



普通高等教育“十二五”规划教材  
全国普通高等教育基础医学类系列教材

熊兴良 陈龙聪 主编

# 医学物理学

MEDICAL PHYSICS

供基础、临床、预防、口腔、护理等  
医学类专业使用



科学出版社



普通高等教育“十二五”规划教材

## 全国普通高等教育基础医学类系列教材

供基础、临床、预防、口腔、护理等医学类专业使用

# 医学物理学

MEDICAL PHYSICS



熊兴良 陈龙聪 主编

科学出版社

北京

• 版权所有 侵权必究 •

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303 (打假办)

## 内 容 简 介

本书是在有关部门颁发的高等医学院校医用物理学教学大纲的基础上,总结我们多年教学改革的经验,吸取国内外有关教材的优点编写的。本教材既重视物理学知识的系统性,又避免了与中学物理不必要的重复,而且编写了较多的医学物理学专题。

本书主要用于5年制和7年制临床医学、儿科、预防、口腔、影像医学、麻醉、卫生、卫管、卫生检验、妇幼保健、药学等专业教学。

### 图书在版编目(CIP)数据

医学物理学 / 熊兴良, 陈龙聪主编. —北京: 科学出版社, 2014. 9  
全国普通高等教育基础医学类系列教材  
ISBN 978-7-03-040620-0

I. ①医… II. ①熊… ②陈… III. ①医用物理学-高等学校-教材  
IV. ①R312

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第098346号

责任编辑: 胡治国 / 责任校对: 刘小梅  
责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 范璧合

版权所有, 违者必究。未经本社许可, 数字图书馆不得使用

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京佳艺恒彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2014年9月第 一 版 开本: 889×1194 1/16

2014年9月第一次印刷 印张: 13 1/2

字数: 399 000

定价: 39.80 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 《医学物理学》

## 编辑委员会

主 编

熊兴良 陈龙聪

副主编

江奇锋

---

编 委

(以姓氏笔画为序)

王洪雷 江奇锋 苏爱华 陈龙聪  
陈 萍 奉 娇 高 斌 熊兴良

## 专家指导委员会

主任委员

侯一平

副主任委员

孙 俊 王应雄 胡华强

委 员

(以姓氏笔画为序)

王应雄(重庆医科大学)

王建伟(重庆医科大学)

左 丽(贵阳医学院)

龙汉安(泸州医学院)

阮永华(昆明医科大学)

孙 俊(昆明医科大学)

李 华(四川大学华西基础医学与法医学院)

吴玉章(第三军医大学)

张 波(川北医学院)

张 晓(成都医学院)

欧刚卫(遵义医学院)

胡华强(中国科技出版传媒股份有限公司)

侯一平(四川大学华西基础医学与法医学院)

高永翔(成都中医药大学)

# 前 言

物理学是研究物质世界最普遍、最基本的运动规律的科学。物理学研究的内容包括机械运动、分子热运动、电磁运动、场和微观粒子的运动等基本运动形态。这些运动形态广泛存在于生物学和生命科学的运动形态之中,因此物理学是学习医学基础课和医学专业课的必要的基础,现代物理学的研究方法和技术成就在现代医学和生命科学的研究中得到越来越广泛的应用。

力学是物理学最古老的领域之一,它不但在人体组织结构(例如骨骼和肌肉)中起着重要作用,在体育运动和航空、航天技术中更是不可缺少的研究内容。流体力学研究液体和气体的运动规律,人体血液在循环系统中的运动与流体运动规律有着必然的联系。法国医学家泊肃叶研究了血液在血管中的运动而建立了泊肃叶定律,对血液的运动规律的研究做出了重大贡献。当然,血液是非牛顿流体,血管也不是刚性流管,血液的流动还有其生理的独特性质,还需要进一步的研究和探索。电磁运动是物理学的基本运动形态,人体在正常生理状态下,存在着大量的电学和磁学现象,如心电、肌电、脑电和胃电,心磁、脑磁和肺磁等现象,可以说,人体组织许多部分的生理运动中,都产生着电的或磁的信息。心电图、脑电图、心磁图,肺磁图等技术成就,已经成为医学临床诊断和医学研究的有效手段。几何光学的原理在研究眼的成像系统中获得成功,光学显微镜、电子显微镜和光谱分析技术是医学临床诊断和医学研究的有力助手。X 线、放射性核素一经发现,首先就在医学中得到应用。基于物理学、电子学和计算机技术而创立的超声成像技术、X-CT 技术、磁共振成像技术和核医学成像技术,已经成为医学临床诊断和医学研究的先进技术。放射性核素治疗机和电子加速器等已是治疗肿瘤的常规设备。在已经从分子水平和电子水平研究生命科学和医学的今天,生物物理学、量子生物学、量子遗传学等,为生命科学和医学的研究开辟了光明的前景。

综上所述,物理学和医学有着千丝万缕的联系。医用物理学作为医学院校的必修课程,它将为学生学习医学基础课和医学专业课打下坚实的基础。学生通过医用物理学的学习,不仅能掌握必要的物理学基本知识,而且能培养分析问题和解决问题的能力,培养科学的创新思维的方法,使学生具备高级医学人才所必需的理科素质。

本书是在卫生部颁发的高等医学院校医用物理学教学大纲的基础上,总结我们多年教学改革的经验,吸取国内外有关教材的优点编写的。本教材既重视物理学知识的系统性,又避免了与中学物理不必要的重复,而且编写了较多的医学物理学专题。本书主要用于 5 年制和 7

年制临床医学、儿科、预防、口腔、影像医学、麻醉、卫生、卫管、卫生检验、妇幼保健、药学等专业教学。

本书由熊兴良、陈龙聪担任主编，江奇锋担任副主编，主编统一整理定稿。参加本书编写的还有陈萍、奉娇、高斌、苏爱华、王洪雷等同志。

**编 者**

2014 年 7 月

# 目 录

前言

|     |   |
|-----|---|
| 绪 论 | 1 |
|-----|---|

|               |   |
|---------------|---|
| 第一章 人体力学的基础知识 | 4 |
|---------------|---|

|               |   |               |    |
|---------------|---|---------------|----|
| 第一节 质点力学的基本定律 | 4 | 第三节 弹性力学的基本定律 | 16 |
| 第二节 刚体力学的基本定律 | 8 | 习题一           | 20 |

|                 |    |
|-----------------|----|
| 第二章 机械振动、波动及超声波 | 22 |
|-----------------|----|

|                  |    |                     |    |
|------------------|----|---------------------|----|
| 第一节 简谐振动         | 22 | 第六节 波的干涉            | 45 |
| 第二节 阻尼振动、受迫振动和共振 | 27 | 第七节 声波和超声波          | 50 |
| 第三节 简谐振动的合成      | 29 | 第八节 多普勒效应           | 55 |
| 第四节 简谐波          | 36 | 第九节 超声波成像原理及在医学中的应用 | 57 |
| 第五节 惠更斯原理及其应用    | 43 | 习题二                 | 60 |

|          |    |
|----------|----|
| 第三章 几何光学 | 63 |
|----------|----|

|              |    |             |    |
|--------------|----|-------------|----|
| 第一节 球面折射     | 63 | 第四节 眼睛的光学性质 | 71 |
| 第二节 薄透镜的成像公式 | 66 | 第五节 光学仪器    | 75 |
| 第三节 厚透镜的作图求像 | 69 | 习题三         | 80 |

|               |    |
|---------------|----|
| 第四章 波动光学及医学应用 | 81 |
|---------------|----|

|          |    |             |     |
|----------|----|-------------|-----|
| 第一节 光的干涉 | 81 | 第四节 物质的旋光性  | 99  |
| 第二节 光的衍射 | 88 | 第五节 光的吸收和散射 | 100 |
| 第三节 光的偏振 | 95 | 习题四         | 102 |

|                  |     |
|------------------|-----|
| 第五章 光谱与激光在医学中的应用 | 104 |
|------------------|-----|

|             |     |        |     |
|-------------|-----|--------|-----|
| 第一节 可见光光谱   | 104 | 第三节 激光 | 108 |
| 第二节 红外线和紫外线 | 107 | 习题五    | 116 |

|                 |     |
|-----------------|-----|
| 第六章 原子核物理学及医学应用 | 118 |
|-----------------|-----|

|              |     |              |     |
|--------------|-----|--------------|-----|
| 第一节 原子核的基本性质 | 118 | 第二节 原子核的衰变类型 | 120 |
|--------------|-----|--------------|-----|



|     |            |     |     |              |     |
|-----|------------|-----|-----|--------------|-----|
| 第三节 | 原子核的衰变规律   | 122 | 第五节 | 放射性核素在医学上的应用 | 128 |
| 第四节 | 射线与物质的相互作用 | 126 | 习题六 |              | 131 |

第七章

X 射线成像的物理原理

132

|     |               |     |     |              |     |
|-----|---------------|-----|-----|--------------|-----|
| 第一节 | X 射线的发现及其基本性质 | 132 | 第四节 | X 射线在医学中的应用  | 143 |
| 第二节 | X 射线谱         | 135 | 第五节 | X 射线计算机断层摄影术 | 145 |
| 第三节 | X 射线的衰减       | 138 | 习题七 |              | 154 |

第八章

直流电

155

|     |            |     |     |             |     |
|-----|------------|-----|-----|-------------|-----|
| 第一节 | 稳恒电流       | 155 | 第四节 | 电容器的充电及放电过程 | 163 |
| 第二节 | 电源电动势      | 158 | 第五节 | 电泳和电渗       | 165 |
| 第三节 | 基尔霍夫定律及其应用 | 160 | 习题八 |             | 166 |

第九章

流体的运动

168

|     |            |     |     |           |     |
|-----|------------|-----|-----|-----------|-----|
| 第一节 | 理想流体的运动    | 168 | 第四节 | 黏性流体的流动规律 | 176 |
| 第二节 | 连续性方程      | 170 | 习题九 |           | 182 |
| 第三节 | 理想流体的动力学方程 | 171 |     |           |     |

第十章

液体的表面现象

184

|     |              |     |     |             |     |
|-----|--------------|-----|-----|-------------|-----|
| 第一节 | 表面张力和表面能     | 184 | 第四节 | 表现活性物质与表面吸附 | 188 |
| 第二节 | 曲面下的附加压强     | 185 | 习题十 |             | 189 |
| 第三节 | 液体与固体接触的表面现象 | 186 |     |             |     |

第十一章

核磁共振成像原理及其医学中的应用

190

|     |                         |     |      |                |     |
|-----|-------------------------|-----|------|----------------|-----|
| 第一节 | 磁共振                     | 190 | 第四节  | MRI 成像方法       | 196 |
| 第二节 | 磁共振成像原理                 | 193 | 第五节  | 核磁共振成像的特点及医学应用 | 197 |
| 第三节 | 质子密度 $T_1$ 、 $T_2$ 加权图像 | 195 | 习题十一 |                | 199 |

第十二章

电磁现象及其医学应用

200

|     |            |     |      |               |     |
|-----|------------|-----|------|---------------|-----|
| 第一节 | 磁场和磁感应强度   | 200 | 第四节  | 电磁现象在生物医学中的应用 | 207 |
| 第二节 | 安培环路定理及其应用 | 203 | 习题十二 |               | 208 |
| 第三节 | 带电体在磁场中的受力 | 205 |      |               |     |

# 绪 论

物理学是研究物质运动的普遍性质和基本规律的科学，是探讨物质结构、物质间相互作用及其运动规律的科学。主要包括力学、热学、电学、声学、光学、磁学、原子和原子核物理学等多个分支学科。其基本理论和方法对现代科学(包括生物学和医学)的发展起着十分重要的作用，广泛地揭示自然界的各种基本规律，从而成为了自然科学的理论基础。

医学是一门以人体为研究对象的综合性极强的自然科学。但是，到 20 世纪初期，医学基本上还是一门形态科学，其研究方法主要是定性研究。而物理学则有其严格的定量理论，具有先进的实验方法和技术。

随着物理学原理、方法和技术在基础医学研究、临床医学的诊断和治疗中的逐步应用，促进了医学在认识上、理论上和测试手段上的不断发展和提高。随着物理学与医学这两门学科的不断发展和互相渗透，互相促进，形成了医学物理学。

## 一、物理学的内容和学科特点

### (一) 学科定义

物理学是研究物质运动的普遍性质和基本规律的科学。它的研究对象是整个物质世界，它为人们深刻地认识世界提供了理论基础和实验依据。

### (二) 学科内容

物理学的研究内容包括力学、声学、热学、电磁学、光学、原子和原子核物理学等多个分支学科。如果以其理论完善的先后时间划分，并以 20 世纪为分界线也可分为经典物理学和现代物理学(以量子物理学和相对论为代表)。

物理学家们从空间时间大尺度探索宇宙的结构、起源与演化，其对应的研究领域被称为天体物理学；从空间向小尺度探索物质的组成，其对应的研究领域为粒子物理学，这两个领域是目前物理学理论研究的前沿。在物质世界所涉及最大的空间尺度范围内的最大值是  $10^{26}\text{m}$ (约 150 亿光年)；最小可观测的空间尺度是普朗克长度，大约是  $10^{-35}\text{m}$ ；时空所涉及最大的时间是宇宙年龄，约为  $10^{18}\text{s}$ (约 150 亿年)；可观测的最小时间约为  $10^{-43}\text{s}$ 。物理学按照时空尺度把物质世界分成宇观体系、宏观体系、介观体系、和微观体系。物质世界基本的相互作用为：强相互作用、弱相互作用、电磁相互作用和引力相互作用。

### (三) 学科特点

1. 成熟的定量学科 定量学科要求必须用定量的数值或具体的形象来说明被研究的对象和有关规律。其成熟的标志是具有严谨的理论体系和精巧的实验技术，任一分支只由几个基本规律或概念贯穿其中。

2. 其研究方法是发现其他规律的钥匙 物理学的研究方法：首先根据观测事实、实验或原理提出研究命题；然后，再根据问题进行抽象和简化，建立相应的物理模型；最后，用已知原理与推测做出定性解释，并用数学工具根据现有理论作定量计算和逻辑推理。当实验事实与旧理论不相符时，常常会让物理学家们兴奋不已，同时也激发他们进一步探索未知世界。因为这种不相符的实验结果可能正蕴含着重大的理论突破。如果理论或者假说与实验或观测事实有出入，就需要进行修正，再做实验检验，经过反复多次的实验，从而找出自然界的客观规律。

物理学的分析方法可分为逻辑分析方法和物理学思维两大类：

### (1) 逻辑分析方法(包括分析综合法和归纳演绎法)

1) 分析综合法:分析是把“整体”分解成“部分”;综合是把“部分”结合成“整体”。两者是一种可逆的思维过程,组合成综合分析法。比如,任何一种复杂的振动都可以分解成若干简谐振动,用傅里叶级数展开;反之,任何一种复杂的振动都是由若干简谐振动叠加而成。

2) 归纳演绎法:归纳是从“个别”到“一般”的认识方法;演绎是从“一般”到“个别”的认识方法,即从一个已知的一般原理出发,考察某一特殊对象,从而得出结论。同样,归纳和演绎是科学认识过程中两个既互相独立又互相依存的思维方法。

(2) 物理学思维方法:在物理学的发展过程中,一个个奇迹的创造常常是科学家独特创造性思维的结果。这里仅简介三种常见物理思维方法。

1) 理想模型法:理想模型是为研究复杂的物理过程而建立的、能够抽象反映事物特征和本质的理想系统。在建立理想模型时,需要对复杂事物加以抽象简化,突出研究对象的主要特征。运用理想模型可以清晰地进行理论推理,从而得出相关的物理规律。比如,在研究复杂的流体运动规律时,就使用了理想模型的方法:先建立流体的理想模型——理想流体,得出相关的物理规律伯努利方程;然后从理想流体到牛顿流体,修正模型,得出反映牛顿流体流量规律的泊肃叶定律,逐渐让理想模型与实际的研究目标相吻合。在物理学中,质点、刚体、弹性体、弹簧振子、点电荷、绝对黑体以及各种原子模型等也都是典型的理想模型。

2) 物理类比法:类比方法是利用两种科学之间的相似性,用其中的一个去说明另一个。物理类比可以沟通不同领域的研究方法,也可以启发新的物理思想。比如,通过类比方法,可以让物理规律的线条清晰化:像重力势能、电势能、液体表面能和分子原子能态都有能量越低系统越稳定的规律;电力线、磁力线和不可压缩流体流线都是描述场状态的几何描述等。

3) 物理假说法:假说是依据一定的科学理论和事实对研究中的问题提出假定性看法和说明。物理假说是科学认识发展的必要环节,也是物理学研究的主要方法。比如,普朗克为解释他与实验结果完全吻合的辐射公式,提出了能量量子化假说;爱因斯坦为解释光电效应实验提出了光量子假说等。

综上所述,物理学的研究方法是在学习过程中开启知识宝库的钥匙,是在研究领域从事科学创新的锐利武器。

3. 其理论突破将推动其他学科的发展和改变物质世界 物理学与科学技术的关系可以分为两种基本模式:一是由于生产实践需要而创建了技术。比如,从 18 世纪至 19 世纪的蒸汽机等热机技术和热力学理论;二是先在实验室里揭示其基本规律,建立起完整的理论,再在实际生产中发展成为一种全新的技术。比如,在法拉第发现电磁感应现象以及麦克斯韦建立电磁场方程组的基础上创建了今天的现代电力工程与无线电技术。因为物理学已经成为现代高科技发展的先导和基础,因此,在当今世界上第二种模式更为重要。另外,蒸汽机、电磁、相对论、超导和纳米技术等推动其他学科的发展和改变物质世界。特别是相对论甚至对哲学领域产生了重大的影响。

整个 20 世纪自然科学的发展趋势就是以物理学的巨大变革为基础带动其他领域的科技进步。当今科学技术飞速发展充分证明,科研成果转化为生产力的周期在迅速缩短,知识更新的节奏也在不断加快,而作为知识核心的物理基本理论是长久不衰的。通过物理学的学习来培养学生正确的科学发展观是物理学科的教学特点之一。

## 二、物理学与医学的关系

### (一) 医学的定义

医学是以人为研究对象的生物科学。它研究最高级的运动形式——生命现象。目前医学正在从宏观到微观,从定性到定量,从细胞水平到分子和量子水平,从手工的、机械的、接触型操作向自动化、智能化、非接触型操作发展。

### (二) 相互联系

1. 学科本质 任何一门自然学科都是研究物质的运动规律,仅有简繁之分。物质运动的形态是多种多

样的,他们既服从共同的普遍法则,又遵守各自独特的规律。物理学研究的运动普遍地存在于其他高级的、复杂的物质运动形式之中。比如,人体内的神经电活动包含着复杂的电学过程;一切自然现象都毫无例外地受到能量守恒定律、万有引力定律以及其他物理定律的约束。

## 2. 学科的发展

(1) 定量分析:量子物理学+计算机技术=>生命之谜。

(2) 交叉边缘学科:物理学与医学这两门学科的互相渗透形成了医学物理学;与生物学、医学、工程学的互相渗透又形成了生物物理学和生物医学工程学等。

生命是一种极其复杂的运动形式。即使像细菌这样最简单的生物也具有复杂结构。生命现象的复杂性,不仅要从微观角度看(即从分子水平上阐明机制)还需要从宏观规律上加以说明,特别要对控制、调节、自组织、分化、发育、生长、信息处理以及个体与环境间的关系等问题进行研究。当人们对生命现象的认识达到一定深度的时候,自然而然地会将医学研究与物理学的理论和思想方法结合起来,从而导致生命科学从描述宏观形态到探索微观机制,进入对生命现象本质性的研究阶段。

## 三、不断探索生命与自然奥秘

### (一) 物理学知识是了解生命现象所不可缺少的理论基础

例如,要了解人体骨骼和关节受力情况必须掌握弹性力学和静力学的知识;要了解血液在心血管系统中运动的情况必须知道流体力学的基本定律;要了解眼睛的作用不仅要掌握几何光学的原理,还要掌握波动光学的方法;要了解声音的感觉及超声在医学上的应用,必须学习机械波的物理性质;要了解心电、脑电、肌电等必须具备有关的电学知识等。

### (二) 物理学的方法和技术为临床医学提供了许多新的检测和治疗手段

几乎所有与物理学基本原理有关的现代高新技术都被医学所利用,为医学诊断和科学研究提供了强有力的工具。在物理治疗方面除了传统的光疗、热疗、电疗、声疗、X 放射治疗之外,还有很多新的物理治疗手段和治疗仪器。例如, HIFU 技术、血液透析技术、低温冷冻技术以及高频电刀、超声刀、心脏起搏器、心脏除颤器、医用激光器、X 刀、医用加速器、钴-60 治疗机等。

医学物理学是把物理学的原理和方法应用于人类疾病的预防、诊断、治疗和保健的一门交叉学科。两项开创性研究(1895 年伦琴发现 X 射线并用于人体摄像和 1898 年居里夫人发现放射性元素镭并用于肿瘤的治疗)奠定了医学物理学的基础。作为一个独立学科,它形成于 20 世纪 50 年代,包括放疗物理、影像物理、核医学物理、保健物理、激光和超声物理等子学科。1974 年,国际医学物理组织(IOMP)成立,标志着医学物理学科走向成熟。中国医学物理工作者,于 1981 年成立中国生物工程学会医学物理分会。1986 年,医学物理分会以中国医学物理学会的名义加入 IOMP。

在进入 21 世纪后物理学理论与医学研究的结合可以说是最具生机和活力的结合之一。从全球基因组计划的实施到蛋白质结构的揭秘,从干细胞学说的兴起到脑功能研究的深入,无不以物理学的前沿理论与先进技术为基础和工具,同时也为物理学的发展提供了新的研究课题。物理科学与生命科学的结合将绘制出物质世界中最精彩、最具吸引力的图像。医学物理学的学习将把医学生带进这些五彩缤纷的物理世界中,并给出一定的理论解释,从而激发医学生不断探索生命与自然奥秘的兴趣和热情。

(高 斌)

# 人体力学的基础知识

力学是研究物体机械运动规律及其应用的科学。力学是医学物理学和其他科学技术的基础。本章将重点介绍在变力的作用下，质点动力学的基本规律、刚体转动的基本规律、物体形变和弹性的基本规律。

## 第一节 质点力学的基本定律

### 一、单位和量纲

1. 单位 对于任何一个物理量，为了定量地描述它必须选定一个基本量(fundamental quantity)，这个基本量就是它的物理量单位(unit)。例如，长度用米(m)作单位，质量用千克(kg)作单位，时间用秒(s)作单位。

物理学的单位又分为基本单位和导出单位。基本单位是直接规定的，在国际单位制(SI)中，直接规定长度、质量和时间为力学基本量。米(m)、千克(kg)和秒(s)就是相应的力学基本单位。由基本单位导出的物理量单位统称为导出单位。力学中的其他物理量(如速度、加速度和力等)都为导出量，它们的单位(m/s,  $m/s^2$ ,  $kg \cdot m/s^2$ )就是导出单位。

2. 量纲 表示一个物理量是由哪些基本量所组成的表达式称为该物理量的量纲式。在国际单位制中，用  $L$ 、 $M$  和  $T$  分别表示长度、质量和时间这三个力学基本量的量纲。由此，任何导出量都可以用这三个基本量的某种组合表示出来：

$$[Q] = M^p L^q T^r \quad (1-1)$$

上式称为物理量  $Q$  的量纲式(dimension formula)，其中指数  $p, q, r$  分别称为物理量  $Q$  对质量、长度和时间的量纲指数。例如，速度、加速度、力和角度的量纲式分别为：

$$[v] = [s] / [t] = LT^{-1}$$

$$[a] = [v] / [t] = LT^{-2}$$

$$[F] = [m] [a] = MLT^{-2}$$

$$[\varphi] = [s] / [r] = 1$$

以上表明：速度对长度的量纲为 1，对时间的量纲为-1，对质量的量纲为零。角度的量纲为零。量纲式还可以用于检验等式。

由于在较为复杂的等式中常常包含若干项物理量，因此确定等式是否正确，检验等式中各项的量纲式是必不可少的步骤。例如，在自由落体运动中，落体的末速度为： $v=(2gh)^{1/2}$ 。该等式左边的量纲式为： $LT^{-1}$ ，等式右边的量纲式为： $(L^2 T^{-2})^{1/2} = LT^{-1}$ 。由此可见，该式两端各项的量纲是正确的。

### 二、质点的平面运动

1. 参照系 为了描述某个物体的运动，首先要选定另一个物体(被看成相对静止的物体)或物体系统作为参考标准，如此的物体或物体系统称为参照系(frame of reference)。选择不同的参照系描述同一物体的运



动,其结果是不相同的。参照系的选择要根据所研究对象的特点来确定。通常选用固定在地面的坐标系作为参照系来定量描述物体的运动。

2. 位置矢量和位移 假设一个质点在  $XOY$  平面内沿着曲线  $ABC$  运动(如图 1-1),在  $t=0$  的时刻,质点在  $A$  点,然后依次到达  $B, C$  等各点。从坐标原点  $O$  分别指向  $A, B, C$  各点的矢量  $OA, OB, OC$  等称为各该时刻的位置矢量(position vector)。

从  $A$  到  $B$  画出的矢量  $AB$  称为从  $A$  到  $B$  这一时间间隔内质点的位移(displacement)。一般用  $\Delta S$  表示位移,即  $\Delta S=AB$ 。显然,矢量  $AB$  与  $OA, OB$  的关系为

$$OB=OA+AB, \quad AB=OB-OA \quad (1-2)$$

即位移矢量  $AB$  是位置矢量的增量。

3. 平均速度和瞬时速度 位移  $AB$  与所经历的时间间隔  $\Delta t$  的比值  $AB/\Delta t$  称为该时间间隔内的平均速度。即  $\bar{v} = AB/\Delta t$ 。当时间间隔  $\Delta t$  趋近于零时,  $v$  的极限称为该时刻的瞬时速度,简称速度(velocity)。即

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} AB/\Delta t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta s/\Delta t = \frac{ds}{dt} \quad (1-3)$$

速度是位移对时间的一阶导数。 $v$  是矢量,它的方向与该时刻位移矢量的方向一致。

4. 平均加速度和瞬时加速度 在一段时间间隔  $\Delta t$  之内,速度的增量  $\Delta v$  与  $\Delta t$  的比值,称为该时间间隔内的平均加速度。即  $\bar{a} = \Delta v/\Delta t$ 。当时间间隔  $\Delta t$  趋近于零时,  $a$  的极限称为该时刻的瞬时加速度,简称加速度(acceleration)。即

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta v/\Delta t = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} \quad (1-4)$$

瞬时加速度是位移对时间的二阶导数。瞬时加速度是矢量,它的方向与该时刻速度增量矢量的方向一致。

5. 法向加速度与切向加速度 在质点作曲线运动的情况下,质点的加速度  $a$  可分解为沿轨道切线方向的切向加速度  $a_t$ (tangential acceleration)和沿轨道法线方向的法向加速度  $a_n$ (normal acceleration)。如图 1-2 所示,总加速度  $a$  是  $a_t$  与  $a_n$  的矢量和:

$$a=a_n+a_t \quad a=(a_n^2+a_t^2)^{1/2}=[(v^2/R)^2+(dv/dt)^2]^{1/2} \quad (1-5)$$

6. 匀加速直线运动 假设质点作匀加速直线运动。 $t=0$  时,  $v=v_0$ , 由(1-4)式可得

$$dv=adt \quad (1-6)$$

因为加速度不变,将上式积分得  $\int_{v_0}^v dv = v - v_0 = at$ ,

$$v = v_0 + at. \quad (1-7)$$

即

又因为  $v=ds/dt$ , 即  $ds=vdt$ 。

假设  $t=0$  时,  $s=s_0$ , 将上式积分得

$$\int_{s_0}^s ds = \int_0^t vdt = \int_0^t (v_0 + at)dt$$

即  $s-s_0=v_0t+(1/2)at^2$  或  $s=s_0+v_0t+(1/2)at^2$ ,

如果  $s_0=0$ , 则  $s=v_0t+(1/2)at^2$

上式即为匀加速直线运动的路程公式。

### 三、质点动力学的基本定律

1. 牛顿运动定律 1687 年,牛顿在他的著作《自然哲学的数学原理》中阐述了三条运动定律,后人称

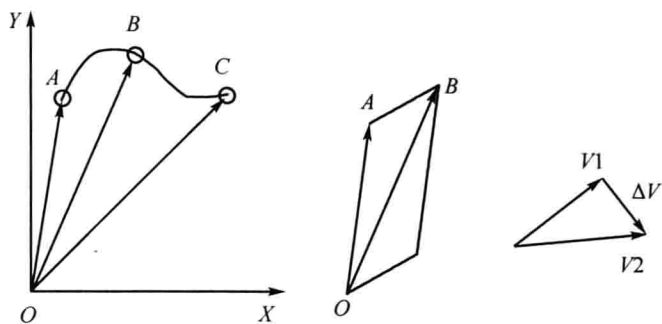


图 1-1 位置矢量和位移

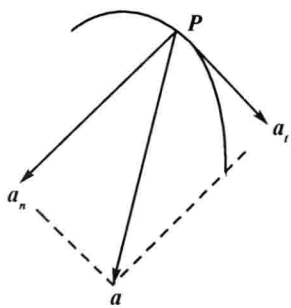


图 1-2 法向加速度与切向加速度

为牛顿运动定律(Newton's Laws of motion)。它不仅适合于质点的运动,也是研究一般物体运动的理论基础。

(1) 牛顿第一定律:任何物体都保持静止状态或匀速直线运动状态,除非有外力作用迫使它改变这种状态。这个定律包含两层意义。首先,物体在没有外力作用的条件下,原来静止的保持静止状态;原来运动的物体将以原有的速度做匀速直线运动。换句话说,不改变其运动状态。这种性质称为物体的惯性(inertia),因而牛顿第一定律也称为惯性定律。其次,要改变物体的运动状态必须有外力(force)的作用。因此,外力作用是改变物体运动状态的条件,而改变运动状态是外力作用的结果。

(2) 牛顿第二定律:物体运动的加速度(acceleration) $a$ 的大小与所受合外力 $F$ 的大小成正比,与物体的质量(mass) $m$ 成反比,加速度的方向与合外力的方向一致。即

$$F=ma \quad (1-9)$$

牛顿第二定律阐明了力、质量和加速度之间的数学关系。注意:力和加速度都是矢量。

(3) 牛顿第三定律:物体之间的作用力是相互的。当物体A以力 $F$ 作用在物体B上时,物体B也必定同时以力 $F'$ 作用在物体A上,而且 $F'$ 与 $F$ 大小相等,方向相反,作用在同一直线上。两力同时存在,同时消失。通常称其中任一力为作用力,另一力为反作用力。作用力与反作用力分别作用在两个物体上,因此不能相互抵消。

## 2. 动能定理 机械能守恒定律

### (1) 功和能

1) 恒力的功:恒力的功等于在作用点位移方向的分力与位移大小的乘积:

$$W = Fs \cos \alpha \quad (1-10)$$

式中, $\alpha$ 是力的方向与位移方向的夹角。力和位移是矢量,而功是标量。式(1-10)为力和位移的标积,可写成:

$$W = \mathbf{F} \cdot \mathbf{s} \quad (1-11)$$

在国际单位制中,功的单位是焦耳(J),其量纲为 $ML^2T^{-2}$ 。

2) 变力的功:假设在变力作用下,物体产生了位移,其变力所做的功由下列积分计算:

$$W = \int_a^b F \cos \alpha ds \quad (1-12)$$

3) 功率:描述力对物体做功快慢程度的物理量称为功率。假设在 $\Delta t$ 时间间隔内,力对物体所做的功为 $\Delta A$ ,则 $\Delta A$ 与 $\Delta t$ 的比值 $\Delta A / \Delta t$ 称为这段时间的平均功率。当 $\Delta t$ 趋于零时,比值 $\Delta A / \Delta t$ 的极限称为 $t$ 时刻的瞬时功率,用 $P$ 表示

$$P = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta A / \Delta t = \frac{dA}{dt}$$

在国际单位制中,功率的单位是瓦特(W),其量纲为 $ML^2T^{-3}$ 。

(2) 动能和动能定理:假设质量为 $m$ 的物体在合外力 $F$ 的作用下,沿曲线从 $a$ 运动到 $b$ 。力 $F$ 的切线分量为 $F \cos \alpha$ ,根据牛顿第二定律

$$F \cos \alpha = ma_t$$

式中: $a_t = dv/dt$ 是切向加速度。又因为 $v = ds/dt$ , $ds = vdt$ ,所以在 $ds$ 位移内,合外力对物体所做的功为

$$dW = F \cos \alpha ds = m (dv/dt) v dt = mvdv$$

用 $v_a$ 和 $v_b$ 分别表示物体在 $a$ 点和 $b$ 点的速度,利用式(1-12)可计算出合外力所做的功为

$$W = \int_a^b F \cos \alpha ds = \int_{v_a}^{v_b} mvdv = (1/2)mv_b^2 - (1/2)mv_a^2 \quad (1-13)$$

式中: $(1/2)mv^2$ 称为物体的动能(kinetic energy)。用 $E_k$ 表示动能,用 $E_{ka}$ 和 $E_{kb}$ 分别表示物体在 $a$ 处和 $b$ 处的动能,则有

$$W = E_{kb} - E_{ka} \quad (1-14)$$

上式表明:合外力对物体所做的功等于物体动能的增量。这一结论称为动能定理。动能是标量,它的单位是焦耳(J)。量纲是 $ML^2T^{-2}$ 。物体的动能越大,则它做功的本领也越大。

### (3) 保守力做功: 势能。

首先讨论重力做功的情况。假设一个质量为  $m$  的质点, 在重力作用下从  $A$  点沿着曲线运动到  $B$  点(图 1-3), 计算重力所做的功。质点在曲线上移动  $dl$  重力所做的功为

$$dW = mg dl \cos \theta$$

质点从  $A$  点到  $B$  点由重力所作的总功为

$$W = \int_A^B dW = \int_A^B mg dl \cos \theta$$

因为,  $dl \cos \theta = -dh$ , 所以

$$W = -\int_A^B mg dh = -mg(h_B - h_A) = mgh_A - mgh_B \quad (1-15)$$

由此可见, 重力所做的功等于势能的减少, 即势能增量的负值。重力做功只决定于起点和终点的位置, 而与所经历的路径无关。这是重力做功的重要特性。把具有这种特性的力称为保守力。

既然重力具有做功的能力, 因此由地球和物体所组成的系统具有重力势能。重力势能为  $E_p = mgh + C$ , 其中  $C$  是  $h=0$ (即参考平面)时的重力势能。

假设  $h=0$  时,  $C=0$ , 则  $E_p = mgh$

(1-16)

式(1-16)还表明: 重力做功使系统的重力势能降低。

### (4) 功能原理: 机械能守恒定律。

现在考虑由  $n$  个质点组成的质点系, 把适用于单个质点的动能定理推广应用到质点系, 作用于各质点的力所做的功分别等于各质点的动能的增量:

$$W_1 = E_{k1} - E_{k10}$$

$$W_2 = E_{k2} - E_{k20}$$

.....

$$W_n = E_{kn} - E_{kn0}$$

式中:  $E_{k1}, E_{k2} \cdots E_{kn}$  分别为各质点的末动能,  $E_{k10}, E_{k20}, \cdots, E_{kn0}$  分别为各质点的初动能。将以上各式求和得

$$\sum_{i=1}^n W_i = \sum_{i=1}^n E_{ki} - \sum_{i=1}^n E_{ki0} \quad (1-17a)$$

系统内各质点所受的力包括外力和内力。无论外力和内力都可分为保守力与非保守力。作用于质点系各力的总功为

$$\sum_{i=1}^n W_i = W^{ex} + W_c^{in} + W_{nc}^{in} = \sum_{i=1}^n E_{ki} - \sum_{i=1}^n E_{ki0} \quad (1-17b)$$

其中, 系统内保守力所做的功等于势能增量的负值, 即  $W_c^{in} = -(\sum_{i=1}^n E_{pi} - \sum_{i=1}^n E_{pi0})$

由此可得,  $W^{ex} + W_{nc}^{in} = (\sum_{i=1}^n E_{ki} + \sum_{i=1}^n E_{pi}) - (\sum_{i=1}^n E_{ki0} + \sum_{i=1}^n E_{pi0})$

式中, 动能和势能统称为机械能。分别以  $E_0$  和  $E$  表示初机械能和末机械能,

即  $E_0 = (\sum_{i=1}^n E_{ki0} + \sum_{i=1}^n E_{pi0})$ ,  $E = (\sum_{i=1}^n E_{ki} + \sum_{i=1}^n E_{pi})$

因此, (1-17b)式可表示为

$$W^{ex} + W_{nc}^{in} = E - E_0 \quad (1-17c)$$

上式表明, 作用于质点系的外力和非保守内力的总功等于质点系的机械能的增量。这一结论称为功能原理。

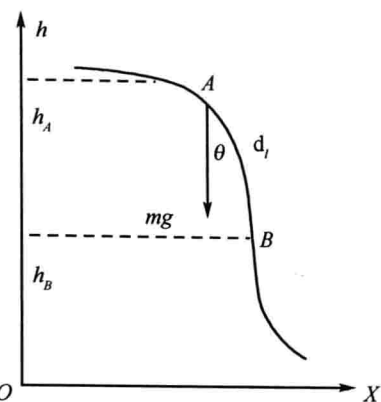


图 1-3 重力作功情况



根据功能原理, 如果  $W^{ex} + W_{nc}^{in} = 0$ , 则由(1-17b)可得  $E = E_0$ ,

即

$$\left(\sum_{i=1}^n E_{ki} + \sum_{i=1}^n E_{pi}\right) = \left(\sum_{i=1}^n E_{ki0} + \sum_{i=1}^n E_{pi0}\right) \quad (1-17d)$$

上式说明: 一个质点系如果外力和非保守内力做功为零, 则只有保守内力做功, 质点系的机械能的总和保持不变。这一结论称为机械能守恒定律。机械能守恒定律是普遍的能量守恒定律在力学中的特殊表达形式。

### 3. 动量定理 动量守恒定律。

#### (1) 动量: 冲量和动量定理。

运动物体的质量与速度的乘积称为该物体的动量(momentum)。用  $P$  表示动量, 则  $P=mv$ 。动量是矢量, 其方向与速度方向一致, 在国际单位制中, 动量的单位是千克·米/秒(kg·m/s), 量纲是  $MLT^{-1}$ 。

根据牛顿第二运动定律可得  $F = ma = m \frac{dv}{dt} = \frac{dmv}{dt} = \frac{dP}{dt}$ , 或  $Fdt = dP$

由此可得

$$\int_{t_1}^{t_2} Fdt = \int_{P_1}^{P_2} dP = P_2 - P_1 = mv_2 - mv_1 \quad (1-18)$$

上式等号左端是力对一段时间的积累, 称为力在该时间间隔内的冲量; 等号右端是该物体的动量的增量。上式表明, 运动物体所受合外力的冲量等于该物体动量的增量。这一结论称为动量定理。在实际计算中应注意到力和动量都是矢量。可分别把力和动量分解在直角坐标系的  $x, y, z$  坐标轴上, 合外力在各坐标轴上的分量的冲量等于该物体在相应坐标轴上的动量的增量。动量定理在解决碰撞打击一类问题时十分有用。

(2) 动量守恒定理: 动量定理可以应用于物体系中各物体所受的力, 包括外力和内力。当物体系不受外力或所受合外力为零时, 物体系内各物体只有相互作用的内力。

对每个物体应用动量定理

$$\int_{t_1}^{t_2} F_{i内} dt = m_i v_{i2} - m_i v_{i1}$$

对整个物体系求和得

$$\int_{t_1}^{t_2} \sum_{i=1}^n F_{i内} dt = \sum_{i=1}^n m_i v_{i2} - \sum_{i=1}^n m_i v_{i1}$$

根据牛顿第三定律, 物体系中各物体间相互作用的内力都是成队出现, 大小相等, 方向相反, 因此系统内所有内力冲量的矢量和为零。由此可得

$$\sum m_i v_{i2} = \sum m_i v_{i1} \quad (1-19a)$$

或写成

$$\sum P = \text{恒矢量} \quad (1-19b)$$

上式表明, 如果系统不受外力或所受合外力为零, 则系统的总动量保持恒定不变。这一结论称为动量守恒定律(law of conservation of momentum)。

## 第二节 刚体力学的基本定律

在外力作用下, 形状和大小都不变化的物体称为刚体。实际物体在外力作用下, 或多或少都会发生变化, 因而刚体是一种理想模型。当研究的重点是物体的转动属性时, 其形状和大小的变化可以忽略不计, 在这种情况下物体可以视为刚体。

刚体的主要运动形态是平动和转动。如果在任何给定的时间间隔内, 刚体上每一个质点都有相同的位移、速度和加速度, 这种运动称为刚体的平动。刚体转动时, 刚体上每一个质点都绕着同一轴线作圆周运动。例如, 房门的打开和关闭就可视为转动的最简单例子。一般刚体的运动中既有平动又有转动, 是平动和转动的叠加。本节只讨论刚体的定轴转动。