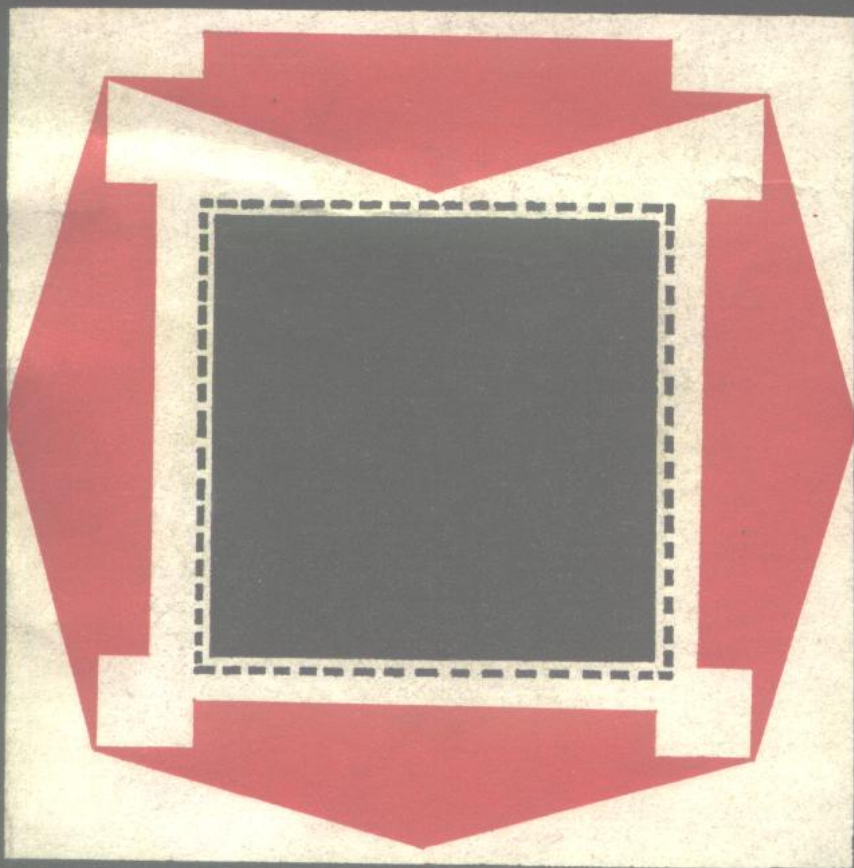


〔美〕 杰姆斯·苏赛克 著

传热学

人民教育出版社

上册



72.54
261

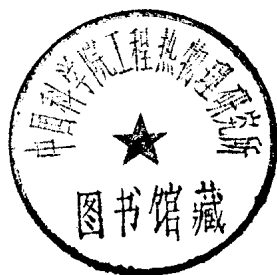
传 热 学

上 册

〔美〕杰姆斯·苏赛克 著

俞佐平 裘烈钧

李承欧 孔 珑 蔡国琰 孙云凤 编译



人民教育出版社

√100428

内 容 提 要

本书是根据美国缅因州大学 (University of Maine) 机械工程系副教授 杰姆斯·苏赛克 (James Sucec) 所著《传热学》(Heat Transfer) 一书 1975 年版编译的。

原书是根据一学期的传热学讲课笔记整理而成的。本书不同于普通的传热学教科书, 具有独特的风格。书中除对传热学的理论和公式作单独的介绍外, 还把一部分理论和公式放在例题中叙述。全书共有例题 511 题, 补充题 627 题 (部分有答案)。例题大都取材于日常生活和工程实际, 有一定的实用价值。例题的内容逐步深入, 并有详尽的解答, 适合于自学。

全书共有八章, 分上、下两册出版。上册包括: 传热学导论、稳态导热、非稳态导热及辐射换热; 下册包括: 受迫对流换热、自然对流换热、具有相变时的换热、热传递中的其它专题、附录和索引。本书已将原书中的英制单位制改为国际单位制 (SI), 所用符号也已改为我国通用符号。

本书可作为高等学校工科动力机械、航空和航天工程、建筑、热物理等专业的教学参考书, 也可供有关科技人员参考。

传 热 学

上 册

【美】杰姆斯·苏赛克 著

俞佐平 袁烈钧

编译

李承欧 孔 珑 蔡国琰 孙云凤

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 16.75 字数 400,000

1980 年 12 月第 1 版 1981 年 11 月第 1 次印刷

印数 00,001—8,000

书号 15012·0298 定价 1.65 元

编 译 说 明

本书系根据美国缅因州大学(University of Maine)机械工程系副教授杰姆斯·苏赛克 (James Sucec) 所著《传热学》(Heat Transfer)一书 1975 年版编译的。

全书共分八章,每章均有例题和补充题,共有例题511题,补充题 627 题。编译本分上、下两册出版。上册四章,即传热学导论、稳态导热、非稳态导热和辐射换热;下册四章,即受迫对流换热、自然对流换热、具有相变时的换热和热传递中的其它专题。书末列有附录。

本书既不同于通常的教科书,又区别于一般的习题集,具有独特的风格。全书中,在叙述一段基本理论之后,随即列举大量例题,以阐明这些理论的具体应用。有些理论知识是在例题中通过分析、求解某一实际问题的方式予以介绍的。例题的内容逐步深入、取材广泛,有很大的实用性。本书还在一些例题的后边,更进一步叙述内容较深的有关理论,以达到循序渐进、更上一层楼的目的。因此,本书具有所谓“逐步求解”的特点。编译者认为该书理论联系实际较好,是一本比较理想的传热学方面的教学参考书,对于有关专业(包括食品加工以及宇航工程等)的科研和工程技术人员更有参考价值。

编译中考虑到目前国内的具体情况,把原书所用的符号全部改为我国通用的符号,并将英制单位制改为国际单位制(SI)。由于采用了国际单位制,因此对附录中的部分物性表作了相应的改动。另外,在编译过程中,对原书中某些错印或不易理解之处加以改正和注释。

参加本书翻译的有李承欧(第一、二、八章)、裴烈钧(第三章)、

孙云凤(第四章)、孔珑、蔡国琰(第五章)、俞佐平(第六、七章)。俞佐平和裘烈钧分工校核译稿,最后由俞佐平作全书的统稿并更换为国际单位制。解焕民参与编译,并协助做了许多文字工作。

限于水平,编译错误和不当之处在所难免,请读者批评指正。

编 译 者

1980. 10.

序

本书系根据三年级或高年级工科学生一个学期的传热学教程的讲课笔记整理而成,它是作为该课程的完整教材来编排的,同时也可作为复习用教材或其它传热学课本的补充教材。本书的格式也有助于从事工业实践的工程师们作为参考书使用,或作为复习传热学的指导书。

对于一本传热学教材所需要的全部理论和公式,本书是使之和例题一起进行阐述和介绍的。一些理论章节和引入的新资料或扩大已引入的新资料的一些例题,都用灰色网纹底印刷*。此外,对一些采用较多的关系式并表明用数值解的方法求解实际传热问题的例题,也用灰色网纹底印刷。本书包括传热学课程中所需要的全部图线、表格和热物理性质的数据。

作为复习指导书或各种传热学课本的补充教材,本书不但提供了 500 多道例题的详尽解答,而且也提出了 600 多道补充题,以供读者练习。

假定本书的读者已掌握了热力学、微积分、微分方程和流体力学等先期课程的基本知识。不过,在第五章的开始部分复习了流体力学,这对学习对流换热是必要的;在第二章和第三章中还利用分离变量法对一些有关稳态导热和非稳态导热的偏微分方程给出了详尽的解。

在第一章中,除了对热传递的三种方式及其机理、在这些热传递方式中决定能量传递率的定律进行一般的叙述外,作者也尽量

* 编译本未采用。

强调了在热传递过程中应用能量守恒定律的重要性。这个定律采用“传递率”的形式,应用于控制表面固定于空间中的控制体。在推导一些基本方程和求解一些重要的实际传热问题中,能量守恒定律的运用贯穿全书,既用于微元控制体,也用于一维或多维的有限范围。因为作者认为,对于学习传热学的学生来说,十分熟悉能量方程式并能很有把握地将其运用于他所遇到的任何问题是十分重要的。在第一章中,有相当的篇幅用于说明该方程式的应用实例。

对于准一维导热问题(如肋片),在第二章中作了仔细而广泛地论述,其中包括必须满足的判据的推导和使用,以使准一维导热近似解能得到工程上可以接受的精确度。

在非稳态导热的一章中,特别强调了集总参数法。因为,当有关的毕渥准则或其它准则被满足时,能在很大的范围内用这种方法分析复杂的非稳态导热问题。

为了有效而方便地讨论灰体和黑体表面辐射换热的全部光谱,对反射法、网络法和杰勃哈特(Gebhart)的吸收系数法等都作了介绍。因此,工程师能选择最适宜的方法来处理比较简单的单表面、双表面以及更复杂的多表面的辐射换热问题。

用于受迫对流换热的所谓“积分法”,本书也作了详尽说明。在第五章中,介绍了解释这些方法为什么能经常应用得很好的物理和数学原理,以及用这些方法选择分布函数和这些函数所满足的条件机理。

在第五章中,也将各种自由流速度的变化及各种壁面温度(随时间而变化)对层流和紊流受迫对流换热的影响,作为阿姆勃劳克(Ambrok)方法的结果近似地给予考虑。

根据我的经验,本书前七章中的大部分内容和第八章中的部分可选择内容已能满足三年级或高年级一个学期传热学课程的需要。

对帮助我的学生以及阅读原稿的爱德华K. 马修斯博士致以谢意。对库珀协会的沃雷斯·希尼茨博士审阅原稿并提出建设性意见表示感谢。西门和舒斯特的工作人员,特别是丽厄·尼科尔斯对本书的出版给予了帮助。

最后, 我感谢初稿的打字人员里查德·艾莫里克女士, 朱迪·波莉奥特女士,感谢我妻子朱迪思的经常支持和协助打字。

杰姆斯·苏赛克

奥罗诺, 缅因

主要符号表(上册)

本书用符号

A	面积 m^2
a	热扩散率 m^2/s
b	宽度 m
c_p	比热容 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
D	直径 m
E	辐射力 W/m^2
F	角系数
G	投射辐射 W/m^2
I	辐射强度 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr})$
J	有效辐射 W/m^2
L	长度 m
m	质量 kg
P	周长 m
Q	热流量 W
q	热流密度 W/m^2
$\dot{q}$	内热源强度 W/m^3
R (或 r)	半径 m
T	温度 $\text{K}; ^\circ\text{C}$
T_f	流体温度 $\text{K}; ^\circ\text{C}$
T_w	壁面温度 $\text{K}; ^\circ\text{C}$
V	体积 m^3
v	速度 m/s
z	深度 m
α	对流换热系数 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; 吸收率
δ	厚度 m
ϵ	黑度
θ	过剩温度 $\text{K}; ^\circ\text{C}$
λ	导热系数 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; 波长 μ
ρ	密度 kg/m^3 ; 反射率
σ_b	斯蒂芬-玻尔兹曼常数 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$
τ	时间 h, s ; 透射率
ω	立体角 sr

原书用符号

A
a
W
c_p
D
W
F
G
I
J
L
m
P
q
q''
q'''
R (或 r)
T
T_∞
T
V
v
z
$h; \alpha$
L
ϵ
θ
k
ρ
σ
τ
ω

上册目录

主要符号表(上册).....	viii
第一章 传热学导论	1
1.1 引言.....	1
1.2 热传递的方式和基本定律.....	2
1.2a 导热.....	2
1.2b 对流.....	10
1.2c 辐射.....	13
1.3 能量守恒定律.....	15
1.4 补充题.....	33
第二章 稳态导热	40
2.1 通用导热方程式.....	40
2.2 无内热源的一维稳态导热.....	46
2.3 有内热源的一维稳态导热.....	71
2.4 准一维稳态导热.....	84
2.5 二维和三维稳态导热.....	124
2.6 多维导热问题的精确分析解.....	134
2.7 稳态导热中的有限差分法.....	157
2.7a 有限差分方程式的解.....	167
2.8 补充题.....	202
参考文献.....	229
第三章 非稳态导热	231
3.1 引言.....	231
3.2 精确分析解和诺模图.....	232
3.2a 半无限大平板的非稳态导热.....	262
3.2b 二维和三维的非稳态导热.....	268
3.3 非稳态导热分析的集总参数法.....	291
3.4 非稳态导热中的有限差分法.....	327
3.4a 有限差分方程式的稳定性.....	336

3.4 b 稳定性判据的含义	340
3.5 补充题	366
参考文献	388
第四章 辐射换热	390
4.1 引言	390
4.2 热辐射的概念	390
4.2 a 辐射能按波长的分布	393
4.2 b 辐射强度	410
4.2 c 角系数	414
4.2 d 角系数数值的计算	419
4.3 净辐射损失的计算反射法	434
4.3 a 辐射平衡中的表面	439
4.3 b 用于灰体表面的反射法	446
4.4 净辐射损失的计算网络法	465
4.5 净辐射损失的计算杰勃哈特(Gebhart)法	490
4.6 非灰体表面的净辐射损失	503
4.7 气体辐射	504
4.8 辐射表面的换热系数	506
4.9 补充题	507
参考文献	525

第一章 传热学导论

1.1 引言

传热学是一门计算物体内部温度分布的科学, 这种温度分布是空间坐标和时间的函数。传热学也能计算通过所研究的表面的传热量, 它是由表面上的温度梯度以及不同表面之间的温差所引起的。喷气发动机透平叶片的热应力和确定换热器尺寸的计算是说明应用传热学原理重要性的两个例子。因为叶片的热应力决定于温度分布, 而换热器需要在被其器壁隔开的两种流体之间传递给定的传热量。本书列举了很多的例子, 以介绍解决热传递问题的一些实际方法。

传热学和经典热力学的区别在于: 热力学涉及到温度的含义, 虽然能由稳定流动能量方程式求出传热量, 但是, 热力学不能确定实际的温度分布(在全部时间及所研究的范围内, 各点温度都相同的特殊情况除外)。例如, 在涉及换热器的问题中, 采用热力学方法不能计算换热器的两种流体之间在特定的传热量下所需要的传热面积, 但是用传热学的方法却能加以确定。为了进一步说明传热学和热力学之间的区别, 设想从一温度较高的热处理炉中取出一根金属棒, 并把它放在大车间的热绝缘垫上进行冷却。从经典热力学得到的唯一的常识是, 在热平衡时(即经过一段时间以后)棒的温度将等于车间内周围空气的温度。另一方面, 传热学的方法却能计算棒内的温度, 此温度是时间和棒内位置的函数。也就是说, 对于所研究的金属棒, 传热学能够计算其内部各点在任何时刻(在达到热平衡之前, 温度是逐点变化的)和任何位置(如处于

最高温度的棒的中心点)的温度,也能计算在任何时刻棒的全部或任何部分表面的瞬时传热量,甚至计算该棒在一段时间内损失的总内能,而不象热力学那样,只能简单地计算始态和终态之间的内能变化。

1.2 热传递的方式和基本定律

1.2a 导 热

热传递一般有三种不同的方式,即导热、对流和辐射。导热是由物质内部的温度梯度引起的。通常认为导热是不透明固体中唯一的热传递方式。图 1.1 表示一根除左右两端外周围为理想热绝缘的固体棒,两端面温度各为 T_{w1} 和 T_{w2} , 且 T_{w1} 大于 T_{w2} 。实验表明,如果棒的状态不随时间而变,棒内又没有热源,则从左端面到右端面有一个净传热量,其单位用 W 表示。这就是所说的导热,且净传热量的方向遵循热力学第二定律。

导热的真实机理,即发生热量传递的方式是复杂的,还了解得不完全。简单地说,固体导热是由于相邻分子发生的碰撞和自由电子迁移所引起的能量传递;气体导热是由连续而不规则运动的气体分子相互碰撞所引起的。

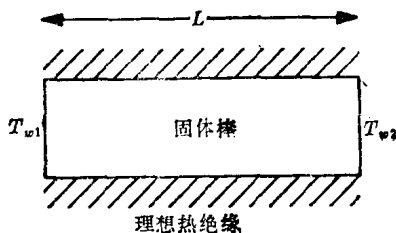


图 1.1 由温差 $T_{w1}-T_{w2}$ 引起的通过固体棒的导热

如果用图 1.1 所示的棒在稳定状态下进行实验（即棒内任何一点的温度或其它参量均不随时间而变），则发现导热量 Q [W] 与垂直于热流的横截面积 A [m²] 成正比，与温差 $T_{w1} - T_{w2}$ [K 或 °C] 成正比，而与热流方向上的路程长度 L [m] 成反比，比例常数 λ 称为物质的导热系数，其单位为 W/(m·K)。

由上述实验所得导热量 Q 的数学表达式称为傅里叶 (Fourier) 简化导热定律，可写为

$$Q = \lambda A \frac{T_{w1} - T_{w2}}{L} \quad \text{W} \quad (1.1)$$

对于各向同性(即性质没有方向性)的均匀物质来说，式(1.1)中的导热系数是物质的一个热力特性，并且是压力和温度等其它热力特性的函数。固体的导热系数受压力的影响很小，不接近临界点的液体也是这样。另外，在接近标准大气压力下大多数气体的导热系数基本上与压力无关。所以，附录 A 中所选录的导热系数都不是压力的函数，而仅指出 λ 值在特定温度范围内的变化。表 1.1 是从附录 A 中选录的一些 λ 值。

从表 1.1 可看出，属于气体的空气具有最小的导热系数 λ ，而金属银的 λ 值最大，银的 λ 值大约是空气 λ 值的 17000 倍。可见，实际物质的导热系数在一个很大的范围内变化。空气是气体的典型，而气体是导热系数 λ 值最小的一类物质；液体的 λ 值往往要比气体的大一些；非金属的 λ 值又往往大于液体的 λ 值（虽然其中有一些重叠，例如，把石棉和水相比就很明显）。比较起来，金属和合金的导热系数最大。金属和合金具有独特的导热机理，即自由电子或价电子的迁移或扩散，所以，相对于非金属固体来说，可以认为这是金属固体具有较大导热系数的理由。

对于气体和非金属固体，导热系数 λ 值随温度升高而增大。大

表 1.1 一些物质的导热系数 λ (其它物质可参阅附录 A)

物 质	温度 t [$^{\circ}\text{C}$]	导热系数 λ [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{k})$]
气体		
空气	27	0.02624
	127	0.03365
	327	0.04659
液体		
发动机油(未用过的)	0	0.147
	100	0.137
水(饱和的)	0	0.552
	100	0.680
	300	0.540
非金属		
石棉	0	0.151
	200	0.208
干砖	20	0.38~0.52
金属和合金		
碳钢($C \approx 0.5\%$)	0	55
	100	52
	300	45
纯铝	0	202
	100	206
	300	228
纯铜	0	386
	100	379
	300	369
银(99.9%)	0	410

多数液体的 λ 值则往往随温度升高而减小, 但水却是明显的例外。金属和合金的 λ 值, 其特性是多变的; 大多数纯金属的 λ 值随温度升高而减小, 而合金的 λ 值, 随温度的升高是增大还是减小取决于其种类。

热流密度 q 是单位面积的热流量 Q/A , 表示为

$$\frac{Q}{A} = q = \lambda \frac{T_{w1} - T_{w2}}{L} \quad (1.2)$$

对于多维导热或温度随时间而变的情况, 需要用式(1.2)的更一般的形式。实验表明, 对各向同性的固体介质来说, 式(1.2)可推广成傅里叶导热定律, 并表示为

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1.3)$$

式中, n 为所研究方向的坐标; 负号是为了使单位面积的导热量为正值而加的, 因为当热量在 n 的正方向传递时, 温度导数 $\frac{\partial T}{\partial n}$ 为负值。

把式(1.3)推广到各向异性(即物性有方向性)的固体, 则为

$$q = -\lambda \nabla T$$

式中, q 为热流密度矢量; ∇T 为标量温度分布的梯度, 也是矢量; λ 为导热系数张量, 它将温度梯度矢量的负号反映于热流密度矢量中。

例 1.1 小型加热室的竖壁, 高 0.6m, 长 1m, 厚 0.05m。已知内壁温度为 260°C, 外壁温度为 40°C, 室壁材料的导热系数为 0.18W/(m·K), 并处于稳定状态。试计算: (a) 通过室壁的热流量; (b) 通过室壁的热流密度。

解 实际情况的简图如图 1.2 所示。

(a) 如果假设边缘是绝热的, 则因处于无内热源的稳定状态, 所以傅里叶简化导热定律即式(1.1)对本情况是适用的。因为 $\lambda = 0.18\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $A = 0.6 \times 1 = 0.6\text{m}^2$, $T_{w1} = 260^\circ\text{C}$, $T_{w2} = 40^\circ\text{C}$, 厚度 $\delta = 0.05\text{m}$, 由式(1.1), 通过墙壁的热流量为

$$Q = \lambda A \frac{T_{w1} - T_{w2}}{\delta} = 0.18 \times 0.6 \times \frac{260 - 40}{0.05} = 475.2\text{W}$$

(b) 热流密度为

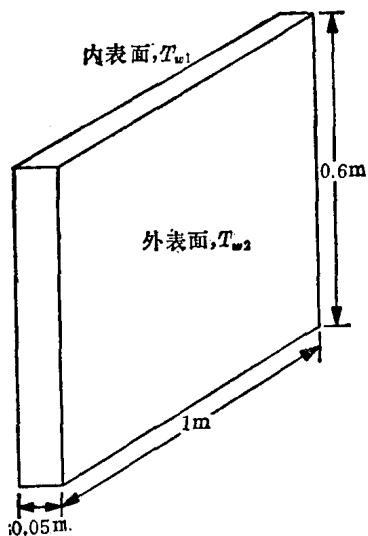


图 1.2 例 1.1 的加热室墙壁

$$\frac{Q}{A} = q = \frac{475.2}{0.6} = 792 \text{ W/m}^2$$

从上题叙述的情况来看, 可以推测: 热量到达内壁面是由于加热室内空气的自然对流和加热室内热源 (如燃烧器或电阻加热器) 的辐射; 热流离开外壁面是由于与周围空气的对流和与其它固体表面的辐射换热。

例 1.2 一块厚 5mm 的大平板材料用来测定该材料的导热系数。在稳定状态下, 当平板两表面间保持 40°C 的温差时, 测得靠近任一表面中心 (此处忽略边缘效应并近似为一维导热) 的单位面积的热流量为 9500 W/m^2 。试确定此材料的导热系数。

解 因为所述的过程是无内热源的一维稳态导热, 所以可用傅里叶简化导热定律, 即式 (1.2) 的形式来计算导热系数 λ 。已知 $q = 9500 \text{ W/m}^2$, $T_{w1} - T_{w2} = 40^\circ\text{C}$, $\delta = 5 \text{ mm} = 0.005 \text{ m}$, 代入式

$$q = \lambda \frac{T_{w1} - T_{w2}}{\delta} \quad [1.2]$$