熱傳遞學題解

（第五版）

原著者：J. P. Holman

解題者：黃劍化　吳志文

熱傳遞學題解

（第 五 版）

霍尔曼

原著者：J. P. Holman

解題者：黃劍化　吳志文

科技圖書股份有限公司

本公司經新聞局核准登記
登記證局版台業字第1123號

書　　名：熱傳遞學題解
原著者：J. P. Holman
解題者：黃劍化　吳志文
發行人：趙　國　華
發行者：科技圖書股份有限公司
台北市重慶南路一段49號四樓之一
電　話：3118308・3118794
郵政劃撥帳號 0015697-3

七十四年元月初版　　　特價新台幣 150 元

前　　言

Holman 教授著熱傳遞學第五版的中譯本，已由毛迪教授就第四版的原譯本，經過增刪補譯，並於七十三年出版。原書的習題亦有增加，另請吳志文碩士代爲補演校訂。由於原版並無答案可資校對，故所有解答僅可供參考。讀者務必自己先作詳細推演，再查對本書以資參證，如此才能獲益，幸垂察焉。

科技圖書股份有限公司編輯部誌

目　錄

第一章　導　論……1
第二章　穩定態熱傳導——一度空間……15
第三章　穩定態熱傳導——二度空間……63
第四章　非穩定態熱傳導……98
第五章　對流原理熱傳導……137
第六章　強制對流熱傳遞的經驗與實用關係式……175
第七章　自然對流系統……226
第八章　輻射熱傳遞……286
第九章　凝結與沸騰熱傳遞……377
第十章　熱交換器……408
第十一章　質量傳遞……465
第十二章　熱傳的特殊主題……487

第一章 導　論

問　題

1.1　定義熱導度（thermal conductivity）

【解】依式（1-1），其定義為

$$k = -q / \left(A \frac{\partial T}{\partial X} \right)$$

式中 q 爲熱傳遞率。

1.2　定義對流熱傳係數（convection heat-transfor coefficient）

【解】依式（1-8），定義爲

$$h = \frac{q}{A(T_w - T_\infty)}$$

1.3　討論氣相與固相的熱傳導機構。

【解】

(a) 氣相：在氣體中，分子作連續而雜亂的運動，互相碰撞以交換能量與動能。高能量分子即借着碰撞將能量傳給低能量分子。另分子由高溫移至低溫區，亦可將動能傳到系統的低溫部份。此即氣體的熱傳導機構。

(b) 固相：在固體中，熱傳的機構有二，一是靠晶體格子的振動傳熱，一是靠自由電子移動傳熱。

1.4　討論熱對流機構。

【解】 對流與傳導頗有關連，可以說是流體流動影響及溫度梯度變化下的傳導現象。在表面上因爲流速爲0，所以在此附近的現象可視爲單純的傳導，但離開表面較遠的地方的熱傳現象可能包含傳導及流體粒子的紊亂移動（ turbulent ），即整塊的流體由點A移動到點B而將熱量帶走。

1.5 若 3kW的熱，以傳導方式通過一絕緣材料，其截面積爲 0.1 m² ，厚度爲 2.5 cm，熱導度爲 0.2 W/m-°C。計算材料兩個端面的溫度差。

【解】 由（1-1）式

$$q = -kA\frac{\Delta T}{\Delta x}$$

故

$$\Delta T = \frac{-q}{k}\frac{\Delta x}{A}$$

$$= \frac{3\times 10^3}{0.2}\times\frac{2.5\times 10^{-2}}{0.1}$$

$$= 3750^\circ\mathrm{C}$$

1.6 利用 1-5節的單位與因次的定義，求下列諸單位間的關係。(a)焦耳轉換爲Btu，(b)達因-釐米轉換爲焦耳，(c)Btu轉換爲 cal 。

【解】

(a) $$1\,J = 1\,J\,\frac{1\ \mathrm{lb_f\cdot ft}}{1.356\,J}\,\frac{1\ \mathrm{Btu}}{778.16\ \mathrm{lb_f\cdot ft}}$$

$$= 9.477\times 10^{-4}\ \mathrm{Btu}$$

(b) $$1\ \mathrm{dyne\cdot cm^2}$$

$$= 1\ \mathrm{g\ cm^2/sec^2}$$

$$= 1\,\mathrm{g\,cm^2/sec^2}\times\frac{\mathrm{kg}}{1000\ \mathrm{g}}\times\left(\frac{1\,\mathrm{m}}{100\,\mathrm{cm}}\right)^2$$

$$= 10^{-7}\ \mathrm{kg\,m^2/sec}$$

$$= 10^{-7}\ J$$

(c) $1\ \mathrm{Btu} = 252\ \mathrm{cal}$ $\quad\therefore\quad$ $1\,J = 4.2\ \mathrm{cal}$

1.7 橫過一厚度爲 13 cm的玻璃纖維層，其溫度差爲 85°C 。玻璃纖維的熱導度爲 0.035 W/m-°C。計算該材料每小時，每單位面積所傳遞的熱量。

【解】

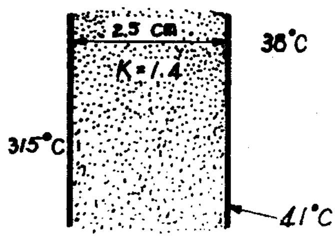
$$\frac{q}{A}=-k\frac{\Delta T}{\Delta x}=k\frac{(-\Delta T)}{\Delta x}$$

$$=0.035\times\frac{85}{0.13}\ W/m^2$$

$$=22.88W/m^2\times\frac{J}{W\cdot sec}\times\frac{3600\ sec}{hr}$$

$$=82.4\ KJ/m^2\ hr$$

1.8 一平面牆壁曝露於 38°C 的周圍溫度中，壁的表面覆蓋厚度 2.5 cm的熱絕緣層，其熱導度爲 1.4W/m-°C ，在熱絕緣層內面的牆壁溫度爲 315°C ，熱以對流方式逸散。計算熱絕緣層外表面所需保持的對流傳遞係數，使熱絕緣層外表面的溫度，保持在 41°C以下。



【解】
$$q=-kA\frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$$=hA(T_w-T_\infty)$$

$$\therefore h=\frac{K}{T_w-T_\infty}\ \frac{(-\Delta T)}{\Delta x}$$

$$=\frac{1.4}{41-38}\ \frac{(315-41)}{0.025}$$

$$=5.11\ kW/m^2\ {}^\circ C$$

1.9 建立兩個完全的黑表面，使離開溫度爲 800°C 的表面的所有輻射能，完全抵達另一表面上。另一表面的溫度保持在 250°C。計算每小時，維持在 800°C表面的每單位面積與另一表面間的熱傳遞。

【解】 由式(1-9)

$$\frac{q}{A}=\sigma(T_1^4-T_2^4) \quad (但\ \sigma=5.67\times10^{-8}\,\mathrm{W/m^2})$$

$$=5.67\times10^{-8}[(800+273)^4-(250+273)^4]$$

$$=70.9\,\mathrm{kW/m^2}$$

1.10　兩個極大的平行平面，其表面近乎黑體表面，分別保持 1100 °C與 425°C。計算單位時間、單位表面積、兩平面間的輻射熱傳遞。

【解】 由式(1-9)

$$\frac{q}{A}=\sigma(T_1^4-T_2^4)$$

$$=5.67\times10^{-8}[(1100+273)^4-(425+273)^4]$$

$$=1.88\times10^2\,\mathrm{kW/m^2}$$

1.11　$\frac{1}{4}$ in 厚的鋼平板，具 25 Btu/h-ft-°F 的熱導度，曝露在輻射熱通量(radiant heat flux)為 1500 Btu/h-ft² 的真空空間中，此時可忽略對流熱傳遞。假設曝露在輻射能的鋼表面溫度維持在 100°F 。若撞擊該平板的所有輻射能，藉着傳導作用通過此平板。試求另一表面的溫度。

【解】

$$q=-kA\frac{\Delta T}{\Delta x}\quad,\quad \Delta T=T-100°\mathrm{F}$$

$$\therefore T=100-\frac{q\,\Delta x}{kA}$$

$$=100-\frac{1500\times(\frac{1}{4}\times\frac{1}{12})}{25}$$

$$=98.8°\mathrm{F}$$

1.12　由直角坐標的三度空間熱傳導公式〔式(1-3a)〕。試導出用圓柱坐標的一般熱傳導方程式。

【解】

$$x=r\cos\phi \qquad r=\sqrt{x^2+y^2}$$

$$y=r\sin\phi \qquad \phi=\tan^{-1}\frac{y}{x}$$

$$z=Z \qquad z=z$$

由連續微分公式：

$$\frac{\partial A}{\partial x}=\frac{\partial A}{\partial r}\frac{\partial r}{\partial x}+\frac{\partial A}{\partial \phi}\frac{\partial \phi}{\partial x}+\frac{\partial A}{\partial z}\frac{\partial z}{\partial x}+\frac{\partial A}{\partial t}\frac{\partial t}{\partial x}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

$$\frac{\partial r}{\partial x}=\frac{\partial\sqrt{x^2+y^2}}{\partial x}=\frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}}=\frac{r\cos\phi}{r}=\cos\phi$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial x}=\frac{\partial\tan^{-1}\dfrac{y}{x}}{\partial x}=\frac{\dfrac{-y}{x^2}}{1+(\dfrac{y}{x})^2}=\frac{-y}{x^2+y^2}=\frac{-\sin\phi}{r}$$

$$\frac{\partial Z}{\partial x}=0\text{，}\quad\frac{\partial t}{\partial x}=0$$ 代入(1)式得

$$\frac{\partial A}{\partial x}=\cos\phi\frac{\partial A}{\partial r}-\frac{\sin\phi}{r}\frac{\partial A}{\partial \phi}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

同法可得

$$\frac{\partial A}{\partial y}=\sin\phi\frac{\partial A}{\partial r}+\frac{\cos\phi}{r}\frac{\partial A}{\partial \phi}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

$$\frac{\partial A}{\partial z}=\frac{\partial A}{\partial z}\cdots\cdots(3)$$ (1)、(2)、(3)式中的 A 爲任意函數

將以上各式代入式（1-3a）得

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}=\frac{\partial}{\partial x}(\frac{\partial T}{\partial x})$$

$$=\frac{\partial}{\partial x}(\cos\phi\frac{\partial T}{\partial r}-\frac{\sin\phi}{r}\frac{\partial T}{\partial \phi})$$

$$=\cos\phi\frac{\partial}{\partial r}(\cos\phi\frac{\partial T}{\partial r})-\frac{\sin\phi}{r}\frac{\partial}{\partial \phi}(\cos\phi\frac{\partial T}{\partial r})$$

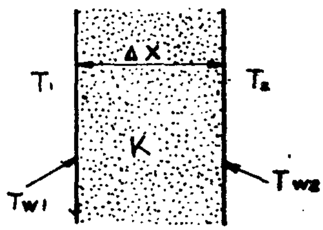
$$-\cos\phi\frac{\partial}{\partial r}(\frac{\sin\phi}{r}\frac{\partial T}{\partial \phi})+\frac{\sin\phi}{r}\frac{\partial}{\partial \phi}(\cos\phi\frac{\partial T}{\partial r})$$

將上式化簡，再用同法求出 $\partial^2T/\partial y^2$，$\partial^2T/\partial^2 z$ 代入式（1-3a）即可得式（1-3b）。

1.13 考慮一邊由對流來加熱，另一邊由對流來冷却牆壁。證明通過此牆壁的熱傳遞率式爲

$$q=\frac{T_1-T_2}{1/h_1A+\Delta x/kA+1/h_2A}$$

式中T_1與T_2爲牆壁兩側的流體溫度（ fluid temperature ），h_1與h_2爲流體所對應的熱傳遞係數。



【解】 設T_{w1}爲T_1液體面的牆壁溫度，

T_{w2}爲T_2的液體面的牆壁溫度，

則 $q=h_1A(T_1-T_{w1})$

$$=kA\frac{T_{w1}-T_{w2}}{\Delta x}$$

$$=h_2A(T_{w2}-T_2)$$

$$T_1-T_2=(T_1-T_{w1})+(T_{w1}-T_{w2})+(T_{w2}-T_2)$$

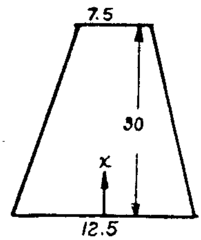
$$=\frac{q}{h_1A}+\frac{q}{kA/\Delta x}+\frac{q}{h_2A}$$

$$\therefore q=\frac{T_1-T_2}{\dfrac{1}{h_1A}+\dfrac{\Delta x}{kA}+\dfrac{1}{h_2A}}$$

1.14 30 cm高的截頭圓錐（ truncated cone ）係由鋁所製成。頂圓的直徑爲 7.5 cm，底圓的直徑爲 12.5 cm。在底面維持 93°C 溫度，頂表面溫度則爲 540°C 。其餘的表面均爲絕緣。假設爲一度空間熱流，問熱傳遞率（單位用 watt ）爲若干？

【解】

$$J=(12 \quad -\frac{x}{6})\times 10^{-2}\ \text{m}$$



截面積

$$A=\frac{\pi}{4}d^2=\frac{\pi}{4}(12.5-\frac{x}{6})^2\times10^{-4}\ \mathrm{m}^2$$

$$q=-kA\frac{dT}{dx}$$ （假設一度空間熱流）

$$\int_{93}^{540}k\,dT=\int_{0}^{30}\frac{-q}{A}dx$$

$$k(540-93)=\int_0^{30}-\frac{4q}{\pi}\frac{dx\times10^{-2}}{(12.5-\frac{x}{6})^2\times10^{-4}}$$

$$=\frac{4q}{\pi}6\cdot\left.\frac{+1\times10^{-2}}{(12.5-\frac{x}{6})\times10^{-4}}\right|_0^{30}$$

$$=40.7q$$

於平均溫度 317°C 時，$k=229$ kW/m°C（圖1-6）

$$\therefore q=\frac{k(540-93)}{40.74}$$

$$=\frac{229(540-93)}{40.74}$$

$$=2.51\ \mathrm{kW}$$

1.15 厚度爲 15 cm的平面牆壁，其表面溫度分別爲 370°C 與 93°C 牆壁由特殊玻璃所製成，具有下列諸性質：$k=0.78\mathrm{W/m^2\cdot{}^\circ C}$，$\rho=$

2700 kg / m³ ，C_p = 0.84 kJ / kg·°C。試求在穩定狀況下，經過此牆壁的熱流爲多少？

【解】 $$\frac{q}{A}=k\frac{(-\Delta T)}{\Delta x}$$

$$=0.78\times\frac{370-93}{0.15}$$

$$=1.44\ \mathrm{kW/m^2}$$

1.16 一家庭主婦對其工程師先生說：在夏天時，站在打開的冰箱前面，她時常感到較冷。她的先生對她說：這種感覺只是心理作用而已，因爲冰箱內並無風扇將冷空氣吹向她。因而產生生動的爭論。你認爲那一邊對？爲什麼？

【解】 妻子的說法正確。因爲冰箱內的溫度一定低於其他地方的溫度，由於對流和熱傳導的作用，她會感到較冷。

1.17 一家庭主婦對她的工程師先生說“熱水比冷水凍結的速度要快”，他說沒有這回事。但是她却發覺熱水放在冰箱中的凍結速度的確較快。如果你是他們的朋友，那你如何解決這一場爭論？對她所觀察到的現象有何解釋？

【解】 熱水的最初冷却速度的確較冷水爲快。但熱水要多出冷至冷水的溫度，此後冷却速度一樣。因此熱水所需的凍結時間較多，亦即冷水凍結速度較快。該主婦發覺熱水凍結較快，可能是水少的緣故。

1.18 夏天裡，德克薩斯州的冷氣教室保持 72°F 溫度下，學生們只穿着短袖衣、拖鞋和薄襯衫，覺得非常舒適。到了冬天，相同的教室維持仍在 75°F 下，學生們必需穿着毛大衣，長袖襯衫，和毛線衣，才感到與夏天同樣的舒適。假設空氣中的濕度不是一個決定因數。試解釋對這種“舒適溫度（ temperature comfort ）間的明顯不同感受的原因。

【解】 夏天時，人的活動量大，散熱量多，故需保持較低的外界溫度始覺得舒適。冬天時人的活動量小，散熱量較少，故需穿毛衣，並保持較高的外界溫度。

1.19 某種超絕緣材料（ superinsulation material ）具有 2×10^{-4} W/m·°C 的熱導度，用以絕緣一個裝有液體氮的容器維持在 −320°F 溫度。在此溫度下，欲蒸發液體氮所需的熱爲每磅 85.8 Btu，假

設容器爲球形，其內直徑爲 2 ft 。估計絕緣厚度爲 1.0 in ，周圍溫度爲 70°F 時，每天所蒸發的氮氣量。假設絕緣的外溫度爲 70°F 。

【解】 由於絕緣層的厚度較容器內徑小甚多，故可將之視爲平板處理

$$1\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^\circ C}}=0.5778\,\frac{\mathrm{Btu}}{\mathrm{ft\ hr\ ^\circ F}}$$

$$q=kA\frac{-\Delta T}{\Delta x}$$

$$=2\times10^{-4}\times0.5778\times4\times\pi\times\left(2+\frac{1}{12}\right)^2\times\frac{(70+320)}{\frac{1}{12}}$$

$$=29.497\,\frac{\mathrm{Btu}}{\mathrm{hr}}$$

氮蒸發量

$=29.497\times24/85.8$

$=8.25$ lb/日

1.20 計算兩個黑平面間，一天的輻射熱交換，平面的面積等於直徑 2 ft 球的表面積，分別保持在 -320°F 與 70°F 溫度。試問，由此計算所得的結果，與問題 1-19 的關係如何？

【解】 $q=\sigma A(T_1^4-T_2^4)$

$$=5.669\times10^{-8}\times4\times\pi(2\times0.3048)^2$$

$$\left[\left(\frac{70+460}{1.8}\right)^4-\left(\frac{-320+460}{1.8}\right)^4\right]$$

$=1980.0$ W/S

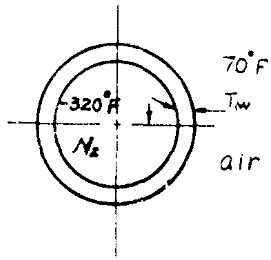
$=17.1$ MJ/日

此值遠比 1.19 題計算出來的值大，亦即表示絕緣層若是透明，必須在外邊加上不透明物質，否則即使絕緣再好，亦不能達到絕熱的效果。

1.21 假設問題 1.19 中，對球的熱傳遞，係因對流作用而產生。若熱傳遞係數爲 27 W / m² - °C 。計算球的外表面與周圍間的溫度差。

【解】 (a) 忽略內部的熱傳阻力

(b) $\Delta x \ll ID$，假設爲平板



$$q = hA(70 - T_w)\text{，或}\quad 70 - T_w = \frac{q}{hA} \quad \cdots\cdots\cdots(1)$$

$$q = kA\frac{T_w + 320}{\Delta x}\text{，或}\quad T_w + 320 = \frac{q\,\Delta x}{kA} \quad \cdots\cdots\cdots(2)$$

(1)+(2)式 $$390 = \frac{q}{hA} + \frac{q\,\Delta x}{kA} \quad \cdots\cdots\cdots(3)$$

(1)/(3)式 $$\frac{70 - T_w}{390} = \frac{1/h}{1/h + \Delta x/k}$$

$$70 - T_w = \frac{1/2.7}{\dfrac{1}{2.7} + \dfrac{2.54\times10^{-2}}{2\times10^{-4}}} \times 390$$

$$= 1.13^\circ\mathrm{F}$$

1.22 試以(a)過渡效應（transient response），(b)穩定狀態狀況，將下列材料分級。取最高級的材料，將其他材料以最大值（即最高級的百分比表示之：鋁、銅、銀、鐵、鉛、鉻鋼（18%鉻、8%鎳）、鎂。依此分級，你可得到些什麼結論？

【解】 由式（1-3a）

$$\Delta^2 T + \frac{q}{k} = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial \tau}$$

在同樣的溫度曲線且沒有熱源情況下，左邊定定值，故α越大

，$\frac{\partial T}{\partial \tau}$越大，亦即$T$隨時間的變化大，亦即過渡效應較快

在穩定狀態時

$$q = kA\Delta T \propto K$$

故比較過渡效應，即為比較α的大小

比較穩定狀態，即為比較k的大小

1.23　直徑50 cm的管路，輸送30°C熱油，周圍溫度為－20°C，用5 cm厚的特殊粉末絕緣（powder insulation）層環繞管子，其熱導度為7 mW／m－C°。管外的對流熱傳遞係數為12 W／m²－°C。估計1 m長管子所損失的熱量。

【解】(a) 油管內壁的熱傳阻力可以忽略。

(b) 管路本身的阻力可以忽略（管路的k值約100～300 遠較絕緣層的值為大）

$$q = kA\frac{30-T_1}{\Delta x}$$

$$q = hA[T_1-(-20)]$$

由以上兩式消去T_1，又$A=\pi DL$

$$q = \frac{A(30+20)}{\frac{\Delta x}{k}+\frac{1}{h}}$$

$$= \frac{\pi\cdot(0.50+0.05)\cdot 1\cdot 50}{\frac{0.05}{7}+\frac{1}{12}}$$

$$= 0.96\ \mathrm{kW/m}$$

1.24　700 W／m²的太陽輻射熱通量（solar radiant heat flux）被一金屬平板所吸收，金屬平板的背面係完全絕緣。平板的對流熱傳遞係數為11W／m²－°C，環境溫度為30°C。計算在平衡狀況下，平板的溫度。

【解】吸收的輻射能

$= 700\mathrm{W/m^2}$

由對流放出的熱量（單位面積）

$$\frac{q}{A} = h\ (\ t - 30\ )$$

在穩定狀態下，此兩者為相等，得成立

$700 = 11\ (\ t - 30\ )$

解之得 $t = 93.6\ ^\circ C$

1.25 5 cm厚的鬆石棉層，置於 100°C與 200°C 的兩平板間。試求通過此層的熱傳遞。

【解】 由表 A - 3 查得鬆石棉層的 $k = 0.161$ W/m°C

$$由\ \frac{q}{A} = k\frac{-\Delta T}{\Delta x}$$

$$= 0.161 \times \frac{200 - 100}{0.05}$$

$$= 0.32\ \text{kW/m}^2$$

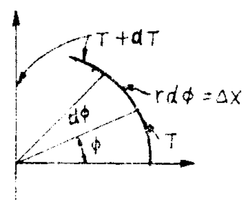
1.26 寫出下列兩種狀況的簡化熱流的方程式(a)圓柱座標的幅角（ azimuth ）ϕ 方向的一度空間穩定熱流。(b)球座標的幅角 ϕ 方向的一度空間穩定熱流。

【解】 (a) $q = -kA\dfrac{\Delta T}{\Delta x}$

$$= -kA\left(\frac{T - dT - T}{r\,d\phi}\right)$$

$$= -kA\frac{1}{r}\left(\frac{\partial T}{\partial \phi}\right)$$

$$\therefore \frac{A}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial^2 \phi^2} + \frac{\dot{q}}{k} = 0$$



(b) 因 $\Delta x = r\ \sin\phi\ d\phi$

$$q = -kA\frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$$= -kA\left(\frac{1}{r\sin\phi}\ \frac{\partial T}{\partial \phi}\right)$$

$$\therefore \frac{1}{r^2\sin^2\phi}\frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\dot{q}}{k} = 0$$