



高等院校理工类规划教材
大学生通识教育

Fundamentals of Thermal Science

热学基础

◎ 朱 华 编著

FUNDAMENTALS OF
THERMAL
SCIENCE



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

高等院校理工类规划教材
大学生通识教育

Fundamentals of Thermal Science

热 学 基 础

朱 华 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大學出版社

图书在版编目(CIP)数据

热学基础 / 朱华编著. —杭州: 浙江大学出版社, 2009. 3

ISBN 978-7-308-06568-9

I. 热… II. 朱… III. 热学—高等学校—教材 IV. 0551

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 017989 号

内容简介

本书是大学生通识教育教材,适用于理工农医和社科经管各类专业的大学生学习,也可可为其他读者阅读参考。本书主要介绍热学的基本概念、基本原理、基本过程、基本分析计算方法、常用热力设备和装置等,同时介绍了相关热学发展历程、常见热门问题讨论、热学测量基本技术以及热学计算工具软件等,各章还附有一定量的例题、思考题和练习题。本书内容简明扼要、通俗易懂,着眼于将知识熏陶与素质培养相结合、科学教育与人文教育相结合,以扩大学生的眼界、丰富知识、启发思维、培养工程设计和创新能力。

热学基础

朱 华 编著

责任编辑 杜希武

封面设计 俞亚彤

出版发行 浙江大学出版社

(杭州天目山路 148 号 邮政编码 310028)

(E-mail: zupress@mail. hz. zj. cn)

(网址: <http://www.zjupress.com>

<http://www.press.zju.edu.cn>)

电话: 0571—88925592, 88273066(传真)

排 版 杭州求是图文制作有限公司

印 刷 杭州浙大同心教育彩印有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 14.5

字 数 352 千字

版 印 次 2009 年 3 月第 1 版 2009 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-06568-9

定 价 25.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话 (0571)88925591

前 言

热学起源于人类对冷、热现象本质的探究,是研究自然界中物质与冷热有关的性质及与冷热相联系的各种规律的科学。热学的研究和发展是人类文明进步的一大动力。我们的衣食住行,从电力、电子、汽车、空调、环境、气象到农林牧副渔,再到航空航天无不与热科学紧密相关,所以热学基础是一门将科学教育与人文教育、自然科学与社会科学、基础性与普适性完美结合的课程,将热学基础作为通识课程是恰当的和有益的。

19 世纪初,美国博德学院的帕卡德(A. S. Parkard)教授将通识教育与大学教育联系在一起,称之为“普通教育”或“通才教育”等,以避免学科过于分化、专业过于细密对学生造成的不利影响,为学生提供均衡的视野和平衡的心智,使学生具备远大眼光、通融识见、博雅精神和优美情感,达到构筑完整知识架构、训练判断和思维能力、发掘学习和创造潜力的目的。对通识教育至今还没有一个公认的、精确的表述,所以在编写本书的同时,也是编者不断探索通识教育的理念和目标的过程,这个过程历时两年有余,是漫长和艰苦的,期间几易其稿,多次向大量来自人文社科经管理工农医众多专业的学生授课,体会了内容抉择取舍的痛苦和构筑建造的快乐,也研读了大量的教育、科学和哲学著作,包括蔡元培先生的教育论著等,以求能编写出一部合格的通识课教材。在这个过程中编者逐渐认识到通识教育犹如建筑房屋的地基,学生学习的知识越基础,接受新知识、解决新问题的能力和创新意识就越强,给予学生准确的、一般性知识以及学科理念和科学发展的美感尤为重要。人类的文明与日俱进,但科学的真理与科学的价值观永存。

在本书的编写过程中,首先要感谢出版社杜希武编辑,对我的迟迟不能交稿十分宽容和耐心,感谢我的学生庄博、谈金军和徐章禄在第八章的内容编译和书中部分习题整理和答案解答方面提供的帮助,还要感谢学校、学院和教研室同事、老师以及家人在本书编写中给予的大力支持和帮助!

由于编者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,敬请读者不吝赐教。

朱 华

2008 年 12 月于浙大求是园

目 录

第一章 概 述	(1)
1.1 什么是热学	(1)
1.2 研究方法	(3)
1.3 热学的应用	(4)
1.4 热学简史	(6)
1.5 常用计量单位	(8)
思考题	(9)
第二章 温度、热量和能量	(10)
2.1 温度和第零定律	(10)
2.2 热量和功	(16)
2.3 能量和第一定律	(22)
2.4 温度和热量的测量	(27)
思考题	(35)
习 题	(36)
第三章 热过程的方向、限度和熵	(38)
3.1 热力过程的方向	(38)
3.2 什么是熵	(43)
3.3 卡诺的贡献	(49)
3.4 热寂说	(53)
思考题	(56)
习 题	(57)
第四章 热力系统的状态和方程	(59)
4.1 热力系统的状态	(59)
4.2 什么是理想气体	(65)
4.3 相与相变	(70)
4.4 自然界的空气	(76)
4.5 绝对零度和第三定律	(78)

思考题	(83)
习 题	(84)
第五章 热力装置和“永动机”	(87)
5.1 热力设备分析	(87)
5.2 热力过程分析	(91)
5.3 动力装置	(93)
5.4 制冷装置与热泵	(104)
5.5 永动机	(111)
思考题	(115)
习 题	(117)
第六章 热传递的基本原理	(119)
6.1 热传递的条件	(119)
6.2 传热的基本模式	(120)
6.3 导热	(122)
6.4 对流换热	(127)
6.5 辐射换热	(136)
思考题	(140)
习 题	(141)
第七章 传热分析	(144)
7.1 复合传热	(144)
7.2 传热过程	(145)
7.3 热阻概念的提出	(147)
7.4 换热设备	(156)
7.5 强化传热和隔热保温	(160)
思考题	(164)
习 题	(165)
第八章 热学计算工具软件介绍	(168)
8.1 概 述	(168)
8.2 EES 菜单	(169)
8.3 EES 窗口	(176)
8.4 EES 的函数和程序	(178)
8.5 EES 的库函数	(183)
主要参考文献	(187)
附录 A 常用公式、常数和图表	(189)
附表 A1 国际单位制与其它单位制的相互换算	(190)
附表 A2 常用物理常数	(191)
附表 A3 理想气体可逆过程计算公式表(定值比热容)	(191)

附表 A4	几种典型形状的一维稳态无内热源导热问题的解	(192)
附表 A5	强迫对流换热关联式	(193)
附表 A6	自然对流换热实验关联式	(195)
附表 A7	凝结与沸腾换热计算式	(196)
附表 A8	铜—康铜热电偶分度表	(197)
附录 B	常用物质的热物性	(198)
附表 B1	常用气体的部分热力性质	(199)
附表 B2	常用气体的平均比热容与温度的关系式(线性)	(199)
附表 B3	常用气体在理想气体状态下的比定压热容与温度的关系	(200)
附表 B4	大气压力下干空气的热物性($p=1.01325\times 10^5\text{ Pa}$)	(201)
附表 B5	大气压力下标准烟气的热物性($p=1.01325\times 10^5\text{ Pa}$)	(202)
附表 B6	饱和水的热物性($p=1.01325\times 10^5\text{ Pa}$)	(203)
附表 B7	干饱和水蒸汽的热物性	(204)
附表 B8	金属材料的密度、比热容和导热系数	(205)
附表 B9	保温和建筑及其它材料的密度和导热系数	(206)
附表 B10	几种常用材料的法向黑度	(208)
附表 B11	饱和水与饱和水蒸汽的热力性质(按温度排列)	(209)
附表 B12	饱和水与饱和水蒸汽的热力性质(按压力排列)	(211)
附表 B13	未饱和水与过热水蒸汽的热力性质	(213)
附表 B14	R134a 饱和热力性质(按温度排列)	(220)
附表 B15	R134a 饱和热力性质(按压力排列)	(221)
附表 B16	R134a 过热蒸汽热力性质	(222)

第一章 概 述

热学这一门科学起源于人类对于热与冷现象本质的追求。由于在有史以前人类已经发明了火,我们可以想象到,追求热与冷现象的本质的企图可能是人类最初对自然界法则的追求之一。

——王竹溪:《热力学》

我们热切地想知道自己从哪里来到何处去,但唯一可观察的只有身处的这个环境。这就是为什么我们如此急切地竭尽全力去寻求答案。这就是科学、学问 and 知识,这就是人类所有精神追求的真正源泉。对我们所置身的时空环境,我们总是尽可能想知道更多。当努力寻找答案时,我们乐在其中,并且发现它引人入胜……

——薛定谔:《自然与古希腊》

1.1 什么是热学

1.1.1 研究内容

热现象是自然界与科学领域中最普遍的现象。人们对于“热”和“冷”现象本质的探究引起了热学研究的发展,也引发了人类文明的进步。热学是研究自然界中物质与冷热有关的性质及与冷热相联系的各种规律的科学。

热学的基本内容可以分为两大部分:

(1)研究热能和其他形式能量之间相互转换的规律

又称为热力学,分为理论热力学、化学热力学和工程热力学,分别研究热力学的一般基础理论、热力学原理在化学过程中的应用以及热能和机械能之间相互转换的规律。

(2)研究由温差引起的热传递的规律

又称为传热学。凡是有温度差的地方,热量自发地从高温物体传向低温物体,或从物体的高温部分传向低温部分。由于自然界和生产技术中处处存在着温差,所以研究和应用热量传递规律对科学技术发展和生活水平提高具有重要意义。

1.1.2 产生和发展

远古时代,当我们的祖先终于直立起身体,抬起头,向着天空睁大眼睛,用双手托起一朵晶莹冰冷的雪花,看着它倏地消失在指缝中;或者在烈日下停住匆匆的脚步,擦一把汗,眯起双眼眺望远处,看到龟裂的大地边缘蒸腾起迷雾般的光影,茫然中忽然闪出一丝讶异的念头:这到底是怎样的一个世界?我们可以改变它吗?尽管人类从刀耕火种的漫漫洪荒岁月发展到日新月异的蒸汽机时代,进而到达“千里江陵一日还”的电气时代,直至疾步跨入被誉为“知识爆炸”、“世界无边界”的网络数字信息时代,这个问题仍然紧锁在人类的心头,成为一个永恒的谜题。

我们的祖先在四季更替、昼夜变换、风霜雨雪、炎热酷暑中认识到了冷热的区别,观察到了物体受冷和受热后的变化,这种关于冷热的相关知识逐渐被应用到生活和生产实践中。

古代东汉王充在《论衡·寒温》中说:“夫近水则寒,近火则温,远则渐微。何者?气之所加,远近有差也。”《吕氏春秋·察今》中写道:“见瓶水之冰而知天下之寒。”《淮南子·说山训》中讲:“睹瓶中之冰而知天下之寒暑。”《淮南子·天文训》说:“积阳之热气生火,火气之精者为日;积阴之寒气为水,水气之精者为月。”……

《诗经·国风》中有提到:“二之日凿冰冲冲,三之日纳于凌阴。”《周礼》中写:“凌人,掌冰。……”就是描述利用冰窖储藏天然冰用于降温防腐和安排专人负责储冰之事;《关尹子·七釜》中甚至提到夏季制冰术:“人之力可以夺天地造化者,如冬起雷,夏造冰。”唐《意林》引用《淮南万毕术》注曰:“取沸汤置瓮中,密以新缣,沈(井)中三日成冰。”宋代苏轼的《物类相感志·总论》中也记载:“夏月热汤入井成冰。”明末方以智在《物理小识》中说:“万毕术有凝水石作冰法,陈眉公言以水晶煮水,入井得冰。智按其理,不必凝水石与水晶也。凡瓶水煮之极沸即坠入井底则六月亦能成冰。”尽管现代人对这种古代夏季造冰技术的可行性颇为怀疑,但这些说法也从侧面反映了一直以来人类对掌控自然、改造自然所作的大量努力。

在美国华盛顿的一栋建筑物前面刻着这样一段文字:“火:一切发现中的最伟大的发现,使人类能够生存于不同的气候之中,造出很多的食物,并迫使自然的力量为他们工作。”韩非子的《五蠹》中也说:“民食果、菰、蚌、蛤,腥臊恶臭而伤腹胃,民多疾病。有圣人作钻燧取火以化腥臊,而民悦之,使王天下,号之曰燧人氏。”《礼记内则疏》中有“晴则以金燧取火于日;阴则以木燧钻火也。”金燧又名阳燧,铜制的凹面镜,会聚太阳光在其焦点处可点燃火种。

战国时期,李冰在蜀地建设都江堰工程中,由于“崖峻阻险,不可穿凿,李冰乃积薪烧之。”这是用热胀冷缩原理开凿岩石,以降低施工难度。恩格斯在《反杜林论》中则说:“就世界性的解放作用而言,发明用火超过了蒸汽机,摩擦生火第一次使人支配了一种自然力,从而最终把人与动物界分开。”在《自然辩证法》中他进一步提到“甚至可以把这种发现看做人类历史的开端”。所以人类文明可以说起源于火的发明和利用,对火和热的本质的探索也成为人类早期认识世界、研究自然规律的一个首选目标。

1.2 研究方法

热学的研究对象是物质的热运动和与各种热现象有关的规律,而物质是由大量微观粒子(分子、原子)所组成的,尽管组成宏观物质的大量微观粒子热运动是随机的,如标准状态下 1m^3 的空气中包含有 2.7×10^{25} 个分子,分子之间不断地进行着相互碰撞,每个分子平均每秒与其他分子发生几十亿次的碰撞,就单个分子而言,其运动速度的大小和方向是随机的和不断变化的,各个分子之间的动能也是不同的,但大量微观粒子的整体存在统计规律性,系统中的微观粒子数越多,其统计规律的正确度也越高。所以热学的研究方法可以分为宏观方法和微观方法两种。

1.2.1 宏观研究方法

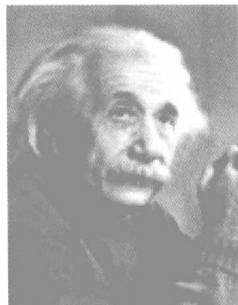
热学的宏观研究方法是将物质视为连续体,对于研究对象(系统)的状态从整体上加以描述,利用几个可以直接测量的宏观物理量,如压力 p 、体积 V 、温度 T 等,来描述研究对象的状态和物性,通过观察和实验来研究总结热现象的规律,得出热现象的宏观理论。

在长期的生活劳动实践中,人们发现系统的某些物理量是可以通过测量直接得到的,各宏观物理量之间相互联系、相互制约,这些制约关系除了与物质的特性有关外,还必须遵守一些基本的热学规律,如热力学第一定律、第二定律等,这些基本定律构成了宏观研究方法的基础。

宏观研究方法的优点是可靠,它以大量观察和实验所得经验定律为依据,所以只要推论无误,则结论亦可靠。经验定律是大量经验(观察和实验)的归纳总结,其可靠性体现在至今未有反例。例如热力学就是热学的宏观理论,它从对大量热现象的直接观察和实验测量所得到的基本定律出发,应用逻辑推理和数学方法得到物质各种宏观特性之间的关系、宏观过程的发展方向和极限等结论。

爱因斯坦(A. Einstein, 1879—1955)在 1949 年曾经评论说:“一个理论,如果它的前提越简单,而且能说明各种类型的问题越多,使用的范围越广,那么它给人的印象就越深刻。因此,经典热力学给我留下了深刻的印象。经典热力学是具有普遍内容的唯一的物理理论,我深信,在其基本概念适用的范围内是绝对不会被推翻的。”

宏观研究方法的缺点首先是所得出的规律不能说明其所以然,例如为什么会“守恒”? 为什么会有“方向性”? 等等;其次是宏观方法所得出的规律的应用有一定的局限,所谓上不能推广至茫茫宇宙,下不能深入至物质内部个别分子或原子的表现。例如热力学基本定律只适用于微观粒子数很多、能将物质作为连续体处理并处于平衡态下的宏观系统。



阿尔伯特·爱因斯坦
(Albert Einstein,
1879—1955)

1.2.2 微观研究方法

通过对宏观热现象加以微观描述和解释,对一个系统的状态用微观粒子运动状态,如用分子质量、速度、位置、能量等,这些不能直接测量的微观量来描述系统的宏观状态的方法,它将物质的宏观性质看作是由微观粒子热运动的统计平均值所决定,因此要运用气体分子论和统计力学进行研究。

由于一个看似稳态的、或者说不随时间变化的宏观状态,实际包含着大量的不断变化着的微观状态,例如 1mm^3 的水中含有 3.35×10^{19} 个水分子, 1mol 气体中包含了 6.023×10^{23} 个气体分子,在标准状况下一个空气分子平均每秒钟与其他分子碰撞约 10^9 次,其分子速度、方向、位置等瞬息万变,进行着永不休止的无规则运动,在容器的壁面上,每 1cm^2 每秒钟经受约 10^{24} 次空气分子的碰撞,但经过大量分子运动的统计平均,从宏观上看,实际呈现出来的是一定的压力、温度等宏观状态参数。

单个分子的运动是无规则的,大量分子的整体却出现了规律性,分子在各方向运动的概率是相同的,没有哪个方向的运动占优势,这种规律性具有统计平均的意义,称为统计规律性。

微观研究方法的优点是能阐明热现象的本质,可说明“所以然”。但其缺点在于对分子微观结构作出的模型假设往往都是近似的,因此尽管运用了繁复的数学运算,所求得的结果由于模型的简化性和近似性而受到局限,而且往往不够精确,与实验不能完全符合,因此这种方法不可任意推广。

微观研究方法和宏观研究方法是描述同一物理现象的两种不同方法,因此互相之间有一定的内在联系,并不对立。由于宏观物体所发生的各种现象都是由它所包含的大量微观粒子运动的集体表现,因此宏观量是那些微观量的统计平均值。

1.3 热学的应用

我国古代劳动人们很早就知道利用热能,能够通过“钻木取火”使木材等燃料燃烧获取热量,懂得使用煤和石油,意大利人马克·波罗(Marco Polo, 1254—1324)在他的《马克·波罗游记》中提到“中国的燃料不是木,也不是草,却是一种墨石头”。公元前2世纪我国古人就会用冰制成透镜聚焦取火,《问经堂丛书》记载了“削冰令圆,举以向日,以艾承其影,则火生”。在春秋战国已经知道用颜色来判断冶炼金属的加热温度,《考工记》中讲:“凡铸金之状,金(指铜)与锡,黑浊之气竭,黄白次之;黄白之气竭,青白次之;青白之气竭,青气次之。然后可铸也。”

在现代社会中,从汽车、火车、飞机的开动到电厂发电,从暖通空调到电脑、网络、手机的应用,从航天器、宇航服到蔬菜大棚,从器官冷冻保存到大气温室效应……都离不开热学原理,无一不是热学原理在各个实际领域中的应用。热学的应用领域及其与各学科的联系从表1-1所列举的热学与一些工科专业的关系中就可见一斑了。现代经济学、管理学、法学等

也与热学产生了千丝万缕的联系,甚至纯文科的中文和新闻专业,撰笔的过程中也难免不涉猎到一些热现象和热技术,需要相应的热学知识作为基础才能客观准确地表达。

表 1-1 热学与工科各专业的关系

学科门类	有关的热现象或技术问题举例
1. 地矿	• 矿物与石油开采、储运、加工过程中的加热、冷却、分离和精制等过程; • 加热炉的热设计、改进、热回收等; • 矿物加工过程中所用各种换热设备的设计、开发及改进等。
2. 材料	• 金属熔化、凝固中的传热问题,板坯连铸中的传热问题; • 加热炉、熔化炉的设计; • 射流冲击冷却技术; • 陶瓷、玻璃等无机材料制造过程中的燃烧、干燥与冷却过程的控制与组织; • 塑料成型过程中的控制; • 单晶硅制造过程中的流动与传热问题。
3. 机械	• 铸造、焊接过程中金属的熔化、凝固传热问题; • 激光成型过程中的传热问题; • 高精度机械加工中热变形的控制与预测; • 塑料挤压过程中的热设计; • 机械电子器件中的热设计; • 汽车、拖拉机、车辆工程中热力发动机原理及设计; • 材料加工与处理过程中所用各类热力设备的设计。
4. 仪器仪表	• 精密设备与仪器中热变形与热应力的控制; • 热工计量测试仪器、仪表的设计开发(热线风速仪、光学高温计、红外成像技术、热流计等)。
5. 能源动力	• 工程热力学、传热学是该类专业所有方向的重要技术基础课程。
6. 电气信息	• 电子器件和微电子器件的有效冷却技术; • 电子器件及通讯材料(如光纤)制造过程中的流动和传热问题; • 流体力学、热力学及传热学的基本原理在生物医学工程中的应用; • 流体传动与控制中的流体力学问题; • 大规模集成电路制造过程中的传热问题(非傅里叶导热、微电子焊接、超细薄膜形成); • 低温冷冻在生物医学中的应用。
7. 土建	• 建筑物的散热与保温; • 太阳房与太阳能采暖设计; • 太阳能空调与制冷系统设计; • 建筑物的采暖、空调与通风; • 管网中的流动阻力与流量计算。
8. 航空航天	• 航空发动机的工作原理; • 燃气轮机叶片的有效冷却方法; • 航天器重返大气层时的冷却与绝热技术; • 发热体在太空中的散热技术; • 微重力下的各类传热传质现象; • 地面上微重力环境的模拟技术; • 热管用于控制航天器的表面温度。
9. 环境与安全	• 热污染及其对策; • 大气的污染与控制; • 火焰中可燃气体、毒性气体的扩散、对流及其控制; • 大气中的风云变幻、环流、风霜雨雪等现象均与热量传递过程有关。

续 表

学科门类	有关的热现象或技术问题举例
10. 化工制药	“三传”是化工专业的重要技术基础课； - 各类炉窑(隧道窑、间隙式窑炉等)的设计与运行中的流动与传热问题； - 制药过程的操作,如蒸发、结晶、干燥、冷冻、加热、冷却等均涉及热量、质量的传递过程。
11. 交通运输	- 各类用于交通运输的热力发动机的基本原理； 油、气储运中的加热、冷却、液化等操作； - 运用工程热力学、传热学知识指导轮机及其他交通工具的节能工程。
12. 海洋工程	- 船舶动力机械的工作原理与热设计； - 海水淡化过程中的传热传质问题； - 热现象在海洋运动与环流形成中的作用； - 海洋资源利用中的热力学及传热传质问题。
13. 轻工 纺织 食品	- 食品快速冷冻保鲜； - 纺织服装生产车间的环境控制与调节； - 食品制备过程中的传热传质问题； - 烟草等经济作物的干燥是一个复杂的传热传质问题。
14. 武器	- 火箭发动机燃烧室中的工作过程； - 枪炮的发射是一个复杂的气动、燃烧、传热过程,如现代枪炮炮筒温度的分布对射击精度有重要影响； - 新式武器的开发与热科学有密切关系,如高性能液体火箭炮、电热炮等； - 兵器新技术中的传热传质问题,如随行装药技术的开发； - 爆炸后冲击波的传播、生成气体的对流扩散是一个复杂的气动热力过程。
15. 工程力学	- 材料或构件中的热应力计算； - 气动力学中用到大量的热力学基本原理与定律。
16. 生物工程	- 发酵及微生物制药是一个复杂的包含传热传质的物理化学过程； - 生物系统生物化学过程的热影响； - 生物反应、生物过程的分子动力学研究。
17. 农机林业	- 农业动力机械的工作原理及热设计； - 土壤保护中的热、质传递问题； - 生物质能的转化、沼气利用等农业能源工程中的特殊热科学问题； - 森林防火技术中的传热问题； 农、林产品加工制备过程的特殊传热传质问题(干燥、各向异性材料的导热、多孔介质中的传热等)； 农、林产品加工处理过程中的热交换设备。
18. 公安技术	- 红外探测技术在刑事科学技术中的应用； - 火焰产生与高温烟气传递过程中的热质交换现象； - 高层建筑火灾形成及火焰传递过程规律的研究。

摘自《热工课程在工科各专业人才培养中的地位及设置建议》，陶文铨、何雅玲、王秋旺，《面向 21 世纪的热工基础教学》，1999. 11

1.4 热学简史

热学研究始于 19 世纪初,其发展简史如下:

1803 年 发现红外线,确认了热辐射的存在。

1804 年 法国物理学家傅里叶(J. B. J. Fourier)根据实验提出了导热基本定律——后

人称为“傅里叶定律”,成为热学中导热研究领域的奠基人。

1807 年 傅里叶提出了求解温度场微分方程的分离变量法和求解导热微分方程的无穷级数——傅里叶级数。

1822 年 傅里叶发表了著名论著《热的解析理论》,成功地创建了热传导基础理论。

1823 年 法国科学家纳维埃(M. Navier)提出了不可压缩流体的流动方程。

1824 年 卡诺(N. L. S. Carnot)在研究提高蒸汽机效率的基础上提出了卡诺定律。

1842 年 德国医生迈耶(J. R. Mayer)认为热是能量的一种形式,提出能量守恒的理论。

1845 年 英国科学家斯托克司(G. G. Stokes)改进了纳维埃的流动方程,提出了纳维埃-斯托克司方程(Navier-Stokes 方程),成功建立了完整的流体流动方程。

1848 年 开尔文(Lord Kelvin)提出了热力学第二定律的一种表述。

1850 年 焦耳(James P. Joule)用不同的机械生热法测出了热功当量,能量守恒原理得到科学界的公认,热力学第一定律诞生。

1850 年 克劳修斯(R. Clausius)提出了热力学第二定律的另一种表述,并以此为前提论证了卡诺定律,正式确立了热力学第二定律。

1859 年 德国物理学家基尔霍夫(G. Kirchhoff)发表两篇论文,揭示出实际物体的热发射率与吸收率之间的关系。

1879 年 斯蒂芬(J. Stefan)根据实验发现了黑体辐射力与绝对温度之间的四次方规律。

1881 年 洛伦兹(L. Lorentz)得到了自然对流换热的理论解。

1885 年 格雷兹(L. Gratz)提出圆管内热起始段的换热理论解。

1894 年 玻耳兹曼(L. E. Boltzmann)从理论上证明了黑体辐射基本定律之一的四次方定律,后人称为斯蒂芬-玻耳兹曼定律。

1896 年 维恩(Wien)推导出一个黑体辐射的光谱能量分布的半经验公式——维恩位移定律,在短波段与实验结果符合较好,而在长波段与实验不符。此后,瑞利(L. Rayleigh)又从理论上推出一个黑体辐射的光谱能量分布公式,并得到金斯(J. H. Jeans)的改进,后人称为瑞利-金斯公式,该公式在长波段与实验结果比较符合,而在短波段却与实验有很大的差距,人称“紫外灾难”。

1900 年 普朗克(M. Planck)提出了“量子假说”,否定了经典物理学的连续性概念,认为物体发出或吸收辐射时,能量不是连续变化的,而是以“量子”的形式一份份发射或吸收的,后来的实验证明了普朗克公式在整个光谱段都适用。

1904 年 德国科学家普朗特(L. Prandtl)提出流动边界层概念。

1904 年 爱因斯坦(A. Einstein)提出的光子理论得到了社会的公认,普朗克公式也被人们所承认。

1908 年 普朗特的学生白拉修斯用边界层方程求得了外掠平板的理论解,并得到实验的证实,使普朗特的边界层理论得到公认和接受。

1910 年 德国科学家努谢尔特(W. Nusselt)得到管内换热理论解。

1909 年和 1915 年 努谢尔特发表两篇论文,对强制对流换热和自然对流换热的微分方程和边界条件进行量纲分析,获得了有关无量纲量之间的原则关系,开创了用量纲分析法

研究对流换热问题的先河。

1910 年 努谢尔特得到管内换热理论解。

1912 年 能斯特(W. Nernst)针对低温现象提出了热力学第三定律。

1914 年 白金汉(E. Buckingham)提出量纲分析法。

1916 年 努谢尔特得到凝结换热理论解,成为凝结换热领域的经典作品。

1921 年 波尔豪森(E. Pohlhausen)在流动边界层概念的启发下,提出热边界层概念。

1924 年 基南提出可用能概念,在热能工程中得到广泛应用。

1925 年 普朗特提出求解紊流换热问题的二层紊流模型和普朗特比拟。

1930 年 福勒(R. H. Fowler)提出热力学第零定律。

1930 年 波尔豪森和施密特(E. Schmidt)、贝克曼(W. Beckmann)一起得到了竖壁附近空气自然对流的理论解。

1931 年 基尔皮切夫(M. B. Kirpicheff)提出求解对流换热问题的相似理论。

1935 年 俄国科学家波略克借鉴了商务结算中的算法,提出计算物体间辐射换热的“净辐射法”。

1939 年 冯·卡门(Th. von Karman)提出求解紊流换热问题的三层紊流模型和卡门比拟。

1954 年 霍特尔特(H. C. Hottel)提出“交换因子法”用于计算辐射换热问题,1967 年又对此加以改进。

1956 年 奥本海姆(A. K. Oppenheim)提出用“模拟网络法”来计算辐射换热问题。

1.5 常用计量单位

计量单位有国际单位制、工程单位制和英制。由于历史的原因,不同的国家采用不同的计量单位制。1960 年第十一届国际计量大会通过了国际单位制 SI,受到了包括中国在内的世界各国的认同和使用,1974 年的第十四届国际计量大会确定基本国际单位有七个,其中与热学相关的有四个:长度(m)、质量(kg)、时间(s)和温度(K),其他单位如力、压力、热量、功等均为导出单位,见表 1-2。我国于 1984 年颁布了法定计量单位,以国际单位制为基础。国际单位制与其他单位制的换算见附录 A 表 A1。常用物理常数见附录 A 表 A2。

表 1-2 SI 基本单位和导出单位

	量的名称	单位名称	单位符号	导出单位和基本单位的关系
SI 基 本 单 位	长度	米	m	
	质量	千克	kg	
	时间	秒	s	
	温度	开尔文	K	
	电流	安培	A	
	物质的量	摩尔	mol	
	发光强度	坎德拉	cd	

续 表

	量的名称	单位名称	单位符号	导出单位和基本单位的关系
导 出 单 位	力	牛 顿	N	$1\text{N}=1\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$
	压力、应力	帕 斯 卡	Pa	$1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2$
	能量、功、热量	焦 耳	J	$1\text{J}=1\text{N}\cdot\text{m}$
	功率、辐射能通量	瓦 特	W	$1\text{W}=1\text{J}/\text{s}$
	速度		m/s	
	表面张力		N/m	$1\text{N}/\text{m}=1\text{kg}/\text{s}^2$
	热流密度		W/m^2	$1\text{W}/\text{m}^2=1\text{kg}/\text{s}^3$
	热容、熵		J/K	$1\text{J}/\text{K}=1\text{m}^2\cdot\text{kg}/(\text{s}^2\cdot\text{K})$
	比热容、比熵		$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	$1\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})=1\text{m}^2/(\text{s}^2\cdot\text{K})$
	比能、比焓		J/kg	$1\text{J}/\text{kg}=1\text{m}^2/\text{s}^2$
	摩尔容积		m^3/mol	
	摩尔热力学能、摩尔焓		J/mol	$1\text{J}/\text{mol}=1\text{m}^2\cdot\text{kg}/(\text{s}^2\cdot\text{mol})$
	摩尔热容、摩尔熵		$\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$	$1\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})=1\text{m}^2\cdot\text{kg}/(\text{s}^2\cdot\text{K}\cdot\text{mol})$

思考题

- 1-1 什么是热学？热学基础的研究对象是什么？
- 1-2 什么是热学的宏观研究方法和微观研究方法？请比较它们的优缺点，并探讨一下两者的关系。
- 1-3 请举出 5 个与热学相关的日常生活现象。
- 1-4 与热学相关的基本国际单位有哪几个？它们的单位是什么？
- 1-5 联系实际，谈谈热学有哪些应用？

第二章 温度、热量和能量

用来描述热现象的最基本的概念是温度和热,在科学史上经过了非常长的时间才把这两种概念区别开来,但是一经辨别清楚,就使科学得到了飞速的发展。

——A. 爱因斯坦、L. 英费尔德:《物理学的进化》

如果说我比别人看得更远些,那是因为我站在了巨人的肩上。

——艾萨克·牛顿

2.1 温度和第零定律

2.1.1 热力学第零定律

1930年,福勒(R. H. Fowler)提出了热力学第零定律:如果两个系统分别与处于确定状态的第三个系统达到热平衡,则这两个系统彼此也将处于热平衡。

换句话说,如图 2.1 所示,在不受外界影响的情况下,如在一个绝热环境中,如果系统 A 和系统 B 分别与系统 C 的同一状态处于热平衡,那么无论它们是否接触,我们都可以肯定系统 A 和系统 B 也必然处于热平衡。

尽管第零定律的正式提出比第一定律和第二定律推迟了差不多 80 多年,但实际上人们对温度的认识和测量过程中早已经开始应用它了。

首先,热力学第零定律给出了温度的概念,即两个或多个系统处于同一热平衡状态时,它们必然具有某种共同的宏观性质——具有相同的系统温度;其次,它指出利用一种标准系统——温度计可以判别系统之间温度是否相同。所以,热力学第零定律为温度的测量提供了依据。人们可以采用标准温度计作为不同系统的共同标准,通过它与被测物体接触后达到热平衡时其内部物性的变化来显示出被测物体的温度值,或者比较互不接触的不同系统之间的温度差异,如图 2.2 所示,与被测系统 A 接触的测温系统 C 应远小于被测系统 A,这样温度计的介入不会引起系统 A 的温度的改变。