

中国高等教育学会医学教育专业委员会规划教材

全国高等医学院校教材

供基础、临床、预防、口腔医学类专业用

医用物理学

(第4版)

主编 喀蔚波

*Physics for
Medical Students*



北京大学医学出版社

中国高等教育学会医学教育专业委员会规划教材
全国高等医学院校教材

供基础、临床、预防、口腔医学类专业用

医用物理学

Physics for Medical Students

(第4版)

主 编 喀蔚波

副主编 张淑丽 孙大公

编 者 (按姓名汉语拼音排序)

邓德宁 (北京大学医学部)

喀蔚波 (北京大学医学部)

李 辉 (北京大学医学部)

孙大公 (北京大学医学部)

万永刚 (齐齐哈尔医学院)

薛俭雷 (齐齐哈尔医学院)

苑桂红 (北京大学医学部)

张淑丽 (齐齐哈尔医学院)

北京大学医学出版社

YIYONG WULIXUE

图书在版编目 (CIP) 数据

医用物理学 / 喀蔚波主编 . — 4 版 . — 北京 :
北京大学医学出版社 , 2013.12
ISBN 978-7-5659-0713-5

I . ①医… II . ①喀… III . ①医用物理学 — 医学院校
— 教材 IV . ① R312

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 276330 号

医用物理学 (第 4 版)

主 编 : 喀蔚波

出版发行 : 北京大学医学出版社 (电话 : 010-82802230)

地 址 : (100191) 北京市海淀区学院路 38 号 北京大学医学部院内

网 址 : <http://www.pumpress.com.cn>

E-mail : booksale@bjmu.edu.cn

印 刷 : 北京朝阳新艺印刷有限公司

经 销 : 新华书店

责任编辑 : 张其鹏 责任校对 : 金彤文 责任印制 : 苗 旺

开 本 : 850mm × 1168mm 1/16 印张 : 15.5 字数 : 445 千字

版 次 : 2013 年 12 月第 4 版 2013 年 12 月第 1 次印刷

书 号 : ISBN 978-7-5659-0713-5

定 价 : 28.00 元

版权所有 , 违者必究

(凡属质量问题请与本社发行部联系退换)

全国高等医学院校临床专业本科教材评审委员会

主任委员 王德炳 柯 杨

副主任委员 吕兆丰 程伯基

秘 书 长 陆银道 王凤廷

委 员 (按姓名汉语拼音排序)

白咸勇 曹德品 陈育民 崔慧先 董 志

郭志坤 韩 松 黄爱民 井西学 黎孟枫

刘传勇 刘志跃 宋焱峰 宋印利 宋远航

孙 莉 唐世英 王 宪 王维民 温小军

文民刚 线福华 袁聚祥 曾晓荣 张 宁

张建中 张金钟 张培功 张向阳 张晓杰

周增桓

序

北京大学医学出版社组织编写的全国高等医学院校临床医学专业本科教材（第2套）于2008年出版，共32种，获得了广大医学院校师生的欢迎，并被评为教育部“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。这是在教育部教育改革、提倡教材多元化的精神指导下，我国高等医学教材建设的一个重要成果。为配合《国家中长期教育改革和发展纲要（2010—2020年）》，培养符合时代要求的医学专业人才，并配合教育部“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材建设，北京大学医学出版社于2013年正式启动全国高等医学院校临床医学专业（本科）第3套教材的修订及编写工作。本套教材近六十种，其中新启动教材二十余种。

本套教材的编写以“符合人才培养需求，体现教育改革成果，确保教材质量，形式新颖创新”为指导思想，配合教育部、国家卫生和计划生育委员会在医药卫生体制改革意见中指出的，要逐步建立“5 + 3”（五年医学院校本科教育加三年住院医师规范化培训）为主体的临床医学人才培养体系。我们广泛收集了对上版教材的反馈意见。同时，在教材编写过程中，我们将与更多的院校合作，尤其是新启动的二十余种教材，吸收了更多富有一线教学经验的老师参加编写，为本套教材注入了新鲜的活力。

新版教材在继承和发扬原教材结构优点的基础上，修改不足之处，从而更加层次分明、逻辑性强、结构严谨、文字简洁流畅。除了内容新颖、严谨以外，在版式、印刷和装帧方面，我们做了一些新的尝试，力求做到既有启发性又引起学生的兴趣，使本套教材的内容和形式再次跃上一个新的台阶。为此，我们还建立了数字化平台，在这个平台上，为适应我国数字化教学、为教材立体化建设作出尝试。

在编写第3套教材时，一些曾担任第2套教材的主编由于年事已高，此次不再担任主编，但他们对改版工作提出了很多宝贵的意见。前两套教材的作者为本套教材的日臻完善打下了坚实的基础。对他们所作出的贡献，我们表示衷心的感谢。

尽管本套教材的编者都是多年工作在教学第一线的教师，但基于现有的水平，书中难免存在不当之处，欢迎广大师生和读者批评指正。

王德炳 柯杨

2013年11月

第4版前言

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用的自然科学。它的基本理论已经渗透到自然科学的各个领域,并应用于生产技术的许多部门,是其他自然科学和工程技术的基础。同时,在人类追求真理、探索未知世界的过程中,物理学展现的一系列科学的世界观和方法论,深刻地影响着人类对物质世界的基本认识、人类的思维方式和社会生活,是人类文明发展的基石,在人才的科学素质培养中具有十分重要的地位。作为公共基础课程,医药学专业学生学习物理学不仅可以掌握物理学的基本概念、原理和方法,获得对自然界的基本认识,提高分析问题、解决问题的能力,而且在物理学课程学习中得到的训练对于自身科学素质的养成、研究能力的提高和科学世界观的形成也是其他课程无法替代的。正因为如此,医药学专业学生在物理学课程上的学习成果将支撑他们今后的学习、研究和工作。

当然,物理学涉及的物理现象丰富,理论体系庞大,研究方法灵活多样,并且与大量的实验现象紧密结合。这又使很多非物理专业(特别是医药学专业)的学生感到物理学课程难度大、掌握困难。要学好物理学就需要了解物理学课程的特点,应将物理学的基本概念、基本原理和基本方法作为学习的重点。学习、体会物理学对于不同研究对象、不同运动形式所使用的研究手段和研究方法,寻找它们之间的联系和区别,思考这些研究手段和方法可以解决哪些实际问题。对于重要的公式要清楚各个参量的物理意义,了解公式推导或证明的思路和过程,明确适用条件和范围。其实,并不是所有公式都要死记硬背,知道公式的由来后,只需记牢少数几个最基本的公式,其他公式都可以推导出来。应摒弃中学应试的学习方法,对待习题的态度不应只关注结果,更要注重解题过程,把习题答案背下来应付考试一定事与愿违。本书设置习题的目的是为了帮助学生巩固知识、查找问题,解题时分析、思考解决问题的思路和方法才是最重要的。得到习题解答后应养成对结果进行讨论、反思的习惯,并能举一反三。总之,在掌握了正确的学习方法后,读者将会体会到物理学简洁明快、均衡对称、和谐统一的科学美感。

本书(第4版)是在《物理学(第3版)》基础上修改、补充而成。除改正了第3版中发现的错误,并使文字更加准确、流畅,易于理解之外,与第3版相比主要改动如下:①删除了狭义相对论部分;②将第3版的第四章与第三章合并;③增加了几何光学一章;④量子物理基础及原子物理学基础两章做了较大的删改;⑤对原子物理学基础及X射线两章中的医学应用部分做了更新;⑥增加了习题答案、主要参考书目及名词索引等内容。这次改版更多考虑了读者的需求,如在每章章首增加了“本章导读”,简要介绍本章主要内容及相互关系,每章后增加了“本章重点”,对本章的重点内容及要求进行总结。我们希望通过“本章导读”和“本章重点”能帮助读者

更好地理解、掌握书中内容，特别是明确了对知识点的要求程度，使读者复习时更有针对性。又如增加习题答案便于读者自查，增加名词索引便于读者检索。在我们精心挑选的参考书目中不仅列出了我们编写时参考的文献，也列出了可供读者查阅及进一步学习时参考的文献。其中既有内容丰富严谨，由国内名校名师编写的大学物理学教材，也有通俗易懂，适合医药学专业学生阅读的国外优秀教材，还有国内用于医药学专业的物理类教材。由于篇幅限制，本书中一些结论没有给出推导和证明，读者都可以通过这些参考文献得到解答。读者不仅可以从参考文献中看到对各个知识点的不同解读，还可以通过这些参考文献了解物理学在包括生命科学在内的各领域中的应用。

本书主要由北京大学医学部及齐齐哈尔医学院的教师编写。在此感谢《物理学(第3版)》的主编及全体编委打下的良好基础，感谢北京大学医学出版社给予的大力支持，特别感谢责任编辑的辛勤工作。也希望读者能对书中的错误提出批评指正，以使我们改进，提高本书的质量，更好地为读者服务。

喀蔚波

2013年11月

目 录

第一章 力学基本定律..... 1	第六章 热力学基本定律 81
第一节 质点动力学的基本定律..... 1	第一节 热力学的一些基本概念 81
第二节 刚体的定轴转动..... 6	第二节 热力学第一定律 83
第三节 角动量守恒定律 14	第三节 热力学第一定律的应用 84
第四节 进 动 16	第四节 热力学第二定律 88
[附录] 矢量的标积和矢积 17	习 题 90
习 题 19	第七章 静电场 92
第二章 流体的运动 21	第一节 电场与电场强度 92
第一节 理想流体与定常流动 21	第二节 高斯定理 95
第二节 伯努利方程 23	第三节 静电场力的功与电势 98
第三节 黏性流体的流动 26	第四节 电偶极子的电场..... 103
第四节 血液循环与血液黏度 30	第五节 静电场中的电介质..... 107
习 题 32	第六节 静电场的能量..... 110
第三章 振动和波动 34	习 题 113
第一节 简谐振动 34	第八章 直流电..... 116
第二节 简谐振动的合成 38	第一节 欧姆定律的微分形式..... 116
第三节 阻尼振动、受迫振动与共振 ... 42	第二节 电源电动势..... 119
第四节 平面简谐波 43	第三节 基尔霍夫定律及其应用..... 120
第五节 波的衍射和干涉 48	第四节 电容器的充电和放电..... 122
第六节 声 波 52	习 题 124
第七节 多普勒效应 56	第九章 电磁现象..... 126
第八节 超声波 57	第一节 磁 场..... 126
习 题 59	第二节 磁场对运动电荷的作用力..... 132
第四章 气体分子动理论 61	第三节 磁场对载流导线的作用..... 135
第一节 理想气体物态方程 61	第四节 物质的磁性..... 138
第二节 理想气体的压强和温度 62	第五节 电磁感应..... 139
第三节 能量按自由度均分定理 65	第六节 电磁振荡和电磁波..... 143
第四节 气体分子速率和能量的统计分布 规律 67	习 题 147
第五节 气体分子的碰撞 69	第十章 波动光学..... 149
第六节 气体内的输运现象 70	第一节 光的干涉..... 149
习 题 71	第二节 光的衍射..... 154
第五章 液体的表面现象 73	第三节 光的偏振..... 160
第一节 液体的表面张力和表面能 73	第四节 双折射现象 165
第二节 弯曲液面的附加压强 75	第五节 旋光现象..... 168
第三节 毛细现象 76	第六节 光的吸收和散射..... 169
习 题 80	习 题 171
	第十一章 几何光学..... 173

第一节	球面折射	173	第三节	原子核的基本性质	210
第二节	透 镜	176	第四节	核衰变及规律	211
第三节	眼 睛	180	习 题		214
第四节	几种医用光学仪器	185	第十四章	X 射线	215
习 题		188	第一节	X 射线的产生	215
第十二章	量子物理基础	189	第二节	X 射线的基本性质	217
第一节	热辐射	189	第三节	X 射线衍射和 X 射线谱	217
第二节	光的量子性	192	第四节	物质对 X 射线的吸收规律	220
第三节	微观粒子的波动性	194	第五节	X 射线的医学应用	221
第四节	不确定关系	195	第六节	X - CT	223
第五节	薛定谔方程及其应用	197	习 题		226
习 题		201	习题答案		227
第十三章	原子物理学基础	203	附 录		232
第一节	光 谱	203	主要参考书目		235
第二节	激 光	205	名词索引		236

第一章 力学基本定律

本章导读

力学 (mechanics) 是研究物体的机械运动规律及其应用的科学, 机械运动是物体之间或物体内部各部分之间相对位置发生变化的运动。虽然物质世界存在多种多样的运动形态, 但其中的机械运动既是最基本、最直观的运动形式, 也是研究复杂运动的基础。本章将以中学物理讨论过的质点在恒力作用下的运动规律为基础, 介绍在变力作用下质点力学的基本概念及规律, 进一步讨论特殊的质点系——刚体在定轴转动中的一些基本规律。

第一节 质点动力学的基本定律

动力学研究的是物体的运动和物体间相互作用的联系及规律。当物体的大小和形状在运动中所起的作用可以忽略不计时, 为使问题简化可以把它抽象成一个只有质量而没有大小和形状的点, 称为质点 (mass point)。质点动力学的基本规律是牛顿 (I. Newton) 运动定律。

一、牛顿运动定律

(一) 牛顿第一定律

任何物体都保持静止或匀速直线运动状态, 直到其他物体的作用迫使它改变这种状态为止。

牛顿第一定律表明: 如果没有其他物体的作用, 则所研究的物体将保持其静止或匀速直线运动状态, 这种性质称为物体的惯性 (inertia), 所以牛顿第一定律也叫惯性定律 (inertial law); 牛顿第一定律还表明: 要改变物体的运动状态, 即使物体产生加速度, 一定要有其他物体对它作用, 这种作用就是力 (force), 也就是说力是物体获得加速度的原因。

(二) 牛顿第二定律

物体受到外力作用时, 所获得的加速度的大小与合外力的大小成正比, 与物体的质量成反比; 加速度的方向与合外力的方向相同。

牛顿第二定律确定了物体的加速度 a 和它所受的力 F 以及它的质量 m 之间的联系, 在国际单位制中, 牛顿第二定律的数学表达式为

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

该定律表明: 任何两个物体在同样大小的合外力作用下, 质量大的物体获得的加速度较小, 而质量小的物体获得的加速度较大, 即质量是改变物体运动状态难易程度的物理量, 是物体惯性的量度, 所以在这一意义下的质量称为惯性质量 (inertial mass)。

(三) 牛顿第三定律

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; F 和 F' 在同一直线上, 大小相等, 方向相反。其数学表达式为

$$F=-F' \quad (1-2)$$

这两个力分别作用在不同的物体上, 其中一个力称为作用力, 另一个力称为反作用力, 它们是相同性质的力。力学中常见的力有三种: 万有引力、弹力和摩擦力。

实验表明, 牛顿运动定律不是对任何参照系都成立的, 例如, 一列车 A 静止停放在站台上, 车对地静止, 加速度为零, 因为该列车受的合外力为零, 牛顿运动定律对地面参照系成立。当另一列车 B 加速驶过时, 在列车 B 上的观察者看来, 列车 A 向相反方向做加速运动, 但其受力情况并未改变, 合外力为零。因此对加速运动的列车 B 参照系, 牛顿运动定律不成立。凡是牛顿定律成立的参照系, 称为**惯性参照系**, 简称**惯性系** (inertial system), 牛顿运动定律不成立的参照系, 称为**非惯性参照系**, 简称**非惯性系** (non-inertial system)。相对于惯性系做匀速直线运动的参照系都是惯性系。实际中根据实验观察来判断一个参照系是否为惯性系。太阳参照系——以太阳中心为坐标原点, 坐标轴指向固定方向的参照系是惯性系。地心参照系近似为惯性系, 研究地面物体的运动时, 常以地面为参照系, 该参照系也近似为惯性系。

二、动能定理、功能原理与机械能守恒定律

质点在力的作用下会发生运动状态、空间位置、运动形式等方面的改变, 同时当力对质点做功时, 质点的能量也要发生变化。功和能量的概念是解决动力学问题的另一途径。

(一) 力的功

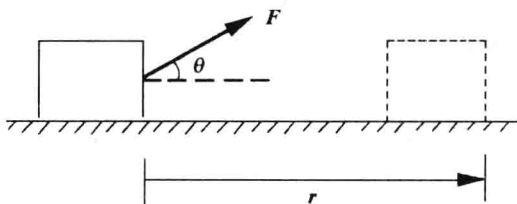


图 1-1 恒力的功

1. 恒力的功 设物体 (可视为质点) 在恒力 F 的作用下, 沿直线运动, 位移为 r , 力 F 的方向和质点运动方向的夹角为 θ , 如图 1-1 所示。则力在位移方向的分量与该位移大小的乘积, 就是力 F 对质点所做的功 (work), 用 A 表示, 即

$$A = (F \cos \theta) r \quad (1-3)$$

功是标量 (见附录), 只有大小, 没有方向。在功的表达式中, 力和位移都是矢量, 按照矢量标积

的定义, 式 (1-3) 可写成

$$A = \mathbf{F} \cdot \mathbf{r} \quad (1-4)$$

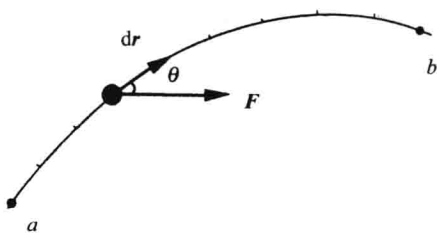


图 1-2 变力的功

2. 变力的功 质点在变力作用下沿任意曲线由 a 点运动到 b 点的过程中, 研究变力对质点做功的情况。如图 1-2 所示, 将路径 ab 分成许多小段, 当每一个小段分得足够小时, 小段弧可看作直线, 弧长等于弦长, 且在每一个小段上作用于质点上的力可看作恒力。任取一小段, 位移为 $d\mathbf{r}$, 相应的作用力为 $\mathbf{F}$, 则在这小段上的力 $\mathbf{F}$ 对质点作的元功 dA 为

$$dA = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = F \cos \theta dr \quad (1-5)$$

式中 θ 为 $\mathbf{F}$ 与 $d\mathbf{r}$ 的夹角。将整个路径的所有元功加起来, 就得到沿整个路径力对质点做的功。当 $d\mathbf{r}$ 取无限小时, 得到

$$A = \int_a^b \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = \int_a^b F \cos \theta dr \quad (1-6)$$

此式为功的一般定义式。可以看出, 功是力对空间的积累效应。根据 F 与 θ 随路程 r 变化的函数关系, 可由上式用积分法求出功的量值。

在国际单位制中, 功的单位是焦耳 (J)。

3. 功率 功率是描述力对质点做功快慢的物理量。设在 Δt 时间内完成的功为 ΔA , 则这段时间的平均功率为

$$\bar{P} = \frac{\Delta A}{\Delta t}$$

当 Δt 趋于零时, 得到 t 时刻的**瞬时功率** (简称**功率**, power)

$$P = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{dA}{dt} \quad (1-7)$$

由式 (1-5) 得

$$P = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v} = F \cos \theta v \quad (1-8)$$

由此可见功率等于力在速度方向的分量和速度大小的乘积。

在国际单位制中, 功率的单位是瓦特 (W)。

(二) 动能和动能定理

如图 1-3 所示, 设质点在变力 $\mathbf{F}$ 作用下, 沿任意曲线从 a 点运动到 b 点, 将牛顿第二定律代入功的定义式 (1-6), 得到在此过程中合外力所做的功

$$A = \int_a^b \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = \int_a^b F \cos \theta dr = m \int_a^b a_t dr$$

其中 a_t 为质点的切向加速度, 由于

$$a_t = \frac{dv}{dt}, \quad dr = v dt$$

于是得

$$A = m \int_a^b \frac{dv}{dt} v dt = m \int_a^b v dv = \frac{1}{2} m v_b^2 - \frac{1}{2} m v_a^2 \quad (1-9)$$

v_a 和 v_b 分别表示质点在 a 点和 b 点时的速率。式 (1-9) 说明力做功的结果改变了物体的运动状态。定义物体的质量与其运动速率平方乘积的 $1/2$ 为物体的**动能** (kinetic energy), 用 E_k 表示, 即

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \quad (1-10)$$

式 (1-9) 可以写为

$$A = E_{kb} - E_{ka} \quad (1-11)$$

式中 E_{ka} 和 E_{kb} 分别表示质点在 a 点和 b 点的动能。该式表明合外力对质点做的功等于质点动能的增量。这一结论称为**动能定理** (kinetic energy theorem)。

应用动能定理时, 仅由始末状态的动能就可得到在此过程中力对物体做的功, 而不涉及运动过程, 因此在解决某些力学问题时, 应用动能定理要比应用牛顿第二定律更简便。

动能是物体运动状态的单值函数, 当运动速度发生变化时, 动能随之而变。动能是标量, 在国际单位制中, 动能的单位与功相同。

(三) 保守力与势能

1. 重力的功 如图 1-4 所示, 一质量为 m 的质点在重力作用下沿任一曲线 acb 由 a 点运动到 b 点的过程中, 重力所做的功为

$$A = \int_{acb} mg \cos \theta dr = \int_a^b -mg dh$$

积分得

$$A = -mg(h_b - h_a) = mgh_a - mgh_b \quad (1-12)$$

h_a 和 h_b 分别为 a 点和 b 点相对于参考平面的高度。

若质点沿另一路径 adb 由 a 点运动到 b 点, 重力的功仍为这一结果。由此可见, 重力的功只与受力物体的始末位置有关, 与物体所经历的路径无关。

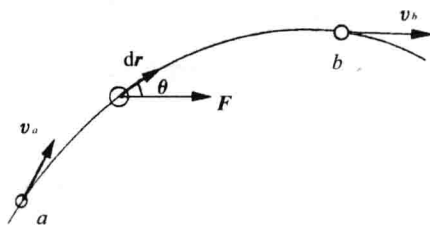


图 1-3 动能定理

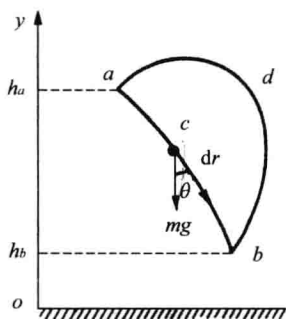


图 1-4 重力的功

当质点沿闭合路径 $acbda$ 运动一周时, 重力所做的功为

$$A = \oint -mgdh = \int_{acb} -mgdh + \int_{bda} -mgdh = 0 \quad (1-13)$$

即质点沿闭合路径运动一周, 重力所做的功为零。

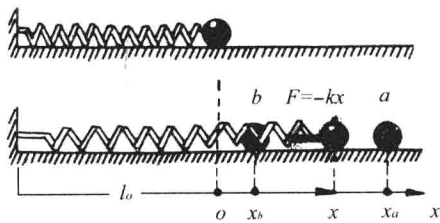


图 1-5 弹性力的功

2. 弹性力的功 以弹簧的弹性力为例说明。如图 1-5 所示, 将一轻弹簧的一端固定, 另一端连接一物体 (可视作质点), 置于光滑水平桌面上。O 点是弹簧既没有压缩也没有拉伸时质点的位置, 称为平衡位置 (equilibrium position)。当质点离开平衡位置、弹簧伸长 x 时, 根据胡克定律, 在弹性限度内, 弹簧的弹性力为

$$F = -kx \quad (1-14)$$

比例系数 k 称为弹簧的劲度系数 (coefficient of stiff-

ness), 简称劲度。

质点由图中 a 点运动到 b 点的过程中, 力与位移始终同向, 故式 (1-6) 中的 $\cos\theta = 1$, 于是弹性力对物体所做的功为

$$A = \int_{x_a}^{x_b} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{x} = \int_{x_a}^{x_b} -kx dx = \frac{1}{2}kx_a^2 - \frac{1}{2}kx_b^2 \quad (1-15)$$

由此可见, 弹性力的功也是仅由物体的始末位置决定, 而与路径无关。也就是说, 若物体由 a 点出发, 弹簧在弹性限度内无论经过怎样的伸长和压缩, 物体再到达 b 点, 弹性力的功仍为上述结果。若物体回到 a 点, 则弹性力的功为零。

综上所述, 重力和弹性力具有共同的特点: 它们的功都与运动物体所经历的路径无关, 仅由运动物体的起点和终点的位置决定。或者说, 沿闭合路径它们对物体所做的功为零。

如果沿任意闭合路径运动一周, 力对物体所做的功为零, 这种力称为保守力 (conservative force), 否则称为非保守力 (non-conservative force)。非保守力做功与路径有关。除重力和弹性力外, 万有引力、静电力、分子力等也是保守力; 摩擦力是非保守力。

由式 (1-12) 和 (1-15) 可以看出, 物体的始末位置不同, 保守力做功不同; 始末位置一定, 保守力做功就是定值, 这个定值完全取决于物体的位置。因此, 可以引入一个作为位置函数的物理量, 称为势能 (potential energy), 用 E_p 表示。不同的保守力有不同类型的势能。与重力相应的势能称为重力势能 (potential energy of gravity); 与弹性力相应的势能称为弹性势能 (elastic potential energy)。

在多个质点组成的质点系中, 保守力是质点系内各质点之间的相互作用力, 且势能由质点的相对位置决定, 因此, 势能是质点系所共有的, 而不应该把它看做是某个质点独有的。重力势能属于质点和地球组成的重力系统, 若以地面为重力势能的零点, 当质量为 m 的质点距地面的高度为 h 时, 重力势能定义为

$$E_p = mgh \quad (1-16)$$

弹性势能属于质点与弹簧组成的弹性系统, 若选取弹簧无形变时为弹性势能零点, 则弹簧形变量为 x 时, 弹性势能定义为

$$E_p = \frac{1}{2}kx^2 \quad (1-17)$$

系统的势能是状态的单值函数, 它的量值随状态的变化而改变。势能是标量, 其单位与动能的单位相同。

引入势能之后, 式 (1-12) 和 (1-15) 可写成

$$A = E_{pa} - E_{pb} = - (E_{pb} - E_{pa}) \quad (1-18)$$

由此可见, 保守力对物体做的功等于相应的势能增量的负值, 这就是保守力做功与势能的

关系。

(四) 功能原理与机械能守恒定律

如上所述, 势能是质点系共有的, 而动能定理是对系统中单个质点而言的, 现在将动能定理推广到质点系。

将动能定理用于质点系中所有质点, 每个质点都可以得到如式 (1-11) 形式的动能定理, 然后将所有等式左右两端分别求和, 得到

$$\sum A = \sum E_{kb} - \sum E_{ka} \quad (1-19)$$

$\sum A$ 表示作用在质点系内所有质点上的力所做功的总和, $\sum E_{ka}$ 和 $\sum E_{kb}$ 分别表示质点系内所有质点在始态和末态时动能的总和。

质点系内的质点所受到的力可以分为两类, 一类是系统外物体对系统内质点的作用力, 称为外力 (external force), 也就是系统的外力; 另一类是系统内质点之间的相互作用力, 称为内力 (internal force)。内力又可分为保守内力和非保守内力。这样式 (1-19) 可写成

$$\sum A_{\text{外}} + \sum A_{\text{保内}} + \sum A_{\text{非保内}} = \sum E_{kb} - \sum E_{ka}$$

又因保守内力做功等于势能增量的负值, 即

$$\sum A_{\text{保内}} = -(\sum E_{pb} - \sum E_{pa})$$

代入上式得

$$\sum A_{\text{外}} + \sum A_{\text{非保内}} = (\sum E_{kb} - \sum E_{ka}) + (\sum E_{pb} - \sum E_{pa}) = \sum E_b - \sum E_a \quad (1-20)$$

式中

$$\sum E = \sum E_k + \sum E_p \quad (1-21)$$

称为系统的机械能 (mechanical energy)。式 (1-20) 表明: 系统外力的功和非保守内力的功的代数和等于系统机械能的增量, 这一结论称为系统的功能原理 (principle of transformation between work and energy)。

根据功能原理, 当

$$\sum A_{\text{外}} + \sum A_{\text{非保内}} = 0$$

时, 得到

$$\sum E_{kb} + \sum E_{pb} = \sum E_{ka} + \sum E_{pa} \quad (1-22)$$

该式说明, 如果一个系统只有保守内力做功, 而其他内力和一切外力都不做功或它们做功的总和为零, 那么系统内各质点的动能和各种势能之间可以互相转换, 但系统的机械能保持不变。这一结论称为机械能守恒定律 (law of conservation of mechanical energy)。

三、动量定理与动量守恒定律

牛顿第二定律表示了力和受力物体产生的加速度间的瞬时关系。事实上, 力对物体的作用总要保持一定的时间, 力的时间累积效应规律由动量定理给出。

1. 动量 物体的质量 m 和速度 v 的乘积, 称为该物体的动量 (momentum), 用 P 表示, 即

$$P = m v \quad (1-23)$$

动量是矢量, 在国际单位制中, 动量的单位是千克·米·秒⁻¹ ($\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

牛顿第二定律用动量表示的形式为

$$F = \frac{dP}{dt} = \frac{d(mv)}{dt} \quad (1-24)$$

该形式具有更普遍的意义。

2. 冲量 动量定理 设质量为 m 的质点, 在变力 F 的作用下, 由时刻 t_1 运动到 t_2 过程中, 相应地速度由 v_1 变为 v_2 。在极短的时间间隔 dt 内, F 可看作是恒力, 由式 (1-24) 可得

$$\mathbf{F}dt = d\mathbf{P}$$

将上式积分得

$$\int_{t_1}^{t_2} \mathbf{F}dt = \int_{P_1}^{P_2} d\mathbf{P} = \mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1 \quad (1-25)$$

上式左侧积分表示力在一段时间 $(t_2 - t_1)$ 内的累积, 称为力在该时间内的冲量 (impulse)。用 $\mathbf{I}$ 表示, 则

$$\mathbf{I} = \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{F}dt \quad (1-26)$$

冲量是矢量, 在国际单位制中, 冲量的单位是牛顿·秒 ($\text{N} \cdot \text{s}$)。由此式 (1-25) 可表示为

$$\mathbf{I} = \mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1 = m\mathbf{v}_2 - m\mathbf{v}_1 \quad (1-27)$$

上式表示, 质点在运动过程中所受合外力的冲量等于该质点动量的增量。这一结论称为动量定理 (momentum theorem)。该定理说明了力对时间的累积效应引起物体动量的增量。

式 (1-27) 是动量定理的矢量式, 计算时常把式中的力和动量分解在直角坐标系的三个坐标轴上, 合外力在各轴上分量的冲量等于质点在相应轴上动量的增量。

3. 动量守恒定律 动量定理说明了一个质点在所受合外力作用下动量要发生变化。对于几个质点组成的质点系, 其中各质点所受的力包括内力和外力。当质点系不受外力或所受合外力为零时, 质点系内各质点只有相互作用的内力, 对每个质点应用动量定理

$$\int_{t_1}^{t_2} \mathbf{F}_{i\text{内}} dt = \mathbf{P}_{i2} - \mathbf{P}_{i1}$$

对于整个质点系的所有质点, 将上式两边求和, 得到

$$\int_{t_1}^{t_2} \sum \mathbf{F}_{i\text{内}} dt = \sum \mathbf{P}_{i2} - \sum \mathbf{P}_{i1}$$

根据牛顿第三定律, 质点系中各质点间相互作用的内力都是成对出现, 大小相等, 方向相反。因此系统内力的矢量和为零, 即

$$\sum \mathbf{F}_{i\text{内}} dt = 0$$

因此得到

$$\sum \mathbf{P}_{i2} = \sum \mathbf{P}_{i1} \quad (1-28)$$

即

$$\sum \mathbf{P} = \text{恒矢量} \quad (1-29)$$

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不变。这一结论称为动量守恒定律 (law of conservation of momentum)。

第二节 刚体的定轴转动

一、平动和转动

前面讨论的是质点和质点系的运动规律, 即物体在运动中的形状、大小忽略不计, 物体看做是质点。实际物体受到力的作用时, 其大小和形状都会发生或大或小的变化, 即产生形变。在某些问题中, 物体大小或形状的改变可以忽略不计, 这样的物体用刚体 (rigid body) 这一理想模型来表示, 所谓刚体, 就是在外力作用下大小和形状都不发生变化的物体。刚体也可以看做是一特殊的质点系, 其中任意两个质点之间的距离保持不变。因此, 它在运动过程中或与其他物体相互作用过程中, 不会发生任何形变。

刚体运动时,如果刚体上任何一条直线在运动过程中的方向始终保持不变,这种运动称为**平动**(translation),如图1-6所示。刚体平动时,刚体上各点具有相同的位移、速度及加速度,因此可用刚体上任一点的运动来代表整个刚体的运动。前面关于质点运动的规律都可以用来描述刚体的平动。

刚体运动时,如果刚体上各点都绕同一直线作圆周运动,刚体的这种运动称为**转动**(rotation),该直线称为**转轴**(axis of rotation),如图1-7所示。转轴固定不动的转动称为**定轴转动**(rotation about fixed axis)。

刚体的一般运动可以看做是平动和转动这两类基本运动的合成。本节主要讨论刚体的定轴转动。

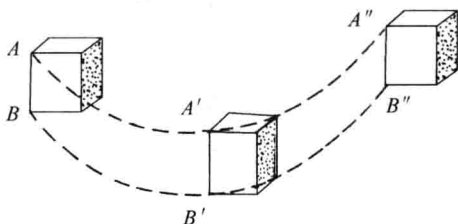


图1-6 刚体的平动

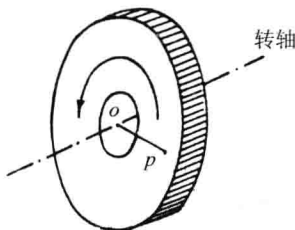


图1-7 刚体的转动

二、刚体定轴转动的运动学

1. 描述刚体定轴转动的物理量 刚体作定轴转动时,刚体上任一点都在垂直于转轴的平面内作圆周运动。刚体上到转轴距离不同的点在半径不同的圆周上运动,它们有不同的位移、速度和加速度,因此不能用这些量来描述整个刚体的转动,然而在相同的时间内,刚体上各点所转过的角度都相同,因此我们可以用与角度相关的物理量来描述刚体的转动。

过刚体上任意一点并垂直于转轴的平面称为**转动平面**。设 P 点为任意转动平面内的任一点,如图1-8所示。由于 P 点是任意选取的,因此对 P 点运动状态的描述即是对整个刚体运动状态的描述。设 t 时刻半径线 OP 与参考方向 Ox 轴的夹角为 θ ,则 θ 称为刚体在 t 时刻的**角坐标**,它表示了刚体在某时刻的位置。设 OP 在 Δt 时间内转过的角度为 $\Delta\theta$, $\Delta\theta$ 称为刚体在 Δt 时间内的**角位移**(angular displacement)。一般规定,刚体沿逆时针方向转动时,角位移取正值,沿顺时针方向转动时,角位移取负值。在国际单位制中,角位移的单位为弧度(rad)。

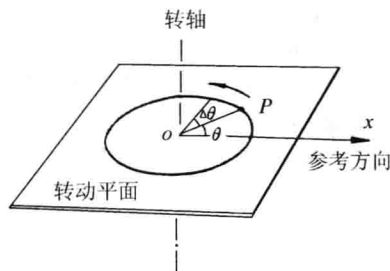


图1-8 转动平面

角位移 $\Delta\theta$ 与时间 Δt 的比值,称为刚体在 Δt 时间内的平均角速度,以 $\bar{\omega}$ 表示,即

$$\bar{\omega} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

当 Δt 趋于零时,平均角速度的极限值称为刚体在 t 时刻的**瞬时角速度**,简称**角速度**(angular velocity),用 ω 表示,即

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt} \quad (1-30)$$

角速度是矢量,其方向由右手螺旋法则确定,即:右手拇指伸直,四指沿转动方向弯曲,拇指所指方向即为角速度矢量 ω 的方向,如图1-9所示。

刚体绕定轴转动时,角速度的方向只能沿着转轴,因此可以把角速度当做标量,用正负号

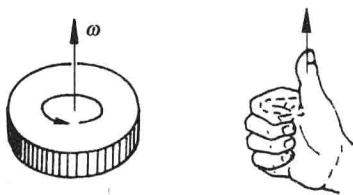


图 1-9 右手螺旋法则

来表示沿转轴向上或向下两种取向。

在国际单位制中,角速度的单位为弧度·秒⁻¹ (rad·s⁻¹)。

刚体做匀速转动时,角速度是一个恒量。如果刚体作变速转动,设刚体在 t 时刻的角速度为 ω , 在 $t+\Delta t$ 时刻的角速度为 $\omega+\Delta\omega$, 则角速度的增量 $\Delta\omega$ 与时间 Δt 的比值,称为刚体在 Δt 时间内的平均角加速度,以 $\bar{\beta}$ 表示,即

$$\bar{\beta} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

当 Δt 趋于零时,平均角加速度的极限值称为刚体在 t 时刻的瞬时角加速度,简称角加速度 (angular acceleration),用 β 表示,即

$$\beta = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (1-31)$$

角加速度是矢量,其方向与角速度增量的方向一致,角加速度矢量和角速度矢量同方向时,刚体作加速转动,反方向时,刚体作减速转动。刚体定轴转动时,角加速度矢量沿着转轴只有两种取向,可以用正负号来表示其方向。刚体作匀变速转动时,角加速度是一个恒量。

在国际单位制中,角加速度的单位为弧度·秒⁻² (rad·s⁻²)。

2. 刚体匀速、匀变速转动公式 刚体作匀速或匀变速转动时,其运动方程与质点做匀速或匀变速直线运动的运动方程相似。匀速转动方程为

$$\theta = \omega t \quad (1-32)$$

匀变速转动方程为

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \omega_0 + \beta t \\ \theta &= \omega_0 t + \frac{1}{2} \beta t^2 \\ \omega^2 &= \omega_0^2 + 2\beta\theta \end{aligned} \right\} \quad (1-33)$$

3. 角量与线量的关系 如上所述,刚体作定轴转动时,刚体上各质点都在各自的转动平面内作圆周运动,描述各点作圆周运动的位移,速度和加速度等物理量称为线量,线量与角量的关系为

$$v = \omega r \quad (1-34)$$

$$a_t = \beta r \quad (1-35)$$

$$a_n = \omega^2 r \quad (1-36)$$

式中 r 是质点做圆周运动的曲率半径, a_t 和 a_n 分别是质点的切向加速度和法向加速度。

三、刚体定轴转动定律

1. 力矩 在质点力学中,我们已经知道力的作用使物体的运动状态发生改变。而一个有固定转轴的刚体的转动状态是否改变,与其所受的力矩有关。力矩反映了力的大小、方向和作用点对物体转动的影响。

如图 1-10 所示,设刚体所受合外力 F 在其作用点 P 的转动平面内, P 到转轴的距离是 r , 相应的矢径是 r 。 r 与 F 的夹角为 φ 。转轴到力的作用线的垂直距离为 d , $d = r \sin\varphi$, d 称为力 F 对该转轴的力臂 (force arm)。力的大小与力臂的乘积称为力对该转轴的力矩 (moment of force)。以 M 表

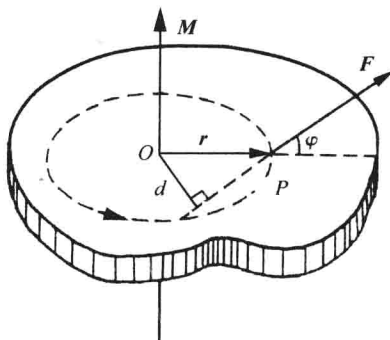


图 1-10 转动平面内的力的力矩