





国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



自然科学大辞典系列

# 物理学大辞典

总主编 都有为

副总主编 程建春 欧阳容百 张世远

DICTIONARY OF PHYSICS

科学出版社

## 内 容 简 介

本书是一部综合性的物理学辞典,涵盖力学和理论力学、理论物理学、热学、热力学与统计物理学、声学、电磁学、光学、原子与分子物理学、无线电物理学、凝聚态物理学、等离子体物理学、原子核物理学、高能物理学、天体物理学、计算物理学、非线性物理学、化学物理、能源物理、经济物理、生物物理学、医学物理等学科,以常用、基础和重要的名词术语为基本内容,提供简短扼要的定义或概念解释,并有适度展开。正文后附有物理学大事件、常用物理量单位、常用物理学常数表等附录,并设有便于检索的外文索引、汉语拼音索引。

本书可供物理及相关专业的科技工作者、高等院校师生、中学教师、物理学爱好者以及具有大专以上文化程度的其他读者参考、使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

物理学大辞典/都有为主编. —北京: 科学出版社, 2017.12  
(自然科学大辞典系列)

ISBN 978-7-03-055778-0

I. ①物… II. ①都… III. ①物理学-辞典 IV. ①O4-61

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 298653 号

责任编辑: 钱 俊 周 涵 / 封面设计: 黄华斌

责任校对: 彭珍珍 杜子昂 / 责任印制: 肖 兴

**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>

**中国科学院印刷厂** 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017 年 12 月第 一 版 开本: 889 × 1194 1/16

2017 年 12 月第一次印刷 印张: 78 1/2

字数: 3 300 000

定价: 298.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## 《物理学大辞典》编委会

总 主 编 都有为

副总主编 程建春 欧阳容百 张世远

编 委 (以汉语拼音为序)

丁大军 丁剑平 丁明德 董锦明

冯一军 黄吉平 鞠国兴 李俊

刘春根 刘万东 吕笑梅 宁新宝

任中洲 王 炜 王伯根 闻海虎

徐 骏 张若筠 章 东 钟 伟

朱诗亮 宗红石 邹志刚

## 《物理学大辞典》撰写人员名单

(以汉语拼音为序)

安克难	安 晋	卞春华	曹庆琪	曹 毅	陈抱一	陈丹丹	陈 刚
陈 健	陈 锴	陈申见	陈 怡	陈召忠	陈 卓	陈子亭	程建春
程 鑫	程 营	崔著钊	戴 煜	丁大军	丁海峰	丁剑平	丁明德
丁 谦	丁世英	丁维平	董锦明	杜 军	杜 勇	段文晖	方世良
方 忠	冯 济	冯一军	甘再国	龚新高	龚彦晓	顾秋生	郭 静
郭霞生	郭学锋	郭 洋	韩 宁	胡文兵	胡希伟	胡小鹏	黄吉平
黄晓林	吉鸿飞	季伟捷	金飏兵	金 新	靳根明	鞠国兴	康 琳
孔令欣	兰 涛	黎书华	李昌鸿	李朝升	李 川	李 俊	李 明
李淑义	李思宇	李廷会	李 伟	李向东	李晓辉	李云轩	李志远
梁 源	缪 峰	林海青	林志斌	刘 峰	刘福春	刘汉卿	刘洪君
刘 辉	刘建国	刘 璐	刘万东	刘晓峻	刘 洋	刘宗华	卢 晶
陆全明	吕笑梅	罗文俊	罗晓鸣	马 晶	马千里	马 日	马琰铭
马余强	倪冬冬	倪 军	宁新宝	欧阳容百	平加伦	秦 宏	秦允豪
邱小军	任中洲	单国锋	邵陆兵	沈俭一	沈 勇	盛玉宝	施 勇
史华林	舒咬根	宋凤麒	孙国柱	孙 浩	孙 建	孙为民	谭志杰
汤雷翰	唐少龙	陶 超	陶建成	涂 彧	涂展春	屠 娟	万贤纲
万友平	王 达	王鼎盛	王敦辉	王桂琴	王建生	王建松	王金东
王 俊	王 骏	王 群	王 涛	王天珩	王 炜	王友年	王志刚
王智河	韦广红	魏建榕	魏志勇	闻海虎	吴 镒	吴剑锋	吴俊宝
吴兴龙	伍瑞新	谢代前	谢捷如	谢金兵	谢若非	辛 苑	忻 辰
徐建华	徐 骏	徐 平	徐晓东	许 昌	许 吉	许伟伟	薛正远

闫冰 闫世成 严洁 颜辉 杨光 杨洁 杨星水 杨玉军  
姚秀娟 叶式公 殷峥 于顺利 于涛 袁建民 袁仁宽 曾雉  
詹鹏 张春峰 张大威 张海军 张惠澍 张俊延 张若筠 张小鹏  
章东 赵经武 郑春阳 郑坚 郑伟 郑文智 钟伟 周海京  
周进 周燕子 周勇 周苑 朱晨歌 朱广浩 朱建华 朱少平

朱诗亮 宗红石 邹海山 邹志刚 左芬 左光宏

# 前 言

历经 6 年的筹备、组织、撰写、审稿等流程，国家出版基金项目《物理学大辞典》即将由科学出版社出版，这部凝聚了二百余位撰写人、审稿人、编委与出版人员心血的大辞典终于奉献给读者了。《物理学大辞典》的撰写人、审稿人均为在相关领域中学有所长有所建树的专家、学者，在十分繁忙的工作中抽出宝贵的时间完成任务。因此，首先应感谢他们的辛勤劳动付出，以及精益求精、科学严谨的精神。此外，尚需感谢科学出版社自始至终的关心、支持与优良的编辑出版工作。在此，我特别要感谢副总主编程建春、欧阳容百和张世远教授，没有他们勇挑重担，要完成这部巨著是不可能的。

物理学是一门基础性的学科，与数学、材料、化学、天文、生物、医学等学科紧密交叉，又为科学技术发展奠定了坚实的基础。作为一部单卷本、综合性的中大型物理学专科辞典，《物理学大辞典》的出版必将为普及科学知识、为广大读者进入科学殿堂提供十分便捷的通道。这是一部严谨的科学工具书，可为广大中小学和大学的师生参考。

《物理学大辞典》以全国科学技术名词审定委员会发布的有关学科的名词术语作为选择词条的首选参考内容，并参考了已出版的《物理学词典》等有关材料，对物理学各领域中的主要名词、术语进行解释，其内容按物理学的各分支学科进行分类介绍：

(1) 力学和理论力学；(2) 理论物理学；(3) 热学、热力学与统计物理学；(4) 声学；(5) 电磁学；(6) 光学；(7) 原子与分子物理学；(8) 无线电物理学；(9) 凝聚态物理学；(10) 等离子体物理学；(11) 原子核物理学；(12) 高能物理学；(13) 天体物理学；(14) 计算物理学；(15) 非线性物理学；(16) 化学物理；(17) 能源物理；(18) 经济物理；(19) 生物物理学；(20) 医学物理。

除传统的力学、电磁学、凝聚态物理等外，增加了能源物理、化学物理、经济物理等内容。共收录条目 10 000 余条，约 330 万字。

人类已进入大数据、物联网、智能化时代，人类对客观世界的认识也由宏观到微观，进入对宇宙深层次的探索，如黑洞、引力波、暗物质、反物质等，量子纠缠可能导致第二次量子革命，知识的大爆炸需要科学知识的大普及。人类社会几乎每隔 100 年有一次产业革命，18 世纪热能的使用开启了第一次产业革命，19 世纪电能的应用导致社会的电气化，20 世纪的信息化与原子能的应用，当前 21 世纪进入以纳米科技为主要内涵的第四次产业革命。《物理学大辞典》尽可能地反映科技的进步，引入一些新的科技名词与术语。为了方便读者查阅，附有中、英文词目索引。

最后期望《物理学大辞典》能为知识普及、人才培养、国家富强尽一份菲薄之力。

都有为  
南京大学物理学院  
2017 年 10 月

# 凡 例

## 总体编排

1. 本书正文由 20 个部分组成，各部分均按专业知识体系分类编排，词条以逻辑关系为序。
2. 正文前列有目录，文后设有附录和索引。

## 收词立目

3. 本书为专科术语辞典，收录物理学词目共计 10 000 余条。
4. 本书词目均用黑体字排出。词目后一般括注英文对译词。
5. 本书词目有一词数名或一词数译的，以有关部门审定、较为恰当或常见的为正条。
6. 词目如有别称、简称，一律在释文前说明，并另立参见条。
7. 词目为一词多义时，若各义项分属不同学科或门类，则在各学科或门类内分列该词目。

## 释 文

8. 释文使用规范的现代汉语。在不产生歧义的前提下，释文开始和释文中一般不重复词目。
9. 释文中出现的词语，在本书中另有专条解释而需要参见的，该词语以楷体排版。
10. 释文中需要设为副条（参见条）的词语，在排版时以加下划线的形式标示。
11. 释文一般只介绍定论。如学术上尚无定论，则同时介绍并列的几说，或以一说为主、兼及他说。
12. 括号的用法：释文中方括号内的文字通常为使用中可以省略的文字，圆括号中的文字通常为解释说明性文字。（公式以及其他特殊情况例外。）

## 检 索

13. 本书设有汉语拼音、外文两套索引。
  - ①汉语拼音索引中阿拉伯数字、英文、希文等依次排在汉字之后，其他特殊字符排在希文之后。标点符号、大小写和正斜体在排序时均不考虑。
  - ②外文索引中，标点符号、大小写、正斜体在排序时均不考虑。阿拉伯数字、希文及其他特殊字符依次排在英文之后。



## 其 他

14. 本书于 2017 年 6 月底截稿, 个别方面的内容由于资料来源所限, 截稿稍早。截稿后有变动的内容只在时间和技术条件允许的情况下酌情增补或修改, 一般不做补正。

# 目 录

前言	
凡例	
一、力学和理论力学	1
1.1 基本概念	2
1.2 静力学	4
1.3 运动学	5
1.4 动力学	6
1.5 狭义相对论	12
1.6 刚体力学	19
1.7 分析力学	23
1.8 流体力学	28
1.9 弹性力学	31
二、理论物理学	35
2.1 数学物理	35
2.2 电动力学	67
2.3 相对论与场论	83
2.4 量子力学	120
2.5 量子信息与量子计算	180
2.6 宇宙学	189
2.7 弦理论与超弦理论	200
三、热学、热力学和统计物理学	231
3.1 热学	231
3.2 热力学	270
3.3 统计物理学	288
四、声学	334
4.1 声学基础理论	334
4.2 声学材料	343
4.3 音频声学	351
4.4 生物声学	386
4.5 水声学	389
五、电磁学	400
5.1 静电场	400
5.2 稳恒磁场	406
5.3 电磁感应	412
5.4 电路	414
5.5 电磁学的单位制	427
六、光学	429
6.1 经典光学	429
6.2 光度学和色度学	442
6.3 波动光学	445
6.4 信息光学	468
6.5 统计光学	477
6.6 应用光学	478
6.7 集成光学	503
6.8 非线性光学	512
6.9 激光	520
6.10 纳米光学和超快光学	534
6.11 量子光学	540
6.12 光谱学	547
6.13 红外光学	551
七、原子与分子物理学	554
7.1 原子分子的电子结构理论	554
7.2 原子光谱和原子-光相互作用	582
7.3 分子光谱和分子-光相互作用	591
7.4 波谱学	595
7.5 原子与分子碰撞过程与相互作用	596

7.6 奇特原子分子、团簇物理·····	599	十三、天体物理学·····	875
7.7 冷原子分子物理·····	600	十四、计算物理学·····	887
7.8 原子分子物理其他学科·····	602	十五、非线性物理学·····	917
八、无线电物理学·····	605	15.1 状态空间·····	917
8.1 电磁波物理·····	605	15.2 分岔与混沌·····	918
8.2 量子无线电物理·····	619	15.3 分形·····	921
8.3 微波物理学·····	620	15.4 非线性数学物理方程·····	922
8.4 超高频无线电物理·····	638	十六、化学物理·····	924
8.5 统计无线电物理·····	643	16.1 结构化学·····	924
8.6 电子电路·····	644	16.2 量子化学·····	929
九、凝聚态物理学·····	657	16.3 量子动力学·····	934
9.1 超导与低温物理·····	657	16.4 分子模拟·····	935
9.2 磁学·····	722	16.5 固体表面化学物理与物理化学···	938
9.3 半导体物理·····	726	16.6 催化化学与物理·····	941
9.4 凝聚态理论·····	762	16.7 光化学·····	944
十、等离子体物理学·····	769	16.8 高分子物理·····	948
10.1 基础等离子体物理·····	771	16.9 功能材料·····	951
10.2 高温磁约束聚变等离子体物理···	774	16.10 近代物理方法在化学中的应用··	954
10.3 高温惯性约束聚变等离子体物理··	778	十七、能源物理·····	959
10.4 低温等离子体物理·····	780	十八、经济物理·····	980
10.5 空间与天体等离子体物理·····	782	十九、生物物理学·····	992
十一、原子核物理学·····	787	19.1 分子生物物理学·····	992
11.1 原子核基本性质·····	787	19.2 纳米生物学·····	994
11.2 原子核结构·····	793	19.3 膜生物物理学·····	996
11.3 原子核衰变·····	798	19.4 蛋白质聚合·····	997
11.4 原子核反应·····	808	19.5 蛋白质折叠·····	998
11.5 原子核裂变和聚变·····	815	19.6 生物信息学·····	999
11.6 放射性束物理·····	819	19.7 生物力学·····	1001
11.7 相对论重离子碰撞·····	824	19.8 DNA 分子的结构与功能·····	1002
11.8 超重原子核·····	845	19.9 放射生物学·····	1003
11.9 中子物理·····	848	19.10 细胞生物物理·····	1006
十二、高能物理学·····	851	19.11 系统生物学·····	1008

---

19.12 生物分子机器·····	1014	20.6 微波医学·····	1048
19.13 RNA 分子结构和功能·····	1015	20.7 核医学·····	1049
19.14 生物物理技术·····	1018	20.8 纳米医学·····	1050
19.15 神经系统生物物理学·····	1019	20.9 非线性医学·····	1053
<b>二十、医学物理·····</b>	<b>1022</b>	<b>附 I 物理学大事记·····</b>	<b>1056</b>
20.1 电子医学·····	1022	<b>附 II 常用物理量单位·····</b>	<b>1065</b>
20.2 磁医学·····	1034	<b>附 III 常用物理学常数表·····</b>	<b>1067</b>
20.3 光医学·····	1039	<b>外文索引·····</b>	<b>1070</b>
20.4 超声医学·····	1043	<b>汉语拼音索引·····</b>	<b>1158</b>
20.5 运动医学和热医学·····	1045		



## 力学和理论力学

**物理学** [physics] 研究物质与运动的基本规律的科学。其研究内容包括物质的结构、物质间的各种基本相互作用和物质的一些基本运动形态等。在微观领域内,存在有不同层次的粒子——基本粒子、原子核、原子与分子等,相应地有物理学的分支学科,如粒子物理、原子核物理以及原子与分子物理。在宏观领域内,存在有不同的聚集态,诸如固态、液态、气态和等离子态,相应地有凝聚态(包括固态与液态)物理和等离子体物理等分支学科。众多物相可以汇聚成尺度更大的体系,诸如行星、恒星、星系、星系团等,乃至于囊括一切的宇宙,均可以作为物理学研究的对象。这些就构成与地球科学、天文学的交叉学科:地球物理、天体物理与宇宙学。物质的基本相互作用目前已知共有4种,即长程的万有引力与电磁作用力和短程(局限于 $10^{-15}\text{m}$ 之内)的弱作用力与强作用力。长程的相互作用是人们感官得以直接感知的,而短程相互作用仅出现在原子核内部和一些基本粒子之间。相互作用是通过场媒介来传递的,引力场、电磁场与规范场即为其实例。因而对场的研究在现代物理学中也占有重要地位。物理学所关注的运动形态,有宏观的,如机械运动、电磁现象与热现象,相应的学科为力学与声学、电磁学与光学、热力学统计物理;也有微观的,如各个层次粒子的运动、激发与反应,构成了粒子物理、原子与分子物理、原子核物理所研究的对象。物质的运动总是在一定的空间和时间里呈现的,这样空间、时间及其参考系也成为物理学研究的对象。

实验研究是物理学的基础。精密的定量测量是实验物理学的基本要求和追求的目标,构成了物理学不可或缺的一个组成部分。通常,只有在取得大量的经验规律之后,方可能建立起自洽完整的理论体系。而这些理论又会对某些特定问题提出具体的预言,有待于进一步的物理实验来对之甄别,即予以证实或证伪。这样,经过实验物理学家与理论物理学家的大量工作和反复推敲、去伪存真,使得物理学的理论具有了一定范围的适用性和一定程度的可靠性。

经典力学是物理学中最早成熟的分支学科。17世纪初德国天文学家开普勒(J. Kepler, 1571—1630)根据天文学的观测数据得出了行星运动三定律这个重要的经验规律。几乎同时,意大利物理学家伽利略(G. Galileo, 1564—1642)通过落体、抛物体和摆的实验,总结出动力学的初步理论。随后英国物理学家牛顿(I. Newton, 1642—1727)进行了深入的研究,总结出三条运动定律和万有引力定律,为建立经典力学的理

论奠定了基础。以后的发展体现于许多方面,首先在应用上大见成效;其次是研究的对象不断扩大,推广到不同性质的媒质,分别建立了刚体力学、弹性力学、流体力学和声学(处理机械波的传播)等分支学科;再次是理论体系更加完备和具有广泛适用性。

电磁学在18、19世纪取得重大进展,通过法国物理学家库仑(C. A. Coulomb, 1736—1806)、法国物理学家和数学家安培(A. M. Ampere, 1775—1836)、英国物理学家法拉第(M. Faraday, 1791—1867)等的实验研究,建立了有关静电、静磁与电磁现象的若干基本规律。集其大成者是19世纪下半叶的英国物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell, 1831—1879),他总结出了能够全面描述电磁现象的基本理论,即麦克斯韦方程组。这一理论预言了电磁波,随后即为德国物理学家赫兹(H. Hertz, 1857—1894)的实验所证实。原来独立发展的光学,至此归结为可见频段的电磁波的研究,从而纳入了电磁学的范围。探索和研究宽广的电磁波谱,从无线电波到微波与厘米波,从红外光、可见光到紫外光,从X射线到 $\gamma$ 射线,一直持续到20世纪。

对热现象的研究导致19世纪中叶热力学的建立。其第一定律就是能量守恒定律,适用于任何宏观与微观过程,其有效性遍及物理学和整个自然科学;其第二定律就是熵恒增定律,确定了不可逆过程中的时间之矢。对热现象在微观层次上进行探究,导致了分子动理学和经典统计物理学的问世,麦克斯韦、奥地利物理学家玻尔兹曼(L. Boltzmann, 1844—1906)与美国物理学家吉布斯(J. W. Gibbs, 1839—1903)对它做出了重要贡献。这是在物理学中首次明确地引入了微观粒子(分子与原子)的概念。

应该强调指出,经典物理学已经孕育出一系列工程技术:建立在经典力学基础上的有机机械工程、土木建筑工程和航空航天技术;建立在经典电磁学基础上的有电机工程、无线电工程和电子工程;建立在热力学基础上的有动力工程和工程热物理等。经典物理学也促进了其他自然科学的发展,如经典力学之于天体力学,热力学与统计力学之于物理化学等。

在20世纪初,物理学出现了两大突破,即相对论与量子论。由于美国物理学家迈克耳孙(A. A. Michelson, 1852—1931)与莫雷(E. W. Morley, 1838—1923)的精确测量不能发现地球的运动对光速的影响,1905年德国物理学家爱因斯坦(A. Einstein, 1879—1955)提出了狭义相对论,指出在所有惯性参考系中物理规律具有相同的形式,肯定了经典电磁学的规律对于一切惯性参考系都有效。相对论提出了新的时空观,建立了处理高速运动问题的理论体系,奠定了高能物理、粒子物理等学科的理论基础。1916年他基于惯性质量与引力质量等效的假设,建立了广义相对论。这是引力的几何理论,将引力和时空曲率相联系,从而提供了处理强引力场力学问题的

有效方法。相对论弥补了经典物理学的一些漏洞,也为处理大尺度的天体和宇宙问题提供了合适的理论框架。在 19、20 世纪之交,由于黑体辐射与光电效应的实验结果与经典物理学有明显矛盾,德国物理学家普朗克 (M. Planck, 1858—1947) 与爱因斯坦提出了初步的量子论。1913 年丹麦原子物理学家玻尔 (N. Bohr, 1885—1962) 提出了量子论的原子模型来解释氢光谱线系的经验规律。随后法国物理学家德布罗意 (L. de Broglie, 1892—1987) 提出粒子与波动二象性的概念。1925 年德国物理学家海森伯 (W. K. Heisenberg, 1901—1976) 与奥地利物理学家薛定谔 (E. Schrödinger, 1887—1961) 等建立了量子力学,给出了统一描述微观粒子行为的基本理论。量子力学问世之后,科学家用它解决原子结构与分子结构等问题,显示了它具有非凡的解决问题的能力。另一方面,量子力学也提供了理解化学元素周期表的物理基础,进而发展了量子化学和化学物理,进一步确立了物理学和化学两大学科之间的联系。1928 年英国物理学家狄拉克 (P. A. M. Dirac, 1902—1984) 提出了(狭义)相对论的量子力学理论,到 20 世纪中叶量子电动力学开花结果,成功地从微观上来处理电磁相互作用问题。

从 20 世纪之初到 20 世纪 40 年代,从放射性的研究逐步开拓成以原子核结构与其反应为主要内容的原子核物理学。核裂变与核聚变的发现和应用创建了全新的原子能技术。加速器的能量一再提高,促进了以研究基本粒子为对象的高能物理学的发展。大量基本粒子(包括各种类型的轻子、夸克与中间玻色子)被发现,对它们进行测量、分类并理顺其关系,从而得出了粒子物理的标准模型(包括强子的夸克模型、量子色动力学与弱电相互作用的统一理论)。迄今为止,此模型未遇反例,成为 20 世纪后半叶物理学的重大成果之一。当前面临的挑战在于如何超越标准模型的框架,扩大统一场论和对称性的范围,以期将量子力学和广义相对论相融合起来。

20 世纪也是天体物理学得以迅速发展时期的一个时期。现代天文学的视野开阔,观测手段先进,因而可以将星体、星系和宇宙视为无比庞大的实验用来甄别物理学的基础理论。一些观测的结果已可对宇宙演化模型提供若干制约。目前获得学界认可的是宇宙学标准模型,是从大爆炸的高能态开始的。这样一来,就将高能粒子物理学和早期宇宙联系在一起,标志了微观与宏观的两个极端迂回地合二为一了。

原子与分子物理在 20 世纪五六十年代出现了新的转机。受激发射在微波和光波段先后得到了实现,从而导致激光器的发明,开创了有重大应用前景的激光技术,同时也使光学和原子与分子物理学焕发出新的生命力。

在 20 世纪 30 年代将量子力学与统计物理应用于固体中的电子和原子,创建了固体物理学。电子在周期晶格中传播导致了固体的能带理论,格波在周期晶格中传播导致了晶格动

力学,通过实验和理论的研究得以确立。1947 年晶体管的发明是固体物理学对技术的重大贡献,引发了电子学技术的重大革命,成为当今信息技术的基础。电子间的相互作用引起了铁磁性和超导电性,其探讨既具实际意义又有理论价值,使理论进入了多体问题物理学的领域。另一方面研究对象也越出常规的晶体,准晶、玻璃、液晶、胶体、聚合物、生物聚合物等,都进入了视野。相应地固体物理学也转换为凝聚态物理学。凝聚态物理学与材料科学密切相关,也成为发展新型电子学(微电子学、纳米电子学、磁电子学、超导电子学等)和光子学的基础。经典物理学在 20 世纪亦萌发出一些“新枝”,如相变与临界现象以及非线性动力学(远离平衡态的失稳、斑图形成、分形、混沌与湍流等),将为进一步理解复杂性这一疑难问题铺路架桥,也将促进物理学与化学、生物学、地学等相邻学科的相互交叉和渗透。可以说,物理学已成为自然科学、技术科学和工程科学的基础。

**力学 [mechanics]** 研究宏观物体之间或物体各部分之间相对位置随时间的变化,以及物体间相互作用,与由此引起的物体运动状态变化所遵从的规律的分支学科。力学研究的对象是机械运动,从运动的形态来分,可以把力学分为静力学 (statics)、运动学 (kinematics) 和动力学 (dynamics) 等几部分。从研究的对象来分,有质点力学、质点系力学、刚体力学、连续介质力学等。当前,单独使用“力学”一词时,一般指牛顿力学 (Newtonian mechanics) 或经典力学 (classical mechanics),它适用于物体速度远小于光速的情况。当物体速度接近光速时,牛顿力学不再适用,而必须用相对论力学 (relativistic mechanics)。另一方面,在亚原子领域,则需用量子力学 (quantum mechanics),或量子场理论 (quantum field theory),简称量子场论。不过,量子力学等理论中已与力的概念无关了,仅是名称而已。

## 1.1 基本概念

**质量 [mass]** 度量物体惯性大小或物体间相互吸引能力的物体的物理属性。质量源于对物质的认识。人们早就认识到物质是能够被我们的感观所直接感受的,可称为物体的客观存在。在长期的实践中,需要度量物质的量,由此形成了质量的概念,即质量被理解为“物体所含物质的量”。质量是一个通过测量来定义的基本的物理量,国际上公认的质量基准是保存在巴黎国际计量局中的铂铱原器,规定它的质量为 1 千克。

与质量直接有关的基本定律有两条:万有引力定律和牛顿第二定律。与前者相关的质量称为引力质量,而与后者相关的质量称为惯性质量,它们分别量度物质的两种不同属性。惯性质量与引力质量原则上应是完全不同的,但从牛顿开始

直至目前为止的所有测量两者差别的实验都表明,在非常高的精度范围内(例如  $10^{-13}$ ),它的数值是完全一样的。见万有引力定律、牛顿第二定律、引力质量和惯性质量。

**时间 [time]** 时间表征物质运动的持续性,具有单向性、可测量性等特性。空间反映物质运动的广延性,空间中两点间的距离称为长度。时间和空间是两个基本的物理量,它们的内涵、性质等是随着人们认识的深入不断变化和丰富的。对时间和空间赋予不同的性质和结构,相应地会有不同的理论体系形式。在物理中,通常假设时间是均匀的,空间是均匀和各向同性的,这将与能量守恒、动量守恒和角动量守恒等守恒定律相关。在牛顿力学中,时间和空间具有绝对性,空间平直,用欧几里得几何描述。在相对论中,时间和空间是视为一体的,称为时空,时空不再具有绝对的意义,是与参考系有关的。在狭义相对论中,时空是平直的,用闵可夫斯基几何描述;在广义相对论中,时空是弯曲的,需采用黎曼几何。时间和长度的计量基准随着科学技术的发展而不断变化。目前时间的测量基准是:1969年国际计量大会选择的铯原子  $^{133}\text{Cs}$  两个超精细能级跃迁所对应的辐射频率  $\nu = 9192631770\text{Hz}$  作为时间间隔基准,1s 定义为  $1\text{s} = 9192631770/\nu$ ;1983年第17届国际计量大会采用真空光速  $c = 299792458\text{m/s}$  这一常量来定出长度单位,规定:1m 是光在真空中  $1/299792458\text{s}$  时间间隔内所经路程的长度。

**空间 [space]** 见时间。

**参考系 [reference system]** 表述一定的物体在空间的位置是怎样随时间而变化的参照体系。一物体的位置或一事件发生的地点,只有参照另一适当选择的物体,才能表达出来。牛顿虽然相信有绝对空间,但他认识到人们无法描绘出物体在绝对空间中的运动路径,只能“使用相对而非绝对的位置和运动”。作为一个物体位置和运动的参照的这个物体,就称为参考系。参考系选定后,在这参考物体上建立一套坐标系,并将一个时钟固定在该坐系统里。坐标系用来决定物体在空间的位置,时钟用来指示相应的时间。

**惯性系 [inertial system]** 一个自由运动的物体,即一个无外力作用的运动物体,保持其原来相对于参考系为静止或做匀速直线运动的状态的参考系。牛顿虽然认识到物体位置和运动的相对性,但他相信存在与物质和运动无关的“绝对空间”,这是一种“绝对不动”的空间,而他的运动定律就是对“绝对参考系”而言的。伽利略指出,对绝对参考系做匀速直线运动的参考系,牛顿运动定律都能成立。因此,惯性系就是牛顿运动定律在其中成立的一切参考系。实际上,牛顿的“绝对空间”和“绝对参考系”是不存在的,绝对意义上的惯性系也是不存在的。

如果两个参考系彼此相对做匀速直线运动,而其中一个又是惯性系,则另一个显然也是惯性系,一个自由运动的物体

相对于它也将做匀速直线运动。由此,我们可以有无数个做相对匀速直线运动的惯性系。

**非惯性系 [non-inertial system]** 相对于惯性系做加速运动的参考系。在非惯性系中,牛顿运动定律并不成立。如果要让牛顿运动定律继续成立,就必须在物体所受的真实的其他物体给予的作用力之外,加上与参考系自身的加速运动相关的所谓“惯性力”。

**坐标系 [coordinates system]** 为了能定量地表示物体在各个时刻相对于选定的参考系的位置就必须要选择适当的坐标系。最常用的坐标系是直角坐标系 (rectangular coordinates system),此外还有用于描写在平面内运动的平面极坐标系 (planar polar coordinates system),以及柱坐标系 (cylindrical coordinates system)、球坐标系 (spherical coordinates system)、自然坐标系 (natural coordinates system) 及曲线坐标系 (curve coordinates system) 等。

**直角坐标系 [rectangular coordinates system]** 又称笛卡儿坐标系。由三根相互垂直的坐标轴构成的坐标系。任一矢量可以用该矢量在直角坐标系中的分量,即该矢量在各坐标轴上的投影来表示。例如位置矢径  $\boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j} + z\boldsymbol{k}$ , 其中  $x$ 、 $y$ 、 $z$  就是位置矢量在各坐标轴上的投影, $\boldsymbol{i}$ 、 $\boldsymbol{j}$ 、 $\boldsymbol{k}$  分别是各坐标轴的单位矢量,它在空间各点是相同的。

**笛卡儿坐标系 [Cartesian coordinates system]** 即直角坐标系。

**平面极坐标系 [polar coordinates system]** 由极点和从极点出发的极轴构成的坐标系。任一矢量  $\boldsymbol{A}$  可用它在极轴方向和垂直于极轴方向的投影,即径向分量  $A_\rho$  和横向分量  $A_\varphi$  来表示:  $\boldsymbol{A} = A_\rho\boldsymbol{e}_\rho + A_\varphi\boldsymbol{e}_\varphi$ , 其中  $\boldsymbol{e}_\rho$  和  $\boldsymbol{e}_\varphi$  分别是径向和横向单位矢量。值得注意的是这些单位矢量的方向在不同的地点不同。

**柱坐标系 [cylindrical coordinates system]** 在平面极坐标系的基础上加一个垂直于平面极坐标所在平面的  $z$  轴构成的坐标系。任一矢量  $\boldsymbol{A}$  可用它在极轴方向和垂直于极轴方向的投影,即径向分量  $A_\rho$  和横向分量  $A_\varphi$  加上  $z$  轴方向的分量  $A_z$  的矢量和来表示:  $\boldsymbol{A} = A_\rho\boldsymbol{e}_\rho + A_\varphi\boldsymbol{e}_\varphi + A_z\boldsymbol{e}_z$ , 其中径向和横向单位矢量  $\boldsymbol{e}_\rho$  和  $\boldsymbol{e}_\varphi$  在不同的地点是不同的, $z$  轴方向的单位矢量  $\boldsymbol{e}_z$  固定不变。

**球坐标系 [spherical coordinates system]** 一个矢量  $\boldsymbol{A}$  在球坐标系中的三个分量分别是  $A_r$ 、 $A_\theta$ 、 $A_\varphi$ 。它们分别表示矢量在径向、余纬度方向(又称极角方向)及经度方向(又称方位角方向)的分量:  $\boldsymbol{A} = A_r\boldsymbol{e}_r + A_\theta\boldsymbol{e}_\theta + A_\varphi\boldsymbol{e}_\varphi$ 。坐标系的所有单位矢量  $\boldsymbol{e}_r$ 、 $\boldsymbol{e}_\theta$ 、 $\boldsymbol{e}_\varphi$  都随不同地点而不同。

**自然坐标系 [natural coordinates system]** 在给定的轨道的情况下,用自然坐标系表示物体的运动是比较方便的。在这种坐标系中,质点的速度大小由  $v = ds/dt$  表示,其

中  $ds$  是轨道曲线的元弧长, 其方向是沿曲线在该点的切线方向 (指向弧长增加的方向)。加速度可分解为切向加速度和法向加速度。前者为  $a_t = d^2s/dt^2$ , 后者为  $a_n = v^2/\rho$ 。这里的  $\rho$  是轨道曲线在该点密切圆的半径, 即曲率半径。

**曲线坐标系** [curve coordinates system] 由三组曲线组成的坐标系。平面极坐标系、柱坐标系和球坐标系都是曲线坐标系。若在曲线簇的交点处三组曲线相互垂直, 则叫作正交曲线坐标系。

**国际单位制** [international system of units, SI] 由国际计量大会 (CGPM) 批准采用的基于国际度量制的单位制, 包括单位名称和符号、词头名称和符号及其使用规则。国际单位制的七个基本量和相应基本单位的名称和符号, 见下表。基本物理量是通过测量来定义的, 通过基本概念和基本物理量而得到的物理量称为导出物理量。

SI 基本单位

长度	米	m
质量	千克	kg
时间	秒	s
电流	安 [培]	A
热力学温度	开 [尔文]	K
物质的量	摩 [尔]	mol
发光强度	坎 [德拉]	Cd

**力** [force] 力是运动变化的原因。力的相互抵消导致平衡和结构的稳定性。现代物理学认为, 力是一种相互作用, 人们已经知道存在 4 种形式的相互作用, 即强相互作用、弱相互作用、电磁相互作用和引力相互作用。因此, 就现在的认识水平而言, 自然界中存在的力基本可以分为四种, 即万有引力、电磁力、弱力和强力。万有引力存在于一切质量不为零的物体之间, 是人们最早认识的力, 由牛顿在 17 世纪建立万有引力理论。电磁力是由静止或运动的电荷产生的力, 它几乎是所有宏观力的根源, 如各种材料的内部张力、弹性力、分子间的结合力、物体与物体之间的摩擦力, 都是电磁相互作用形成的。弱力存在于基本粒子之间, 其强度只有电磁力的  $1/10^{12}$ , 作用距离约为  $10^{-15}$  cm, 只相当于原子半径的  $1/10^7$ 。强力是核子之间的相互作用力, 原子核稳定存在就是因为强相互作用力, 它的作用距离约为  $10^{-13}$  cm。因此, 弱力和强力是短程相互作用, 而万有引力和电磁力是长程相互作用。

**平动** [translational motion] 也称平移, 运动物体上任意两点所连成的直线, 在整个运动过程中, 始终保持平行, 这种运动叫作平动。作平动的物体, 在任一时刻, 其上各点的速度和加速度都相同。

**转动** [rotation] 物体上任意两点所连成的直线的指向在运动中不断变化, 这种指向的变化称为转动。当研究物体转动时, 必须考虑物体的大小、形状和结构等特性。不考虑

物体的形变或者这种形变对于所研究的物体的运动的影响可以忽略不计, 则这种物体称为刚体。刚体的转动分为定轴转动和定点转动等复杂的形态。对质点而言, 运动方向的变化可以视为绕某点或某轴的转动, 并由角速度矢量来定量描述质点的转动。见质点的角速度。

**质点** [mass point] 有质量但没有大小的物体或者大小对该物体运动的影响可以忽略不计的物体。质点是一个理想化模型。物体作平动时, 由于物体上各点的运动情况相同, 可以不考虑物体的大小, 而把它作为质点来处理; 运动物体的大小跟所研究的问题中的某些特征线度相比可忽略不计时, 该物体也可按质点处理。例如研究地球绕太阳的公转, 地球的大小和地球与太阳之间的距离相比是一个小量, 则可近似将地球当作一质点。

**静质量** [rest mass] 按照狭义相对论, 物体的质量与它的运动状态有关。静质量是指取一个特定的惯性参考系, 相对此惯性参考系, 物体静止, 在此状态下测得的物体质量, 用  $m_0$  表示。

**运动质量** [moving mass] 又称相对论质量或动力学质量。运动物体的质量随着其运动速度增加而增大, 当物体相对某惯性参考系以速度  $v$  运动时, 在这个惯性参考系测量的物质质量  $m$  称为运动质量, 有关系  $m = m_0/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ , 其中  $c = 299792458$  m/s 为真空中的光速。

**相对论质量** [relativistic mass] 即运动质量。

**动力学质量** [dynamical mass] 即运动质量。

## 1.2 静力学

**静力学** [statics] 力学的分支。研究力系的简化规律及物体处于平衡状态时所受外力应满足的条件。

**力的平衡公理** [axiom for equilibrium of two forces] 要使作用在刚体上的两个力平衡, 其充分与必要条件是此两力的大小相等, 方向相反, 并且作用在一条直线上, 与作用点在作用线上的位置无关。对于刚体, 力是一种滑移矢量, 即力可以沿其作用线任意滑移而不改变它所起的力学作用。

**平面交汇力系** [planar crossed force system] 处于同一平面内, 且都通过平面内某一个点的  $N$  个力构成的力系。

**平面交汇力系的合力** [resultant force of planar crossed force system] 平面交汇力系的合力等于所有力的矢量和, 合力的作用线通过该力系的交汇点, 叫主矢量, 即合力,  $F = \sum_{i=1}^N F_i$ 。

**平面交汇力系的平衡** [equilibrium of planar crossed force system] 平面交汇力系平衡的充分必要条件是  $\sum_{i=1}^N F_i = 0$ 。平衡时, 该力系构成的力多边形是封闭的。



**平面任意力系 [planar force system]** 处于同一平面内的  $N$  个力构成的力系叫平面力系。作用在刚体上的平面力系可以简化为一主矢量和一个主矩。主矢量是力系各力的矢量和：
$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^N \mathbf{F}_i。$$

主矩是对任意选定的简化中心而言的，它是各力对该简化中心的力矩之矢量和：
$$\mathbf{M} = \sum_{i=1}^N \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i，$$
其中  $\mathbf{r}_i$  是简化中心到  $\mathbf{F}_i$  作用点的矢径。

**平面任意力系的平衡 [equilibrium of planar force system]** 作用在刚体上的任意平面力系达到平衡的充分必要条件有两个：主矢量等于零，即 
$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^N \mathbf{F}_i = 0；$$
主矩为零，即 
$$\mathbf{M} = \sum_{i=1}^N \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i = 0。$$

**力系的简化 [simplify of a force system]** 作用在同一点的力系总可以按平行四边形法则，简化为一个合力。作用在刚体上的力系，由于其作用点不同可以引起不同的力学效应。这种力系可以简化为对简化中心的主矢量和一个力偶矩。前者就是力系的矢量和 
$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^N \mathbf{F}_i，$$
后者是力系对简化中心的主矩 
$$\mathbf{M} = \sum_{i=1}^N \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i。$$

**加(减)平衡力公理 [axiom about adding and/or subtracting forces]** 从作用在刚体上的力系中加上(或减去)任一平衡力系都不改变该力系对刚体的作用。

### 1.3 运 动 学

**运动学 [kinematics]** 力学的分支。它只讨论物体或物体各部分之间相对位置随时间的变化，而不涉及产生这些变化的原因。这实际上是一种几何化的描述。

**位置矢量 [position vector]** 简称位矢。为表征一个质点在空间的位置，可以选择一个参考点作为原点  $O$ ，质点的位置可以用质点相对于该参考点  $O$  的矢径  $\mathbf{r}$  来表示。该矢量就是位置矢量。在直角坐标系中，位矢可用其沿  $x, y, z$  轴的分量表示为  $\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}$ ，其中  $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$  分别是各坐标轴的单位矢量；在柱坐标系中，位矢表示为  $\mathbf{r} = \rho\mathbf{e}_\rho + z\mathbf{e}_z$ ，其中  $\rho$  和  $z$  分别是矢径  $\mathbf{r}$  在  $\mathbf{e}_\rho$  和  $\mathbf{e}_z$  方向的投影；在球坐标系中，位矢表示为  $\mathbf{r} = r\mathbf{e}_\rho$ ，其中  $r$  为位矢的长度。

**轨道 [trajectory, orbit]** 质点在运动过程中所经空间各点的连线，即位置矢量顶点的连线。它可以用参数方程  $x = x(t), y = y(t), z = z(t)$  表示，其中  $t$  是时间或其他任意参数。

**位移矢量 [displacement vector]** 设质点的位矢是时间的函数： $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$ ，则  $t + \Delta t$  与  $t$  时刻的位矢差  $\Delta \mathbf{r} =$

$\mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t)$  称为时间间隔  $\Delta t$  内的位移矢量，简称为位移，它是从  $t$  时刻的位矢端点指向  $t + \Delta t$  时刻的位矢端点的矢量。

**路程 [distance]** 质点从空间的一个位置运动到另一个位置，运动轨迹的长度叫作质点在这一运动过程所通过的路程。路程是标量，即没有方向的量。位移与路程是两个不同的物理量。在直线运动中，路程是直线轨迹的长度；在曲线运动中，路程是曲线轨迹的长度。当物体在运动过程中经过一段时间后回到原处，路程不为零，位移则等于零。

**平均速度 [average velocity]** 从时刻  $t$  到  $t + \Delta t$  的间隔  $\Delta t$  内，质点的位移与时间间隔之比或者位矢的平均变化率  $\bar{\mathbf{v}} = \Delta \mathbf{r} / \Delta t。$

**瞬时速度 [instantaneous velocity]** 当平均速度的时间间隔趋向于零时，即  $\Delta t \rightarrow 0$  时，平均速度的极限就是时刻  $t$  的瞬时速度，数学表示为：
$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta \mathbf{r} / \Delta t = d\mathbf{r} / dt。$$
它是一个矢量，方向沿其轨迹的切线方向，大小是  $dr/dt$  的绝对值，后者也叫瞬时速率。

**平均速率 [average speed]** 表征物体运动快慢的物理量，在一定的时间间隔  $\Delta t$  内，质点经过的路程的平均变化率  $\bar{v} = \Delta s / \Delta t。$

**瞬时速率 [instantaneous speed]** 平均速率的极限或者瞬时速度的大小，可以表示为  $v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta s / \Delta t = ds / dt$ ，其中  $ds$  是该质点在  $dt$  时间内经过的轨道的弧长。

**径向速度 [radial velocity]** 在平面极坐标系中，质点速度沿矢径方向的分量。

**横向速度 [transverse velocity]** 在平面极坐标系中，质点速度在垂直于矢径方向的分量。

**绝对速度 [absolute velocity]** 物体相对于静止参考系的速度。

**相对速度 [relative velocity]** 相对于静止参考系有运动的参考系叫运动参考系。物体相对于运动参考系的速度就叫相对速度。

**牵连速度 [convected velocity]** 在有相对运动的两个参考系中，运动参考系中任一点或物体上与之相联的一点因参考系的运动而具有的相对于静止参考系的速度叫牵连速度。

**面积速度 [area velocity]** 也叫掠面速度。运用平面极坐标描述质点在有心力作用下的运动时，经常用到面积速度的概念。定义为：质点相对于力心的矢径在单位时间里扫过的面积。面积速度是单位质量的质点相对于力心的角动量的一半。

**加速度 [acceleration]** 速度随时间的变化率。由于速度是矢量而时间是标量，故速度的时间变化率也是矢量。所以加速度包括速度大小的变化和速度方向的变化。在直角坐