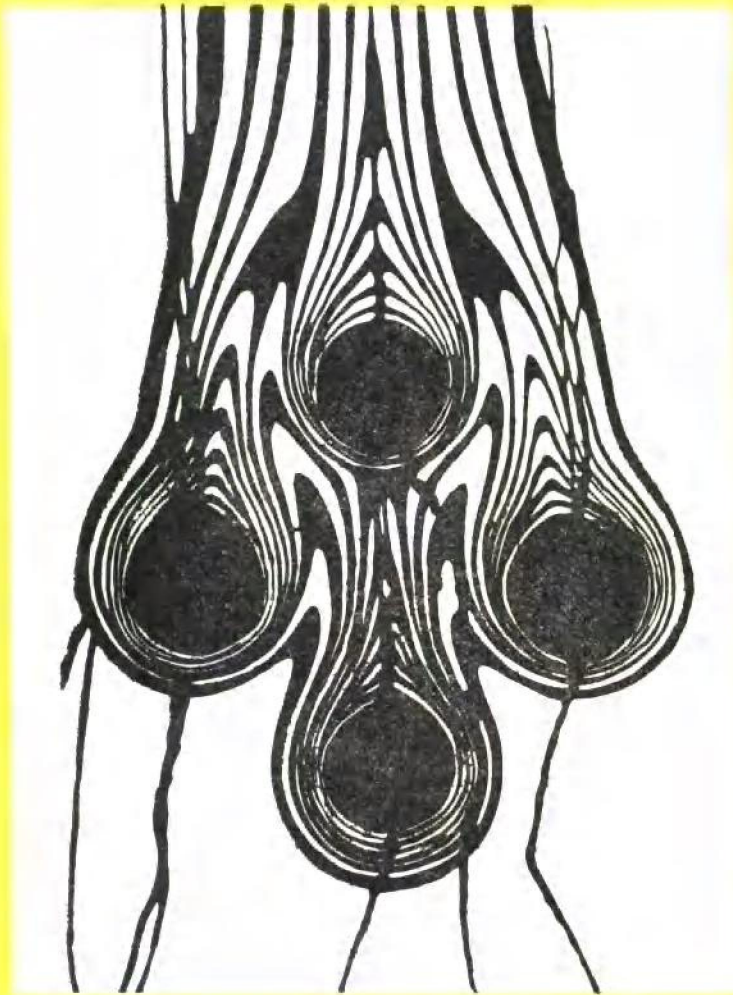


高等学校教材

# 传热学

(第二版)

杨世铭 编



高等学校教材

# 传热学

(第二版)

杨世铭 编

高等教育出版社

(京) 112 号

## 内 容 提 要

本书是在西安交通大学杨世铭主编《传热学》的基础上，参照 55~70 学时《传热学课程教学基本要求》修订而成的。

全书共八章，包括导热、对流换热、辐射换热、传热过程与换热器、传质等内容。与第一版相比，本书在内容取舍、系统结构上均有较大改进。书中突出了分析问题、解决问题的方法，物理概念阐述清晰，文字简洁流畅。全书有丰富的习题，并按难易程度分为两类，供教师、学生按不同需要选择。全书采用我国法定计量单位，书末有附录、索引及习题答案。

本书经热工课程教学指导委员会传热学课程教学指导小组审订，可作为热工类及机械类动力机械各专业的教材，也可供有关工程技术人员参考。

高等学校教材

**传 热 学**

(第二版)

杨世铭 编

\*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

高等教育出版社印刷厂印装

\*

开本 850×1168 1/32 印张 15.5 字数 374 000

1980 年 10 月第 1 版 1987 年 10 月第 2 版 1995 年 10 月第 9 次印刷

印数 63 878 - 71 385

ISBN7 - 04 - 000183 - 7/TB · 7

定价:12.00 元

## 第二版前言

本版是参照1986年热工课程教学指导委员会审订的高等工业学校《传热学课程教学基本要求》(55~70学时)的精神编写的。本书第一版发行七年来,提高教学质量指导思想的不明确,高等工业学校教学经验的积累和教学水平的提高以及传热学学科的新发展,都对教材提出了更高的要求,加之第一版是在教育事业遭受破坏,为解决当时教材有无问题的情况下而仓促成书的,因此比较彻底的改版修订显然是非常必要的。

本版在以下若干方面作了较大改进。

将原来分散的稳态导热和非稳态导热集中在一起,使导热这个基本传热方式两部分的论述联系更加紧密。导热问题的求解,不论一维、多维、有无内热源,统一以导热微分方程式为出发点,加强了处理导热问题数理方法的系统性。

对流换热部分着眼于提高学生认识物理现象、分析和解算实际问题的能力,并注意充实了物理现象机理和数学模型的阐述。对相似原理和量纲分析的处理作了改进。在对流换热按层次分类的论述上有所创新。凝结与沸腾换热部分进一步突出了基本内容,压缩了篇幅。

辐射换热部分强调了封闭腔的概念,删除了两个灰体间辐射换热的近似解,改进了论述的严密性,注意发挥网络法求解辐射换热问题的作用。

本版充实了数值计算的内容,注意加强在传热学中应用计算机解题能力的培养,并分别在稳态导热、非稳态导热、辐射换热和

换热器各部分通过例题介绍了计算机解题的基本方法。计算机程序改用更为通用的 FORTRAN 语言, 以适应计算机日益普及的新形势。

本版习题的改进有以下几个方面: 全面增加了基本题, 使培养解算能力的各方面内容都有可能得到训练; 精选并增加了提高题, 删除了提高题中难度过大的习题; 着眼于解算能力的培养, 选题时注意了习题的质量, 尽可能剔除硬代公式的习题; 书后给出了各章习题的答案, 有利于读者核对。答案所用物性值, 除习题中给定的以外, 均取自附录。

为了扩大本书对不同专业、不同层次读者的适应性, 本版采用了对某些章节打“\*”号的处理方式, 以增加部分专业所需要的应用内容, 如太阳辐射、热管等。这些“\*”号章节的内容已超出基本要求的范围, 省略它们并不影响内容的连贯性。

为了克服内容衔接的缺陷和笔调、风格不同等弊病, 此次改版由编者一手完成, 以达到浑然一体、提高质量的目的。

编者认为, 教材适合我国情况的先进性, 要求传热学教材反映我国自己的传热学科研究成果和反映国产材料的热物理性质。本版注意了充实这方面的内容, 如编入了国产新型保温、耐火材料和国产润滑油的热物理性质, 参考文献亦选用学生易于获得的参考资料等。当然, 应该清醒地认识到, 这仅仅是个开端, 还有待长期坚持不懈地努力。好在方向已经指明, 目的是一定可以达到的。

编者愿借此机会特别感谢帮助我在选用习题、提供答案方面付出辛勤劳动的前同事陶文铨教授。他的帮助是十分宝贵的。主审本版的清华大学任泽霖教授对书稿提出许多有益的意见。书稿还得到参加 1986 年镇江审稿会的华中工学院、哈尔滨工业大学、西安交通大学、南京工学院、江苏工学院、浙江大学、北京航空学院、华北电力学院和上海交通大学的代表的帮助, 他们提出了

不少很好的建设性的意见。此外，编者还收到不少教师和同学的书面意见，对书稿质量的提高起了很大作用。编者在此谨向所有提出宝贵意见的同志表示衷心的感谢。

限于编者水平，虽经努力，书中错误和不妥之处仍在所难免，欢迎读者批评指正。

杨世铭

1987年4月于上海

# 第一版序

本书为一九七七年十月教育部召开的高等学校工科基础课教材座谈会确定编写的教材之一。在一九七七年十二月的青岛教材会议上,由西安交通大学提出编写大纲草案,与会的十余所高等院校的代表,对大纲草案进行了深入的讨论,确定编写一本适用于70~100学时的传热学试用教材。本书就是按青岛会议决定的大纲编写的。

全书共分八章,除了分章深入讨论导热、对流、辐射及传热过程与换热器的基本理论及计算公式外,最后也对传质过程作了介绍。书中加强了传热问题的分析解法与数值解法的内容,并采用ALGOL 60算法语言举例说明用电子计算机求解导热问题的方法,同时对量纲分析、实验模化技术等内容也给予了应有的注意。全书采用国际单位制,在必要的地方列出了工程单位制的数值以资对照。每章末附有习题及参考文献。

学习本书时,在数学基础方面学生除应掌握微积分的一般知识以外,还应对常微分方程与偏微分方程、数值计算方法及算法语言有所了解。考虑到各个学校与专业在课程次序及内容安排上不尽一致,故本书在用到上述内容之处均作了必要的说明。如果学生已经系统地学过上述三门课程,则教师可按具体情况对讲授内容作相应的调整。

本书于一九七九年七月在西安审稿会议上由清华大学主审。参加会议的还有山东工学院、哈尔滨工业大学、南京工学院、天津大学、上海交通大学、重庆大学、华中工学院、华北电力学院、东北

电力学院、吉林工业大学、上海化工学院、武汉工学院、大庆石油学院、西南石油学院、成都农机学院、海军工程学院、云南工学院等兄弟院校的代表，他们对初稿提出了不少宝贵意见，使本书质量有了明显的提高。编者在此谨向他们表示衷心的感谢。

本书由西安交通大学热工教研组杨世铭主编，参加编写的还有陈钟颀(第三、六章)、王启杰(第四、八章)、林梓硕(第五章)和陶文铨(第一、七章)，全书最后由杨世铭修改定稿。书中绝大部分插图由西安交通大学印刷厂绘制。

由于编者水平有限，编写时间短促，书中缺点和错误在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者

1979年9月



## 主要符号表

$\lambda$	热扩散率(导温系数), $\text{m}^2/\text{s}$
$c$	比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
$d$	直径, $\text{m}$
$f$	截面积, $\text{m}^2$
$F$	面积, $\text{m}^2$
$g$	重力加速度, $\text{m}/\text{s}^2$
$I$	定向辐射强度
$k$	传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ; 辐射减弱系数
$l, L$	长度, $\text{m}$
$p$	压强(压力), $\text{Pa}$
$q$	热流密度(热通量), $\text{W}/\text{m}^2$
$Q$	热流量, $\text{W}$ ; 热量, $\text{J}$
$r$	半径, $\text{m}$ ; 汽化潜热, $\text{J}/\text{kg}$
$R$	半径, $\text{m}$ ; 热阻, $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$
$t$	温度, $^{\circ}\text{C}$
$T$	绝对温度, $\text{K}$
$u, v, w$	速度, $\text{m}/\text{s}$
$V$	容积, $\text{m}^3$
$\alpha$	换热系数(放热系数, 给热系数), $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ; 吸收率
$\beta$	体积膨胀系数, $\text{K}^{-1}$
$\delta$	厚度, $\text{m}$
$\epsilon$	黑度; 换热器的效能

- $\theta$  过剩温度,  $^{\circ}\text{C}$   
 $\lambda$  导热系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ; 波长,  $\mu\text{m}$   
 $\mu$  动力粘度,  $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$   
 $\nu$  运动粘度,  $\text{m}^2/\text{s}$   
 $\rho$  密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ; 反射率  
 $\sigma$  表面张力,  $\text{N}/\text{m}$   
 $\sigma_0$  黑体辐射常数,  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$   
 $\tau$  时间,  $\text{s}$ ; 穿透率  
 $\omega$  立体角,  $\text{sr}$

### 相似准则

$$Re = \frac{ul}{\nu} \text{—— 雷诺准则}$$

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho u^2} \text{—— 欧拉准则}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \text{—— 普朗特准则}$$

$$Ga = Fr/Re^2 = \frac{gl^3}{\nu^2} \text{—— 伽里略准则}$$

$$Pe = RePr = \frac{ul}{a} \text{—— 贝克利准则}$$

$$Fo = \frac{a\tau}{l^2} \text{—— 傅里叶准则}$$

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \text{—— 努谢尔特准则}$$

$$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda} \text{—— 毕渥准则}$$

$$Gr = \frac{gl^3}{\nu^2} \beta \Delta t \text{—— 葛拉晓夫准则}$$

# 目 录

主要符号表	1
第一章 绪论	1
1-1 热量传递的三种基本方式	3
1-2 传热过程和传热系数	10
1-3 单位制	13
第二章 导热基本定律及稳态导热	20
2-1 导热基本定律	20
2-2 导热微分方程式	26
2-3 通过平壁和圆筒壁的导热	32
2-4 通过肋片的导热	41
<del>2-5</del> 导热问题数值法求解原理	51
<del>2-6</del> 计算机解题介绍	59
*2-7 几点补充	64
第三章 非稳态导热	83
3-1 非稳态导热的基本概念	83
3-2 一维非稳态导热问题的求解及诺谟图	85
<del>3-3</del> 二维及三维非稳态导热问题的求解	98
3-4 对分析解的几点讨论	104
* <del>3-5</del> 非稳态导热问题的数值解法	113
* <del>3-6</del> 非稳态导热的正规热状况	129
第四章 对流换热	144
4-1 对流换热概说	144
4-2 对流换热微分方程组 <del>不涉传热方程</del>	151
4-3 边界层分析及边界层微分方程组 <del>不涉</del>	158
4-4 边界层积分方程组及求解示例 <del>不涉</del>	166
4-5 动量传递与热量传递的比拟理论	177
4-6 相似原理	184
* <del>4-7</del> 量纲分析	194

4-8	强制对流换热及其实验关联式	197
4-9	自然对流换热及其实验关联式	213
<b>第五章</b>	<b>凝结与沸腾换热</b>	<b>236</b>
5-1	凝结换热现象	236
5-2	膜状凝结分析解及实验关联式	238
5-3	影响膜状凝结因素的讨论	246
5-4	沸腾换热现象	248
5-5	沸腾换热计算式	255
<b>第六章</b>	<b>辐射换热</b>	<b>268</b>
6-1	热辐射的基本概念	268
6-2	黑体辐射	272
6-3	实际固体和液体的辐射 灰体	282
6-4	黑体间的辐射换热及角系数	292
6-5	灰体间的辐射换热	307
6-6	气体辐射	320
*6-7	火焰辐射	331
*6-8	太阳辐射	333
<b>第七章</b>	<b>传热过程与换热器</b>	<b>357</b>
7-1	传热过程的分析和计算	357
<del>7-2</del>	<del>换热器的型式及平均温压</del>	<del>365</del>
<del>7-3</del>	<del>换热器的热计算</del>	<del>378</del>
<del>7-4</del>	<del>传热的强化和隔热保温技术</del>	<del>395</del>
<del>7-5</del>	<del>热管及热管换热器</del>	<del>399</del>
<b>*第八章</b>	<b>传质</b>	<b>415</b>
8-1	概说	415
8-2	扩散的基本定律	416
8-3	对流传质及传质系数	425
8-4	质量和热量的同时传递	432
<b>附录</b>		<b>438</b>
附录 1	金属材料的密度、比热容和导热系数	438
附录 2	保温、建筑及其它材料的密度和导热系数	441
附录 3	几种保温、耐火材料的导热系数与温度的关系	442
附录 4	干空气的热物理性质 ( $p=1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$ )	442
附录 5	在大气压力 ( $p=1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$ ) 下烟气的热物理性质	443

附录 6	饱和水的热物理性质	441
附录 7	干饱和水蒸气的热物理性质	446
附录 8	液态金属的热物理性质	448
附录 9	几种饱和液体的热物理性质	449
附录 10	在大气压力( $p=1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ )下过热水蒸气的热物理性质	450
附录 11	气体和蒸气在空气中的质扩散率( $25^\circ\text{C}, 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ )	450
附录 12	双曲线函数值	451
附录 13	选摘的变相贝塞尔函数值	452
附录 14	电子计算机程序选编	453
<b>索引</b>		<b>465</b>
<b>外文人名对照表</b>		<b>472</b>
<b>习题答案</b>		<b>473</b>

# 第一章 绪 论

传热学是研究热量传递规律的科学。

凡是有温度差的地方，就有热量自发地从高温物体传向低温物体。由于自然界和生产技术中几乎到处存在着温度差，所以热量传递就成为自然界和生产技术中一种非常普遍的现象。

传热学在生产技术领域的许多部门应用十分广泛。在能源、化工、冶金、动力机械等部门中广泛采用的换热器和专用换热设备都以传递热量为其主要功能，它们的设计、制造、运行和提高经济效益都要大量地运用传热学的知识。此外，电气工业中部件温升的控制，电子工业中电子元件的散热，机械制造工艺中工件的加热、冷却、熔化、凝固过程中温度场的测算和控制，建筑工程中建筑物的隔热、保温、供热和空调等建筑热工问题的处理，以及农业、生物、环境保护和气象等部门中的热量传递问题，无一不需要用到传热学的知识。还值得指出，传热学的应用不仅范围广泛，而且有时还起着关键的作用，例如，控制机床热变形是达到高级加工精度的先决条件，把热流密度控制在“烧毁点”之内是原子能反应堆安全工作的保障，而耐超高温隔热板的研制成功解决了飞行器重返大气层而不致熔化的难题等。近几十年来，现代科学技术的进步，特别是高参数大容量发电机组的发展，原子能、太阳能、地热能等新能源的开发利用，航天技术的飞速发展，超导和大规模集成电路等一系列现代科学技术的巨大进步推动了传热学学科的迅速发展。它的理论体系日趋完善，内容不断充实，已经成为现代技术科学中充满活力的主要基础学科之一。

就物体温度与时间的依变关系而言，热量传递过程可区分为稳态过程（又称定常过程）与非稳态过程（又称非定常过程）两大类。凡是物体中各点温度不随时间而改变的热传递过程均称为稳态热传递过程，反之则称为非稳态热传递过程。各种热力设备在持续不变的工况下运行时的热传递过程属于稳态过程，而在起动、停机、变工况时所经历的热传递过程则为非稳态过程。各种热力设备的设计往往是以额定功率下持续不变工况的运行作为依据的，所以稳态过程的分析讨论在本书中占有大量篇幅。本书除第三章讨论非稳态导热问题外，其它各章主要讨论稳态热传递过程。考虑到质量传递与热量传递有类似之处，为了拓宽传递过程的视野，触类旁通，并加深理解，在第八章中讨论了传质过程的基本规律和计算。

采用高等数学方法分析热传递过程，总要假定所研究的对象是一个连续体，即认为所研究的对象内各点上的温度、密度、速度等都是空间坐标的连续函数。实际上，只要被研究物体的几何尺度远大于分子的平均自由行程，连续体的假定即可成立<sup>[1]①</sup>。就本书涉及的内容而言，连续体的假定都是成立的。

在这一章里将扼要介绍热量传递的三种基本方式，及由这些方式组合而成的传热过程，并给出它们各自最基本的计算关系式。其目的在于沟通与普通物理学基础的联系，使读者对传热学构成的概貌有所了解，为以后分章深入学习创造条件。本书采用我国法定计量单位。为使读者掌握我国法定计量单位与目前仍有参考价值的工程单位之间的换算关系，本章末对单位制及其换算作了必要的说明。

---

① 方括号中的数字表示本章中与所述问题有关的参考文献的编号。

## 1-1 热量传递的三种基本方式

热量传递有三种基本方式：导热、对流和热辐射。

### 1. 导热

物体各部分之间不发生相对位移时，依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而产生的热量传递称为导热（或称热传导）。例如，物体内部热量从温度较高的部分传递到温度较低的部分，以及温度较高的物体把热量传递给与之接触的温度较低的另一物体都是导热现象。

从微观角度来看，气体、液体、导电固体和非导电固体的导热机理是有所不同的。①气体中，导热是气体分子不规则热运动时相互碰撞的结果。众所周知，气体的温度越高，其分子的运动动能越大。不同能量水平的分子相互碰撞的结果，使热量从高温处传到低温处。②导电固体中有相当多的自由电子，它们在晶格之间象气体分子那样运动。自由电子的运动在导电固体的导热中起着主要作用。③在非导电固体中，导热是通过晶格结构的振动，即原子、分子在其平衡位置附近的振动来实现的。晶格结构振动的传递在文献中常称为弹性波④。⑤至于液体中的导热机理，还存在着不同的观点。有一种观点认为定性上类似于气体，只是情况更复杂，因为液体分子间的距离比较近，分子间的作用力对碰撞过程的影响远比气体大<sup>[3]</sup>。另一种观点则认为液体的导热机理类似于非导电固体，主要靠弹性波的作用<sup>[4,5]</sup>。导热微观机理的进一步论述已超出本书的范围，有兴趣的读者可参阅热物性学专著<sup>[6]</sup>。本书以后的论述仅限于导热现象的宏观规律。

通过对实践经验的提炼，导热现象的规律已经总结为傅里叶定律。考察如图 1-1 所示的两个表面均维持均匀温度的平板的导



热。这是个一维导热问题。对于  $x$  方向上任意一个厚度为  $dx$  的微元层来说, 根据傅里叶定律, 单位时间内通过该层的导热热量, 与当地的温度变化率及平板面积  $F$  成正比, 即

$$Q = -\lambda F \frac{dt}{dx} \quad \text{W} \quad (1-1)$$

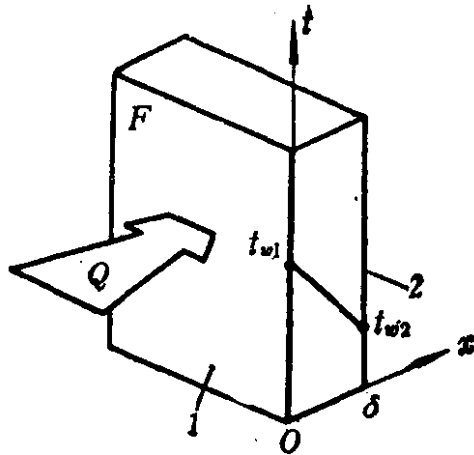


图 1-1 通过平板的一维导热

式中,  $\lambda$  是比例系数, 称为导热系数(又称热导率), 负号表示热量传递的方向同温度升高的方向相反。

单位时间内通过某一给定面积的热量称为热流量, 记为  $Q$ , 单位为  $W$ 。单位时间内通过单位面积的热量称为热流密度(或称热通量), 记为  $q$ , 单位为  $W/m^2$ 。傅里叶定律按热流密度形式表示为

$$q = \frac{Q}{F} = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad \text{W}/\text{m}^2 \quad (1-2)$$

傅里叶定律又称导热基本定律。式(1-1)和(1-2)是一维稳态导热时傅里叶定律的数学表达式。傅里叶定律更完备的向量表达式将在第二章中讨论。

导热系数是表征材料导热性能优劣的参数, 其单位为  $W/(m \cdot ^\circ C)$ 。不同材料的导热系数值不同, 即使是同一种材料, 导热系数值还与温度有关, 在第二章中将作进一步讨论。这里仅指出: 金属材料的导热系数最高, 良导体, 如银和铜, 也是良导热体; 液体次之; 气体最小。

## 2. 对流

对流是指流体各部分之间发生相对位移, 冷热流体相互掺混所引起的热量传递方式。对流仅能发生在流体中, 而且必然伴随有导热现象。工程上常遇到的不是单纯对流方式, 而是流体流过