

传热学教材 60 年的主要变迁及 《传热学》（第 5 版）简介

——纪念杨世铭、陈大燮编《传热学》出版 60 周年

陶文铨

摘要：总结了国内外 60 年来传热学教材的主要变迁，同时简要介绍了《传热学》（第 5 版）的主要特点，提出传热学教材编写应该具有时代特色、适应学科发展、注重工程应用、能反映我国研究成果、便于读者使用。

关键词：传热学；与时俱进；工程应用；教材建设

一、我与传热学

1959 年 2 月 1 日，杨世铭先生给我们交通大学（西安部分）锅炉专业 7 字头大班讲授传热学，我开始了传热学课程的学习。我的本科专业是锅炉设计与制造，锅炉本身是一台复杂的换热器，需要深入学习传热学；本科毕业后我考取杨世铭先生的研究生，继续攻读传热学；研究生毕业留西安交通大学热工教研室任教；1980—1982 年，我在美国明尼苏达大学传热实验室进修，学习数值传热学及传热强化技术；回国后继续从事传热学的教学与科研。我的一生可谓与传热学的学习、教学及科研密切相关。

传热学是研究在温差作用下热量传递规律的科学。由于在自然界以及各种工程领域中无处不存在温差，因而无处不存在热量传递现象，使得传热学与工业生产和日常生活的关系特别密切。传热学的基本原理虽然已经形成了一个多世纪（Nusselt 的凝结换热经典解发表于 1916 年），但随着科学技术的发展，直至今日传热学仍然是热科学乃至整个技术科学中十分活跃的学科。教材的内容是与相应学科的发展密切

相关的，在近 60 年中传热学教材内容也有重要变化。

现仅结合我的记忆及手边的资料简述传热学本科教材 60 年来的主要变迁。2004 年，笔者曾经与三位同事合作撰写过《“传热学”本科生教材 40 年的变迁及其对我们的启示》一文^[1]，该文从近半个世纪来科学技术的发展引发传热学研究及教学的进展做了较详细的介绍，本文不再赘述。这里仅从基本概念、计算公式、强化传热技术以及计算机与软件应用四方面来说明。

二、传热学教材 60 年来四个方面的主要变迁

1. 基本概念的发展

（1）沸腾换热中固体表面上什么地点最容易成为汽化核心？

在米海耶夫等的早期教材中^[2-3]，认为最有利的地点是表面上隆起部分。1959 年，苏联莫斯科动力学院 Labuntsov 及美国西北大学的 Westwater 分别著文，分析指出固体表面上的凹

陶文铨，西安交通大学教授，中国科学院院士，首届高等学校教学名师奖获得者。

坑、沟槽才是最容易成为汽化核心的地点^[4-5]。值得注意的是,在1959年出版的Eckert和Drake的著作中已经从产生大过热度可能地点、角度指出表面上的凹坑可能是最有利地点^[6]。紧接着出版的教材中,如文献[7-9]就都采纳了这个观点。沸腾换热这一正确概念的建立为以后日立公司等企业开发相变换热的强化表面奠定了理论基础^[10]。

(2) 固体表面间的辐射换热为什么必须采纳封闭腔模型?

组成封闭腔的固体表面间的辐射换热是本科传热学辐射部分的主要教学内容。计算的重点是每个表面的净辐射换热量。在早期部分国内外教材中^[11-13],往往没有强调由于辐射换热的特殊性,计算固体表面的辐射换热时,计算区域必须是包含感兴趣表面在内的封闭腔,而且常常将对于封闭腔推导得到的结果不适当地推广到空间任意两个不组成封闭腔的表面之间。文献[14]专门对此进行了讨论。

(3) 自然对流从层流到湍流的转变究竟取决于 Ra 数还是 Gr 数?

大空间自然对流流态的判别历来采用 Ra 数为依据。1994年,杨世铭教授通过物理机制以及实验数据的细致分析,提出应该以 Grashof 数为判据的观点^[15],许多研究结果对这一观点提供了支持。例如 Bejan 与 Lage 在1990年对于文献中大空间竖直平板上自然对流实验数据的研究表明,在 Prandtl 数从 0.007 到 200 的范围内,流态转变的局部 Grashof 数均在 10^9 左右,根本与 Prandtl 数无关^[16];近期教材[17]中,Cengel 明确指出,自然对流的 Grashof 数与强制对流的 Reynolds 相当,因此流态判别应该是 Grashof 数。虽然目前不少计算关联式均采用 $Nu=f(GrPr)=f(Ra)$ 的形式,这正如液态金属的管内强制对流换热一般都表示成 $Nu=f(RePr)=f(Pe)$ 的形式,但是作为流态判别仍然是 Reynolds 数而不是 Peclet 数,同样,流体自然对流层流与湍流的判别依据是 Grashof 数。

(4) 什么条件下常规尺度传热学内容的适用性受到限制?

随着从20世纪末开始的极端时间及微纳尺度传热问题研究的开展,常规尺度传热学内容的适用性逐渐明确,虽然非傅里叶导热及微纳尺度对流及辐射传热特性不是本科传热学的教学主题,但是在教材的适当部分扼要表述是使一本教材与时俱进、具备时代特色的必要内容。近年来出版的一些主要教材都不同程度地有所表述^[17-20]。例如教材[18]中介绍了块体材料与薄膜材料导热系数的区别,介绍了尺度在 $100\ \mu\text{m}$ 到 $0.1\ \mu\text{m}$ 微米之间的微通道中液体与气体的对流传热计算关联式;教材[17]也对微尺度传热做了简要介绍。《传热学》(第5版)中对这些新内容的说明更加全面^[20]。

2. 计算公式的发展

(1) 管道内湍流充分发展对流传热计算关联式

管内湍流对流换热的计算关联式是本科阶段传热学中一个最基本的关联式,历史上曾经提出了多个计算形式,它们的预测精度普遍被认为 $\pm(20\%\sim 25\%)$ ^[17,18,20,21]。苏联科学家 Petukhov-Papov 在理论分析基础上提出了适用于较高 Reynolds 的关联式^[22],以后 Gnielinski 对其进行了修正,使该式能适用于低 Reynolds 数的范围,得出的公式为^[23-24]:

$$Nu_f = \frac{(f/8)(Re_f - 1000)Pr_f}{1 + 12.7\sqrt{f/8}(Pr_f^{2/3} - 1)} \left[1 + \left(\frac{d}{L}\right)^{2/3} \right]; f = (1.8 \lg Re - 1.65)^{-2} \quad (1)$$

该式适用范围广 ($2300 < Re < 10^6$, 进口段与充分发展段),与实验数据符合的精确度高,90%的实验数据最大偏差为 $\pm 20\%$,大部分数据偏差在 $\pm 10\%$ 以内,已经被大部分近期教材采纳为推荐关联式^[17-21,25-26]。

(2) 外掠管束对流传热计算关联式

在早期的教材中曾普遍采用 Grimson 在1937年发表的对气体实验得出的结果^[27]: $Nu = CRe^n$,其中系数与指数需根据不同的 $S_1/d, S_2/d$ 选取,很不方便,同时对于液体,只能根据经验用增加系数 Pr^m 来考虑。立陶宛科学院 Zhukauskas 在大量实验结果上总结出以下形式的关联式^[28-29]:

$$Nu_f = C Re_f^n Pr_f^{0.36} (Pr_f/Pr_w)^{0.25} \quad (2)$$

其中系数及指数取决于管子排列方式、Re 数及流动方向的管排数。

这一关联式使用范围宽，预测精度高，已经在国内外教材中得到广泛采用^[17-21,25-26,30]。

(3) 非稳态正规状况计算的 Campo 公式

对固体非稳态导热进入正规状况阶段后的计算，历史上长期来都采用 Heisler (1947) - Gruber (1961) 图线来计算温度及换热量。虽然图线具有变化趋势明显的优点，但不便于计算。近年来一些教材开始尝试更便于计算的表述方式。例如教材 [18] 中对于三种几何形状进入正规状况阶段的近似解用表格给出一系列 Bi 数下的特征值 μ_1 及系数之值，对于没有列入的 Bi 数还是需要插值；1997 年 Campo 将三种几何形状不同 Bi 数下的特征值、系数及相关的特殊函数拟合成计算公式^[31]，杨世铭编《传热学》(第 4 版) 在国内外教材中率先引进了这种计算方法。十余年来的教学实践表明，此法不仅避免了插值查表不准确的缺点，而且在使用乘积解法求解多维问题时，采用 Heisler 图需要迭代计算的情形可以利用指数相加的特点立即得出结果。

3. 强化传热技术的重视

我国传热学研究前辈学者杨世铭教授早在 1959 年给笔者所在大班教授传热学时就指出传热研究所关注的两大问题是传热强化及削弱。文献 [3] 以《传热的增强》作为一节的标题，指出要强化一个传热过程必须首先增强热阻大的一侧的换热过程，但还未对强化传热的技术开展阐述。出版于 20 世纪 60—70 年代的教材对此大多并未重视。发生于 20 世纪 70 年代的能源危机大大促进强化传热的研究。在此后出版的教材中，不同程度地关注了强化传热命题。例如在 1993 年出版的 Bejan 的教材 [33] 中，提出研究传热学的主要任务是：(1) 热绝缘；(2) 强化传热；(3) 温度控制。在两本西方名著 [17,18] 中，都在单相对流部分专门列出了强化传热的标题。对这一命题最关注的是教材 [19] 和 [20]，该教材不仅在单向对流部分，而

且在相变传热及辐射传热部分都介绍了相关的强化技术。

关于强化单相对流传热的机制在现有教材中从减薄热边界层厚度、增加流体中扰动等角度予以说明，但都有其局限性。1998 年，我国学者过增元教授提出了强化对流传热的场协同原理，从根本上阐述了强化的机制是减小速度与温度梯度的夹角，改善协同性。这一概念首先在杨世铭编《传热学》(第 4 版) 中予以介绍^[19]，在第 5 版 [20] 中得到进一步强化。

4. 计算机与软件的应用

在本科的传热学教学中最容易引入有限差分数值求解的部分是非稳态导热，早在 20 世纪 50 年代前就发展了多种图解法^[34]。纵观国内外教材中关于这部分内容的发展，随着计算机的兴起和广泛使用，大概经历了三个阶段。第一阶段是计算机求解方法刚引入时，普遍附以程序，如教材 [35] 和 [36]；第二阶段只介绍建立离散方程的方法以及代数方程的求解方法，不再列入程序本身^[37]；第三阶段是进入 21 世纪后，随着各种工程软件的兴起，在西方教材中工程软件被广泛引入教学中，使得学生可以求解问题的难度与深度显著增加^[16-17,20,38]。笔者认为这是国际工程教育中一个总体趋势，因此在《传热学》(第 5 版) 中也引入了 MATLAB 求解的习题，并且给出了求解方法^[20]。

三、《传热学》(第 5 版) 的主要特点

《传热学》第 5 版与第 4 版相比在下列 5 个方面有所变化。

(1) 对第 5、6、8、9、10 章内容做了调整，以增加教材科学原理的系统性。以第 5 章为例，标题由原来的《对流传热的理论基础》改为《对流传热的理论分析及实验研究基础》，以更能够体现即使到现在对流传热还很大程度地依赖于实验研究，在内容上将原第 6 章中关于相似原理的节 6.1 和 6.2 移到第 5 章作为节 5.5 及 5.6。

(2) 适当增加了一些新的研究成果使教材

更具有时代气息。例如第3章增加了非傅里叶导热问题简介(节3.6),第4章增加了数值计算的稳定性、收敛性及精度等(节4.4)。

(3)增加了采用MATLAB求解的题目以培养学生使用工具软件的能力。第1章到第10章都引入两三个采用工具软件题目作为尝试。

(4)每章末尾增加了“网络与兴趣阅读”,旨在提高学生的学习兴趣。这是为了给学有余力的学生提供一些可供本科生进一步阅读的资料而设置的,完全不属于教学要求,也不显著增加篇幅。

(5)纠正了部分欠妥乃至有误的内容,以提高教材的科学性及严谨性。例如在介绍换热器的设计计算方法时,第4版中将传热系数 k 及传热面积 A 看作为两个独立变量,第5版中将 kA 的乘积作为一个变量处理,逻辑上更为合理。

(6)在版式设计和出版形态上做出变革,更加便于师生的教与学。第5版采用双色印刷,并进行定版设计,更加便于读者阅读。教材以新形态版式出版,配套的数字课程网上资源包括全套多媒体课件、试卷以及拓展资源等。MATLAB习题解答以及“网络与兴趣阅读”可以扫描教材上二维码进行查阅。

四、结语

编写一本具有时代特色、适应学科发展、注重工程应用、能反映我国研究成果、便于读者使用的传热学教材是笔者根据杨世铭先生的基本思想所拟定的目标。本文简述的传热学教材60年来的主要变迁就是笔者在编写《传热学》(第5版)时梳理的结果。虽然在《传热学》(第5版)编写过程中笔者做了努力,但离这个目标还有很大距离,欢迎广大读者批评指正。

参考文献:

- [1] 陶文铨,何雅玲,李增耀,等. “传热学”本科生教材40年的变迁及其对我们的启示[C]//2004年全国热工课程发展战略规划研讨学术大会论文集,2004.
- [2] 米海耶夫·M A. 传热学[M]. 王补宣,译. 北京:

高等教育出版社,1954:122.

[3] 杨世铭,陈大燮. 传热学[M]. 北京:水利电力出版社,1958:121,106,163.

[4] LABUNTZOV D A. Nucleate boiling of liquid[J]. Thermal Energy (In Russian). 1959(12):19-26.

[5] WESTWATER J W. Boiling heat transfer[J]. American Scientist. 1959,47(3):427-432.

[6] ECKERT E R G, DRAKE R M. Heat and mass transfer[M]. New York: McGraw-Hill, 1959: 343.

[7] 杨世铭,陈大燮. 传热学[M]. 北京:中国工业出版社,1961:106.

[8] KUDATIELADS C C. Fundamentals of heat transfer theories[M]. Moskva: MASHGEZ, 1962: 336.

[9] HSU S T. Engineering heat transfer[M]. Toronto: D Van Nostrand Company, Inc., 1963: 427.

[10] NAKAYAMA W, DAIKOKU T, KUWAHARA H, KAKIZAKI K. High-flux heat transfer surface “Thermoexcel” [J]. Hitachi Review, 1975, 24(8): 329-334.

[11] THOMAS L C. Fundamentals of heat transfer[M]. New Jersey: Prentice Hall, Inc., 1980: 292.

[12] TODD J P, ELLIS H B. Applied heat transfer[M]. New York: Harper & Row, Publishers, 1982: 330-331.

[13] 范治新. 工程传热原理[M]. 北京:化学工业出版社,1982.

[14] TAO W Q, SPARROW E M. Ambiguities related to the calculation of radiant heat exchange between a pair of surfaces[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1985, 28(9):1786-1787.

[15] 杨世铭. 自然对流换热基本规律的新进展[M]//陶文铨,林汉涛,李长发,等. 传热学的研究与进展. 北京:高等教育出版社,1995:17-26.

[16] BEJAN A, LAGE J L. The Prandtl number effect on the transition in natural convection along a vertical surface [J]. ASME J Heat Transfer, 1990, 112: 787-790

[17] CENGEL Y A. Heat and mass transfer[M]. 3rd ed. Boston:McGraw-Hill, 2007: 509, 385, 474, 481, 477.

[18] BERGMAN T L, LAVINE A S, INCROPERA F P, DEWITT D P. Introduction to heat transfer[M]. 6th ed. Hoboken:John Wiley & Sons, 2011: 73, 503, 517, 449,

301, 527.

[19] 杨世铭, 陶文铨. 传热学: 第4版 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[20] 陶文铨. 传热学: 第5版 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2019.

[21] HOLMAN J P. Heat transfer[M]. 10th ed. Boston:McGraw-Hill, 2010: 281, 305.

[22] PETUKHOV B S. In: Irvine T F, Hartnett JP, eds. Advances in heat transfer [M]. 1968,6: 508-601.

[23] GNIELINSKI V. New equations for heat mass transfer in turbulent pipe and channel flows [J]. Int Chem Eng, 1976, 16: 359-368.

[24] GNIELINSKI V. On heat transfer in tubes[J]. Int Journal Heat Mass Transfer, 2015, 63: 134-140.

[25] LIENHARD J H, IV, Lienhard J H, V. A heat transfer textbook[M]. 3rd ed. Cambridge: Phlogiston Press, 2003: 362, 382.

[26] 赵镇南. 传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 248, 230.

[27] GRIMSON E D. Correlation and utilization of new data on flow resistance and heat transfer for cross flow of gases over tube banks [J]. Trans ASME, 1937, 59:583-594.

[28] ZHUKAUSKAS A. Heat transfer from tubes in crossflow. In T F Irvine, Jr and J P Hartnett, editors, Advances in Heat Transfer[M]. 1972, 8: 93-160.

[29] ZHUKAUSKAS A. Heat transfer from tubes in crossflow. In T F Irvine, Jr and J P Hartnett, editors, Advances in Heat Transfer [M]. 1987, 18: 87-159.

[30] 章熙民, 任泽霏, 梅飞鸣. 传热学: 第4版 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001: 161.

[31] CAMPO A. Rapid determination of spatial-

temporal temperature and heat transfer in simple bodies cooled by convection: usage of calculation in lieu of Heisler-Grober charts [J]. Int Commu Heat Mass Transfer, 1997,24(4): 553-564.

[32] KREITH F, BOHN M S. Principles of heat transfer[M]. 4th ed. New York: Harper & Row, Publishers, 1986.

[33] BEJAN A. Heat transfer [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1993: 6-7.

[34] JAKOB M. Heat transfer [M]. Vol. 1. New York: John Wiley & Sons. 1949. Chapter 19 Graphical methods for the solution of heat conduction problems.

[35] THOMAS L C. Fundamentals of heat transfer [M]. New Jersey: Prentice Hall, Inc., 1980: 292.

[36] 杨世铭. 传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1980.

[37] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.

[38] NELLIS G, KLEIN S. Heat transfer[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

[致谢: 感谢教育部高等学校能源动力类专业教学指导委员会何雅玲教授、丰镇平教授、王秋旺教授, 以及西安交通大学传热学课程组教师吴一宁、李增耀、唐桂华、曾敏、屈治国、张剑飞、杨剑、马挺、冀文涛、陈黎、赵存陆和陈磊的帮助; 感谢何茂刚教授在工质热物性数据更新中提供的帮助, 感谢浙江大学俞自涛教授提供的米海耶夫教材资料; 感谢高等教育出版社理工出版事业部机械分社宋晓的帮助!]

[责任编辑: 余大品]