

科技用書

熱 傳 導

洪永銘
鄭育能

合譯

**HEAT
TRANSFER**

J.P. HOLMAN

Professor of Mechanical Engineering
Southern Methodist University

FOURTH EDITION

大行出版社印行

科技用書

熱傳導

洪永銘 合譯
鄭育能

HEAT TRANSFER

T. P. HOLMAN

Professor of Mechanical Engineering
Southern Methodist University

FOURTH EDITION

大行出版社印行

中華民國六十八年元月 日初版
書名：熱 傳 導
著作者：洪永銘·鄭育能合譯
發行人：裴 振 九
出版者：大 行 出 版 社
社址：台南市體育路41巷26號
電話：2 5 3 6 8 5 號
本社免費郵政劃撥帳號南字第32936號
本社登記證字號：行政院新聞局
局版台業字第0395號
總經理：成大書局有限公司
台南市體育路41巷26號
電話：~~253685~~ 2 0 ~~253685~~
特 價：平 ~~400元~~ ~~400元~~ 元
編 號：T ~~000032~~ 0 4 8 6
同業好交 敬請愛護

著者序

本書的目的是對熱傳原理作基本的探討。本書可用作大三以上一個學期課程的教科書。修習本書應先讀微分方程，熱力學。若讀者唸過流體力學，對讀本書將有很大幫助，但並非必要。

雖然在接近固體邊界的靜止流體中，對流熱傳的物理機構是傳導，書中的順序仍依傳統方式分類：依次為傳導，對流及輻射。書中的重點在做合理的分析，期使讀者能了解物理意義，但當無法做簡易分析時，則借重實驗數據。

傳導和對流的分析包含解析法和數值分析法，前者對機構及物理意義的了解很有幫助，而後者則是相當實用的工具。自然與強制對流之分析中，再應用積分近似法求得物理現象的初步概念，以作為計算熱傳係數的公式或經驗公式的準繩。在輻射熱傳中則偏重於簡易的鋼路分析法。熱交換器採用廣泛應用的對數平均溫差法及效用分析法，兩者各有優缺點。本文並簡介擴散及質量傳送，使讀者能了解其基本意義，並建立質、熱及動量傳送之間的類比觀念。

第十二章討論較前面深入的例子，第十三章則著重周遭環境之熱傳導及相關的有趣問題。

每章結尾都有習題，一部分題目是為加深學生對熱傳參數的數量級大小和數字的概念；另一部分則用來訓練如何應用基本原理到不同問題。兩種型態的問題都很重要。

熱傳遞並不是一門已發展完全的科學，每年都有大量更有規則，更好的分析解法和數據出現。若將所有雜誌上出現的資料和文獻通通納入書中，將使讀者無法適從。本書的目的是在作一本入門書，因此作者在書中所列的都是些基本的，具有代表性的資料，相信能夠很容易，很迅速為讀者所吸收。書中廣泛的例題和例子則不只用來加深讀

者的了解和印象，更希望能使讀者舉一反三，作更深入的思考及了解。對有興趣的讀者，則可由每章後面的參考資料找到所需的文獻，作為深入研究的踏板。

本書是發行以來的第四版，發行以來的各版皆作些許的改進，反映出熱傳學的進展情形：雖然基本物理機構並無改變，但分析法和實驗數據却年年進步。此版的一個目的便是希望能包含最新的資料，同時使初學者易於瞭解吸收這些最新的學問。

目前計算機早已應用到熱傳學上，不只學生會用，工程師也在使用。由於固態記憶單元的發明，桌上型計算機的能力愈來愈強。不論其能力如何發展，下面兩點不會變：(1)每種計算機的輸入輸出和計劃皆不會相同，(2)桌上型微計算機將會每人一台，而每人可以用自己的計劃能力和嗜好來解各種問題。因此本書加重數值分析問題的設立及分析，使讀者能自己設計程式並解之。

目前公制單位漸將完全替代英制單位，對在此英制為標準的環境中成長的人來說，可能不太習慣，但是公制的優點是易於吸收，尤其對初學者而言更是方便。（我國高初中及國小都用公制，唯獨大學尚有部分科系採用英制）因此本書以公制為基本單位。但目前美國工業界仍在使用英制，故使讀者對公制和英制間的單位換算，能熟悉使用是必須的，本書的每個問題都使用公制和英制，以期使讀者能熟悉兩種單位，並了解之。

本版計增加下列篇幅：第二章，接觸熱傳。第三四兩章中的數值分析新解。第五章：擾流邊界層分析之修正及強制對流的數個經驗公式。第七章：依據最近研究成果，重寫自然對流。第九章：重寫薄膜凝結。第八章增加氣體幅射和幅射熱傳的數值分析法。此外每章都有新的例題及習題。

幫助校訂以及對本書提供寶貴意見的人，相當多，為免除遺漏任何一個人名的不恭敬，在此不贅述其大名，並謹向所有對本書有貢獻的人致最大的謝意。

熱 傳 導 目 錄

第一章 引 言 (<i>Introduction</i>)	1
1-1 熱傳導 (<i>Conduction Heat Transfer</i>)	2
1-2 熱傳導度 (<i>Thermal Conductivity</i>)	7
1-3 對流傳熱 (<i>Convection Heat Transfer</i>)	13
1-4 輻射傳熱 (<i>Radiation Heat Transfer</i>)	15
1-5 因次與單位 (<i>Dimensions and Units</i>)	16
1-6 複習問題 (<i>Summary</i>)	22
習 題	23
參考文獻	26
第二章 一因次穩定態傳導 (<i>Steady-State Conduction-One Dimension</i>)	27
2-1 引 言 (<i>Introduction</i>)	27
2-2 平面壁 (<i>The Plane Wall</i>)	27
2-3 徑向系統——圓柱 (<i>Radial Systems—Cylinders</i>) ...	29
2-4 總熱傳係數 (<i>The Overall Heat - Transfer Coefficient</i>)	34
2-5 絕熱的臨界厚度 (<i>Critical Thickness of Insulation</i>)	36
2-6 熱源系統 (<i>Heat - Source Systems</i>)	37
2-7 具熱源之圓柱體 (<i>Cylinder With Heat Sources</i>)	39
2-8 傳導——對流系統 (<i>Conduction-Convection Systems</i>)	42
2-9 凸片 (散熱片) (<i>Fins</i>)	45

2 目 錄

2-10 熱接觸阻抗 (Thermal Contact Resistance)	54
複習問題	58
習 題	59
參考文獻	66

第三章 穩態，二因次傳導 (Steady-State

Conduction - Two Dimensions)

3-1 引 言 (Introduction)	67
3-2 二因次熱傳導的數學分析 (Mathematical Analysis of Two-Dimensional Heat Conduction)	68
3-3 圖解分析法 (Graphical Analysis)	73
3-4 傳導的形狀因素 (The Conduction Shape Factor) ...	74
3-5 數值分析法 (Numerical Method of Analysis)	78
3-6 藉熱阻元素表示的數值公式 (Numerical Formulation in Terms of Resistance Elements)	91
3-7 高斯 - 賽德耳疊代法 (Gauss-Seidel Iteration)	95
3-8 二因次熱傳導的電路類比 (Electrical Analogy For Two-Dimensional Conduction)	100
複習問題	101
習 題	101
參考文獻	107

第四章 非穩態熱傳導 (Unsteady Conduction) ...109

4-1 引 言 (Introduction)	109
4-2 塊狀熱容系統 (Lumped-Heat-Capacity System) ...	111
4-3 在半無限固體內之暫態熱流 (Transient Heat Flow in A Semi-Infinite Solid)	117
4-4 對流邊界條件 (Convection Boundary Conditions) ...	122

4-5	多因次系統 (Multidimensional Systems).....	135
4-6	暫態數值解法 (Transient Numerical Method).....	141
4-7	熱阻及熱容的表示式 (Thermal Resistance and Capacity Formulation).....	148
4-8	圖解分析——斯密特圖 (Graphical Analysis—The Schmidt Plot).....	157
	複習問題.....	160
	習 題.....	160
	參考文獻.....	167
第五章 對流的原理 (Principles of Convection) 168		
5-1	引 言 (Introduction).....	168
5-2	黏滯流動 (Viscous Flow).....	168
5-3	非黏性流動 (Inviscid Flow).....	172
5-4	平板上之層流邊界層 (Laminar Boundary Layer on A Flat Plate).....	177
5-5	邊界層的能量方程式 (Energy Equation of The Boundary Layer).....	186
5-6	熱邊界層 (The Thermal Boundary Layer).....	190
5-7	流體摩擦與熱傳遞間之關係 (The Relation Between Fluid Friction And Heat Transfer).....	199
5-8	擾流邊界層的熱傳遞 (Turbulent - Boundary - Layer Heat Transfer).....	102
5-9	擾流邊界層厚度 (Turbulent - Boundary - Layer Thickness).....	210
5-10	管狀層流的熱傳遞 (Heat Transfer in Laminar Tube Flow).....	212
5-11	管內之擾流 (Turbulent Flow in A Tube).....	218

4 目 錄

5-12 高速流動之熱傳遞 (Heat Transfer in High-Speed Flow)	221
複習問題	228
習 題	229
參考文獻	234

第六章 強迫性對流的經驗及實際關係 (*Empirical and Practical Relations For Forced-Convection Heat Transfer*) 235

6-1 引 言 (Introduction)	235
6-2 管流之經驗公式 (Empirical Relations for Pipe and Tube Flow)	236
6-3 經圓柱及球體的流動 (Flow Across Cylinders and Spheres)	248
6-4 橫越管列之流動 (Flow Across Tube Banks)	258
6-5 液態金屬的熱傳導 (Liquid-Metal Heat Transfer)	263
複習問題	267
習 題	267
參考文獻	273

第七章 自然對流系統 (*Natural-Convection Systems*) 275 |

7-1 引 言 (Introduction)	275
7-2 在垂直平板上之自然對流熱傳送 (Free-Convection Heat Transfer On A Vertical Flat Plate)	275
7-3 自由對流之經驗公式 (Empirical Relations for Free Convection)	285
7-4 在垂直平面與圓柱之自由對流 (Free Convection	

	From Vertical Planes and Cylinders)	286
7-5	水平圓柱體的自然對流 (Free Convection From Horizontal Cylinders)	292
7-6	水平平板之自由對流 (Free Convection From Horizontal Plates)	293
7-7	傾斜面之自由對流 (Free Convection From Inclined Surfaces)	293
7-8	非牛頓性流體 (Nonnewtonian fluids)	295
7-9	空氣之簡化方程式 (Simplified Equations for Air)	296
7-10	球體之自由對流 (Free Convection From Spheres)	298
7-11	封閉空間內之自然對流 (Free Convection in Enclosed Spaces)	298
7-12	合併自然及強制對流 (Combined Free and Forced Convection)	305
	複習問題	310
	習 題	311
	參考文獻	316
 第八章 幅射熱傳遞 (<i>Radiation Heat</i>		
	<i>Transfer</i>)	319
8-1	引 言 (Introduction)	319
8-2	物理機構 (Physical Mechanism)	319
8-3	輻射性質 (Radiation Properties)	322
8-4	輻射之形狀因數 (The Radiation Shape Factor) ...	331
8-5	形狀因數間之關係 (Relations Between Shape Factors)	339
8-6	在非黑體間之熱交換 (Heat Exchange Between Nonblackbodies)	344

6 目 錄

8-7	無限大的平行面 (Infinite Parallel Planes)	350
8-8	輻射屏蔽物 (Radiation Shields)	352
8-9	氣體輻射 (Gas Radiation)	355
8-10	對可吸收及穿透介質之輻射網路 (Radiation Network For an Absorbing and Transmitting Medium)	368
8-11	鏡射表面間之輻射交換 (Radiation Exchange with Specular Surfaces)	374
8-12	具有穿透、反射及吸收性介質之輻射交換 (Radiation Exchange with Transmitting, Reflecting, and Absorbing Media)	381
8-13	數值解之公式 (Formulation For Numerical Solution)	388
8-14	太陽輻射 (Solar Radiation)	400
8-15	輻射在溫度測量上的效應 (Effect of Radiation on Temperature Measurement)	404
8-16	輻射熱傳係數 (The Radiation Heat-Transfer Coefficient)	405
	複習問題	406
	習 題	407
	參考文獻	417

第九章 冷凝與沸騰之熱傳遞 (*Condensation and Boiling Heat Transfer*)

9-1	引 言 (Introduction)	419
9-2	冷凝熱傳現象 (Condensation Heat - Transfer Phenomena)	419
9-3	冷凝數 (The Condensation Number)	425
9-4	在水平管內之薄膜冷凝 (Film Condensation)	

	Inside Horizontal Tubes)	426
9-5	沸騰熱傳遞 (Boiling Heat Transfer)	430
9-6	水之沸騰熱傳遞之簡化公式 (Simplified Relations for Boiling Heat Transfer with Water)	444
9-7	摘要及設計資料 (Summarg. and Design Information)	446
	複考問題	448
	習 題	448
	參考文獻	452
第十章 熱交換器 (Heat Exchangers)		454
10-1	引 言 (Introduction)	454
10-2	總熱傳係數 (The Overall Heat - Transfer Coefficient)	455
10-3	積垢因數 (Fouling Factors)	462
10-4	熱交換器之型式 (Types of Heat Exchangers)	463
10-5	對數平均溫差 (The Log Mean Temperature Difference)	466
10-6	有效度——NTU法 (Effectiveness - NTU Method)	474
10-7	性質變化之分析 (Analysis For Variable Properties)	489
10-8	熱交換器設計之考慮 (Heat-Exchanger Design Considerations)	491
	複習問題	491
	習 題	492
	參考文獻	498

第十一章 質量傳送 (<i>Mass Transfer</i>)	499
11-1 引 言 (Introduction)	499
11-2 Fick's 擴散定律 (Fick's Law of Diffusion)	500
11-3 氣體擴散 (Diffusion in Gases)	502
11-4 液體及固體中的擴散 (Diffusion in Liquids and Solids)	508
11-5 質量傳送係數 (The Mass-Transfer Coefficient)	509
複習問題	515
習 題	515
參考文獻	517
第十二章 熱傳學的特殊問題 (<i>Special Topics</i> <i>in Heat Transfer</i>)	519
12-1 引 言 (Introduction)	519
12-2 磁漿流體力學系統之熱傳導 (Heat Transfer in Magnetofluidynamic (MFD) Systems)	519
12-3 散發冷卻 (Transpiration Cooling)	527
12-4 低密度熱傳導 (Low-Density Heat Transfer)	533
12-5 熔解消失 (Ablation)	543
12-6 熱 管 (The Heat Pipe)	546
複習問題	550
習 題	550
參考文獻	552
第十三章 環境熱傳 (<i>Heat Transfer in The</i> <i>Environment</i>)	554
13-1 引 言 (Introduction)	554

13-2	環境中的輻射性質 (Radiation Properties of The Environment)	554
13-3	大氣中的對流穩定性 (Convective Stability in The Atmosphere)	561
13-4	蒸發過程 (Evaporation Processes)	567
13-5	湖水中的溫度分佈 (Temperature Distributions in Lakes)	571
	複習問題	576
	習 題	576
	參考文獻	578
附錄A	數值表 (Appendix A Tables)	579
附錄B	層流邊界層方程式的正解 (Exact Solutions to The Laminar - Boundary - Layer Equations)	598
索 引		605

第一章 引 言

(Introduction)

熱傳學是什麼？簡而言之就是當兩物體間有溫度差異時，用以預測兩物體間所產生的各種能量傳遞現象之科學。此種能量傳遞在熱力學中稱為熱，熱傳學尋求的不僅僅是解釋熱能之如何傳遞，而且也預測其在各種特殊條件下熱能交換的速率。熱力學與熱傳學之主要分別是：熱傳導主要在分析熱傳率；而熱力學處理的是在平衡狀態下之系統，它可用以預測使一個系統由某一個平衡狀態 (Equilibrium State) 改變為另外一個平衡狀態所需能量之多寡。但是它並不能用以預測在此過程中，處於不平衡情況下系統達至平衡狀態所需時間到底是多少。熱傳學利用了熱力學第一及第二定律，同時使用了實驗的方法以確立能量傳遞速率之觀念，就如同在熱力學中一樣，這些用於熱傳學中的實驗方法，都是簡單而且易於推廣到各種不同的實際情況。

舉例來說，將一熱鋼棒放入一桶冷水中，熱力學只能提供其達於平衡時之溫度，而不能提供達至平衡所需要之時間，也不能預測在達到平衡狀態前某一時刻之溫度，熱傳學卻可以將鋼棒和水之溫度以時間的函數表現出來。

大部份的讀者都知道熱傳遞的三種形式，即傳導、對流，與輻射，在本章內將首先解釋這三種形式的機構，以使各位對之能有適當的了解，在以後各章中再詳細討論熱傳遞之三種形式。

2 熱傳導

1-1 熱傳導 (Conduction Heat Transfer)

在一物體內，若存在著一溫度梯度時，能量將由高溫處傳至低溫處，此種能量之傳送方式我們謂之為傳導，其單位面積之熱傳速率是與其溫度梯度成正比關係，即

$$\frac{q}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x}$$

若將其比例常數代入即得

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1-1)$$

其中 q 為熱傳率， $\frac{\partial T}{\partial x}$ 為在熱流動方向之溫度梯度，正值常數 k 謂之此材料之熱傳導度，而式中負號是表示熱乃是由高溫處流至低溫處，以符合熱力學第二定律。如圖 (1-1) 所示。(1-1) 式又稱為 Fourier's 定律，以紀念此位法國數學、物理學家 Joseph Fourier 在熱傳導的分析處理上所做過的一些重要貢獻，值得注意的是 (1-1) 式也同時定義了熱傳導度 k ，在典型的單位系統中，若以瓦特 (Watt) 來代表熱流量，則 k 的單位為 Watt/m, °C。

現在假若我們要決定支配固體熱傳送的一個基本方程式，(1-1) 式可用之為出發點。

考慮一因次 (1-dimension)，穩態系統 (steady system) ——

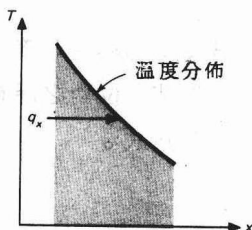


圖 1-1 熱流之方向圖

即溫度不能隨時間而改變。則此問題僅須簡單的將(1-1)式積分，且代入以適當之值，就可將所需之熱傳量解出，但若此問題是一非穩定態 (unsteady) 溫度隨著時間而改變，例如固體內有熱源 (Heat source)，熱穴 (Heat sink) 之存在時，顯然的，問題將複雜許多，為了使問題能更廣泛的包括各種情況，我們考慮在物體中具有熱源，且溫度隨時間而變化之問題的解決方式。

在一厚為 dx 之元件 (element) 中，如圖 1-2：

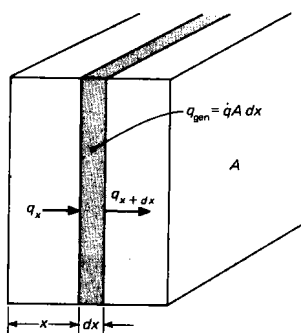


圖 1-2 一因次熱傳導分析之體積元件

其能量之平衡關係，可寫為

由左面傳導進入元件之能量 + 元件中產生的熱量
= 內能的變化量 + 由元件右面傳導出之能量
這些能量可表示如下：

$$\text{進入左面之能量} = q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$\text{元件所產生之熱量} = \dot{q} A dx$$

$$\text{內能的變化量} = \rho c A \frac{\partial T}{\partial \tau} dx$$

$$\text{傳出左面之能量} = q_{x+dx} = -kA \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x+dx}$$