



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

# 大学物理学 下

(第4版·修订版)

主编 赵近芳 周 林

Physics



北京邮电大学出版社  
www.buptpress.com



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

# 大学物理学

(第4版·修订版)

(下)

主 编 赵近芳 周 林  
编 者 王 戩 刘剑波 李 妍  
主 审 颜晓红

PHYSICS

北京邮电大学出版社

· 北京 ·

## 内容简介

本书是在“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材《大学物理学》(第4版)的基础上改编而成,全书仍分为上、下两册.上册内容包括力学和电磁学;下册内容包括振动与波动、波动光学、气体动理论和热力学、近代物理.本次改编我们将课程内容进行了重组,电磁学部分调整到上册,振动与波动、热力学部分调整到下册.但依然延续第4版的“高、宽、新、活、宜”的原则,即高视点选择经典内容,尽量反映新科技发展,注意各部分知识之间的联系,并保持内容难度适宜.本书与第4版共用一套学习指导书、多媒体课件、电子教案、网络课件、网络学习平台等立体化教学资源.

本书可作为高等工科院校各专业的物理教材,也可作为综合大学和师范院校非物理专业的教材或参考书.

## 图书在版编目(CIP)数据

大学物理学.下/赵近芳,周林主编.—4版(修订本).—北京:北京邮电大学出版社,2016.1(2016.11重印)  
ISBN 978-7-5635-4595-7

I. ①大… II. ①赵… ②周… 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(2015)第 301145 号

- 书 名 大学物理学(第4版·修订版)(下)  
主 编 赵近芳 周 林  
责任编辑 刘国辉  
出版发行 北京邮电大学出版社  
社 址 北京市海淀区西土城路10号(100876)  
电话传真 010-82333010 62282185(发行部) 010-82333009 62283578(传真)  
网 址 www3.buptpress.com  
电子信箱 ctrd@buptpress.com  
经 销 各地新华书店  
印 刷 北京泽宇印刷有限公司  
开 本 787 mm×1 092 mm 1/16  
印 张 23.5  
字 数 570 千字  
版 次 2016年1月第4版 2016年11月第2次印刷



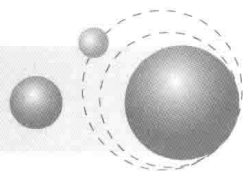
ISBN 978-7-5635-4595-7

定价: 45.00 元

如有质量问题请与发行部联系

版权所有 侵权必究

## 第4版修订版前言



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材《大学物理学》(第4版),自出版以来深受广大师生的欢迎,被全国多所理工科院校使用.为了使教材能够满足不同理工科院校的教学设置,更好地为广大师生服务,我们在第4版的基础上对课程结构作了一定的调整,编写出版了《大学物理学》(第4版·修订版),并对本书内容作了更进一步的修改,使全书的内容体系和结构设置能够满足不同兄弟院校大学物理课程教学的需要.

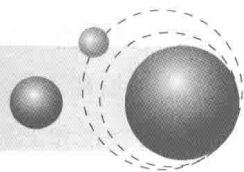
全书仍分为上、下两册.上册内容包括力学和电磁学;下册内容包括振动与波动、波动光学、气体动理论和热力学、近代物理.本次改编我们将课程内容进行了重组,电磁学部分调整到上册,振动与波、热学部分调整到下册.目前,许多高校理工科院系专业课的学习需要有电磁学的基础,调整后的课程体系更能适应这类高校理工科的教学需要.对课程结构调整的同时,我们完善地继承了本书第4版的风格和特色,对部分章节的内容略作调整,适当降低了例题难度.

本书由张永志负责改编力学部分;姜子实负责改编静电场和稳恒磁场部分;李淑侠负责改编电磁感应和电磁波部分及附录;周林负责改编振动与波、波动光学部分;王骞负责改编热学部分;李妍负责改编相对论和量子物理部分;刘剑波负责改编原子核物理及新技术物理部分.最后由赵近芳教授负责全书的修改和定稿工作.在修订过程中,广西师范大学郭平生、湖南工业大学柳闻鹃、湖南科技大学周并举、南华大学彭志华、中南大学罗益民、邵阳学院曾爱华等老师参加了讨论和编写,提出了许多宝贵意见.参加讨论和编写的老师还有焦志伟、白心爱、刘道军、曲蛟、汤永新、张博洋、范军怀、马双武、苏文刚、唐咸荣、杜立、韩霞等.教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会委员、南京邮电大学颜晓红教授仔细审查了此书.北京邮电大学出版社有关人员在本书的编辑出版过程中付出了大量的辛勤劳动,在此一并表示感谢.

由于编者水平有限,书中的疏漏和错误之处在所难免,恳请读者批评指正.

编者

## 第4版前言



承蒙兄弟院校的厚爱,普通高等教育“十一五”国家级规划教材《大学物理学》(第3版)得到了全国数十所高等院校的使用,使我们倍感欣慰.更令我们振奋的是,该书被评为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材.现根据使用教材院校的反馈信息,为了使教材更能满足教学改革的需求,更好地为广大师生提供优质的教材,我们在第3版的基础上对内容进行了精细化修改,使全书内容更丰富,更符合大学物理课程教学的需要.

全书仍分为《大学物理学》上、下两册和《大学物理学学习指导》.上册包括力学、相对论、振动与波、热学;下册包括电磁学、波动光学、量子物理学、新技术物理基础(专题);指导书包括学习指导和系列化习题.全书改编过程遵循“高、宽、新、活、宜”的原则,即高视点选择经典内容,努力拓宽知识面,尽量反映新科技发展概况,注意各部分知识之间的活化联系,同时保持教材内容难度适宜.

近年来高中物理知识和数学知识有所变动.例如,高等数学中的导数和积分已挪到高中学习,物理知识则在难度上有所降低.我们参考了近年来部分省(市)的高中物理教材,仔细研究了大学物理跟高中物理最佳的结合体系和内容.与第3版相比,本版的特色主要表现在以下四个方面.

1. 适当减少综合性、运算繁复的例题,选用了一些切合实际的应用题.

2. 增加思考题、选择题、填空题三类题型.习题的选择注重基本问题的理解和基本解题方法的训练,尽量避免难题和偏题,并以紧扣每部分教学内容的典型题为主,适当控制题目数量,不贪多求大.减少了计算题,适当降低了计算题难度.

3. 对教材内容难度大的部分进行了删改,重要的但有一定难度的内容作适当深入阐述.如高中物理对复杂物体的受力分析弱化,原教材刚体部分讲得不够详细,因此在本版教材中我们把刚体内容单独作为一章列出.此外,部分难度较大的物理内容已用星号“\*”标记,作为选修参考.

4. 教材与课程建设紧密结合,形成了一套独具特色的立体化教学资源.主要包括学习指导书、多媒体课件、电子教案、网络课件、网络学习平台等.教材与学习指导两者既可彼此独立,又可相互配套使用.教材始终保持普通物理基础知识层次,每章均有本章提要,而且重要概念和主要公式用醒目的粗黑字体体现.一些知识点标有星号或用小字体体现,去掉后仍呈体系,可供不同非物理类的各理工科专业选用.

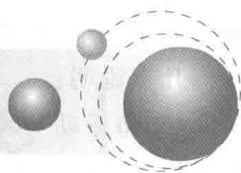
不同院校不同专业的物理教学计划时数可能存在差异,在使用本教材时可根据其具体情况对内容进行重组或取舍,教学时数可掌握在 96~128 学时范围内.

本书由王凤姣负责改编力学、振动与波及其相应章节的阅读材料和习题;杨友田改编热学、量子物理篇、新技术物理基础(专题)的所有内容;谢月娥负责电磁学篇的所有内容;王登龙改编相对论、波动光学篇的全部内容.学习指导的相关章节仍由以上老师改编,最后由赵近芳教授和王登龙教授负责全书的修改和定稿工作.在修订过程中,广西师范大学郭平生、湖南工业大学柳闻鹃、湖南科技大学周并举、南华大学彭志华、中南大学罗益民、邵阳学院曾爱华等老师参加了讨论和编写,提出了许多宝贵意见.参加讨论和编写的老师还有焦志伟、白心爱、刘道军、曲蛟、汤永新、张博洋、范军怀、马双武、苏文刚、唐咸荣、杜立、韩霞等.教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会委员、南京邮电大学颜晓红教授仔细审查了此书.北京邮电大学出版社有关人员在本书的编辑出版过程中付出了大量的辛勤劳动,在此一并表示感谢.

编写适合市场需求的教材是一种探索,由于编者水平有限,书中的疏漏和错误之处在所难免,恳请读者批评指正.

编 者

## 第3版前言



本书是为适应当前教学改革的要求,根据教育部《高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划》的精神,在总结我们多年教材改革实践的基础上,汲取了当前国内外优秀教学改革成果而编写,是普通高等教育“十一五”国家级规划教材.教材既包括了工科大学物理课程指导委员会制定的教学基本要求的全部内容,又特别加强了近代物理知识和新科技物理基础的介绍,使全书内容更丰富、更符合工科物理教学的需要,这套教材的主要特点是:

**1. 高视点选择经典内容,更新教学体系** 如力学中删去了直线运动、抛体运动、碰撞等内容,加强了矢量性、能量及守恒定律等重要概念的阐述,使学生对大学物理有新鲜感.教材把相对论纳入力学篇,使牛顿力学与相对论时空观紧密相联,开拓了学生的视野.

**2. 着重内容现代化** 教材介绍了当前高新技术领域中的基础性物理原理,如熵与信息、全息、光纤通信、能带理论、激光、超导、纳米科学技术等,还引入了非线性物理的一些基本概念,如混沌、孤波、耗散结构、非线性光学等内容;同时大力加强了现代物理学的重要观念,如相对论时空观、微观粒子的波粒二象性、量子论以及时空对称性与守恒定律的关系等,使读者尽早接触现代高科技的发展脉搏和现代物理的前沿课题,具有鲜明的时代特色.

**3. 加强培养全局掌握、运用知识的综合能力** 教材力求突出主干,删除枝节,精选了例题和习题,尽量避免烦琐的叙述和冗长的数学推导,力求对物理概念、原理阐述准确、简洁、透彻,重点突出,便于学生阅读和理解.加强重要概念在各部分内容中的联系,如势能概念在力学、热学和电学中一直互相呼应,一脉相承,使学生整体把握知识的能力受到必要的训练,有利于从全局观点掌握、运用知识和综合思考.

**4. 开“窗口”、重视科学素质训练** 在现代物理部分大胆地“渗透”一些科技前沿信息及开一定的非线性物理“窗口”.尽管有些内容学生不一定能完全清楚,但这将有益于培养学生的求知欲望和独立思考能力,而求知欲和独立思考是科学素质和创造能力的基本要素.

说明:

- (1)教材中打 \* 号的章节多为开“窗口”的内容,教师可自行取舍;
- (2)书中小字部分是相关章节的延伸内容,不作要求;
- (3)若将打 \* 号的章节和小字部分除去,仍不影响教材的整体性.

本书第 1 版于 2002 年 8 月由北京邮电大学出版社出版,为新一代物理教材.该书出版后,曾在国内 10 多所高校中使用,反映较好.

本书第 2 版于 2005 年由北京邮电大学出版社出版,教材体系与第 1 版大体相同,保持了原教材基础知识系统、扎实,内容精干,重实际训练等特色,又进一步加强了现代物理的新

观念、新思想及新技术的介绍,使全书内容更丰富、更符合工科物理教学的需要。

现根据使用学校师生的反馈意见和要求,对教材进行了再次修改.全书分《大学物理学》上、下册和《大学物理学学习指导》.上册:力学、相对论、振动与波、热物理学;下册:电磁学、波动光学、量子物理学、新技术的物理基础(专题);指导书:学习指导和系列化习题.

几点说明:

(1)将振动与波归入力学篇,同时在电磁学篇最后讲述电磁波,接着再讲述波动光学,前后连贯,更方便教学.

(2)教材中删去了部分起点较高的内容和习题,并对书中一些不规范的地方进行了修正.

(3)教材增加了阅读材料和本章小结,供学生自学时参考.

(4)修改了书中的插图,使之更准确、更形象、更美观.

本书由黎培德编写力学、振动与波、超导电性及阅读材料一、二、三、五、六;杨友田编写热学及阅读材料七、八、九;黄克立编写电磁学、激光原理及阅读材料十、十一、十二;赵近芳编写波动光学、固体的能带结构、纳米科学技术及阅读材料十三、十四、十五、十六、十七;崔洪农编写相对论、量子物理基础、原子核物理和粒子物理及阅读材料四、十八;王登龙编写玻色-爱因斯坦凝聚及阅读材料十九.学习指导的相关章节仍由以上编者分工编写,最后由赵近芳教授负责全书的修改和定稿工作.在改编过程中,参加讨论和编写的老师还有黄小益、蔡新华、曹东坡、贺江达、滕道祥、陈飞明、卢德华、唐世洪、苏卡林、周宙安、张登玉、方家元、黄祖洪、吴松安、龚志强、刘朝辉、彭解华、陈昌永、王振华、施毅敏等,他们提出了许多很中肯的建议,尤其是得到了北京航空航天大学、北京邮电大学、厦门大学、中北大学、武汉理工大学、江汉大学、湘潭大学、中南大学、长沙理工大学、南华大学、湖南大学、华南理工大学、中南林学院等学校老师的帮助和指导,教育部物理教学指导委员会委员颜晓红教授仔细审查了此书,匡乐满教授和罗维治教授对此书提出了许多宝贵意见,北京邮电大学出版社有关人员在本书的编辑出版过程中付出了大量的劳动,在此一并致谢.

编写适合教学改革需要的教材是一种探索,加之编者水平所限,难免有不妥和疏漏之处,恳请读者批评指正.

编者



# 目 录

## 振动与波动篇

### 第 8 章 机械振动 /2



- 8.1 简谐振动的动力学特征 /3
- 8.2 简谐振动的运动学 /5
- 8.3 简谐振动的能量 /9
- 8.4 简谐振动的合成 \*振动的频谱分析 /11
- \*8.5 阻尼振动 受迫振动 共振 /18
- 阅读材料八 非线性振动简介 /21
- 本章提要 /23
- 习题 /24

### 第 9 章 机械波 /27



- 9.1 机械波的形成和传播 /28
- 9.2 平面简谐波的波函数 /32
- 9.3 波的能量 \*声强 /40
- 9.4 惠更斯原理 波的叠加和干涉 /44
- 9.5 驻波 /50
- 9.6 多普勒效应 \*冲击波 /56
- \*9.7 色散 波包 群速度 /60
- 阅读材料九 非线性波 孤波 /62
- 本章提要 /63
- 习题 /65

## 波动光学篇

### 第 10 章 光的干涉 /71



- 10.1 光源 光的相干性 /72
- 10.2 杨氏双缝干涉实验 /75
- 10.3 光程与光程差 /78
- 10.4 薄膜干涉 /80
- 10.5 劈尖干涉 牛顿环 /82
- 10.6 迈克耳孙干涉仪 /87

阅读材料十 全息照相 /90

本章提要 /93

习题 /94

## 第 11 章 光的衍射 /97



11.1 光的衍射 惠更斯-菲涅耳原理 /98

11.2 单缝夫琅禾费衍射 /100

11.3 衍射光栅 /104

11.4 圆孔衍射 光学仪器的分辨率 /110

\*11.5 X射线的衍射 /112

阅读材料十一 光纤通信 /114

本章提要 /120

习题 /121

## 第 12 章 光的偏振 /123



12.1 自然光和偏振光 /124

12.2 起偏和检偏 马吕斯定律 /126

12.3 反射与折射时光的偏振 /128

\*12.4 散射光的偏振 /130

\*12.5 光的双折射 /131

\*12.6 偏振光的干涉 人为双折射现象 /134

\*12.7 旋光现象 /136

阅读材料十二 液晶 /137

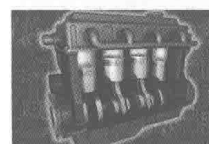
阅读材料十三 非线性光学简介 /142

本章提要 /145

习题 /146

## 气体动理论和热力学篇

## 第 13 章 气体动理论基础 /149



13.1 平衡态 温度 理想气体状态方程 /150

13.2 理想气体压强公式 /153

13.3 温度的统计解释 /155

13.4 能量均分定理 理想气体的内能 /156

13.5 麦克斯韦分子速率分布定律 /158

\*13.6 玻耳兹曼分布律 /164

13.7 分子的平均碰撞频率和平均自由程 /165


\*13.8 气体内的输运过程 /167

阅读材料十四 奇妙的低温世界 /171

本章提要 /174

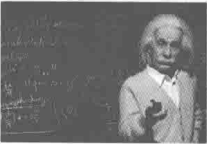
习题 /175

## 第 14 章 热力学基础 /178


- 
- 14.1 内能 功和热量 准静态过程 /179
  - 14.2 热力学第一定律 /181
  - 14.3 气体的摩尔热容 /184
  - 14.4 绝热过程 /186
  - 14.5 循环过程 卡诺循环 /189
  - 14.6 热力学第二定律 /194
  - 14.7 卡诺定理 克劳修斯熵 /198
  - 14.8 热力学第二定律的统计意义 玻耳兹曼熵 /202
  - 阅读材料十五 熵与信息 /205
  - 阅读材料十六 耗散结构 /208
  - 本章提要 /213
  - 习题 /215

## 近代物理篇

## 第 15 章 相对论 /221

- 
- 15.1 伽利略变换和经典力学时空观 /222
  - 15.2 狭义相对论产生的实验基础和历史条件 /224
  - 15.3 狭义相对论基本原理 洛伦兹变换 /226
  - 15.4 狭义相对论时空观 /231
  - 15.5 狭义相对论动力学 /236
  - 阅读材料十七 广义相对论简介 /240
  - 本章提要 /248
  - 习题 /249

## 第 16 章 量子物理基础 /251

- 
- 16.1 黑体辐射 普朗克量子假设 /252
  - 16.2 光的量子性 /255
  - 16.3 玻尔的氢原子理论 /262
  - 16.4 粒子的波动性 /267
  - 16.5 测不准关系 /269
  - 16.6 波函数 薛定谔方程 /272
  - 16.7 薛定谔方程在几个一维问题中的应用 /275
  - 16.8 量子力学对氢原子的应用 /281
  - 16.9 斯特恩-盖拉赫实验 /286
  - 16.10 电子自旋 /288

16.11 原子的壳层结构 /289

阅读材料十八 量子力学的争论和非线性量子力学 /294

本章提要 /296

习题 /298

### \*第17章 原子核物理和粒子物理简介 /301



17.1 原子核的基本性质 /302

17.2 原子核的放射性衰变 /306

17.3 粒子物理简介 /309

阅读材料十九 黑物质与黑能量 /315

本章提要 /316

习题 /316

### \*第18章 新技术的物理基础 /318



18.1 固体的能带结构 /319

18.2 激光原理 /328

18.3 超导电性 /334

18.4 纳米科学技术简介 /344

18.5 玻色-爱因斯坦凝聚态 /349

习题 /355

### 习题答案 /358



# 振动与波动篇

振动与波是一种特殊而又常见的运动形态,这种运动形态在单个质点或刚体上表现为振动,而在连续介质中往往表现为波.振动与波的基本特征之一是其周期性.波是振动在介质中的传播.发生波动的介质中,每个质元仍在作振动,但各质元的振动情况并不完全相同,它们之间以一定的次序联系着,因而波动也就是介质中各质元相互关联的集体振动.

振动与波这种运动形态不仅存在于力学领域,而且广泛存在于物理学的其他领域,如电学、光学、原子物理和量子物理,不过各个领域中发生的这种运动的动力学过程并不相同.

本篇主要讲述机械振动和机械波,其内容将有助于在其他领域中对类似运动形态的学习和理解.



## 第 8 章

# 机 械 振 动

物体在某固定位置附近的往复运动叫作机械振动,它是物体一种普遍的运动形式.例如活塞的往复运动、树叶在空气中的抖动、琴弦的振动、心脏的跳动等都是振动.物体在受到打击,或摇摆、颠簸、发声时必有振动.任何一个具有质量和弹性的系统在其运动状态发生突变时都会发生振动.

广义地说,任何一个物理量在某一量值附近随时间作周期性变化都可以叫作振动.例如交流电路中的电流、电压,振荡电路中的电场强度和磁场强度等均随时间作周期性的变化,因此都可以称为振动.这种振动虽然和机械振动有本质的不同,但它们都具有相同的数学特征和运动规律.所以,振动不仅是声学、地震学、建筑学、机械制造等必需的基础知识,也是电学、光学、无线电学的基础.

本章主要讨论简谐振动和振动的合成,并简要介绍阻尼振动、受迫振动和共振现象以及非线性振动.

## 8.1 简谐振动的动力学特征

简谐振动是振动中最基本最简单的振动形式,任何一个复杂的振动都可以看成是若干个或是无限多个简谐振动的合成.

一个作往复运动的物体,如果其偏离平衡位置的位移  $x$  (或角位移  $\theta$ ) 随时间  $t$  按余弦(或正弦)规律变化,即

$$x = A\cos(\omega t + \varphi_0) \quad (8.1)$$

则这种振动称为简谐振动.

研究表明,作简谐振动的物体(或系统),尽管描述它们偏离平衡位置位移的物理量可以千差万别,但描述它们动力学特征的运动微分方程却完全相同.

### 8.1.1 弹簧振子模型

将轻弹簧(质量可忽略不计)一端固定,另一端与质量为  $m$  的物体(可视为质点)相连,若该系统在振动过程中弹簧的形变较小(即形变弹簧作用于物体的力总是满足胡克定律),那么,这样的弹簧—物体系统称为弹簧振子.

如图 8.1 所示,将弹簧振子水平放置,使振子在水平光滑支撑面上振动.以弹簧处于自然状态(弹簧既未伸长也未压缩的状态)的稳定平衡位置为坐标原点,当振子偏离平衡位置的位移为  $x$  时,其受到的弹力作用为

$$F = -kx \quad (8.2)$$

式中  $k$  为弹簧的倔强系数,负号表示弹力的方向与振子的位移方向相反.即振子在运动过程中受到的力总是指向平衡位置,且力的大小与振子偏离平衡位置的位移成正比,这种力就称之为线性回复力.

如果不计阻力(如振子与支撑面的摩擦力,在空气中运动时受到的介质阻力及其他能量损耗),则振子的运动微分方程为

$$-kx = m \frac{d^2x}{dt^2}$$

$$\text{令} \quad \omega^2 = \frac{k}{m} \quad (8.3)$$

$$\text{则有} \quad \frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0 \quad (8.4)$$

式(8.4)的解就是式(8.1)<sup>①</sup>,可知式(8.4)就是描述简谐振动的运动微分方程.由此可以给出简谐振动的一种较普遍的定义:如某力学系统的动力学方程可归结为式(8.4)的形式,且

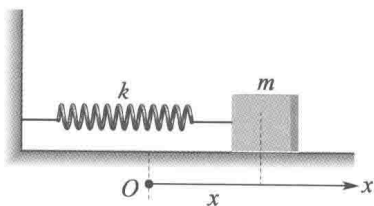


图 8.1 弹簧振子

<sup>①</sup> 根据微分方程理论,式(8.4)的通解为  $x = Ae^{i(\omega t + \varphi_0)} = A\cos(\omega t + \varphi_0) + iA\sin(\omega t + \varphi_0)$ . 在经典物理中只用实数部分表示物理量,描述机械振动通常用余弦函数,所以式(8.4)的解取式(8.1).

其中  $\omega$  仅决定于振动系统本身的性质, 则该系统的运动即为简谐振动. 能满足式(8.4) 的系统, 又可称为谐振子系统.

### 8.1.2 微振动的简谐近似

上述弹簧振子(谐振子) 是一个理想模型. 实际发生的振动大多较为复杂, 一方面回复力可能不是弹力, 而是重力、浮力或其他力; 另一方面回复力可能是非线性的, 只能在一定条件下才可近似当作线性回复力, 例如单摆、复摆、扭摆等.

一端固定且不可伸长的细线与可视为质点的物体相连, 当它在竖直平面内作小角度 ( $\theta \leq 5^\circ$ ) 摆动时, 该系统称为单摆, 如图 8.2 所示.

以摆球为研究对象, 单摆的运动可看作绕过  $C$  点的水平轴转动. 显然, 摆球在铅直方向  $CO$  处为稳定平衡位置(即回复力为零的位置). 当摆线偏离铅直方向  $\theta$  角时( $\theta$  此处又称角位移), 摆球受到重力  $P$  与绳拉力  $T$  的合力, 对过  $C$  点水平轴的力矩为

$$M = -mgl \sin \theta \quad (8.5)$$

式中负号表示力矩的方向总是与角位移的方向相反, 将  $\theta$  值用弧度表示, 在  $\theta \leq 5^\circ$  时, 则有

$\sin \theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} \dots$ , 略去高阶无穷小, 式(8.5) 可近似简化为

$$M = -mgl\theta \quad (8.6)$$

此时的回复力矩与角位移成正比而反向.

若不计阻力, 由转动定律可写出摆球的动力学方程为

$$-mgl\theta = ml^2 \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

$$\text{令} \quad \omega^2 = \frac{g}{l} \quad (8.7)$$

$$\text{则有} \quad \frac{d^2\theta}{dt^2} + \omega^2\theta = 0 \quad (8.8)$$

即单摆的小角度摆动是简谐振动.

绕不过质心的水平固定轴转动的刚体称之为复摆<sup>①</sup>, 如图 8.3 所示. 质心  $C$  在铅直位置时为平衡位置, 以质心  $C$  至轴心  $O$  的距离  $h$  为摆长, 同上分析, 当  $\theta \leq 5^\circ$  时复摆的动力学方程为

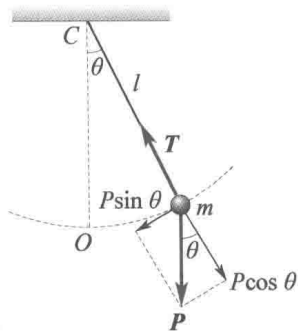


图 8.2 单摆

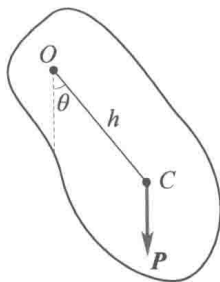


图 8.3 复摆

<sup>①</sup> 若悬线长  $l$  与“摆球”的线度  $r$  不满足  $l \gg r$ , 亦称为复摆.



$$-mgh\theta = J \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (8.9)$$

$$\text{令} \quad \omega^2 = \frac{mgh}{J} \quad (8.10)$$

式中  $J$  为刚体对过  $O$  点水平轴的转动惯量, 于是式(8.9) 亦可归为式(8.8).

由上述讨论可知, 单摆或复摆在小角度摆动情况下, 经过近似处理, 它们的运动方程与弹簧振子的运动方程具有完全相同的数学形式, 即式(8.4)、式(8.8). 进一步的研究表明, 任何一个物理量(例如长度、角度、电流、电压以及化学反应中某种化学组分的浓度等) 的变化规律凡满足式(8.4), 且常量  $\omega$  决定于系统本身的性质, 则该物理量作简谐振动.

## 8.2 简谐振动的运动学

### 8.2.1 简谐振动的运动学方程

如前所述, 微分方程

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0$$

的解可写作

$$x = A \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (8.11)$$

式中  $A$  和  $\varphi_0$  是由初始条件确定的两个积分常数, 式(8.11) 称为简谐振动的运动学方程.

由于

$$\cos(\omega t + \varphi_0) = \sin(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2})$$

令

$$\varphi' = \varphi_0 + \frac{\pi}{2}$$

则式(8.11) 亦可写成

$$x = A \sin(\omega t + \varphi')$$

可见简谐振动的运动规律也可用正弦函数表示. 本教材对机械振动统一用余弦函数表示.

### 8.2.2 描述简谐振动的三个重要参量

#### 1. 振幅 $A$

按简谐振动运动学方程, 物体的最大位移不能超过  $A$ , 物体偏离平衡位置的最大位移(或角位移) 的绝对值叫作振幅. 显然, 振幅  $A$  是由初始条件决定.

简谐振动的运动学方程和它对时间的一阶导数(简谐振动的速度方程) 分别如下:

$$\begin{cases} x = A \cos(\omega t + \varphi_0) \\ v = -\omega A \sin(\omega t + \varphi_0) \end{cases} \quad (8.12)$$

将初始条件  $t = 0, x = x_0, v = v_0$  代入, 得

$$\begin{cases} x_0 = A \cos \varphi_0 \\ -\frac{v_0}{\omega} = A \sin \varphi_0 \end{cases} \quad (8.13)$$

取两式平方和, 即求出振幅为