z$  轴方向上的单位矢量。上式中各函数表示质点位置的各坐标值随时间的变化情况,它们可以看作是质点沿各坐标轴的分运动的表示式。

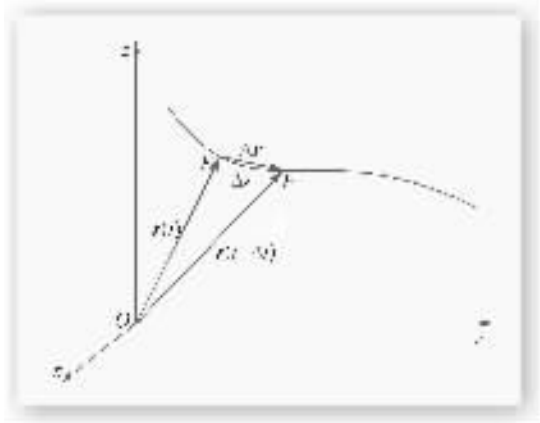


图 1.1 质点的位矢和位移

### 1.1.3 位移和速度

设质点在  $t$  时刻位于  $P$  点,在  $t + \Delta t$  时刻位于  $P_1$  点,其位矢分别为  $\boldsymbol{r}(t)$  和  $\boldsymbol{r}(t + \Delta t)$ ,则  $t$  到  $t + \Delta t$  时间间隔内位矢的增量

$$\Delta \boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t + \Delta t) - \boldsymbol{r}(t) \quad (1.1.3)$$

这就是质点在  $t$  到  $t + \Delta t$  这一段时间内的位移(如图 1.1)。

位移  $\Delta \boldsymbol{r}$  和发生这段位移所经历的时间  $\Delta t$  之比称为质点在这一段时间内的平均速度:

$$\bar{\boldsymbol{v}} = \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} \quad (1.1.4)$$

当  $\Delta t$  趋于零时,上式的极限就是位矢对时间的变化率,称为质点在时刻  $t$  的瞬时速度,简称速度:

$$\boldsymbol{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} = \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} \quad (1.1.5)$$

速度的大小叫速率,以  $v$  表示:

$$v = |\boldsymbol{v}| = \left| \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} \right| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta \boldsymbol{r}|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (1.1.6)$$

其中  $s$  表示路程。上式表明  $v$  又等于质点所走过的路程对时间的变化率。

速度  $\boldsymbol{v}$  还可用三个坐标轴方向的分速度的矢量合成式表示为

$$\boldsymbol{v} = \frac{dx}{dt}\boldsymbol{i} + \frac{dy}{dt}\boldsymbol{j} + \frac{dz}{dt}\boldsymbol{k} = v_x\boldsymbol{i} + v_y\boldsymbol{j} + v_z\boldsymbol{k} \quad (1.1.7)$$

在直角坐标系中,速率又可表示为

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1.1.8)$$

质点在作机械运动时的运动状态,即在任一时刻的位置及运动的快慢、方向,可由该时刻质点的位矢  $r$  和速度  $v$  来描述。 $r$  和  $v$  称为质点运动的状态参量。

#### 1.1.4 加速度

设质点在  $t$  与  $t + \Delta t$  时刻的速度分别为  $v(t)$  和  $v(t + \Delta t)$ , 则这段时间内的平均加速度

$$\bar{a} = \frac{v(t + \Delta t) - v(t)}{\Delta t} \quad (1.1.9)$$

当  $\Delta t$  趋于零时,上式的极限就是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:

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 r}{dt^2} \quad (1.1.10)$$

加速度的分量表示式如下:

$$a = \frac{dv_x}{dt}i + \frac{dv_y}{dt}j + \frac{dv_z}{dt}k = a_x i + a_y j + a_z k \quad (1.1.11)$$

加速度的大小

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1.1.12)$$

下面研究一个质点在平面上的椭圆运动,椭圆的两个半轴长度分别是  $A$ 、 $B$ ,质点绕椭圆转动的角速度是  $\omega$ 。质点的位矢  $r$  可以写成

$$r = x(t)i + y(t)j = (A \cos \omega t)i + (B \sin \omega t)j$$

根据 (1.1.7) 式和 (1.1.11) 式,质点的速度和加速度分别为

$$v = (-\omega A \sin \omega t)i + (\omega B \cos \omega t)j$$

$$a = (-\omega^2 A \cos \omega t)i + (-\omega^2 B \sin \omega t)j$$

图 1.2 的程序演示了质点作椭圆运动时的位矢、速度、加速度,我们可以观察这三个运动矢量的相互关系以及转动角速度对它们的影响。

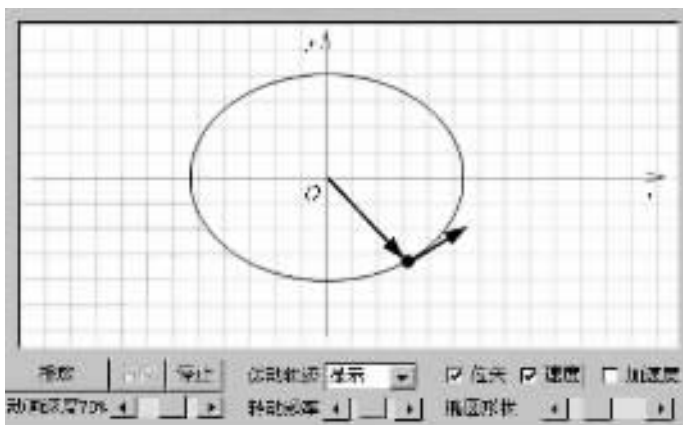


图 1.2 质点运动的位矢、速度和加速度

例题 1.1 设质点的运动方程为

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

其中

$$x(t) = t + 2, y(t) = \frac{1}{4}t^2 + 2$$

(1) 计算在  $t = 1\text{ s}$  到  $t = 4\text{ s}$  这段时间间隔内的平均速度; (2) 求  $t = 3\text{ s}$  时的速度和速率。

解 (1) 由平均速度的定义式, 在  $t = 1\text{ s}$  到  $t = 4\text{ s}$  内的平均速度为

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{v}} &= \frac{\Delta x}{\Delta t}\mathbf{i} + \frac{\Delta y}{\Delta t}\mathbf{j} \\ &= \frac{6-3}{4-1}\mathbf{i} + \frac{6-2.25}{4-1}\mathbf{j} = 1\mathbf{i} + 1.25\mathbf{j} \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}\end{aligned}$$

(2) 由题意知, 速度的分量式为

$$v_x = \frac{dx}{dt} = 1, v_y = \frac{dy}{dt} = \frac{1}{2}t$$

故在  $t = 3\text{ s}$  时的速度为

$$\mathbf{v} = 1\mathbf{i} + 1.5\mathbf{j} \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$$

在  $t = 3\text{ s}$  时的速率为

$$v = |\mathbf{v}| = (1^2 + 1.5^2)^{1/2} = 1.80 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$$

例题 1.2 如图所示, A、B 两物体由长为  $l$  的刚性细杆相连, A、B 两物体可在光滑轨道上滑行。如物体 A 以恒定速率  $v$  向左滑行, 当  $\alpha = 60^\circ$  时, B 的速度是多少?

解 选如图所示的坐标系, A 的速度为

$$\mathbf{v}_A = v_x = \frac{dx}{dt}\mathbf{i} = -v\mathbf{i}$$

B 的速度为

$$\mathbf{v}_B = v_y = \frac{dy}{dt}\mathbf{j}$$

由几何关系有  $x^2 + y^2 = l^2$

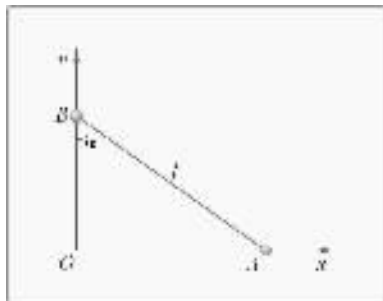
考虑到细杆是刚性的,  $l$  为一常量, 而  $x$ 、 $y$  是时间的函数, 对几何关系两端关于  $t$  求导得:

$$2x \frac{dx}{dt} + 2y \frac{dy}{dt} = 0, \frac{dy}{dt} = -\frac{x}{y} \frac{dx}{dt} = v \tan \alpha$$

因此  $\mathbf{v}_B = v \tan \alpha \mathbf{j}$ 。当  $\alpha = 60^\circ$  时, B 的速度

$$\mathbf{v}_B = 1.73v\mathbf{j}$$

方向沿  $y$  轴正向。



例题 1.2 图

### 1.1.5 自然坐标系和极坐标系中的运动描述

在已知质点运动轨迹时,常常采用自然坐标系。采用自然坐标系可使质点速率的描述更为直观,加速度的描述也更为方便明了。

如图 1.3 所示,自然坐标系的原点  $O$  可选定为质点在运动轨道上的某一点。设原点至质点间的轨道长度为  $s$ ,并规定在原点的一边  $s$  为正,另一边  $s$  为负。这样  $s$  就可以唯一地确定质点的位置,这称为自然坐标或弧坐标。当质点运动时有

$$s = s(t) \quad (1.1.13)$$

在任一时刻质点所在处,可取两个互相垂直的单位矢量  $n$  和  $\tau$ 。 $n$  沿轨道法线,指向轨道的曲率中心; $\tau$  沿轨道切向,指向质点的运动方向。单位矢量  $n$  和  $\tau$  的方向随着质点的运动而改变。质点运动中的速度、加速度均可用自然坐标系中的有关参量表示为

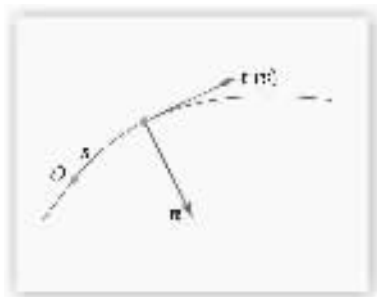


图 1.3 自然坐标系

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}(t) = \frac{ds}{dt} \boldsymbol{\tau} \quad (1.1.14)$$

$$\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}(t) = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = a_{\tau} \boldsymbol{\tau} + a_n \boldsymbol{n} = \frac{dv}{dt} \boldsymbol{\tau} + \frac{v^2}{\rho} \boldsymbol{n} \quad (1.1.15)$$

式中  $\rho$  为质点所在处的轨道曲率半径。

选择适当的坐标系,可使问题大大简化。例如某些平面曲线运动,可选择平面极坐标系。在平面极坐标系中,两个相互垂直的单位矢量  $\hat{r}$  和  $\hat{\theta}$  代表径向和角向,如图 1.4 所示。单位矢量  $\hat{r}$  和  $\hat{\theta}$  的方向随着质点的运动而改变。在极坐标中,质点的位置表示为

$$\boldsymbol{r} = r \hat{r} \quad (1.1.16)$$

上式中虽未出现  $\hat{\theta}$ ,但由于  $\hat{r}$  的取向依赖于  $\hat{\theta}$ ,所以  $r$  实际上是由  $r$  值与  $\theta$  值共同描述的。运动质点的速度、加速度在极坐标中均有相应的表达式:

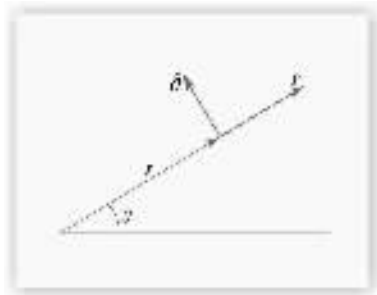


图 1.4 极坐标系

$$\boldsymbol{v} = \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} = \frac{dr}{dt} \hat{r} + r \frac{d\hat{\theta}}{dt} \quad (1.1.17)$$

$$\boldsymbol{a} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = \left[ \frac{d^2 r}{dt^2} - r \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2 \right] \hat{r} + \left( r \frac{d^2 \theta}{dt^2} + 2 \frac{dr}{dt} \frac{d\theta}{dt} \right) \hat{\theta} \quad (1.1.18)$$

当质点做圆周运动时,质点的径向坐标为常量,角位置  $\theta$  是时间的函数:

$$\theta = \theta(t) \quad (1.1.19)$$

角位置的单位是弧度 (rad)。质点的圆周运动用角位移  $\Delta\theta$ 、角速度  $\omega$  和角加速度  $\beta$  来描述:

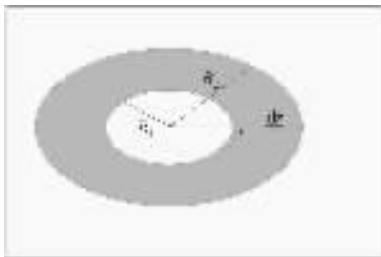
$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (1.1.20)$$

$$\beta = \frac{d\omega}{dt} \quad (1.1.21)$$

从(1.1.17)式可得质点做圆周运动的线速度  $v$  与圆半径  $r$  及角速度  $\omega$  之间的关系:

$$v = r\omega \quad (1.1.22)$$

**例题 1.3** 一张 CD 光盘音轨区域的内半径  $R_1 = 2.2 \text{ cm}$ , 外半径  $R_2 = 5.6 \text{ cm}$ , 径向音轨密度  $N = 650 \text{ 条/mm}$ 。在 CD 唱机内, 光盘每转一圈, 激光头沿径向向外移动一条音轨, 激光束相对于光盘以  $v = 1.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的恒定线速率运动。求: (1) 这张光盘的全部放音时间是多少? (2) 激光束到达离盘心  $r = 5.0 \text{ cm}$  处时, 光盘转动的角速度和角加速度各是多少?



例题 1.3 图

**解** (1) 以  $r$  表示激光束打到音轨上的点对光盘中心的距离, 则在  $dr$  宽度内的音轨长度为  $2\pi r N dr$ 。激光束划过这样长的音轨所用的时间为  $dt = 2\pi r N dr / v$ 。由此得到光盘的全部放音时间

$$\begin{aligned} T &= \int dt = \int_{R_1}^{R_2} \frac{2\pi r N dr}{v} = \frac{\pi N}{v} (R_2^2 - R_1^2) \\ &= \frac{\pi \times 650 \times 10^3 \times (0.056^2 - 0.022^2)}{1.3} \\ &= 4.16 \times 10^3 \text{ (s)} = 69.4 \text{ (min)} \end{aligned}$$

(2) 光盘上各点的线速度与光盘转动的角速度具有关系  $v = \omega r$ , 因此当激光束到达离盘心  $r = 5.0 \text{ cm}$  处时光盘转动的角速度

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{1.3}{0.05} = 26 \text{ (rad} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$$

此时的角加速度为

$$\beta = \frac{d\omega}{dt} = -\frac{v}{r^2} \frac{dr}{dt} = -\frac{v}{r^2} \frac{v}{2\pi r N} = -3.31 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$$

计算结果表明, 激光头沿径向向外移动时驱动光盘机的伺服马达的转速是减小的。

## 1.2 抛体运动

从地面上某点以一定初速度向空中抛出一物体(质点), 它在空中的运动称为抛体运动。物体被抛出后, 忽略风的作用, 其运动是二维的。在恒定的重力作用下(忽略空气阻力), 它将沿一抛物线轨迹运动。