

13.23
6

熱傳學

HEAT TRANSFER

HOLMAN 原著

(第四版)

蔡 隆 明 編譯

興業圖書股份有限公司 印行

A decorative border of small, stylized floral motifs surrounds the central text.

熱 傳 學

HEAT TRANSFER

HOLMAN 原著

第 四 版

蔡 隆 明 編 譯

興業圖書股份有限公司印行

版權所有 • 翻印必究

中華民國 六十八 年 五 月 一版

熱 傳 學

定價 平裝：壹佰 拾元正

原著者：HOLMAN

編譯者：蔡 隆 明

出版登記行政院局版台業字第零肆壹零號

出版者：興業圖書股份有限公司

發行人：王 志 康

發行所：興業圖書股份有限公司

台南市勝利路一一八號

電話(062) 373253

郵政劃撥南字 31573 號

打字印刷：百 祥 打 字 行

台南市富強路144巷104弄37號

序 言

本書乃提供熱傳送的基本原理。作為教科書，它包含有足夠的內容，可供作為一學期課程之用。依課程的目標，可適用於大學中低年級或高年級使用。如對常微分方程已有認識，則將有助於正確的理解本書所包含的材料。雖然有關流體力學方面的知識，將有助於對流討論的了解，但並非必要。熱力學能量平衡的理論，在各種的分析過程中，亦是相當有用的。

雖然我們強調對流熱傳送的物理機構乃是經由熱傳送表面附近的靜止流體層傳導的一種。本書將仍依照古典的路線分別討論傳導、對流和輻射。本書的全篇重點，特別強調對物理意義的瞭解。同時用實驗數據來表示各種狀況的熱傳送。

傳導問題，用解析法與數值法同時處理，使讀者能深入瞭解數值分析與解析分析在實際上是同樣的重要。而前者更是解決實際問題的利器。在對流熱傳送中，亦沿用類似的步驟。自由對流和強制對流邊界層的積分法分析，用以說明對流過程的物理意義。從其物理意義的描述中，自然的導出可用以計算對流熱傳送係數的經驗公式或實用公式。因為輻射網路法比其他方法更容易說明，所以在輻射系統分析中，將廣泛的使用此法。

對數 - 平均 - 溫度差法與效率趨近法，將在熱交換器分析中採用之，因為兩法久被設計者所廣泛使用，同時兩法各有其優點。關於擴散與質量傳送，本書將作簡短的介紹，使讀者對這些程序有一些認識，並建立熱量、質量及動量傳送間重要的相似性。

第 12 章將討論許多特殊的論題，對前述幾章中基本材料的特點，再作若干額外的增加。第 13 章有關大自然的熱傳送問題亦相當特殊，但僅包含若干能增加讀者興趣的內容。

在每章後面，附上若干問題。某些問題將使讀者對數值的處理及在熱傳送上所用的各種不同參數的因次大小，能更為熟悉。其它問題則用以發揮本書的主題，使讀者必需將基本原理應用到新的情況，並推導自己的方程式。這兩種形式的問題都是很重要的。

熱傳送並非是一個靜態的主題，新的發展十分有規律的產生，並且較

熱傳

佳的分析解和實驗數據不斷的被尋找出來，因而有助於從事這方面工作的人。因為在研究論文中，採用大量資料，使初學者可能很容易因所呈現及發展的主題過於瑣細而感到驚慌。本書編纂目的在於提供基本的介紹。所以作者將扮演解釋所用論文的角色，使論文內的發現與方程式，能馬上為讀者所應用。在此深切盼望讀者的注意力，會因本書的引導，而轉移到較深的有關熱傳送主題的著作上。對興趣濃厚的讀者，在每章後面的參考資料，將提供若干有關熱傳送的文獻，以供更深入研究之用。

本書已出至第四版，每次改版均根據多年來許多明顯的反應與建議而改進。本版自不例外。基本的熱傳送機構，仍不改變，而分析技術及實驗數據則作若干的修訂和改進。此次新版的一個目的，在於採用最新的資料，使有關熱傳送的說明能符合時代潮流，但仍保留簡單的趨近法，使初習者易於瞭解。

目前，所有的學生及專業工程師，已採用計算機求解熱傳送的問題，固態記憶設備的快速發展實超乎想像，在不久的將來，我們可預期計算能力龐大的計算機，將大為盛行。不管這種計算機的運算能力如何，作者不欲列出特定的運算程式，其原因有二：(1)每一種計算機在它的輸入、輸出及副計劃能力必有所不同，(2)未來許多問題將會用桌上型計算機求解，這種計算機的程式和輸入 - 輸出設備，將更具獨立性。為了這些原因，在敘述數值解的各章節中，重點將放在問題的建立及各人的計算機設備所採用的公式上。

SI 單位（國際單位，與 MKS 制）目前已為各國工程師學會所採用，本書以往所用的英制單位（FPS 制）全部用公制單位（MKS 制）代替，讀者將發現公制單位的計算要比英制單位容易得多。雖然如此，英制單位與公制單位間的互換關係仍有瞭解的必要，因為英制單位在工業上仍廣泛的被運用。所以在各章的例題中，其中間步驟及答案還是附上英制的數值。

本版中，增加了許多新的題材，在第 2 章中，增加了典型接觸熱導度表；第 3、4 章中，列出傳導問題的數值解的新公式；第 5 章中，將亂流邊界層熱傳送分析加以修正；第 6 章中，增加一些新的強制對流經驗關係式；在第 7 章中，廣泛的重寫自由對流關係式，以反映最近的研究。重寫薄膜凝結部分；氣體輻射部分加以更深入的討論，並另增加一節，討論輻射問題的數值解公式。在所有各章內，增加一些新的、適當的例子，並將

熱傳

問題重加編組。至於公制單位的轉換亦予提及。

本書在此次改版時得到各方的指教良多，未能一一列出至爲抱歉，但在此對各位的熱忱與鼓舞謹致最大的謝意。

J. P. Holman.

符 號 說 明

a	局部音速	E_{b_0}	太陽常數 (8, 13 章)
a	衰減係數 (13 章)	E_{b_i}	單位波長之黑體放射能力 ，由式 (8-12) 定義
A	面積	E	電場向量
A	反射入射能量比 (13 章)	f	摩擦因子，由式 (5-106)) 定義
A_m	散熱片截面面積 (2 章)	F	力，(N)
B	磁場強度	F_{m-n}	或由 m 面至 n 面的輻射形狀
c	比熱 (通常單位 是 $\text{KJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$)	$F_{m,n}$	因子
C	濃度 (11 章)	g	重力加速度
C_D	阻滯係數，由式 (6-13) 所定義	g_c	換算因子，由式 (1-12)) 定義
C_f	磨擦係數，由式 (5-48) 所定義	$G = \frac{\dot{m}}{A}$	質量速度
C_p	等壓比熱，(通常為 $\text{KJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$)	G	照射量 (8 章)
C_v	等容比熱，(通常為 $\text{KJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$)	h	熱傳係數，($\text{W}/\text{m}^2^\circ\text{C}$)
d	直徑	h	平均熱傳係數
D	深度或直徑	h_D	質量—傳送係數，(m/h)
D	擴散係數 (11 章)	h_{pg}	蒸發焓，(KJ/kg)
D_H	水力直徑，由式 (6-12) 定義	h_r	輻射熱傳係數，(8 章)
e	單位質量之內能，通常為 (KJ/kg)	H	磁場強度
E	內能，通常為 (KJ)	i	焓，(KJ/kg)
E	放射能力，(W/m^2)， (8 章)	I	輻射強度
		I	日照率 (13 章)
		I_0	大氣外緣之日照率，式 (13-4b)
		J	發射度 (8 章)

熱傳

J	電流密度	S	傳導形狀因子, (m)
k	熱導度 ($W/m \cdot ^\circ C$)	t	厚度, 用在散熱片問題 (2章)
k_s	封閉空間之有效熱導度 (7章)	t, T	溫度
k_d	散射係數 (13章)	u	速度
L	長度	v	速度
L_c	修正散熱片長度 (2章)	v	比容, (m^3/kg)
m	質量	V	速度
$\dot{m}$	質量流率		分子體積 (11章)
M	分子量 (11章)	W	重量, (N)
n	分子密度	x, y, z	直角系之空間座標
n	混濁因子, 式 (13-4) 定義	$\alpha = \frac{k}{\rho c}$	熱擴散係數, (m^2/s)
N	摩耳擴散速率, moles/時間, (11章)	α	吸收率 (8章)
p	壓力 (N/m^2)	α	調整係數 (12章)
P	周長	α	太陽仰角, (13章)
q	熱傳送速率, ($KJ/\text{時間}$)	α	大氣氣溫遞減率 (LR)
q''	熱流通量, ($KJ/\text{時間} \cdot \text{面積}$)	β	體積膨脹係數, $1/^\circ K$.
$\dot{q}$	單位體積之發熱量	β	熱導度之溫度係數, $1/^\circ C$.
$\bar{q}_{m,n}$	結點殘餘量, 用於鬆弛法 (3, 4章)	$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$	等熵指數, 無因次
Q	熱量, (KJ)	Γ	平板單位深度之凝結質量流動 (9章)
r	半徑或徑向距	Γ	乾絕熱氣溫遞減率 (DALR, 13章)
r	回收因子, 由式 (5-114) 定義	δ	流動體力邊界層厚度
R	固定半徑	δ_t	熱邊界層厚度
R	氣體常數	ϵ	熱交換器之效率
R_{th}	熱阻抗, ($^\circ C/W$)	ϵ	輻射度
s	特性因子 (4章)	ϵ_H, ϵ_M	熱量與動量之渦流擴散係數 (5章)
S	分子速率比 (12章)		

$\zeta = \frac{\delta_t}{\delta}$ 熱邊界層厚度與流體動力
邊界層厚度比

η 相似性變數，由式 (B-6)
定義

η_f 散熱片效率，無因次

θ 球或圓柱座標之角度

θ 溫度差， $T - T_{ref}$ ，參考
溫度的選擇依各種不同的
系統而異 (2 至 4 章)

λ 波長

λ 平均自由徑 (12 章)

μ 力學粘度

ν 動粘度

ν 輻射頻率 (8 章)

ρ 密度，(kg/m³)

ρ 反射率 (8 章)

ρ_e 電荷密度

σ 電導度

σ Stefan-Boltzmann
常數

σ 液-汽界面之表面張力
(9 章)

τ 時間

τ 流體層間之剪應力

τ 穿透率 (8 章)

ϕ 球或圓柱座標之角度

Ψ 流動函數
無因次群

$Bi = \frac{hs}{k}$ Biot 模數

$Ec = \frac{u_\infty^2}{c_p (T_\infty - T_w)}$ Eckert 數

$Fo = \frac{\alpha \tau}{s^2}$ Fourier 模數

$Gr = \frac{g \beta (T_w - T_\infty) x^3}{\nu^2}$

Grashof 數

$Gr^* = Gr Nu$ 對於固定熱流通量
下的修正 Grashof 數

$Gz = Re Pr \frac{d}{L}$ Graetz 數

$Kn = \frac{\lambda}{L}$ Knudsen 數

$Le = \frac{\alpha}{D}$ Lewis 數 (11 章)

$M = \frac{u}{a}$ Mach 數

$N = \frac{\alpha B_z^2 x}{\rho u_\infty}$ 磁影響數

$Nu = \frac{hx}{k}$ Nusselt 數

$\overline{Nu} = \frac{hx}{k}$ 平均 Nusselt 數

$Pe = Re - Pr$ Peclet 數

$Pr = \frac{c_p \mu}{k}$ Prandtl 數

$Re = \frac{\rho u x}{\mu}$ Reynolds 數

$Sc = \frac{\nu}{D}$ Schmidt 數 (11 章)

$Sh = \frac{h_D x}{D}$ Sherwood 數
(11 章)

$St = \frac{h}{\rho c_p u}$ Stanton 數

熱傳

$$\overline{St} = \frac{h}{\rho c_p u} \quad \text{平均 Stanton 數}$$

註腳下標

<i>aw</i>	絕熱壁狀況
<i>b</i>	對黑體狀況 (8 章)
<i>b</i>	總體狀況下之值
<i>d</i>	以直徑為準
<i>f</i>	在膜狀況下之計值
<i>g</i>	飽和蒸汽狀況 (9 章)
<i>i</i>	開始或入口狀況
<i>L</i>	以板長度為準
<i>m</i>	平均流動狀況

<i>m, n</i>	在數值解法中表示結點位置 (見 3 、 4 章)
0	表示滯流狀況 (5 章) 或時間為零的初始狀況
<i>r</i>	在指定的徑向位置
<i>s</i>	在周圍狀況之值
<i>x</i>	對 <i>x</i> 座標的局部位置
<i>w</i>	在壁狀況之值
*	(上標), 在參考溫度下所求得之性質, 用式 (5-118)
∞	在自由流動狀況的值

目 錄

序 言	xi
符號說明	xv
第一章 緒 論	1
1-1 傳導熱傳送	2
1-2 熱導度	6
1-3 對流熱傳送	10
1-4 輻射熱傳送	13
1-5 因次與單位	14
1-6 摘要	18
問 題	19
參考資料	22
第二章 穩定態熱傳導——一度空間	23
2-1 緒 論	23
2-2 平面壁	23
2-3 徑向系統——圓柱體	25
2-4 總體熱傳送係數	29
2-5 臨界絕熱厚度	30
2-6 熱源系統	31
2-7 具有熱源的圓柱體	32
2-8 傳導——對流系統	35
2-9 散熱片	38
2-10 接觸熱阻抗	44
複習問答	48
問 題	48
參考資料	54

第三章 穩定態熱傳導—二度空間..... 57

3-1	緒論	57
3-2	二度空間熱傳導之數學分析	58
3-3	圖解法分析	62
3-4	熱傳導的形狀因子	63
3-5	數值分析法	65
3-6	用熱阻元素表示的數值公式	78
3-7	Gauss - Seidel 疊代法	82
3-8	二度空間熱傳導的電路類比關係	86
	複習問答	87
	問題	87
	參考資料	93

第四章 非穩定態熱傳導..... 97

4-1	緒論	97
4-2	總體熱容系統	99
4-3	半無限長固體的過渡熱流	104
4-4	對流邊界狀況	108
4-5	多度空間系統	121
4-6	過渡熱流的數值解法	125
4-7	熱阻抗及熱容公式	131
4-8	圖解分析法——Schmidt 繪法	138
	複習問答	140
	問題	141
	參考資料	147

第五章 對流原理..... 149

5-1	緒論	149
5-2	粘性流	150
5-3	非粘性流	153
5-4	平板面上的層流邊界層	157

5-5	邊界層的能量方程式	164
5-6	熱邊界層	167
5-7	流體摩擦與熱傳送間的關係	174
5-8	亂流邊界層熱傳送	176
5-9	亂流邊界層厚度	183
5-10	管內層流的熱傳送	185
5-11	管內的亂流	189
5-12	高速流的熱傳送	191
	複習問答	197
	問 題	198
	參考資料	202

第六章 強制對流熱傳的經驗與實用關係式..... 205

6-1	緒 論	205
6-2	管流的經驗關係式	207
6-3	橫過圓柱體與球體的流動	216
6-4	橫過管堆的流動	225
6-5	液態金屬的熱傳送	229
	複習問答	232
	問 題	233
	參考資料	237

第七章 自然對流系統..... 243

7-1	緒 論	243
7-2	垂直平板上的自由對流熱傳送	243
7-3	自由對流的經驗關係式	251
7-4	垂直平面與圓柱體的自由對流	252
7-5	水平圓柱體的自由對流	257
7-6	水平平板的自由對流	257
7-7	傾斜表面的自由對流	258
7-8	非牛頓流體	259
7-9	空氣用簡化方程式	260

熱傳

7-10	球體的自由對流	262
7-11	封閉空間內的自由對流	262
7-12	兼具自由與強制對流的情況	267
複習問答		272
問 題		273
參考資料		277

第八章 輻射熱傳

287

8-1	緒 論	287
8-2	物理機構	287
8-3	輻射性質	289
8-4	輻射熱傳的形狀因子	298
8-5	形狀因子間的關係	304
8-6	非黑體間的熱交換	308
8-7	無限平行平面	313
8-8	輻射屏	314
8-9	氣體輻射	316
8-10	對於吸收與穿透介質的輻射網路	326
8-11	鏡射表面的輻射熱交換	330
8-12	穿透，反射與吸收介質的輻射熱交換	335
8-13	數值解公式	341
8-14	太陽輻射	351
8-15	輻射對溫度測定的影響	354
8-16	輻射熱傳係數	355
複習問答		355
問 題		356
參考資料		364

第九章 凝結與沸騰熱傳

355

9-1	緒 論	355
9-2	凝結熱傳現象	355
9-3	凝結數	360

9-4	水平管內的薄膜凝結	361
9-5	沸騰熱傳	363
9-6	水之沸騰熱傳的簡化關係式	376
9-7	摘要與設計資料	378
	複習問答	379
	問 題	379
	參考資料	383

第十章 熱交換器..... 385

10-1	緒 論	385
10-2	總體熱傳係數	386
10-3	積垢因子	391
10-4	熱交換器的型式	392
10-5	對數平均溫度差	395
10-6	效率 - NTU 法	403
10-7	可變性質的分析	415
10-8	熱交換器設計上的各種考慮因素	416
	複習問答	417
	問 題	417
	參考資料	423

第十一章 質量傳送..... 425

11-1	緒 論	425
11-2	Fick 擴散定律	426
11-3	氣體的擴散	427
11-4	液體與固體的擴散	432
11-5	質量傳送係數	433
	複習問答	437
	問 題	437
	參考資料	439

第十二章 熱傳的特殊主題..... 441

熱傳

12-1	緒論	441
12-2	在磁流動力系統中的熱傳	441
12-3	蒸發冷卻	447
12-4	低密度熱傳	453
12-5	融磨冷卻	461
12-6	熱管	464
	複習問答	467
	問題	468
	參考資料	469

第十三章 大自然之熱傳 471

13-1	緒論	471
13-2	大自然之輻射性質	477
13-3	大氣中之對流穩定性	482
13-4	蒸發過程	485
13-5	湖泊的溫度分佈	485
	複習問答	489
	問題	489
	參考資料	490

附錄A ——表 495

A-1	誤差函數	495
A-2	金屬之各種性質	496
A-3	非金屬之性質	499
A-4	飽和液體之性質	501
A-5	在大氣壓下，空氣之性質	503
A-6	在大氣壓下，氣體之性質	504
A-7	一些常見低熔點金屬的物理性質	506
A-8	25°C，1 atm 下，氣體和蒸汽在空氣中的擴散係數	506
A-9	水的性質（飽和液體）	507
A-10	各種不同表面的正常總放射率	508
A-11	鋼管尺寸	510

A - 12	轉換因數	511
附錄B	層流邊界層方程式的正確解	514