



电力科技专著出版资金资助项目

传热传质原理 及其在电力科技中的应用分析

刘鉴民 著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn



传热传质原理 及其在电力科技中的应用分析

刘鉴民 著

电力科技专著出版资金资助项目



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

前言

物系间的温度差异是自然界中存在的普遍现象。哪里有温差，哪里就要产生热量传递，这引起人们对各种传热现象进行研究，认识也随之不断加深。经历过长年的艰辛努力和积累，至今传热传质学已经发展成为一门独立的技术基础学科。

传热传质学的主要研究方法是理论分析与实验研究紧密结合，由理论指导实验，由实验验证理论，并发现新的未知，推动理论更新发展，再行指导新的实验研究。如此不断循环，探求各种传热传质现象本身所遵循的基本规律以及描述过程的数理方程及其定解条件。由于数学本身进展的难度很大，因此目前传热传质学中已有的理论分析大多是经典的，并且发展缓慢，可能求解的问题极为有限。随着电子计算技术的迅猛发展，数值计算在传热传质学领域中得到了广泛的应用，大大地扩展了问题可能求解的范围，有力地弥补了理论分析求解问题的有限性，已经发展成为与理论分析和实验研究并重的重要研究手段。但正确的数值计算的前提是，建有正确的描述过程的数学物理模型，这必然要依赖于正确的理论分析和实验研究。所以，在传热传质学研究中理论分析、实验研究和数值计算三者之间应互为补充，互相依赖，各取所长，不可偏废，从而促进传热传质学不断地向前发展。

鉴于以上分析，作者的初衷是将三者合为一体，根据传热传质学的最新进展，对其理论分析、实验研究和数值计算合并介绍，着重基本概念和方法的阐述，并以较大的篇幅和广度，就传热传质原理在电力科技中的应用作专题分析，以求理论联系实际。

本书的初稿承蒙中国科学院院士、清华大学教授王补宣先生进行了仔细审阅，并提出了许多宝贵意见。作者根据审稿意见对

内容作了重大调整与修改。承上海交通大学孔祥谦教授以其在传热传质学研究方面的深厚功底，以及一贯严谨的治学风范，对本书作了细致严格的全面审阅，提出了很多十分宝贵的意见，为本书增色不少。中国科学院低温技术实验中心郭廷玮研究员、中国科学院工程热物理研究所姚元庆研究员、中国科学院能源研究所王长贵研究员为本书的出版提供了十分宝贵的支持与帮助，全书由上海交通大学能源工程系李云霞高级工程师作了文字修饰与抄写，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，书中定有不少疏漏与错误，望请读者批评指正。

刘肇民

2005年8月

于上海交通大学



前言

第一章 绪论	1
第一节 传热的三种基本方式	1
第二节 传热传质学在电力科技中的重要地位	3
第二章 导热	5
第一节 导热基本方程	5
第二节 一维稳态导热	10
第三节 肋片导热	14
第四节 二维稳态导热	22
第五节 导热形状因子	26
第六节 非稳态导热	27
第三章 对流换热	41
第一节 对流与对流换热的物理基础	41
第二节 对流换热微分方程组	45
第三节 边界层微分方程	51
第四节 边界层积分方程	52
第五节 相似原理和量纲分析	56
第六节 沿平板纵向流动换热	60
第七节 管外绕流换热	68
第八节 管内换热	74
第九节 自然对流换热	79
第四章 沸腾与凝结换热	88
第一节 概述	88

第二节	沸腾换热	88
第三节	圆管内的受迫对流沸腾换热	96
第四节	凝结换热	100
第五章	热辐射及辐射换热	110
第一节	热辐射的基本概念	110
第二节	黑体辐射	111
第三节	灰体与实际物体表面的热辐射性质	116
第四节	黑体间的辐射换热	119
第五节	角系数的解析与计算	121
第六节	灰体间的辐射换热	126
第七节	气体辐射	129
第八节	火焰及微碳粒焰辐射	138
第九节	太阳辐射	139
第六章	复合传热与换热器	143
第一节	复合传热	143
第二节	强化传热设计	147
第三节	隔热的传热设计	148
第四节	换热器	154
第七章	传质	162
第一节	概述	162
第二节	浓度与斐克定律	162
第三节	分子扩散传质	166
第四节	对流扩散传质	168
第五节	伴随产生传热的传质	176
第八章	传热问题的数值解法	182
第一节	概述	182
第二节	数值方法	183
第三节	稳态导热的有限差分解法	192

第四节	非稳态导热的有限差分法	198
第五节	变物性非稳态导热问题的有限差分求解	201
第六节	常物性流体受迫层流换热的数值计算	203
第七节	自然对流换热的数值计算	208
第八节	有限单元法在对流换热数值计算中的应用	211
第九节	组成封闭空间的 n 表面之间的辐射换热计算	215
第十节	非均匀辐射的换热计算	218
第九章	传热学实验研究	221
第一节	概述	221
第二节	常规传热学的稳态实验研究	223
第三节	非稳态传热实验技术	234
第四节	电热模拟实验研究	242
第五节	热流与温度测量	245
第十章	电厂传热传质分析	252
第一节	超临界电站锅炉水冷壁的温度分布	252
第二节	循环流化床的传热问题	259
第三节	核电站反应堆的堆芯传热	268
第四节	大型汽轮机停机自然冷却传热过程分析	282
第五节	电厂锅炉爆管的传热分析	288
第六节	电厂给水加热器内两相流及蒸汽凝结换热特性	290
第七节	自然通风湿式逆流冷却塔的传热与传质分析	296
第八节	水内冷汽轮发电机的绕组冷却和转子温度场的数值 解法分析	301
第九节	输热管道与水箱的隔热设计	306
第十节	热管式空气预热器的环形直肋强化传热	312
第十一节	螺旋肋片管省煤器的加肋强化传热	316
第十二节	中高温双能源太阳能热发电聚光集热研究	318
附录一	固体金属的热物性	328
附录二	保温、建筑与其他材料的热物性	331
附录三	不同温度下金属材料的半球向总辐射率和 300K 温	

度下太阳辐射吸收率	332
附录四 300K 温度下非金属材料的半球向总辐射率和太阳 辐射吸收率	333
参考文献	335

绪 论

第一节 传热的三种基本方式

当物系中存在温度梯度时,必然产生热量传递。根据传热机理的不同,热量传递有三种基本方式:热传导、热对流、热辐射。

一、热传导

热传导是指温度不同的物体内部,由粒子的微观运动产生能量传递的现象,简称导热。从物理本质上看,可以解释为相互毗邻接触的分子之间分子振动能和电子能的传递。气体通过分子或原子的相互碰撞,液体和不导电固体通过弹性波作用,或者在金属中还依靠自由电子的扩散,能量从高温区向低温区传递。

傅里叶通过实验和分析,揭示了不透明均匀固体介质中热量传递的基本规律,指出当导热体中进行纯导热时,通过垂直于热流方向的面积 dA 的热流量 dQ_n , 与该处温度梯度的绝对值成正比,而与温度梯度的方向相反,即

$$dQ_n = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1-1)$$

上式称为傅里叶定律,亦称导热基本定律。这里 λ 为导热体的导热系数。

物体的导热系数是衡量其导热能力的重要参量。其数值主要决定于自身材料的成分、组织结构、密度、温度和含湿量等,通常由实验测得,而与物体的几何形状无关。各向异性材料,如木

材、结晶体、电机或变压器用硅钢片组成的铁芯和胶合板等，其导热系数还与方向有关。一般说来，金属的导热系数最大，液体次之，气体最小。工程中常用材料的导热系数，均可从附录或传热学手册中查用。

二、热对流

伴随液体或气体中温度不同的各部分之间相互混合的宏观运动而产生的热量传递，称为热对流，通称对流换热。

对流换热和流体的流动性质密切相关。流体沿固体壁面流动时，由于黏性和固体壁面的摩擦作用，在贴近固体壁面处流体的速度被迅速降低，并在壁面上完全滞止，速度为零。在这里热量依靠导热在固体壁面和流体之间进行传递。所以，对流换热过程本质上是流体分子间内部能量的传导和基于流体宏观运动带走热量共同作用的结果。

对流换热的基本计算式是牛顿冷却定律，即

$$Q = \alpha A (T_w - T_f) \quad (1-2)$$

式中 α ——对流换热系数；

T_w ——物体壁面温度；

T_f ——流体温度；

A ——换热面积。

实验表明，对流换热系数的数值与换热过程中的很多因素有关，主要决定于流体的物性、流体运动状态以及换热表面性状。一切对流换热过程的研究与分析，无论是理论的或者是实验的，其基本点都在于确定过程的对流换热系数 α 的值。

三、热辐射

物体以电磁波传递能量的方式称为辐射。辐射是物质所固有的属性。

当物体表面温度大于绝对零度而产生的电磁波辐射称为热辐射。热辐射可以在真空中传播，导热依靠物质内部微观粒子碰撞或弹性波作用，对流换热依靠物质的宏观运动。所以导热和对流换热这两种传热方式只有在有物质存在的条件下才能实现，这是它

们和热辐射之间本质上的区别。热辐射不依靠常规物质的媒介作用，其过程不仅产生能量的传递，还伴随着能量形式之间的转换。

根据热力学原理的研究证明，理想辐射体的辐射力 E_b 与其绝对温度的四次方成正比，即

$$E_b = \sigma_0 T^4 \quad (1-3)$$

式中 σ_0 ——斯蒂芬—玻耳兹曼常数。

两个理想辐射体表面之间通过热辐射所产生的净辐射换热量为

$$Q = \sigma_0 A (T_1^4 - T_2^4) \quad (1-4)$$

上式表示一种理想状态，实际物体的辐射换热计算十分复杂。

第二节 传热传质学在电力科技 中的重要地位

电力工业是电能生产部门。火力发电厂是将矿物燃料的化学能转变为电能，核电站则是将核裂变能转变为电能，它们都是进行热能动力转换的工厂。

目前我国电能生产的现状是，主要依靠火力发电，其次是水力发电，再次是核能发电，各类新能源发电所占比例甚小。所以火力发电技术在电力科技中占有重要地位。

火力发电厂是由众多热工和电气设备组装成的统一体，其中包括锅炉、汽轮机、发电机、凝汽器、冷却塔、给水加热器、管道等，围绕着将燃料的化学能转变为电能这一总目标进行各式各样的换热与换能。例如，煤粉在锅炉中燃烧，高温烟气对锅炉水冷壁、过热器、省煤器、空气预热器等的辐射与对流换热；汽轮机乏汽在凝汽器中凝结换热；冷却水在冷却塔中的传热与传质；发电机的冷却与散热等。从总体上看，它们的学科基础离不开传热传质学。

电厂的经济运行是重要的。要使整个系统经济而高效地运行，首先系统中的各部件都必须处于正常工作状态，这离不开正确的传热与传质分析。

电厂的安全运行至关重要。进行锅炉爆管分析，水冷壁寿命诊断等，均离不开十分复杂的传热与传质分析。

以上说明了一点，即为了有效地提高电厂系统的运行经济性，确保安全运行管理，必须切实地解决系统中各部件实际存在的各种技术问题，传热传质分析是其中的一个重要方面。从工程技术上看，这就使传热传质学成为电力科技的基础学科之一，不得不给予高度重视。

导 热

第一节 导热基本方程

为了求得任意导热体的传热量，首先要求得该物体内的温度分布。其方法是，在所研究的导热体内定义一个微元体，分析其中的能量传递过程，由此推导出确定这一能量传递过程的微分方程。这个微分方程的解就是该导热体内的温度分布。

一、导热微分方程

设有一均匀介质，其温度分布为 $T(x, y, z, \tau)$ ，取微元体 $dx \cdot dy \cdot dz$ ，如图 2-1 所示。根据傅里叶定律，沿 x 、 y 、 z 方向传入微元体内的热量 Q_x 、 Q_y 、 Q_z 分别为

$$Q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} dydz \quad (2-1a)$$

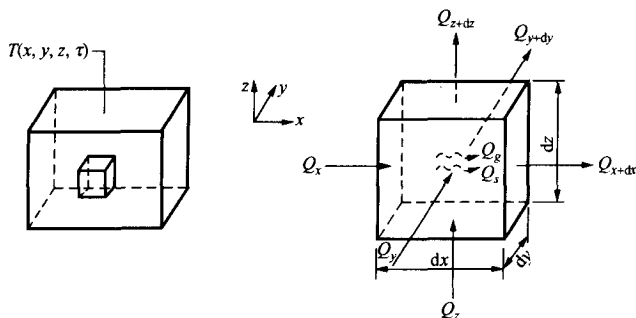


图 2-1 直角坐标中导热分析微元体

$$Q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} dz dx \quad (2-1b)$$

$$Q_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} dx dy \quad (2-1c)$$

则通过导热传至其各自对面的热流量为

$$Q_{x+dx} = -\left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] dy dz \quad (2-2a)$$

$$Q_{y+dy} = -\left[\lambda \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) dy \right] dz dx \quad (2-2b)$$

$$Q_{z+dz} = -\left[\lambda \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz \right] dx dy \quad (2-2c)$$

设物体内部有发热源，其单位体积内热源的生成热为 $\dot{Q}$ ，则微元体的生成热为

$$Q_g = \dot{Q} dx dy dz \quad (2-3)$$

设物体在其传热过程中温度随时间有变化，则微元体的内能变化为

$$Q_s = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} dx dy dz \quad (2-4)$$

式中 ρ ——密度；
 c ——比热容；
 τ ——时间。

这样，根据能量守恒原理，对所研究的微元体 $dx dy dz$ ，导入的总热量 Q_{in} 加上内部所生成的总热量 Q_g ，减去导出的总热量 Q_{ou} ，其余的热量将作为物体内能的变化 Q_s 储存在该微元体中，即

$$Q_{in} + Q_g - Q_{ou} = Q_s \quad (2-5)$$

代入以上诸式，经整理得

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2-6)$$

上式为具有内热源的非稳态导热方程的一般形式。对常物性均匀介质，式 (2-6) 简化为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{Q}}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2-7)$$

这里, $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ 称为热扩散率。它表明介质的导热能力和其储热能力的比例关系。物体热扩散率愈大, 则其导热能力愈强, 温度在其内部的传播速度也愈快。

对稳态导热, $\frac{\partial T}{\partial \tau} = 0$, 式 (2-7) 简化为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{Q}}{\lambda} = 0 \quad (2-8)$$

式 (2-8) 是泊松方程。若物体内部没有内热源, 则方程简化为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (2-9)$$

式 (2-9) 是拉普拉斯方程, 它描述没有内热源和常物性均匀介质中的纯稳态导热过程。

在实际工程中, 不少构件是圆柱形或球形的, 例如锅筒, 中段是圆柱体, 两端为球面。输热管道为圆管。对这种圆柱形或球形部件, 采用圆柱坐标和球坐标作传热分析将更为方便。

参照图 2-2, 依同理求得圆柱坐标系的导热方程为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2-10)$$

参照图 2-3, 依同理求得球坐标系的导热方程为

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) \\ & + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \dot{Q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \end{aligned} \quad (2-11)$$

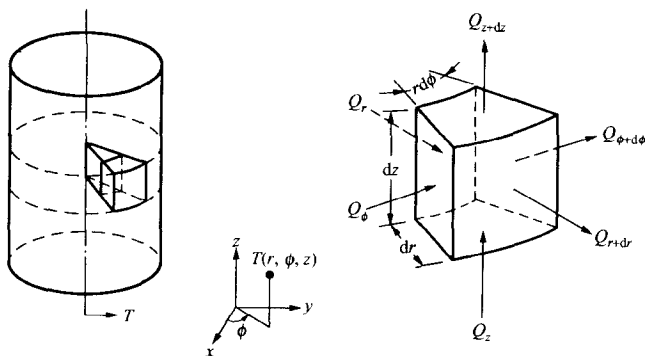


图 2-2 圆柱坐标中导热分析微元体

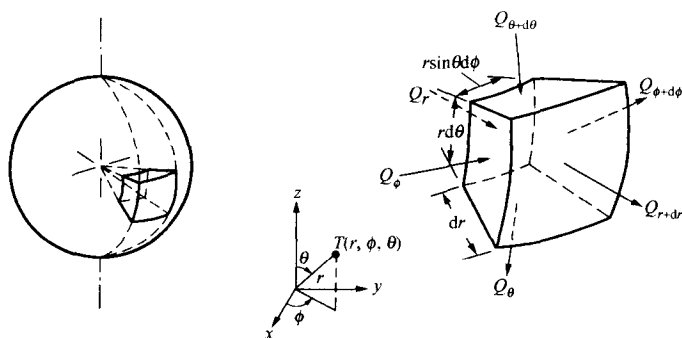


图 2-3 球坐标中导热分析微元体

二、初始条件和边界条件

1. 初始条件

初始条件是时间上的区域条件。导热方程是时间的一阶微分方程，因此只需给定一个初始条件，即开始时介质中的温度分布初值，表示为

$$\tau = 0, T(x, y, z) = T_0(x, y, z)$$

2. 边界条件

边界条件是空间上的区域条件。导热方程是空间二阶微分方

程，因此必须对每一个坐标方向给定两个边界条件。一般传热问题具有以下四类边界条件。

(1) 第一类边界条件

已知或给定物体边界面上的温度 T_w 。最简单情况为恒温面，即 $T_w = \text{常数}$ 。

(2) 第二类边界条件

已知或给定物体边界面上的热流密度 q_w 。特殊情况 $q_w = 0$ ，即物体边界面为理想绝热面。

(3) 第三类边界条件

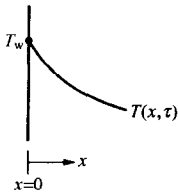
物体边界面与流体接触，已知或给定流体温度 T_f 以及边界面和流体之间的换热系数 α 。

(4) 第四类边界条件

两物体边界面互相紧密接触，已知各物体的导热系数 λ_1 、 λ_2 ，在交接面上两物体的温度和热流密度都应相等。

下面以 x 方向为例，将上述的四类边界条件的关系式和边界示意图对应列于表 2-1。 y 和 z 方向依此类推。

表 2-1 导热方程的四类边界条件

边 界 条 件		示 意 图
1. 第一类边界条件	$T(o, \tau) = T_w$	
2. 第二类边界条件	(1) 恒定热流 $-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right _{x=0} = q_w$	