

TRANSFERTS THERMIQUES

传热学

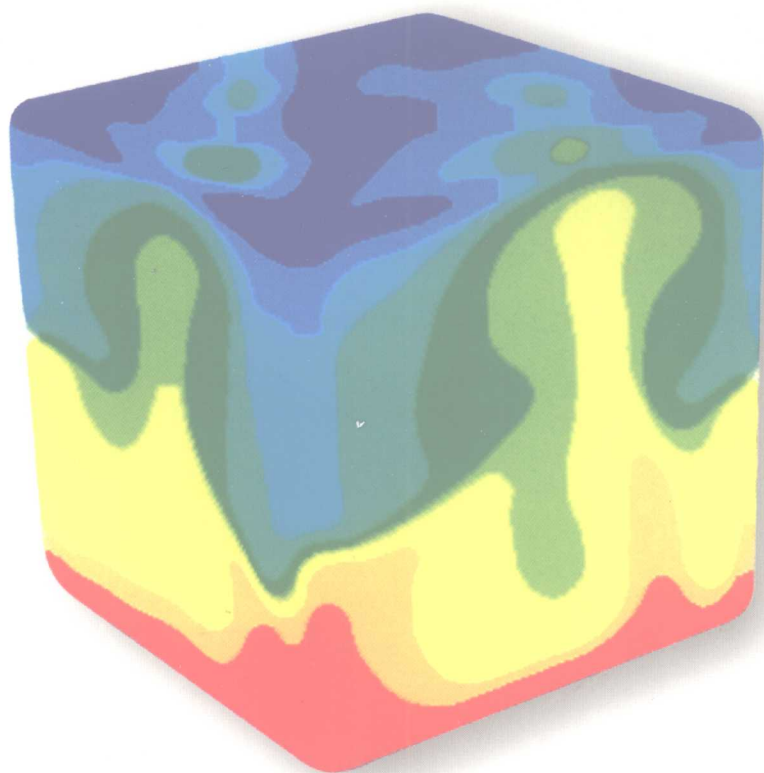
(罗) 安娜 - 玛丽娅 · 比安什

(法) 伊夫 · 福泰勒

(法) 雅克琳娜 · 埃黛

著

王晓东 译



大连理工大学出版社

TRANSFERTS THERMIQUES

传热学

(罗) 安娜 - 玛丽娅 · 比安什

(法) 伊夫 · 福泰勒

(法) 雅克琳娜 · 埃黛

著

王晓东 译



大连理工大学出版社

Transferts thermiques

Ana-Maria Bianchi, Yves Fautrelle and Jacqueline Etay

Originally published in French under the title: "Transferts thermiques"

© 2004 Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, together with

Agence universitaire de la francophonie, Montréal

All rights reserved

ISBN 978-2-88074-496-2

© 大连理工大学出版社 2008

著作权合同登记 06-2007 年第 131 号

版权所有 · 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

传热学/(罗)比安什(Bianchi, A.), (法)福泰勒(Fautrelle, Y.), (法)埃黛(Etay, J.)著;王晓东译. —大连:大连理工大学出版社, 2008. 6

书名原文:Transferts Thermiques

ISBN 978-7-5611-4148-9

I. 传… II. ①比…②福…③埃…④王… III. 传热学
IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 082510 号

大连理工大学出版社出版

地址:大连市软件园路 80 号 邮政编码:116023

发行:0411-84708842 邮购:0411-84703636 传真:0411-84701466

E-mail: dulp@ dulp. cn URL: http://www. dulp. cn

大连印刷三厂印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸:170mm×240mm
2008 年 6 月第 1 版

印张:30.25 字数:560 千字
2008 年 6 月第 1 次印刷

责任编辑:刘新彦 唐立敏

责任校对:石 子

封面设计:季 强

ISBN 978-7-5611-4148-9

定价:88.00 元

译者序

传热学是研究不同温度的物体或同一物体的不同部分之间热量传递规律的学科。传热不仅是常见的自然现象,而且广泛存在于建筑、机械、冶金、化工、食品、电子、医药、生物、核能、航空航天等领域。传热学作为一门基础科学,与热力学、结构力学、流体力学、化学、燃烧学、电磁学、计算数学等许多学科相互渗透和交叉,形成相变传热、流体传热、化工传热、燃烧传热、等离子体传热和计算传热等许多重要分支。

本书作为这一领域欧洲最近出版的传热学的中译本,介绍了罗马尼亚布加勒斯特(Bucharest)建筑大学(UTCB)和法国格雷诺贝尔(Grenoble)国立综合技术大学(INPG)十二年来传热学方面科研合作和教学研究的成果。这种合作提高了该学科研究方法的多样性和互补性,同时也使本书的内容更为丰富。关于传热学技术应用研究双方的着眼点,罗马尼亚方面专注于建筑专业,而法国方面则侧重于流体力学和数值模型。这种互补性体现在因相变而导致的热对流的处理,传热学的数值模型计算,综合传热的操作以及工业应用等方面。

本书力求从传热现象的本质出发,严格、清晰、准确地阐述这门学科,并且加强相关学科之间的联系。同时,也希望面向工程实际应用,并给出基础研究方面的解释说明。需要指出的是,本书并不追求面面俱到、包罗万象,只是希望提供一把开启这门学科的“钥匙”。

全书包括10章内容。第1章介绍了传热学方面的基本定义和概念(导热、对流、热辐射及相变等),以及该领域与其他学科的联系,如热动力学和流体力学等。第2章到第6章是本书的主要内容。首先介绍热量产生和传热的方式,然后从每一种传热方式的机制入手,详细介绍它们的数学处理方法。第7章集中介绍了相变过程(冷凝,沸腾,凝固)及其应用,这为传热学更广泛的实际应用提供了基础。第8章介绍了传热学数值方法,目的是利用现有软件解决工程中的实际应用问题。本章分析和比较了一些常用的数值方

法,以便提高学习利用软件工具模拟各种现象的能力,并了解各自的优点和局限性。第9章概括总结了一些复杂传热问题的综合处理方法,重点介绍实际应用中传热学的两个方面:强化传热和隔热。不难发现,如果不从本质上认识理解传热现象,就不可能对具体的每一种情形形成最优的解决方案。第10章介绍了一些处理传热过程的工业应用的例子,致力于解决热交换应用方面的问题。

全书每章都给出了一些对所分析热现象有实际意义的例子。这些例子来自一些基础方面的研究,并注重实效分析,进而达到控制和优化一些机械设备或热装置功能的目的。

这本书的原著是用法语撰写的,由瑞士法语区大学出版社出版。此书出版的另外一个目的是致力于在科学领域推广法语语言,原作者也希望该书对文化交流——科学领域里必不可少的交流元素——有所贡献。译者作为本书作者之一福泰勒教授的博士后(2003—2008年),在原著发行之初阅读了该书,从本书中得到很多有益的启发和帮助,并认为这是一本很好的研究传热学基础方面的参考书籍,因而也希望把这本书介绍给中国的读者。译者还希望读者能够从欧洲研究者的视角了解一些传热学的最新进展。

近年来,国际科技文化的交流不断加强,例如,本书原作者所在的单位法国国家科技研究中心材料电磁过程(EPM)研究所、格雷诺贝尔国立综合大学(INPG)就和国内的上海大学、东北大学等开展了很多研究合作项目,这其中就有很多和传热学息息相关的内容。译者也有和原作者一样的愿望,就是希望这本中译本的传热学著作能加强科技领域里不同文化之间的交流。

译者要感谢法国格雷诺贝尔国立综合技术大学(INPG),法国国家科技研究中心EPM研究所,罗马尼亚布加勒斯特建筑大学,大连理工大学等研究机构的支持。东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室的李本文教授对本书的全部译稿作了审阅工作。大连理工大学出版社科技教育出版中心为本书的出版作了很多艰苦细致的工作。没有他们的大力支持,本书中译本也不可能和读者见面,在此,译者对他们表示衷心的感谢。另外,译者也要感谢爱人李佳和家人对翻译工作的理解和支持。

这本书的主要读者对象是工程专业在校大学生和研究生,也可作为从事与传热技术相关工作或对其感兴趣的专业人员的参考书。

由于译者专业知识和语言水平所限,书中难免有很多错误和不足,敬请批评和指正。

王 晓 东

2008年5月于加拿大 McGill 大学

目 录

第 1 章 传热学介绍	1
1.1 热力学与传热	1
1.2 传热的基本模式	3
1.3 基本概念	6
1.4 传热的应用	10
参考文献	10
第 2 章 稳态热传导	12
2.1 概况	12
2.2 基本标记	12
2.3 解析法分析一维稳态传导问题	27
2.4 解析法分析二维和三维稳态热传导问题	82
参考文献	89
第 3 章 非稳态导热	91
3.1 简介	91
3.2 非稳态导热的数值特性	92
3.3 单向非稳态导热	97
3.4 二维和三维问题	111
3.5 附录	113
参考文献	116
第 4 章 强制对流	117
4.1 简介	117
4.2 强制对流换热问题的方程	118
4.3 强制对流研究中的相似性原理	124
4.4 量纲分析	126
4.5 穿越平板附近层流边界层的传热	129
4.6 长平板附近的紊流热边界层传输	136

4.7 层流情形下的管内传热	151
4.8 紊流情形下的管内传热	155
4.9 几种特殊单元情形下的对流换热系数	161
参考文献	164
第5章 自然对流	166
5.1 简介	166
5.2 自然对流方程: Boussinesq 假设	167
5.3 无量纲方程和相似性参数	168
5.4 沿长垂直板发展的自然对流	171
5.5 常见的自然对流情形	177
5.6 自然对流的应用	189
参考文献	202
第6章 热辐射	205
6.1 简介	205
6.2 电磁辐射	206
6.3 基本记号	207
6.4 LAMBERT 定律—LAMBERT 体	210
6.5 黑体, 热辐射的参照体	211
6.6 实际物体的辐射	217
6.7 辐射传热与材料内部传热的相互作用	218
6.8 KIRCHHOFF 定律	232
6.9 表面间的辐射	238
6.10 地表辐射	254
6.11 附录: 热辐射传输的专业术语	260
参考文献	262
第7章 相变引起的热、质传输	263
7.1 简介	263
7.2 水蒸气凝结导致的传热现象	263
7.3 沸腾	279
7.4 固液相变	292
参考文献	304

第 8 章 传热的数值方法	307
8.1 简介	307
8.2 区域的离散化	308
8.3 节点函数 $T(x, y, z, t)$ 的近似	310
8.4 空间偏微分的离散化操作——加权残差法	312
8.5 有限差分法	313
8.6 有限容积法	320
8.7 有限元法	324
8.8 时间的离散化	334
8.9 稳态导热	337
8.10 非稳态导热	340
8.11 对流—扩散	347
参考文献	354
第 9 章 综合传热	355
9.1 概述	355
9.2 综合传热	355
9.3 随着综合传热系数增长传热强度的变化	358
9.4 通过增加表面传热来提高传热强度	364
9.5 提高传热强度的其他方法	381
9.6 绝热	389
参考文献	395
第 10 章 复杂传热过程	398
10.1 简介	398
10.2 换热器	398
10.3 热管	427
10.4 工业炉	442
参考文献	462
附录 A	464
附录 B	465
附录 C	468
附录 D	471
附录 E	472
符号列表	473

第1章 传热学介绍

1.1 热力学与传热

热力学是物理学的一个重要分支,它是研究能的另外一种基本形式——热能的转换规律,热的产生、传输和渗透规律的一门学科。

在热力学中,因为温度差导致能量传递,在热力学中这种能量即为“热”。温度差存在于:

1. 任意一个系统中的两个部分之间;
2. 系统与环境之间;
3. 被介质或真空分开的两个系统之间。

经典热力学主要研究、评价系统从一个平衡状态到另一个平衡状态过程中的热量交换。它是不可控的,并以显式方式进行,且不考虑非平衡状态下的传输模式和计算精确条件下的热流密度值。

传热学的最基本目标就是研究与传热现象相伴随的热量传播与热流密度值的计算。这部分重要的物理处理方法包括描述传热模式的机制,在传热通量、系统特征参数(如物理、几何属性)以及环境中的热条件之间建立理论或实验关系。

在我们生活的这个地球上,传热现象是无处不在的(冰雪的消融,海洋中水的回热,季节的循环变化等)。如自从地球上出现人类以来,个体的日常动作的表现(人体体温的调节,食物的准备以及生态环境小气候的改变),城市化过程中出现的大量的热技术(对原始热源的利用,热驱动器,热量交换器以及绝热技术等)。

前面已经提及热力学或热动力学的最基本区别就在于热量传输方面,仍需强调的是,传热学是研究热力学的基本概念和原理的重要支撑。因此,能—热、温度差在传热的分析中起着非常重要的作用,从原理上讲,它也是热力学定义的

标记。

热力学第一定律表述了在一个封闭系统里能量转换过程中热量与做功之间的平衡关系：

$$\oint_r (\delta Q + \delta L) = 0 \quad (1.1)$$

或者说,热力学系统内能守恒,如封闭系统内的转化关系:

$$dU = \delta Q + \delta L \quad (1.2)$$

热力学第二定律阐述传热问题的定量方面,给出了同一系统内两个物体间的传热方向和强度,或者是温度差导致的热量传输。

考虑一个由两个刚体物体 1 和 2 组成的系统,物体 1 和 2 各自具有均一温度,且它们之间存在温度差,体积、密度和比热分别为 V_1 和 V_2 , ρ_1 和 ρ_2 , c_{p_1} 和 c_{p_2} 。两个物体从某一时刻开始接触,假设从机械和热的观点来看,系统与外部为理想的绝热状态,两个物体间存在温度差, $T_1 \neq T_2$, 即存在热能会从一个物体传到另一个物体的趋势。包括以下假设:

① 刚体系统 $\Rightarrow$ 形变量 $\delta L = 0$;

② 系统绝热 $\Rightarrow dU = 0$ 。

根据关系式(1.2)有:

$$\delta Q = \delta Q_1 + \delta Q_2 = 0 \Rightarrow \delta Q_1 = -\delta Q_2 \quad (1.3)$$

根据熵的第二定律表达式可知,系统(该例中由两个物体组成)熵的变化,在这一过程中是正的,可写成如下形式:

$$dS = dS_1 + dS_2 > 0 \text{ 或者 } dS = \frac{\delta Q_1}{T_1} + \frac{\delta Q_2}{T_2} > 0 \quad (1.4a)$$

也可推导出如下的等价形式:

$$\begin{aligned} \delta Q_1 \left[\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right] > 0 &\Rightarrow \rho_1 V_1 c_{p_1} dT_1 \left[\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right] > 0 \\ \delta Q_2 \left[\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right] > 0 &\Rightarrow \rho_2 V_2 c_{p_2} dT_2 \left[\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right] > 0 \end{aligned} \quad (1.4b)$$

假设 $T_1 > T_2$, 可得

$$dT_1 < 0 \Rightarrow \delta Q_1 < 0 \text{ 或者 } dT_2 > 0 \Rightarrow \delta Q_2 > 0 \quad (1.5)$$

这就是说,热物体会向冷物体传出 δQ_1 的热量而变冷,冷物体从热物体处得到 $\delta Q_2 = -\delta Q_1$ 的热量而变热,这一过程会持续到两个物体温度变成相同的平衡状态。

由上述分析可得出以下一些重要结论:

① 一个非绝热系统总是存在热能量传递并且导致熵增,这一过程是不可逆的;

② 在一个由多个刚体组成的孤立系统中,各物体间存在初始温度差,就会经历一个演化过程,达到熵值相对最大的新的平衡状态。

③ 热量总是从高温部分传向低温部分,并且温度差 $\Delta T = T_1 - T_2$ 随时间减小直至为零。

④ 处于热平衡时,物体是理想的绝热体,它和所处的周围环境具有相同的温度。

质量守恒定律解释了为什么质量既不能产生,也不能消失,只能直接转移到其他地方或储存起来。

热力学的研究方法同样适用于热量传输,如传热学中的一些研究手段,理论和实践中行之有效的方法。

① 现象法(宏观尺度):通过分析宏观的自然过程来得到整个系统全局尺度上的属性特征。它可用来解决不同的实践问题——例如,确定温度场和热流量的差异——而不用去做与现象相伴随的分子过程机制的解释。

② 统计法(微观尺度):考虑物体的分子结构,依据的是分子水平的机制过程。这种方法假设物体由大量的特殊单元组成,存在着不停息的运动和相互作用。不同的热激励效应改变物体的微观机构,通过计算统计概率事件来研究巨大数量特殊单元同时发生的行为。

以上两种方法不能混为一谈,但在现代物理中,可根据相关性原理相互补充。

③ 相似法(或相似模型):可借助其他物理领域里的知识研究热现象,这些现象可用相同的数学模型来描述,由此法可引出类比法。

在本书中我们主要采用第一种方法。

1.2 传热的基本模式

传热是一个复杂的过程,它由三种可复合叠加的基本模式实现:传导、对流和辐射。在确定存在着三种模式之一的情况下,其他模式的效应可能很重要,也可能忽略不计,因而可作相应的简化处理。下面根据这些条件来介绍每种模式产生的机制。

1.2.1 传导

固体、液体或者气体的内能是与组成它们的基本粒子(原子、分子、自由电

子) 永恒运动相关联的。传导可表示一个或多个物体直接接触, 而它们的基本粒子存在着能级差而导致的能量传播, 基本粒子运动是其产生的根本原因。

气体条件下, 传热的传导方式是分子扩散的结果, 对于非导电体的液体和固体来说, 是借助于微观弹性波来实现热传导的。

对于金属, 传导主要取决于由热区向冷区的自由电子扩散, 晶体点阵的弹性振动起的作用很小。

一般来说, 这种传热方式是使组成物体的基本粒子的动能更趋于一致。

分析研究传导的方法是将物体视为连续的, 而忽略物质的分子水平的结构。一般来说这个假设没有多大限制, 因为所研究物体间的距离相对于组成它的微观粒子要大很多。

需要指出的是, 对于绝大多数应用技术方面的热传导都是针对固体而言的, 对于液体和气体, 在考虑对流时一般不包括传导的传热模式。

典型的热传导例子有: 建筑物墙体的传热, 导体的冷热部分间的传热, 冬季土壤的冻结等。

1.2.2 对流

传热中的对流现象存在于流动中的液体或气体、液体中。

对流是由传热中存在着温度差的液体或气体区域内微小的流动单元的运动所决定的。这种微单元的混合过程导致能量(热量) 交换和改变它们之间的动量。流体的流动对对流传热起到至关重要的作用。(注: 对流一词源于拉丁语的动词 Convehere, 表示自身挟带的意思)

对流可存在于有温度差的流体中, 或存在于流经与之有温差的较长固体表面上的液体, 它总是伴随着固体表面附近的液体边界层中的热传导。边界层的温度变化对对流的研究非常重要。

根据流体流动的驱动力可分为两类对流: 强制对流和自然对流。

在强制对流中(第4章), 液体的流动是由外部力作用而产生的(例如泵、鼓风机等), 使流体产生足够强的流动。因而, 强制对流强度与流体的流动方式直接相关联。

自然对流(第5章) 源于流体内部较冷或较热液滴和周围流体间在重力场的作用下导致的密度差。自然对流的形式和强度与热条件、流体的自然属性、流动途径中的几何体积形状变化直接相关联。自然对流处理是在重力场作用下而无其他体积力的情况下进行的。

一般来说, 强制对流总是伴随着自然对流, 在温度差较大或强制对流引起的

流动很弱的情况下,后者的作用也同样重要。

典型的对流例子有:热交换器中流体的加热或冷却,在盛放流体的容器下面进行的吹风冷却,烤蛋糕时炉里的空气流动等。

1.2.3 辐射

热辐射是传热的一种特殊形式,它无需借助任何组成物质的微粒来传递能量,而是通过电磁波使物体表面原子振动来实现。辐射的机制是通过电磁波的发射与吸收辐射能来传递能量的,进而改变物体所具有的内能,热辐射与光的照射遵循相同的辐射定律,因而可采用相同的理论来处理。

热辐射不需要介质来支持,在真空条件下照样可以进行。在宇宙空间,通过固体或气体产生的热辐射是传热的一个重要方面,它具有使物体温度显著升高的效应。

典型的热辐射例子有:太阳光照,微波炉加热食物,在加炉里对金属器件进行热处理等。

1.2.4 相变传热

虽然不同传热模式下热现象的机制不同,但都会导致相同的结果:物体的温度有所变化,有时这种变化可导致相变(汽化、冷凝、凝固、熔化)。相变情形下,潜热(一定压力和温度下物质转变成其他物理状态时单位质量需要的能量)起到额外热源的作用(或正或负),这也增加了分析传热过程的复杂性。需要指出的是,在相变过程中传热强度非常巨大,因而在现代技术中有很多利用这一点的实际应用例子,其属性直接反映在热流密度的升高上。

1.2.5 复合模式与综合传热

绝大部分自然传热过程或传热应用技术都是不同基础模式的组合。

在流体情形下,对流总是伴随着传导,流动的流体或气体间不可避免的相互接触。靠近固体表面的流体层内存在着温度差,也会有热传导,不过这里是对流起主导作用,传导可作为该处的边界条件考虑。在很多情形下也存在着辐射传热,同样会使流体温度升高。

在不透明或半透明的固体(如玻璃、塑料)中,辐射和传导同时出现,多数情况下后者起到主导作用。

在研究固体表面时,一定条件下三种传输模式可共存,例如,将一个高温固体放入高速流动的流体中,主导传输模式则不易确定。但多数实际应用中,在分析固体传热时,可优先考虑传导,其他两种模式作为边界条件。这样的处理过程特别容易实施,它是解决这类问题较为简便的办法。

在高温固、液、气系统中,传热行为可含有三种模式,这时可将辐射作为主导模式,尤其是气体系统情形。

对于传热相互干涉的复杂而难于解决的技术问题,可作一些易于研究、可接受的简化假设处理,然后再作进一步的研究分析。

同样,对于一种模式占优的情形,将优先处理该模式的传热,而忽略其他模式。其他情形下,如不同的模式所起的作用差不多时,可尝试将其分解,分开进行处理。另外还有一个特别的理论,对包含三种基本传热模式(传导、对流和辐射)的情形,采用综合传热来处理这个复杂过程。利用包含不同模式的综合传热系数来处理传热强度。

在自然过程或工程技术中,传热常伴随着质量传输。例如,水的蒸发、吸收作用、吸附作用、结晶、干燥等,通过浓度不均匀的物质在空间的变动来实现质量传输。如果该过程是通过传导导致浓度的均一化,则是分子扩散的结果;如果传质是通过系统的宏观运动,则称为摩尔对流。这两种传输过程都属于质量对流传输的范畴,类同于传热中的对流。

1.3 基本概念

1.3.1 温度

可以这样定义温度:它是表示一个系统的热力学强度的一个状态参数,是用宏观量来表达物质的微观能量状态。固体条件下,微观能量状态是指晶体点阵上原子的振动或者电子运动(如金属)。对于流体来说,它是由分子的运动状态来决定的。

通俗地讲,温度是表示固、液或气体的任意部分的冷或热的量度。从实践经验上来讲,大家会注意到,当一个热物体接触到一个冷物体时,它会变冷,一直到冷热物体变成相同的温度,即达到热平衡状态。也可以这样认为,温度也可定义为一个系统与其他系统达到热平衡时的参数。

实际上,热力学的第零定律可表述为:当两个系统分别与第三个系统处于热

平衡状态时,那么这两个系统之间也处于热平衡状态。这是温度测量的依据,借助于第三者(如温度表)来比较两个物体之间的温度差异,而无需这两个物体直接接触。

目前有很多温度标准,为信息传播的便利,推荐使用绝对温度,用 T 表示,在国际单位制中其单位为开尔文(K)。为了交流便利以及习惯的原因,人们仍常用摄氏温度($^{\circ}\text{C}$),相应的温度符号用 θ 表示,它们之间的关系为

$$T[\text{K}] = 273.15 + \theta[^{\circ}\text{C}] \quad (1.6)$$

1.3.2 温度场

无论哪种传输模式,热量传播的唯一理由就是物体不同处(或系统内的不同物体)存在温度差。由实际的观测经验可得出这样的结论:物体的空间位置上的每一点都只有一个唯一的温度值。物体上所有点的温度值就构成了温度场或称为温度分布。

从数学上来讲,温度场是空间坐标和时间的函数:

$$T = T(x, y, z, t) \quad (1.7)$$

在传热过程中确定物体的温度场是热过程分析的首要目标。

根据温度场和时间的关系可作如下分类:

① 稳态或稳恒温度场。温度场与时间无关,更准确地阐述为,温度相对于时间的变化较相对于空间坐标的变化小到可以忽略不计,这种情形下,传热制度也是稳态的,温度场的数学表达式可用函数表示如下:

$$T = T_1(x, y, z), \quad \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1.8)$$

② 非稳态或瞬变温度场。当温度既是空间的函数又是时间的函数时,传热制度称为非稳态的或瞬变的,温度场可表示成式(1.7)。

事实上,所有的传热都是非稳态的,但是根据实际情况,很多情形可近似为稳态,这样对现象的分析要简便得多。

根据坐标的维数,瞬变温度场可分为一维、二维和三维。若温度的变化是二维的,则二维温度场可写成:

$$T = T_2(x, y, t), \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (1.9)$$

如果温度的变化只是一维坐标的函数,则称温度场是一维的,它的表达式为

$$T = T_3(x, t), \quad \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (1.10)$$

对于稳态温度场,关系式(1.9)和(1.10)可分别简化为

$$T = T_4(x, y), \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (1.11)$$

$$T = T_5(x), \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (1.12)$$

1.3.3 等温面

等温面表示物体上所有具有相同温度的点组成的几何面。它可能是：

- ① 稳态的, 等温面的空间坐标不随时间的变化而变化, 或者说它是不变的;
- ② 非稳态的, 等温面的位置是随时间的变化而连续变化的, 也即是说它是可动的或者是可变形的。

等温面不能相互穿越, 这是因为同一时间每个点不可能同时有两个温度。用一个面去切一组等温面会得到一系列等温曲线, 和等温面一样, 它们也不能互相交叉。

单点(等温面的退化形式)代表物体空间上点的温度在其他处不能取到该值, 单点可视为半径为零的球状等温面。

1.3.4 温度梯度

对于任意物体, 在穿越等温面的方向上都会有温度变化, 等温面法向方向上的单位长度的温度差特别重要, 这个变化量被定义为温度梯度。

根据定义, 温度梯度表示在物体内部等温面间法线方向上温度变化最大的向量, 如图 1.1 所示。温度梯度的数学表达式可用温度场和运算符 ∇ 表示:

$$\overrightarrow{\text{grad}T} = \nabla T = \frac{\partial T}{\partial n} \vec{n}_0 \quad [\text{K/m}] \quad (1.13)$$

其中, $\vec{n}_0$ 为等温面上的单位法向量;

$\frac{\partial T}{\partial n}$ 为温度对法向量 $\vec{n}$ 的偏导数。它是温度梯度的标量或者说是该处的温度梯度值, 指向温度低的方向为负值。

当考虑三维系统 Ox, Oy, Oz 时, 温度梯度可写成

$$\overrightarrow{\text{grad}T} = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k} \quad (1.14)$$

或将其影射到坐标轴 Ox, Oy, Oz 上, 有

$$(\text{grad}T)_x = \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (\text{grad}T)_y = \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (\text{grad}T)_z = \frac{\partial T}{\partial z} \quad (1.15)$$

在传热过程中, 温度梯度代表着热量传输中热阻最小的路径, 它的单位是 K/m 。

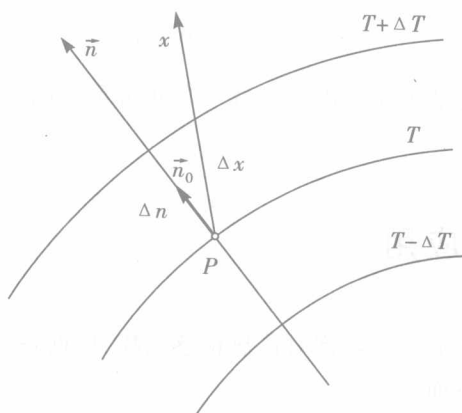


图 1.1 温度梯度示意图

1.3.5 能量 — 热

能 — 热代表着一个系统的热力学能和外部能量相互转换, 表现为温度变化的一种形式。它不会改变系统的边界, 即没有机械做功。

从实践上来说, 热是一个系统在两个平衡状态(1) 和(2) 的能量变化, 正比例于质量 m , 两个平衡状态之间的温度差, 以及平均比热 $\bar{c}$, 因而有

$$Q_{12} = \int_1^2 \delta Q = \int_1^2 m c dT = m \bar{c} (T_2 - T_1) \quad (\text{J}) \quad (1.16)$$

1.3.6 总热流量

总热流量是表示单位时间内穿过给定表面传输的热量:

$$\Phi = \frac{\delta Q}{dt} \quad (\text{J/s} = \text{W}) \quad (1.17)$$

1.3.7 表面热流密度

经过表面 S 的表面热流密度(φ) 表示单位面积上的热流量, 或者是单位时间内单位面积通过的热量:

$$\varphi = \frac{d\Phi}{dS} \quad (\text{W/m}^2) \quad (1.18)$$

如果表面上的热流密度均匀分布, 则有