

高等学校教学参考书

传热学自学指导

李耀主编

李耀 王恩沛 陈小敏

周文敏 彭科源 编著

高等教育出版社

4

内 容 简 介

本书是参照高等工业学校《传热学课程教学基本要求》，配合杨世铭编《传热学》(第二版)教材而编写的一本自学指导书。叙述深入浅出，语言通俗易懂。

本书针对传热学课程的特点，介绍了传热学课程的自学方法，并根据《传热学课程教学基本要求》，详细阐述了各章的基本要求、学习重点。为便于对照传热学课本学习，每章均按基本要求、内容提要、阅读参考材料、习题和自我测验题的顺序编写。书中着重于物理概念的阐述，并注意结合工程实例进行分析，以帮助读者系统掌握传热的基本原理和工程传热问题的分析方法。因此，无论对于在校大学生，还是函授、自学读者，本书均能帮助读者掌握传热学的基本内容，加深对传热问题的理解，并学会分析工程传热问题的方法。此外，本书对于广大青年教师深入领会《传热学课程教学基本要求》，提高传热学教学质量亦有帮助。

本书可作为高等工业学校热工类专业及有关专业的传热学课程的教学参考书，以及与杨世铭编《传热学》配套的函授、自学教材，亦可供有关工程技术人员参考。

高等学校教学参考书

传热学自学指导

李 斌 主编

李斌 王启杰 杨小琼 陶文铨 陈钟顺 编著

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京第二新华印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 9.25 字数 220 000

1990年3月第1版 1990年3月第1次印刷

印数 0001—1 300

ISBN7-04-002741-0/TH·216

定价 2.25元

前 言

本书是参照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),为配合杨世铭编《传热学》(第二版)而编写的自学指导书。目的在于帮助自学读者和函授学员掌握《传热学》课程的学习方法及基本要求,正确理解教材中的基本概念、基本定律,提高分析传热问题的能力。

本书首先介绍了传热学的研究对象、主要研究内容和研究方法,指出了自学的要点。随后,根据杨世铭编《传热学》一书各章节的内容,分析阐述了每章的基本要求、内容提要,介绍了阅读参考材料,指定了习题和自我测验题。基本要求部分为读者指出了各章必须掌握的基本概念、定义、定律以及必须达到的深度和广度;内容提要部分为读者指出了各章节学习的主要内容、重点和难点。本书着重于物理概念的阐述,对重点和难点内容进行了较深入的剖析和必要的补充。阅读参考材料部分针对一些基本内容为读者介绍了阅读资料,特别阐述了传热原理在工程技术中的应用及增强传热的方法,通过工程实例的分析以使读者巩固所学内容,提高分析传热问题的能力。所选择的习题都是基本题,以训练读者解题的能力,正确地完成这些习题是读者达到基本要求必不可少的环节。自我测验题是为了便于读者进行自我检查,判断自己的学习是否达到了要求。习题和自我测验题均附有答案,便于读者自行检查。

本书由西安交通大学热工教研室李斌主编,参加编写的有李斌(第七章)、王启杰(第五、八章)、杨小琼(第二、三章)、陶文铨(第

一、六章)、陈钟顺(第四章),全书由李斌统一定稿。陈钟顺教授对全书的编写提出了宝贵的意见。

限于我们的水平,书中不妥之处在所难免,衷心欢迎批评指正。

编 者

1989年5月

目 录

传热学自学指导	1
§ 0-1 传热学的研究对象及本课程的内容	1
§ 0-2 传热学与工程热力学在研究方法上的异同	2
§ 0-3 传热问题的研究手段与自学应注意之点	4
第一章 绪论	8
§ 1-1 本章基本要求	8
§ 1-2 各节内容提要	8
1-1 热量传递的三种基本方式	9
1-2 传热过程和传热系数	10
1-3 单位制	11
§ 1-3 两个应注意的问题	12
§ 1-4 阅读参考材料	13
习题	21
自我测验题	21
第二章 导热基本定律及稳态导热	22
§ 2-1 本章基本要求	22
§ 2-2 各节内容提要	23
2-1 导热基本定律	23
2-2 导热微分方程式	27
2-3 通过平壁和圆筒壁的导热	31
2-4 通过肋片的导热	40
2-5 导热问题数值法求解原理	46
*2-6 计算机解题介绍	56
*2-7 几点补充	57
§ 2-3 阅读参考材料	60
习题	72
自我测验题	72
第三章 非稳态导热	76
§ 3-1 本章基本要求	76

§ 3-2 各节内容提要	77
3-1 非稳态导热的基本概念	77
3-2 一维非稳态导热问题的求解及诺谟图	79
3-3 二维及三维非稳态导热问题的求解	85
3-4 对分析解的几点讨论	88
*3-5 非稳态导热问题的数值解法	91
*3-6 非稳态导热的正规热状况	98
§ 3-3 阅读参考材料	99
习题	103
自我测验题	103
第四章 对流换热	107
§ 4-1 本章基本要求	108
§ 4-2 各节内容提要	109
4-1 对流换热概说	109
4-2 对流换热微分方程组	114
4-3 边界层分析及边界层微分方程组	117
4-4 边界层积分方程组及求解示例	119
4-5 动量传递与热量传递的比拟理论	124
4-6 相似原理	129
*4-7 量纲分析	136
4-8 强制对流换热及其实验关联式	137
4-9 自然对流换热及其实验关联式	146
§ 4-3 阅读参考材料	148
习题	151
自我测验题	151
第五章 凝结与沸腾换热	154
§ 5-1 本章基本要求	155
§ 5-2 各节内容提要	156
5-1 凝结换热现象	156
5-2 膜状凝结分析解及实验关联式	159
5-3 影响膜状凝结因素的讨论	167
5-4 沸腾换热现象	169
5-5 沸腾换热计算式	176
§ 5-3 阅读参考材料	178

习题	185
自我测验题	185
第六章 辐射换热	187
第一部分 热辐射的基本定律	187
§ 6-1 基本要求	187
§ 6-2 各节内容提要	188
6-1 热辐射的基本概念	188
6-2 黑体辐射	190
6-3 实际固体和液体的辐射 灰体	195
§ 6-3 阅读参考材料	203
第二部分 辐射换热计算	206
§ 6-4 基本要求	206
§ 6-5 各节内容提要	207
6-4 黑体间的辐射换热及角系数	207
6-5 灰体间的辐射换热	212
6-6 气体辐射	220
§ 6-6 阅读参考材料	225
习题	228
自我测验题	228
第七章 传热过程与换热器	230
§ 7-1 本章基本要求	230
§ 7-2 各节内容提要	231
7-1 传热过程的分析和计算	231
7-2 换热器的型式及平均温压	235
7-3 换热器的热计算	240
7-4 传热的强化和隔热保温技术	243
*7-5 热管及热管换热器	249
§ 7-3 阅读参考材料	250
习题	267
自我测验题	267
第八章 传质	269
§ 8-1 本章基本要求	269
§ 8-2 各节内容提要	270
8-1 概说	270

8-2 扩散的基本定律.....	271
8-3 对流传质及传质系数.....	275
8-4 质量和热量的同时传递.....	279
§ 8-3 阅读参考材料.....	281
习题.....	285
自我测验题.....	285

传热学自学指导

我们自学传热学时首先要问一下:传热学的研究对象是什么?与我们的技术工作有什么关系?与工程热力学相比,它在研究内容与研究方法上有什么共同与不同的地方?在自学过程中应该注意一些什么问题?下面就简要地来介绍一下这三方面的内容。

§0-1 传热学的研究对象 及本课程的内容

传热学是研究热量的传递规律及计算方法的一门工程技术科学。我们知道,无论在工程技术领域中还是在自然界里,温度差是普遍存在的,而凡有温度差的地方就有热量传递,因而热量传递是自然界与工程领域中极普遍的现象。我们学习传热学就是要掌握各种热量传递现象的规律,从而为设计满足一定生产工艺要求的换热设备,提高现有换热设备的操作和管理水平,或者对一定的热过程实现温度场的控制打下坚实的理论基础。

几乎在每一个工程技术部门中都会遇到传热问题,而且常常成为设备设计的关键。例如,一台锅炉就是一套复杂的换热设备。以火管锅炉为例,煤在炉室内燃烧形成高温烟气。赤热的煤及高温烟气通过辐射把一部分热量传递给锅筒壁;同时,高温烟气以一定速度流经火管,进一步通过对流及辐射把热量传给火管管壁;位于锅筒内的水从筒壁与火管壁获得热量温度升高而沸腾。所有这些过程都是热量传递过程。要设计一台高效率的锅炉必须对上述热量传

递过程的规律有深入的了解。又如,家用电冰箱或制冷设备主要由一些热交换器组成。其中,在冷凝器中制冷介质(氨、氟利昂)凝结成液体,并把汽化潜热释放给冷却水或冷却空气;在蒸发器中制冷介质从温度较高的物体中获得热量而汽化,从而使温度较高的物体冷却。在其它工程技术领域中同样有大量传热问题,例如发电机与变压器的冷却,建筑物的供热与降温,电子器件与设备的冷却,等等。只有牢固地掌握了传热学知识,这些问题的解决才有可能。

在本课程中,我们将首先简要地介绍传热学的主要研究内容,给出导热、对流与辐射这三种热量传递基本方式的概念及所传递热量的计算公式(第一章),然后分章详细讨论各种情况下导热、对流换热及辐射换热的基本规律(第二、三、四、五、六章)。在此基础上,第七章把上述基本知识综合起来,介绍传热过程及换热设备的计算方法。该章既是上述基本规律的应用,也是传热学本身的一个独立的内容。最后,在第八章简要介绍质交换过程的基本概念与规律。对大多数读者来说,导热、对流换热和辐射换热的基本规律、计算方法及其在换热器设计中的应用,是自学本课程应当掌握的主要内容。

§0-2 传热学与工程热力学在 研究方法上的异同

工程热力学与传热学都是研究热现象的,都以热能的传递与转换过程中的基本规律作为研究对象。但是,工程热力学与传热学从不同的角度来研究热现象,在研究内容与方法上有很大的区别。这些区别大致可从以下几个方面加以说明。

1. 工程热力学所着重研究的是在能量转换与传递过程中各种形式的能量在数量方面的关系及热能在质量方面的变化情况,

而为了实现这一能量转换或传递过程需要多少时间，在经典的工程热力学中是不考虑的。可以说，经典的工程热力学中没有“时间”的概念，我们已学过的工程热力学是无限时间的热力学。工程热力学的这种研究是对实际工程问题的高度抽象，是为了简化复杂的实际问题而又能得出具有一定指导意义的结论所必须的。但是，这只是研究问题的一个方面，而为了使所讨论的能量传递与转换过程能付诸实施，并能满足一定的生产、工艺要求，必须引入时间概念。也就是说，我们必须问一下，为了实施所讨论的能量传递过程需要多少时间，需要多大的设备。在传热学中，时间是一个重要变量。在许多情况下，我们都致力于研究高效的热量传递方法，即特定设备能在单位时间内传递较多热量的方法。

2. 工程热力学主要研究可逆过程，即热量的传递过程是在冷、热介质的温差为无限小的情况下发生的。在传热学中，为传递一定的热量所需温差的大小是其主要的研究内容之一，因此传热学中所研究的一切热量传递过程都是不可逆过程。

3. 工程热力学不仔细研究过程进行的不同时刻与设备的不同地点上温度的变化情况，而这却正是传热学感兴趣的问题。大多数热量传递过程都可以用一组微分方程式描写，因而我们在今后的学习过程中经常会遇到一些微分方程组。虽然要用分析的方法来求解这些方程目前还常常不可能，但正确地列出所研究问题的数学描写仍然是很重要的。

下面我们以两个具体问题为例，说明工程热力学与传热学研究内容与方法的不同。

先看一个动力循环的例子。在工程热力学中研究循环时所关心的是输入系统中的热量、系统输出的功及循环的效率，不考虑为了传递这么多的热量需要多大的换热设备，需要多长时间，因而也无法确定需要多大的温差。而传热学在研究循环中的各个换热设

备时则要解决以下一些问题:

(1) 在一定设备面积与温差下, 传递所给定的热量需要多少时间;

(2) 在给定的温差下传递一定的热量需要多大的设备;

(3) 设备内部(包括冷、热流体)的温度是如何分布的;

(4) 采取什么措施可以使热量传递过程得到强化。

显然, 上述问题无论对设备的设计与运行都具有重要意义。

再看一个例子。当把一热的钢元放到水中冷却时, 工程热力学所关心的是这一系统在初态与终态(达到平衡温度时)之间熵的变化及钢元与水槽各自内能的变化, 而不关心冷却过程中钢元内各点的温度随时间如何变化。但是, 后者正是传热学所关心的问题。

热力学中的两个基本定律是传热学研究的基础, 其中热力学第二定律表现为热量总是自发地由高温物体向低温物体传递这一规律, 它在传热学的计算公式中有相应的体现(特别在导热部分), 而学习过程中经常用到的对所研究对象的热量收、支平衡分析, 则是热力学第一定律的具体应用。

§ 0-3 传热问题的研究手段与 自学应注意之点

传热学作为一门独立的学科始于 20 世纪初。经过近半个世纪的发展, 形成了一整套的研究手段与方法, 并大致可以分成以下四类。

1. 传热问题的分析解法

采用这种方法时首先要对实际传热问题作一定的简化假设, 建立所谓“物理模型”, 然后写出与物理模型相对应的数学描写式,

即微分方程及初、边值条件,并用解析的方法求解。这种方法如果能够成功,则可以获得所研究传热问题中温度分布的解析表达式,便于分析各种条件对传热的影响,是一种很有效的方法。但是,由于实际问题的复杂性,只有少数传热问题能够获得分析解,而大多数问题由于数学上的困难而尚不能获得分析解。虽然如此,分析解法在传热学研究中的地位仍然是不容忽视的。在本课程的学习过程中,我们将介绍几个简单问题分析解的求取方法。

2. 传热问题的数值解法

在最近二十余年中,随着电子计算机工业的飞速发展,传热问题的数值计算方法发挥了愈来愈大的作用。现在我们自学的这本传热学教材与20年前的教材在内容上的主要区别之一就是增添了数值计算的内容。采用数值计算方法时,要用一组代数方程代替解析方法中的微分方程组,求解该代数方程组就可以得出所研究区域中一些代表性地点上的温度及其它所需的物理量。在本自学教材中,将着重在导热部分介绍数值计算方法。

3. 传热问题的实验研究方法

由于工程实际问题的复杂性,虽然上述两种方法都已有很大的发展,但实验研究方法仍是目前传热学的基本研究方法。由于实际传热设备常常比较庞大,要在这种设备上直接进行试验需化费较多的人力、物力,有时甚至是不可能的。为了能有效地进行实验研究,常常采用缩小的模型。要使模型中的试验结果能应用到实际设备中去,需按照相似理论的原则来组织试验、整理数据。在本自学教材中将提到有关内容,并对目前工程计算中常用的实验公式作必要的介绍。

4. 传热问题的比拟研究方法

由于传热现象与其他物理现象(如导电现象、流动现象)在某些条件下可以用类似的微分方程来描写,因此有时可通过测定其它

物理量来获得传热问题的解,例如可以通过测定导电物体中各点的电位来推算出相应的导热物体中各点的温度,这就是比拟解法。本自学教材将介绍这种方法的基本思想。

在自学本课程时要注意以下几点:

(1) 要较好地掌握基本概念 前面说过,传热学要对各类热传递现象的物理过程进行研究,因而会引入一系列基本概念。掌握这些基本概念是学好传热学的基础,读者应努力做到能用自己的语言简明扼要地叙述这些基本概念。

(2) 学习对复杂的实际问题进行必要的简化,建立相应的物理模型与数学描写式的方法 前面业已提到,虽然分析解法的应用场合有限,但是物理模型的建立及其数学描写式的确定仍然是十分重要的事。如果说,分析解方法的寻找主要是数学家的任务,那么物理模型的建立则是工程技术工作者的责任。

(3) 要联系自己的工作、研究实践进行学习 读者在各自的实际工作中都曾不同程度地接触过传热学的问题,自学过程中如能经常联系自己的工作、业务实践,则可使有关章节的学习更深入、扎实。

(4) 要记住一些最基本的数据(或数量级)及公式 在今后的自学过程中会不断遇到一些数据与公式,要完全记住这些数据与公式是不可能的,也无此必要,但对于一些最基本的数据与公式还是应当下功夫记住,这对于实际问题的定性分析是大有帮助的。

(5) 要进行必要的数字例题计算并注意数字答案的正确性 传热学中有不少经验公式,目前解决工程计算问题主要靠这些经验公式。对于这些公式,要弄清楚它们的应用条件并进行必要的数字计算练习(包括如何使用物性数据表等)。有的读者往往不注意这个问题,一做计算就出错,这是应当引以为戒的。

做习题要有一定的格式,建议解题时按以下4个步骤写出:

- ① 已知条件;
- ② 求解(或证明)的内容;
- ③ 示意图(有的习题可省去这一步);
- ④ 解法(或证法)。

(6) 要善于进行阶段小结 随着课程学习的深入,所碰到的热传递现象的种类及计算公式会越来越多,如不注意及时小结,分析对比,往往会使人产生一种内容杂乱的感觉。与工程热力学的系统内容相比,传热学内容的头绪要多一些,这是由于实际传热现象的多样性及课程本身的性质所决定的。但是,就传热学本身而言,在众多的热传递现象及计算公式中还是可以作适当的归类与整理的。建议读者在自学完每一章或每一类热传递方式的有关内容后自己作小结,归纳出这一部分的基本概念有哪些,解决了什么问题,基本的计算公式是什么,应用时应注意什么等。

本自学教材是配合杨世铭编《传热学》(第二版)编写的,以后为行文的简洁,以“教本”二字简称该书。

为便于读者自学,我们先介绍上述内容供读者参考,祝各位自学成功。

第一章 绪 论

§1-1 本章基本要求

本章的目的在于,使读者对传热学所研究的主要内容有一总体的了解,为以后各章深入讨论作好准备。具体地说,通过本章的学习应当掌握以下内容:

1. 热量传递的三种基本方式——导热、对流、热辐射的物理概念,以及相应的三个基本公式:导热的傅里叶定律、对流换热的牛顿冷却公式及热辐射的斯蒂芬-玻尔兹曼定律。
2. 传热过程的概念及传热过程的基本方程式。
3. 热阻的概念及导热、对流换热、传热过程中热阻的计算式。

§1-2 各节内容提要

这一部分先简要介绍第一章各节的主要内容,然后就两个容易混淆的问题作些说明。

第一节以前的部分除了介绍传热学的研究对象及其在工程中的应用外,还引入了三个名词,即所谓稳态热传递过程、非稳态热传递过程及连续体的概念。稳态热传递过程是指在过程的进行中物体各点的温度不随时间而变的过程,它是我们学习的主要内容。非稳态热传递过程仅限于讨论导热问题。热传递过程的稳态与非稳态的特点读者应予以掌握,在非稳态导热这一章中将对此

作进一步的说明。连续体(又称连续介质)是从力学中引过来的一个概念。我们的整个讨论都以发生热传递的物体是连续体为前提,而不能应用于非连续体(如稀薄气体)的情形。非连续体的换热问题另有一套研究与计算的方法。

1-1 热量传递的三种基本方式

导热、对流及热辐射是热量传递的三种基本方式。在实际问题中,这三种热量传递方式常常是同时起作用的,只是为了教学上的方便,我们才分别予以讨论。

导热过程的基本特点有两个,即:(1) 导热过程总是发生在两个互相接触的物体之间或同一物体中温度不同的两部分之间;(2) 在导热过程中物体各部分之间不发生宏观的相对位移。从物质的微观结构对导热过程加以描述与计算是比较复杂的,教本第3页上关于不同类型材料导热过程的微观机理的说明不必作深入的钻研,重点应放在从宏观角度对导热问题进行计算。这主要包括两方面的内容,即计算导热过程中的热量及导热物体内的温度分布。后一部分将在第二、三章中作详细研究。关于计算热量的方法,早在1822年法国物理学家傅里叶(Fourier)就总结出了一条规律,即傅里叶导热基本定律,教本1-1节中针对稳态导热情况给出了这一定律的表达式。

对流换热是指流体流过另一物体表面时对流和导热联合作用的热量传递过程。这是工程上大量遇到的一种热传递现象,其所传递的热量按牛顿(Newton)冷却公式计算。在牛顿冷却公式中引进了对流换热系数的概念。对流换热系数的大小是对流换热过程强烈程度的标志,例如空气掠过热表面的情形,对流换热系数越大,换热过程就越强烈。但要注意,教本中式(1-5)或式(1-6),即牛顿冷却公式实际上只给出了对流换热系数的定义,而并未说明如何