

高等专科学校教材

传热学

CHUAN RE XUE

苏祖恩 编 吴清金 主审

大连海运学院出版社



内 容 提 要

本书主要内容为导热、对流换热原理、对流换热的分析和计算、辐射换热，以及稳态传热过程与换热器等。

全书采用国际单位制。

本书可作为高等专科学校轮机管理专业（30~40学时）的教科书。也可供海运职业大学、中等专业学校轮机管理专业或其它动力类专业的师生及轮机管理人员参考。

高等专科学校教材

传 热 学

苏祖恩编 吴清金主审



大连海运学院出版社出版（大连凌水桥）

高校联合服务中心发行 大连海运学院出版社印刷厂印刷



责任编辑：陈崇铨 封面设计：王艳

开本 787×1092 1/32 印张9.5 字数160千字

1989年2月第1版 1989年2月第1次印刷 印数0001—2000

ISBN 7-5632-0023-1/G·8 定价1.70元

前 言

本书是根据交通部高等专科学校海洋船舶轮机管理专业《传热学》教学大纲编写的，可作为轮管专科30~40学时的教科书。

本书着重讨论海洋船舶机舱的热力设备中热能传递的规律和方法，并分析提高转化效率的途径，以及为了工程实际的需要，如何削弱换热以减少热损失或改善劳动条件，从而为学习轮机管理专业课程打下基础。书中对基本概念、定理，多结合工程实际进行较详细的讨论，使读者能从中建立起明确的概念，较好地掌握基本原理，并进一步培养对工程传热问题进行分析的能力。书中每章除例题外还附有大量思考题及习题，以帮助读者增强分析问题及解决问题的能力。

全书采用国际单位制。

本书初稿承西安交通大学热工教研室吴清金副教授主审、赵冠春副教授参加审阅，并提出不少宝贵意见，谨在此表示感谢。

鉴于编者的理论水平及实践经验有限，加之编写时间仓促，书中定有不妥之处，恳切希望读者批评指正。

编 者

目 录

绪论	(1)
量纲与单位	(3)
第一章 导热	(9)
第一节 导热的基本概念和定律	(9)
第二节 导热微分方程式	(15)
第三节 稳态导热	(23)
第四节 复杂形状物体的稳态导热	(41)
第五节 非稳态导热的概念	(49)
思考题	(53)
习 题	(54)
第二章 对流换热原理	(56)
第一节 热对流和对流换热	(56)
第二节 边界层概念	(58)
第三节 影响对流换热的因素	(67)
第四节 放热系数和对流换热微分方程式	(72)
第五节 求解对流换热的方法简述	(74)
第六节 相似理论基础	(79)
第七节 量纲分析法求对流换热准则方程式	(89)
第八节 实验数据整理中的几个问题	(94)
思考题	(97)
习 题	(98)
第三章 对流换热的分析和计算	(99)

第一节	流体自由流动的放热·····	(99)
第二节	流体在管道内受迫流动时的放热·····	(107)
第三节	流体外绕壁面作受迫流动时的放热·····	(122)
第四节	蒸气凝结时的放热·····	(136)
第五节	液体的沸腾放热·····	(143)
思考题	·····	(149)
习 题	·····	(150)
第四章	辐射换热 ·····	(152)
第一节	热辐射的基本概念·····	(152)
第二节	热辐射的基本定律·····	(159)
第三节	灰体的有效辐射和辐射换热量·····	(168)
第四节	辐射换热的计算·····	(170)
第五节	遮热板原理·····	(176)
第六节	气体的辐射和吸收特性·····	(184)
思考题	·····	(187)
习 题	：·····	(188)
第五章	稳态传热过程与换热器 ·····	(190)
第一节	复合换热·····	(190)
第二节	传热过程的分析 and 计算·····	(192)
第三节	换热器概述·····	(213)
第四节	间壁式换热器的类型及其构造特点·····	(214)
第五节	间壁式换热器的热计算原理·····	(221)
第六节	增强传热·····	(245)
第七节	换热器的技术经济指标·····	(251)
思考题	·····	(254)
习 题	·····	(255)

附 录	(258)
附表 I 单位换算表格	(258)
附表 II F_{12} 饱和蒸气表	(260)
附表 III 气体的物性参数	(266)
附表 IV 液体的热物理性质	(271)
附表 V 固体材料的热物理性质	(276)
附表 VI 液态金属的热物理性质	(280)
附表 VII 饱和水的热物理性质	(282)
附表 VIII 各种不同材料在表面法线方向上的辐射黑度	(284)
附表 IX 水蒸汽在饱和线上的物性参数	(286)
附表 X 不同表面对太阳辐射和一般热辐射的吸收率	(288)
附表 XI 晴天在纬度 40° 处的太阳辐射力	(289)
附表 XII 双曲线函数值	(290)

绪 论

传热学是研究具有不同温度的物体间能量传播和计算物体内部温度分布的科学。这种传播的能量称为热能，这种温度分布是空间坐标和时间的函数。传热学不仅论述热能为什么能传播，而且预示在具体条件下，热能将以多大的速率传播以及任何时刻实际的温度分布。这就是它与热力学不同之处。例如，热力学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）。又如在换热器的问题中，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，用传热学方法能加以确定。考虑水桶内的热钢棒的冷却，热力学可以预算出钢棒——水这一体系最终的平衡温度，但不能告诉我们要用多长时间才能达到平衡状态，或者在达到平衡状态前某一时刻钢棒内任何位置的温度是多少。而应用传热学可以预计出钢棒和水的温度随时间的变化关系。燃气轮机叶片热应力的计算和换热器尺寸的确定是应用传热学原理的两个典型例子。因为叶片的热应力决定于温度分布，而换热器需要在被器壁隔开的两种流体之间传递给定的传热量。因此，传热学的研究对象是热能传递的规律和计算方法。在现代科学技术里，传热学同传质学、工程热力学、气动热力学、燃烧学等共同构成工程热物理这门技术科学。

在自然界与工程技术领域中，由于自然或人为的原因，

物体普遍存在温度差。热力学第二定律指出，热总是自发地从高温处传向低温处。所以，热传递过程是自然界与各个技术领域中一种普遍的自然现象。无论在能源、宇航、动力机械、化工、制冷、建筑、冶金、机械、制造、电工及电子技术，以及农业、生物、环境控制与保护等部门中都有许多传热问题。特别是能源、宇航、动力机械、化工、制冷等部门同传热学的关系尤为密切。这些部门中的许多设备在设计、运行过程中大量地应用着传热学所总结出来的规律。同时，现代科学技术的飞速发展给传热学提出了新的研究课题，提供了新的研究手段，使传热学的研究范围不断扩大；研究方法不断更新，理论分析不断完善。

传热学的研究方法和工程热力学一样，也是宏观的方法。不过，传热学还比较年轻，没有热力学理论那样完整，它的基础是归纳无数经验所得到的导热，对流换热和热辐射的基本定律。所以，对形形色色的实际过程要剖析为基本方式的具体组合来处理，这是解决实际传热问题的基本方法。

学习和掌握了热传递过程的理论知识和实验技能，就能更有效地使用增强或减弱传热的措施来解决工程实际问题。例如在柴油机船舶动力装置中，对柴油机气缸、活塞等高温部件，我们用低温的淡水进行冷却，以免降低材料的机械强度和破坏气缸的润滑。对机舱中所采用的各种换热器则要求增强传热，使设备结构紧凑。相反，在蒸汽动力装置中，蒸汽管道上外敷绝热材料为了保存低温的液化气体而采用保温作用良好的容器壁等，则是利用热绝缘以减弱传热的措施。

传热分为三种基本形式：导热、对流和辐射。本书着重

定性地说明这三种传热形式的机理，分析每一种传热过程的本质，并适当地介绍这三类传热形式的计算方法及计算公式。由于实际传热过程的机理很复杂，它是导热、对流换热、辐射换热这三种基本方式的具体组合。讲解这些错综复杂的种种情况乃是专门的传热学书籍和一些专业课程的任务。限于本课程的性质，只能择要介绍导热、对流换热和辐射换热的基本知识，最后以换热器的传热计算作为实际应用的示例进行简单总结。

量 纲 与 单 位

人们必须注意，不要混淆单位和量纲这两个术语的意义。量纲是确定一个具体系统的状态或性质的物理变量。例如，杆的长度是杆的一种量纲，气体的温度是气体的一种热力学量纲。因此，量纲也可以说是给予物理量的一种名称，如长度、温度、速度等。传热学中常用的基本量纲为长度 $[L]$ 、质量 $[M]$ 、时间 $[\tau]$ 和温度 $[T]$ 等。其它物理量的量纲，可由基本量纲根据一定的物理方程导出，即为导出量纲。例如：由牛顿第二定律 $F = ma$ ，因质量 m 和加速度 a 的量纲各为 $[M]$ 和 $[L\tau^{-2}]$ ，故可得 F 的导出量纲为 $[LM\tau^{-2}]$ 。又如：能量中的功为力 F 与位移的乘积，故能量的导出量纲为 $[L^2M\tau^{-2}]$ 。

长度 $[L]$ 、质量 $[M]$ 、时间 $[\tau]$ 和温度 $[T]$ 等，在不同的单位制中有不同的度量单位。本书采用国际单位制（SI），以长度、时间、质量、电流强度、温度、物质的量及发光强度这七个物理量作基本量，其相应的基本单位分别为 m （米）、

s (秒)、kg (千克)、A (安)、K (开)、mol (摩)、cd (坎)。在国际单位制中对各种不同形式的能量,例如,力学中的机械能,电学中的电能,热学中的热能均采用同一个单位——J (焦)。

鉴于目前我国还处于从工程单位制向国际单位制过渡的阶段中,为便于阅读工程单位制的资料,下面对这两种单位制的换算关系作一简单的说明。

工程单位制以长度、时间、力作为基本量,针对热学问题又补充温度及热量作为基本量,这五个基本量的常用单位分别是: m、s、kg、 $^{\circ}\text{C}$ 以及 kcal, 在对工程单位制与国际单位制进行换算时要掌握以下要点:

1. 关于时间、长度及温度的单位 两种单位制中时间、长度的常用单位均为 s 及 m, 至于温度, 则国际单位制中的热力学温度 (记为 T) 与工程单位制中的摄氏温度 (记为 t) 之间有下列换算关系

$$T = t + 273.15$$

而温度的间隔两者完全一样, 即 $\Delta T = \Delta t$ 同时, 国际单位制中也允许采用摄氏温度, 因此, 凡是仅由米、秒及温度 ($^{\circ}\text{C}$ 或 K) 为组成单位的物理量其数值在两种单位制中是相同的, 不存在换算问题。属于这类的物理量, 如: 速度——m/s, 面积—— m^2 , 运动粘度—— m^2/s , 体积膨胀系数—— $\frac{1}{\text{K}}$ 或 $\frac{1}{^{\circ}\text{C}}$ 。

2. 关于质量的单位 国际单位制中质量的单位为 kg (千克), 力的单位为 N (牛), 1 牛顿的力能使 1 千克的质量产生 1 m/s^2 的加速度, 工程单位制中以力为基本单位,

1 千克力的大小等于国际单位制中的 1 千克质量在重力加速度为 9.80665m/s^2 的海面上的重量。显然，按牛顿第二定律，工程单位制中的 1 千克力正好是国际单位制中力的单位牛顿的 9.80665 倍。工程单位制中质量的单位是 $\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}$ ，无专门的名称，这一质量在 1 千克力的作用下仅能产生 1m/s^2 的加速度。故其值是国际单位制中质量单位千克的 9.80665 倍。凡是从力、质量、长度、时间这些物理量导出的其它物理量就可按上述关系进行单位换算。例如：

由于工程单位制中 1 千克重 (1kgf) 之物其质量正好是国际单位制中的 1 千克 (1kg)，故国际单位制中的密度（每立方米中的质量）在数值上就等于工程单位制中的重度（每立方米中的重量）。

工程单位制中的压力单位是 kgf/cm^2 ，国际单位制中的一种压力单位是 N/m^2 ，称为帕斯卡（Pascal 简记为 Pa），显然

$$\begin{aligned} 1\text{ kgf/cm}^2 &= 9.80665 \times (100)^2\text{ N/m}^2 \\ &= 98066.5\text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

3. 关于能量单位的换算 国际单位制中能量的单位为焦（记为 J， $1\text{J} = 1\text{N}\cdot\text{m}$ ），功率单位为瓦（记为 W， $1\text{W} = 1\text{J/s}$ ），比它们大 1000 倍的单位分别为千焦（kJ）与千瓦（kW）工程单位制中的 1 大卡折合为 4.1868 千焦。据此，传热学中经常遇到的 kcal/h 这一组合可作如下换算：

$$1\text{kcal/h} = \frac{4.1868 \times 10^3\text{J}}{3600\text{s}} = 1.163\text{J/s} \approx 1.163\text{W}$$

因此，工程单位制中的 Q 、 q 、 λ 、 α 、 k 等物理量各乘以 1.163 即可换算成国际单位制中的相应值。

~ 5 ~

表 0-1 为传热学中常用的一些物理量的量纲和单位。关于国际单位制, 工程单位制和英制单位间的换算关系见附录表 I。

例0-1 某材料的导热系数其工程制单位为 $3.5 \text{ kcal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$, 试换算为国际制单位 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

解 能量单位在工程单位制中为千卡 (kcal), 国际单位制中为焦耳 (J), 而

$$1 \text{ kcal} = 4.1868 \times 10^3 \text{ J}, \quad 1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}.$$

$$1 \text{ kcal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}) = \frac{4.1868 \times 10^3}{3600} = 1.163 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

所以

$$3.5 \text{ kcal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}) = 3.5 \times 1.163 = 4.07 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

例0-2 工程单位制的换热系数计算公式为

$$\alpha = 39 \Delta T^{2.33} p^{0.5} \text{ kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$$

式中 p 为工程大气压 kgf/cm^2 , ΔT 为温差 $^\circ\text{C}$, 试把上式换算为国际单位制的计算公式。

解 按上例, 将 α 值乘系数 1.163, 可得国际单位制的 α 值, 即

$$\alpha = 39 \times 1.163 \Delta T^{2.33} p^{0.5} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

但需注意此时式中 p 的单位仍为工程单位制的 kgf/cm^2 。若式中 p 以 MPa ($1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ N}/\text{m}^2 = 10.19 \text{ kgf}/\text{cm}^2$) 为单位, 则公式尚需作如下换算:

$$\begin{aligned} \alpha &= 39 \times 1.163 \Delta T^{2.33} (10.19 p)^{0.5} \\ &= 144.8 \Delta T^{2.33} p^{0.5} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

表0-1 常用物理量的国际单位制量纲和单位

物理量	定义 方程式	量纲式	单位 代号
长度		[L]	米 m
质量		[M]	千克(公斤) kg
时间		[τ]	秒 s
温度		[T]	开 K
速度	$v = \frac{L}{\tau}$	[Lτ ⁻¹]	米/秒 m/s
力	$F = ma$	[LMτ ⁻²]	牛顿 N
压力	$p = \frac{F}{A}$	[L ⁻¹ Mτ ⁻²]	帕 Pa
密度	$\rho = \frac{M}{V}$	[L ⁻³ M]	公斤/米 ³ kg/m ³
能量 (热量、功量)	$W = FL$	[L ² Mτ ⁻²]	焦耳 J
功率	$P = \frac{W}{\tau}$	[L ² Mτ ⁻³]	瓦 W
比热容	$c = \frac{Q}{m\Delta T}$	[L ² τ ⁻² T ⁻¹]	焦耳/公斤·开 J/(kg·K)

物理量	定义 方程式	量纲式	单位	代号
动力粘度	$\mu = \frac{F\Delta L}{A\Delta v}$	$[L^{-1}M\tau^{-1}]$	帕·秒	Pa·s
运动粘度	$\nu = \frac{\mu}{\rho}$	$[L^2\tau^{-1}]$	米 ² /秒	m ² /s
导热系数	$\lambda = -\frac{Q\delta}{A\Delta T}$	$[LM\tau^{-3}T^{-1}]$	瓦/米·开	W/(m·K)
热扩散率 (导温系数)	$a = \frac{\lambda}{c\rho}$	$[L^2\tau^{-1}]$	米 ² /秒	m ² /s
换热系数	$\alpha = \frac{Q}{A\Delta T}$	$[M\tau^{-3}T^{-1}]$	瓦/米 ² ·开	W/(m ² ·K)
传热系数	$k = \frac{Q}{A\Delta T}$	$[M\tau^{-3}T^{-1}]$	瓦/米 ² ·开	W/(m ² ·K)

习 题

空气在管内流动时，换热系数的经验公式为 $\alpha = 0.1 \frac{w^{0.8}}{D^{0.2}}$ Btu/(ft²·h·°F)。式中的 w 为流速 ft/s， D 为内径 ft。现将换热系数改用国际单位制表示，问经验公式中的系数 0.1 应改为多少？

第一章 导 热

第一节 导热的基本概念和定律

热量从物体中温度较高的部分传递到温度较低的部分，或者从温度较高的物体传递到与之接触的温度较低的另一物体的过程称为热传导（又称导热）。在纯导热过程中，物体各部分之间不发生相对位移，也没有能量形式的转换。

从微观角度看，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。气体的导热机理比较简单。温度表征分子的动能。因而在高温区域的分子速度要比低温区域分子速度高，分子连续地无规则运动，被其它分子碰撞并交换能量和动量。如分子由高温区域向低温区域运动，分子把动能传递到系统的低温部分，并通过碰撞将能量传递给能位较低分子，热量就由高温区传到低温区。液体热传导的机理与气体相似。但是，因为液体分子间距较小，分子力场对分子碰撞过程中的能量交换影响很大，因此，情况要复杂得多。固体以两种形式传导热能，自由电子的迁移和晶格结构的振动（即原子、分子在其平衡位置附近的振动）。对于良好的电导体，有相当数量的自由电子在其晶格结构间运动，正象这些自由电子能传导电能一样，它们也可以将热能由高温区域传输到低温区域。材料的晶格结构也能通过振动传递能量。在非导电的固体中的热传导就是通过晶格结构的振动来实现

的。通常通过晶格振动传递的能量不象电子传递的能量那么大，这就是良好的导体往往都是良好的导热体的原因。例如，铜、铝和银既是良好的导体，也是常见的良好的导热体。近年来的研究结果也有认为液体的导热机理类似于非导电固体，即液体的导热主要是通过晶格结构振动的传递（弹性波）作用。但总的说来，关于热传导过程的微观机理目前仍然不很清楚，本书以后的论述限于导热现象的宏观规律。

固体中的热传递完全取决于导热。液体和气体因具有流动的特性，在它们中的热传递，导热也同样发生，但在某种情况下，例如，在紊流区内，流体内部的导热通常不起主导作用。

为了进一步了解导热过程，必须掌握以下基本概念。

一、温度场

在某一瞬间物体各点温度分布的状况称 温 度 场。如图 1-1a) 所示。确定温度场的目的，除了分析计算内部的热流方向和导热量外，对于高温零件，如柴油机的活塞、排气阀等，更重要的是为了摸清它们的工作情况，找出影响热负荷的因素。不随时间而变的温度场称为稳定温度场，这时物体内部的温度分布仅为空间座标的函数，即

$$t = f(x, y, z)$$

随时间而变的温度场称为不稳定温度场，这时物体内部的温度分布不仅为空间座标的函数，还与时间有关。即温度的分布可表示为：

$$t = f(x, y, z, \tau)$$

如果物体内部的温度在 x, y, z 三个方向都有变化，则称三维温度场。对于二维和一维温度场，稳定时表示为 $t =$

$f(x, y)$ 和 $t = f(x)$, 不稳定时则为 $t = f(x, y, \tau)$ 和 $t = f(x, \tau)$ 。

发生于稳定温度场中的导热为稳态导热, 而在不稳定温度场中所发生的导热为非稳态导热。

二、等温面

同一时刻物体中温度相等的点构成的面称等温面。图 1-1a) 是炉墙的墙角, 若此墙角内外表面各为温度 t_1 及 t_2 , 则墙角内的等温面是一系列曲面, 如图中等温面 t_a 、 t_b 、 t_c 等。与等温面相垂直的线为热流线。必须注意, 物体内部同一点不可能同时具有二个不同的温度, 故不同温度的等温面是不会相交的。

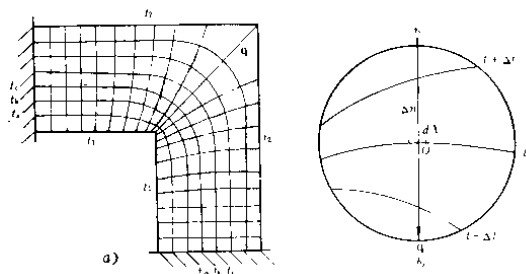


图 1-1 等温面、热流线和温度梯度示意图

三、温度梯度

在等温面的法线方向上, 单位长度的温度变化率, 或者说沿等温面法线方向上的温度增量与法向距离比值的极限称温度梯度。图 1-1b) 是从炉墙的墙角内取出的一小块并放大, 温度为 t 的等温面上 O 点处微元面积 dA 的法线用 n 轴表