部編大學用書

# 熱傳導學

M. N. Özigik 著
石 延 平譯

國立編譯館主編
黎明文化事業公司出版

部編大學用書

# 熱傳導學

# HEAT CONDUCTION

M. N. Öziçik 著　石延平 譯

國立編譯館主編
黎明文化事業公司出版

註册商標


330（73-44）

# 熱 傳 導 學

著作者：M. N. Öziçik
翻譯者：石 延 平
主編者：國 立 編 譯 館
出版者：黎 明 文 化 事 業 股 份 有 限 公 司
地 址：台北市信義路二段二一三號十一樓•電話／3952508
行政院新聞局出版事業登記台業字第一八五號
總發行所：台北市長安東路一段五十六號•電話／5812741
門市部：台北市信義路二段二一三號綜合書城•電話／3952501
台北市重慶南路一段四十九號•電話／3116829
台北市林森南路一〇七號文化大樓•電話／3514221
高雄市五福四路九十五號•電話／5210416
郵政劃撥：帳戶18061號
印刷者：海 王 印 刷 廠 有 限 公 司
地 址：台 北 縣 中 和 市 民 有 街 35 號
電 話／2231291
出 版：中華民國七十三年八月初版
定 價：新臺幣 精裝伍佰柒拾元 平裝伍佰叁拾元



■如有缺頁及倒裝，請寄回換書■

版權所有・翻印必究

# 自　　序

看了 Ozisik 教授所著的「熱傳導學」( *Heat Conduction*) ，很喜歡。雖然這本書不是很均衡，譬如，沒有計算的結果，理論沒有和實驗比較，但這本書在分析上寫得很清楚。尤其是古典的分離變數法—Green 函數—積分變換法，對初學的讀者，非常有幫助。

大家都在談科學中文化，翻譯這本書，可以說自己在這方面盡一點力量。本書開始翻譯時，本人服務於成功大學，而於最近完成。

謝謝國立編譯館多位先生的幫忙。

石　延　平　謹識
國立臺灣工業技術學院

# 目 錄



试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com

# 第一章　熱傳導學的基礎

能量由溫度較高的物體部分，以基本粒子，如分子、原子、或自由電子，傳遞到溫度較低的物體部分，稱之為「**熱**」。熱傳導是熱傳遞的一種方式。這種方式，固體或液體都是靜止的，沒有對流的現象。物體中有溫度梯度存在，能量由高溫部分，傳遞到低溫部分。熱量的流動，不能直接量測，但和溫度有直接的關係。溫度是可以量測的物理量。所以，物體中的溫度分佈，$T(\mathbf{r},t)$ 為位置 $\mathbf{r}$ 和時間 $t$ 的函數確定以後，熱通量可以由公式計算。熱傳導學主要是研究固體中溫度的分佈。

這一章敍述：

1. 熱通量和溫度梯度的關係。
2. 決定溫度分佈的熱傳導方程式。
3. 邊界條件。
4. 熱傳導方程式在各種正交坐標的變換。
5. 解熱傳導方程式的各種方法的一般介紹。

## 1-1　熱通量

熱通量和溫度梯度的關係由實驗觀察得到，均勻及各向同性的（isotropic）固體，

$$\mathbf{q}(\mathbf{r},t)=-k\nabla T(\mathbf{r},t) \tag{1-1}$$

其中

$\nabla T$ 溫度梯度，向量，和等溫面垂直。

$\mathbf{q}$ 熱通量，向量，每單位時間，等溫面的單位面積，由高溫處傳遞到低溫處的熱量。

$k$ 熱傳導係數，純量 (scalar quantity)。

(1-1) 式稱爲 **Fourier 定律***。因爲 $\mathbf{q}(\mathbf{r}, t)$ 的方向是溫度減小的方向，所以 (1-1) 式的右邊有一負號。(1-1) 式各量的單位是：

$\mathbf{q}$　W/m² (瓦特／平方公尺)

$\nabla T$　°C/m (攝氏溫度／公尺)

$k$　W/m°C (瓦特／(公尺×攝氏溫度))

直角坐標，(1-1) 式可寫爲：

$$\mathbf{q}(x, y, z, t) = -\hat{\mathbf{i}}k\frac{\partial T}{\partial x} - \hat{\mathbf{j}}k\frac{\partial T}{\partial y} - \hat{\mathbf{k}}k\frac{\partial T}{\partial z} \tag{1-2}$$

其中

$\hat{\mathbf{i}}, \hat{\mathbf{j}}, \hat{\mathbf{k}}$：沿 $x, y, z$ 軸的單位向量

將熱通量以下式表示：

$$\mathbf{q}(x, y, z, t) = \hat{\mathbf{i}}q_x + \hat{\mathbf{j}}q_y + \hat{\mathbf{k}}q_z$$

和 (1-2) 式比較，熱通量的各分量可寫爲：

$$q_x = -k\frac{\partial T}{\partial x}, \quad q_y = -k\frac{\partial T}{\partial y}, \quad q_z = -k\frac{\partial T}{\partial z} \tag{1-3}$$

當溫度梯度固定時，熱通量和 $k$ 成正比。因此，熱傳導係數控制了熱通量。

各種物質的熱傳導係數相差很大，最大的是純金屬，最小的是蒸氣和氣體；中間的有熱絕緣材料及非金屬液體。各種物質的熱傳導係數大致如下：

---

* 以法國數學物理學家 Joseph Fourier (1768-1830) 命名。

| | |
|---|---|
| 金屬 | 50～415 W/m°C |
| 合金 | 12～120 |
| 非金屬液體 | 0.17～0.7 |
| 絕緣材料 | 0.03～0.17 |
| 氣體（大氣壓力） | 0.007～0.17 |

熱傳導係數隨溫度改變。大多數的金屬的熱傳導係數，隨溫度的增加而減小，氣體和熱絕緣物質隨溫度增加而增加。很低的溫度，熱傳導係數隨溫度的變化，劇烈改變，如圖1-1所表示。文獻〔2-4〕詳細收集各種物質的熱傳導係數。表 1-1 列出代表性的工程物質的熱傳導係數 $k$ ，比熱（定壓）$C_p$，密度 $\rho$ ，熱擴散係數 $\alpha$ 。這些都是重要的熱傳導的物理性質。

## 1-2 熱傳導的微分方程式

這一節演導，靜止，均勻，各向同性，有熱源的固體的熱傳導方程式。熱源是因爲核子反應、電、化學、伽偶射線，或其他原因所產生。熱源也是時間和（或）位置的函數。每單位時間，單位體積所產生的熱量以 $g(\mathbf{r},t)$ 表示；單位是 W/m³。

以圖1-2 的控制體積 $V$ 而言，能量均衡可由下式表示：

$$\underset{(a)}{\begin{pmatrix}\text{從}V\text{的表面}\\ \text{傳遞進去的}\\ \text{熱量的速率}\end{pmatrix}} + \underset{(b)}{\begin{pmatrix}\text{在}V\text{中熱}\\ \text{源產生的}\\ \text{速率}\end{pmatrix}} = \underset{(c)}{\begin{pmatrix}\text{在}V\text{中能}\\ \text{量儲存增}\\ \text{加的速率}\end{pmatrix}} \tag{1-4}$$

（1-4）式的各項如下：

$$(a) = -\int_A \mathbf{q}\cdot\hat{\mathbf{n}}\,dA = -\int_V (\nabla\cdot\mathbf{q})\,dV \tag{1-5a}$$

上式的右邊的項加以負號，是因爲 $\hat{\mathbf{n}}$ 是向外的單位向量。加以負號，使熱量是傳遞進到控制體積 $V$。

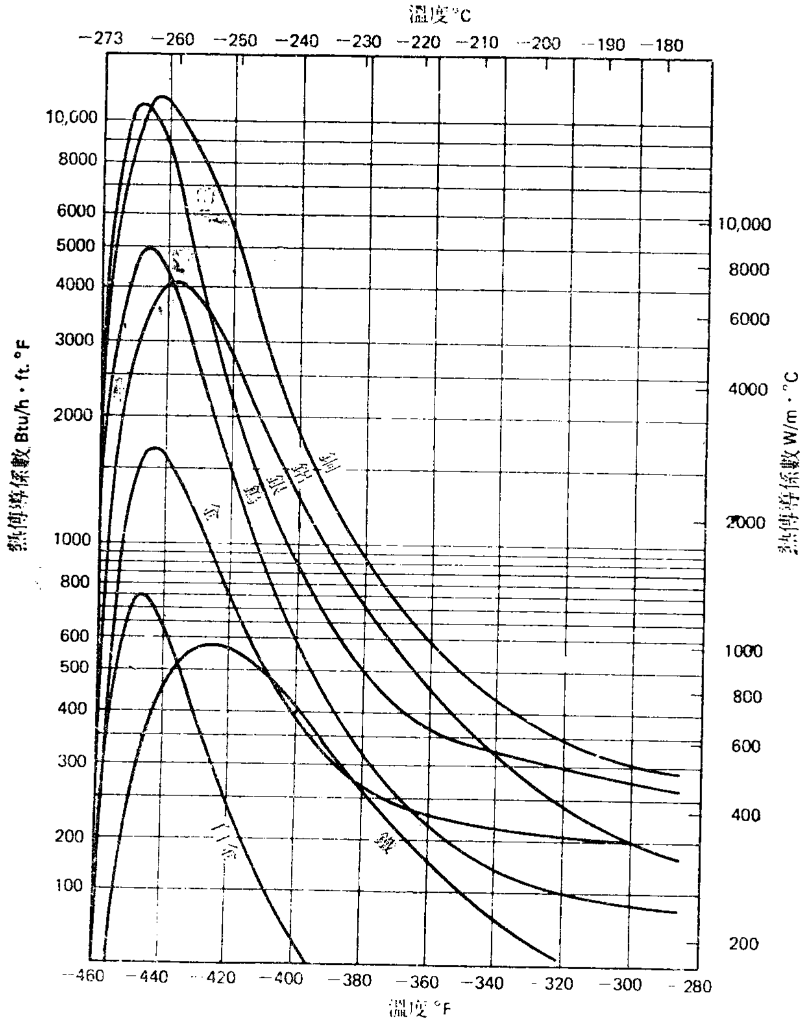


**圖1-1**　金屬在低溫度的熱傳導係數〔2〕

表1-1 金屬和非金屬的物理性質

| 物質 | 溫度 C | $C_p\times10^{-3}$ $\frac{W\cdot s}{kg\cdot C}$ | $k$ $\frac{W}{m\cdot C}$ | $\rho$ $\frac{kg}{m^3}$ | $\alpha\times10^6$ $\frac{m^2}{s}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 金屬 | | | | | |
| 鋁 | 0 | 0.871 | 202.4 | 2719 | 85.9 |
| 銅 | 0 | 0.381 | 387.6 | 8978 | 114.1 |
| 金 | 20 | 0.126 | 292.4 | 19372 | 120.8 |
| 鐵（純） | 0 | 0.435 | 62.3 | 7900 | 18.1 |
| 鑄鐵 | 20 | 0.417 | 51.9 | 7304 | 17.0 |
| 鉛 | 21 | 0.126 | 34.6 | 11343 | 25.5 |
| 汞 | 0 | 0.138 | 8.36 | 13660 | 4.44 |
| 鎳 | 0 | 0.431 | 59.52 | 8930 | 15.5 |
| 銀 | 0 | 0.234 | 418.7 | 10539 | 170.4 |
| 鋼（軟） | 0 | 0.460 | 45.0 | 7884 | 12.4 |
| 鎢 | 0 | 0.134 | 159.2 | 19372 | 61.7 |
| 鋅 | 0 | 0.381 | 112.5 | 7176 | 41.3 |
| 非金屬 | | | | | |
| 石綿 | 0 | 1.047 | 0.151 | 579 | 0.258 |
| 磚 | 204 | 0.837 | 1.004 | 2317 | 0.516 |
| 軟木 | 37 | 2.010 | 0.042 | 128 | 0.155 |
| 硬玻璃 | | 0.837 | 1.177 | 2413 | 0.594 |
| 花崗石 | 0 | 0.796 | 2.768 | 2703 | 1.291 |
| 冰 | 0 | 2.051 | 2.215 | 917 | 1.187 |
| 橡木，橫向 | 29 | 1.716 | 0.192 | 708 | 0.160 |
| 松木，橫向 | 29 | 1.758 | 0.159 | 595 | 0.152 |
| 石英砂（乾） | | 0.796 | 0.260 | 1657 | 0.206 |
| 軟橡膠 | | 1.884 | 0.173 | 1110 | 0.077 |

上式並且應用發散定理（divcrgence theorem），將面積積分改爲體積積分。

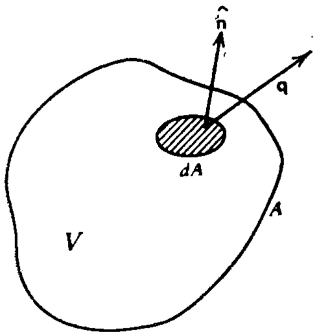


**圖1-2** 演導熱傳導方程式所用的符號
$V$ 靜止的控制體積
$A$ 控制體積的表面積
$dA$ 表面上的微面積
$\mathbf{q}$ 通過 $dA$ 向外的熱通量
$\hat{\mathbf{n}}$ 和 $dA$ 垂直向外的單位向量

（1-4）式的其他二項是

$$(b)=\int_V g(\mathbf{r},t)dV \tag{1-5b}$$

$$(c)=\int_V \rho C_p\frac{\partial T}{\partial t}dV \tag{1-5c}$$

將（1-5 a-c）式代入（1-4）式，得到：

$$\int_V\left[-\nabla\cdot\mathbf{q}+g(\mathbf{r},t)-\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t}\right]dV=0 \tag{1-6}$$

（1-6）式是固體中任意一個小體積的能量均衡。體積 $V$ 可以選擇得很小，因此對體積的積分可以去掉：

$$-\nabla\cdot\mathbf{q}+g(\mathbf{r},t)=\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t} \tag{1-7}$$

將（1-1）式的 $\mathbf{q}$，代入（1-7）式，得到：

$$\nabla\cdot[k\nabla T]+g(\mathbf{r},t)=\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t} \tag{1-8}$$

此熱傳導微分方程式適用於靜止，均勻，各向同性，有熱源的固體。

當熱傳導係數是常數，不是位置和時間的函數，（1-8）式可簡

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com