

高等学校教学用书

傳 热 学 基 礎

M. A. 米海耶夫著

高等教育出版社

高等学校教学用书



傳 热 学 基 礎

M. A. 米海耶夫著
王 補 宣 譯

高等教育出版社

本書係根據蘇聯國立動力出版社 (Государственное энергетическое издательство) 出版的米海耶夫 (М. А. Михеев) 所著“傳熱學基礎” (Основы теплопередачи) 1949年第二版增訂本譯出的。原書經蘇聯高等教育部審定為高等學校教科書。

本書敘述了換熱的物理基礎及其在熱裝置工作的分析中的應用並依次研究各基本現象 (導熱, 對流換熱和輻射) 複雜的傳熱過程以及換熱器的熱計算和流體力學計算。

本書為清華大學王補宣所譯。

傳 熱 學 基 礎

M. A. 米海耶夫著

王 補 宣 譯

高等教育出版社出版

北京琉璃廠一七〇號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇五四號)

商務印書館上海廠印刷 新華書店總經售

書號 67(課 63) 開本 850×1168 1/32 印張 13 6/16 字數 334,000

一九五四年九月上海第一版

一九五六年四月上海第四次印刷

印數 6,501 8,000

定價 (7) 1.66

譯 者 序

本書係根據蘇聯國立動力出版社出版的蘇聯科學院院士米海耶夫 (М. А. Михеев) 所著“傳熱學基礎 (Основы теплопередачи)” 1949 年第二版增訂本譯出。原書曾榮獲斯大林獎金經蘇聯高等教育部審定為高等學校教科書。

全書共十二章，用“由淺入深，循序漸進”的編列方式淺顯而又詳盡地講解了傳熱學的基礎知識。首先從研究導熱、對流換熱和熱輻射各基本現象出發，然後分析複雜的傳熱過程、換熱器的熱計算和其他方面的應用原理，並扼要介紹傳熱的實驗研究法。書後附錄內，羅列着各種有關傳熱計算的主要數據和圖表。本書在每一章節中，都強力指出現象的物理性質，並着重說明在工程上的實際應用，貫徹了理論與實際相結合的原則，說明理論如何指導實踐，這種特點，特別表現在相似理論的講解方面。

翻譯本書的主要目的之一，是要解決目前缺乏教本的困難，所以從實際出發，凡譯者主觀上認為推演公式比較難懂的地方和敘述方面比較容易誤解的地方，就已根據譯者的理解，設法附加註釋；這些附註當然都由譯者負責。

在翻譯本書的過程中，曾經得到清華大學動力機械系部份同志們的協助，尤其在人名音譯方面和最後校對譯稿時，熱工教研組彭秉璞同志提供了若干寶貴的意見，在這裏附帶表示謝意。

譯者 一九五四年一月

原 序

本書供高等工業學校的學生作為教科書之用。全書的篇幅，材料的選擇，及其編排的順序和講述的方式都根據這一項宗旨來確定。

依照高等教育部的教學大綱，本書祇講解任何專業工程師都應該掌握的傳熱學的基礎知識。根據教育學的原則，一切材料都按“由淺入深，循序漸進”的原則而編列。為了這一個目的，本書的講解把複雜的傳熱過程安排在基本現象（導熱、對流和熱輻射）的講述之後來研究，而不穩定導熱的分析又引列在“傳熱”一章的後面。關於流體力學的問題，則視需要和換熱問題一同討論。流動阻力就安插在“換熱器計算”一章裏講解。一些個別的，也是最複雜最新穎的換熱問題則被羅列在最末一章，作為全書的第二階段。作為教科書來看，把材料這樣地編排，著者認為是最適當的。

本書的講解，力求簡單易懂，同時又保存其科學嚴正性。對於所研究的各種現象的物理意義及其在技術上的應用，都給予了很大的注意。書中並已廣泛地運用蘇聯在傳熱方面所得到的最新數據。

著者

基本符號表

r —半徑,“公尺”。

d —直徑,“公尺”。

l —長度,“公尺”。

δ, Δ —厚度,“公尺”,“公厘”。

f —橫截面積,“平方公尺”,[“(公尺)²”]。

F —換熱面積,“平方公尺”,[“(公尺)²”]。

τ —時間,“小時”,“秒”。

V —容積,“立方公尺”,[“(公尺)³”];或流體的容積流量,“(公尺)³/小時”。

G —重量,“公斤”;或流體的重量流量,“公斤/小時”。

w —速度,“公尺/秒”,“公尺/小時”。

t —用冰點作為零度所量出的溫度讀數,°C。

T —絕對溫度,°K。

t_w —壁的温度,°C。

t_f —流體溫度,°C。

Δt —溫壓,°C。

δt —沿流動方向流體溫度的改變值,°C。

θ —過餘溫度,°C。

Q —熱量,“大卡”,“大卡/小時”。

q —熱流量,“大卡/(公尺)²(小時)”。

p —壓力,“公斤/(公尺)²”,“公斤/(公分)²”。

Δp —壓力落差,“公斤/(公尺)²”。

g —重力加速度,“公尺/(秒)²”。

β —容積膨脹係數,“1/°C”。

λ —導熱係數,“大卡/(公尺)(小時)°C”。

c —比熱,(比熱容量),“大卡/(公斤)°C”。

γ —比重量,(重度),“公斤/(公尺)³”。

v —比容積, $\frac{1}{\gamma}$,“(公尺)³/公斤”。

a —導溫係數, $\frac{\lambda}{c_p \gamma}$,“(公尺)²/小時”。

ρ —密度, $\frac{\gamma}{g}$, “(公斤)(秒)²/(公尺)⁴”。

μ —黏度, (黏性係數), “(公斤)秒/(公尺)²”。

ν —動黏度, (動黏度係數), $\frac{\mu}{\rho}$ “(公尺)²/秒”, “(公尺)²/小時”。

S —力, “公斤”。

s —每單位面積的摩擦阻力, “公斤/(公尺)²”。

α —放熱係數, “大卡/(公尺)²(小時)^{°C}”。

k —傳熱係數, “大卡/(公尺)²(小時)^{°C}”。

r —氣化潛熱, “大卡/公斤”。

C —輻射係數, “大卡/(公尺)²(小時)^{°K⁴}”。

ξ —摩擦阻力係數。

ζ —局部阻力係數。

目 錄

譯者序

原序

基本符號表

緒言	1
第一章 穩定導熱	5
§ 1. 導熱的基本定律	5
§ 2. 平壁的導熱	12
§ 3. 圓筒壁的導熱	17
§ 4. 球壁的導熱	23
§ 5. 關於導熱計算的補充	25
第二章 對流換熱	30
§ 6. 放熱過程	30
§ 7. 放熱係數	34
§ 8. 換熱的微分方程式	35
§ 9. 相似理論	44
§ 10. 實驗結果的處理法	58
第三章 流體自由運動時的放熱	70
§ 11. 過程的發展情況	70
§ 12. 無限空間中的放熱	72
§ 13. 有限空間中的放熱	79
第四章 流體受迫運動時的放熱	83
§ 14. 流體在管內和槽內流動時的放熱	83
§ 15. 流體橫向流過管面時的放熱	102
§ 16. 流體沿平壁流動時的放熱	118
第五章 流體集態改變時的放熱	122
§ 17. 液體沸騰時的放熱	122
§ 18. 蒸氣凝結時的放熱	140
第六章 熱輻射	158
§ 19. 一般的概念和定義	158
§ 20. 熱輻射的基本定律	163
§ 21. 物體之間的輻射換熱	173
§ 22. 氣體輻射	185
§ 23. 火炬輻射	194
第七章 傳熱	202
§ 24. 複雜換熱和傳熱	202

§ 25. 通過平壁的傳熱	205
§ 26. 通過圓筒壁的傳熱	209
§ 27. 通過球壁的傳熱	213
§ 28. 通過肋壁的傳熱	214
§ 29. 傳熱的增強	217
§ 30. 熱絕緣	223
第八章 不穩定導熱	233
§ 31. 過程線說和解法	233
§ 32. 分析解法	237
§ 33. 正常情況法	248
§ 34. 有限差異法	254
第九章 換熱器的計算	258
§ 35. 熱計算的基本原理	258
§ 36. 平均溫壓	262
§ 37. 器內傳熱	266
§ 38. 工作流體終溫度的計算	268
§ 39. 回熱器和混合器的計算	276
§ 40. 器內流體力學的計算	286
§ 41. 最有利的組合和換熱器效率	299
第十章 熱設備的模化	306
§ 42. 問題的提法	306
§ 43. 模化的條件	308
§ 44. 模化的實例	311
第十一章 傳熱的實驗研究法	316
§ 45. 觀察與計量的方法	316
§ 46. 導熱係數和導溫係數的測定	319
§ 47. 放熱係數的測定	324
§ 48. 輻射係數的測定	327
§ 49. 流動阻力係數的測定	328
§ 50. 換熱器的實驗	329
第十二章 傳熱的個別問題	330
§ 51. 通過樞軸的熱量傳遞	330
§ 52. 通過梭肋的熱量傳遞	336
§ 53. 元體平衡法	345
§ 54. 具有內熱源時的導熱和電熱器	356
§ 55. 通過流體夾層的傳熱	363
§ 56. 換熱的流體動力學理論	367
附錄 熱參數表、計算熱交換所必需的某些核算量和函數的數值	373
參考書目	402
人名索引	408
名詞索引	411

“從觀察中創立理論，通過理論再糾正
觀察，這是尋覓真理的最好方法”。

—— M. B. 羅蒙諾索夫 ——

緒 言

換熱學說是關於熱的傳播過程的學說。換熱過程出現在各種不同的技術領域內，而且起着很大的作用。

換熱學說是 M. B. 羅蒙諾索夫院士(1711—1765)所奠基的關於熱的一般學說的一部份。羅蒙諾索夫院士創立了熱的機械論，第一次建立起物質不滅定律，從物質不滅定律自然就引出能量不滅定律。這一理論在 Г. B. 李赫曼院士(1711—1753)和 И. И. 波爾松諾夫院士(1728—1766)的工作中得到了進一步的發展。波爾松諾夫院士在掌握了這種先進理論以後，就把它應用到實際中去，終於在 1766 年製造出全世界第一架萬能蒸汽機。

在 18 世紀和 19 世紀裏，熱學作為物理學的一部份而日益發展起來。它研究了一些普遍的原理，其中也包括着熱的傳播的各種問題。不過，由於蒸汽機、接着是汽輪機和內燃機的相繼出現，這一段時期的注意力都被吸引在由熱變功的一類問題上。

以後，隨着技術的發展和單個的聯動機的功率被大量提高，傳熱過程在熱機工作中所擔負的任務越來越加重。在 1904 年所發表的 A. A. 拉次克的論文裏就根據汽缸壁的傳熱情況分析了蒸汽機的工作。在蒸汽鍋爐方面，俄羅斯的許多熱工學家——B. Г. 舒霍夫，K. B. 基爾師等——也貢獻過類似的著作。在這一段時期內，像建築、冶金、製冷、機械製造和電工等其他技術部門裏都開始對換熱現象給與很大的注意。

雖然在本世紀初葉，傳熱問題的研究已經得到了一些成績，但換熱的學說仍處在萌芽狀態，祇不過蒐集了某些個別的經驗數據罷了。近數十年來，物理學上的成就，尤其是流體“層流”和“湍流”情況的研究和靠近壁的層流邊界層的發現，更深刻地闡明了換熱過程的物理本質。同時，還創立了一套關於研究、修訂和綜合實驗數據的一般方法論，“相似”理論就是這種方法論的基礎。其次，在換熱方面一切已有的數據都重新經過審定和修正，把它整理成明確的系統。現在，換熱學說已經成為一門獨立的科學，與“熱力學”共同組成“熱工學”的理論基礎。

俄羅斯的學者們，在推動換熱學說的發展上，曾有過卓越的貢獻。尤其是蘇聯科學院通訊院士 A. A. 拉次克(1869—1941)的工作具有特殊的意義。拉次克氏不僅正確地估計了換熱現象在技術中所起作用的價值，並且第一次為廣大的工程界開設了傳熱學講座。

從二十年代起，蘇維埃物理熱工學派創始人 M. B. 基爾比切夫院士對推動蘇聯換熱學說的發展起着領導的作用。這一學派對於換熱過程物理本質的研究，或整個熱設備工作的考察，都發掘出一套獨特的方法。由於這一學派的很多工作超過了國外的研究，因而推動了換熱學說更進一步的發展。

B. Л. 基爾比切夫教授(1845—1913)和 A. 費傑爾曼教授(1911)在俄國很早就研究的相似理論，後來已得到了很大的發展。在現代，相似理論被我們公認為實驗的理論，在蘇聯，並且以它為基礎創立了“熱模化”的理論。

蘇維埃的學者們，對於後列各種獨特而且有效的計算法都進行過研究：導熱計算法——“正常情況法”和“元體平衡法”；由“傳熱膜”計算對流換熱的方法；液體沸騰和蒸氣凝結時的放熱計算法；在各種不同的放熱情況下，特別是有關高壓過熱蒸汽的放熱計算；物體之間相互輻射和爐內輻射換熱的計算法。其次，蘇維埃學者們製訂了一些關於放熱和導熱實驗研究的獨特方法，測定了液體、氣體和高壓高溫下水蒸氣

(以後簡稱“蒸汽”——譯者)的導熱係數。最後，蘇維埃學者們也編訂了蒸汽表和其他工質的圖表以及蒸汽鍋爐的熱計算規範。

所有這些成就，都是很多蘇維埃學者集體工作的結果。在蘇聯，由於蘇維埃政府為科學的發展創造了許多有利的條件，由於科學與實踐的密切相聯繫以及由於社會主義制度下在電站或工廠中進行科學研究的廣泛可能性，使換熱學說得到迅速而且全面的發展。

很多研究表明：換熱是一種複雜的過程。因此，在研究換熱時，人們就把它分裂為幾種簡單的現象來考慮。一般總把換熱劃分為三種基本的形式——導熱、對流和熱輻射。

“導熱”現象是指由於物體各部份直接接觸而發生的能量交換現象。此時，在液體和固體（介電質）中，能量的轉移是依靠彈性波的作用；而在氣體中則依靠原子或分子的擴散，在金屬內部則依靠自由電子的擴散。

“對流”現象祇能在液體和氣體中出現。這種現象是指各部份發生相對位移而引起能量的轉移。此時，流體的狀態和它的運動性質就非常重要。對流現象總和導熱現象同時發生。

“熱輻射”現象是一種由電磁波來傳播能量的過程。這種現象，與導熱和對流有着本質上的不同，它不僅要產生能量的轉移，還伴隨着能量形式之間的轉化，從熱能到輻射能，或者相反地從輻射能轉化為熱能。

實際上，換熱的簡單現象很少能單獨發現。在大多數的情況下，常常是一種形式伴隨着另一種形式而同時出現。

在換熱器內，傳熱的過程還要複雜。在器內各個不同部份，換熱的各種基本形式可以按照不同的方式相組合。以蒸汽鍋爐為例：從爐烟到沸水管外表面的傳熱過程將同時兼備導熱、對流和輻射三種換熱的形式；從沸水管外表面通過黏附於管壁周圍的烟渣層、金屬管壁、水垢層到沸水管內表面的熱量傳遞完全依靠導熱；最後從沸水管內表面到水流就祇依靠對流來傳遞熱量。由此可見，在這裏換熱的個別形式是

在極不相同的組合下同時進行着，很難把它們明確地劃分開來。在實際計算裏，對於這一類複雜的過程，有時就給它一些專門的名稱，把它當作一種整體來看待。例如，把熱量從熱流體穿過隔牆傳往冷流體的過程叫做“傳熱過程”。本教程的任務就是要討論所有這些過程進行的規律性。

第一章 穩定導熱

§1. 導熱的基本定律

熱的傳播過程和溫度的分佈有着不可分割的密切關係。所以，首先就必須建立起“溫度場”和“溫度梯度”的概念。

1. 溫度場 大家都知道溫度是物體狀態的參數，用來說明物體溫暖的程度。在一般情況下，溫度 t 是坐標 x, y, z 和時間 τ 的函數，即：

$$t = f(x, y, z, \tau) \quad (a)$$

在某一瞬間，所有空間各點溫度的總計，叫做溫度場。(a)式就代表這樣一種場的數學公式。如果溫度跟時間而改變，就說場“不靜止”或“不穩定”。如果溫度並不因為時間變遷而起改變，就說場“靜止”或“穩定”。

溫度場可以是三個坐標、二個坐標或一個坐標的函數。所以，溫度場也有“三度”、“二度”與“一度”的分別。一度穩定溫度場的方程式具有最簡單的形式：

$$t = f(x) \quad (b)$$

2. 溫度梯度 有着同樣溫度的各個點的軌跡是一個等溫面。因為空間同一個點不能同時有兩個不同的溫度，所以溫度不同的等溫面絕不會彼此相交。一切等溫面或者是完全封閉的曲面，或者就終止在物體的邊緣。

祇有在穿過等溫面的方向(例如圖1裏面的 x 方向)，才能觀察到物體內部溫度的改變。同時，最顯著的溫度變化是在等溫面的法線 n 方向。溫度差 Δt 對於沿法線方向兩等溫面之間距離 Δn 的比值的極限，就叫做“溫

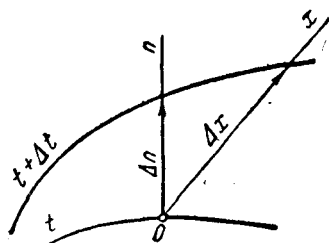


圖1. 關於溫度梯度的定義。

度梯度”，可以用下列標誌中任何一種來表示：

$$\lim\left(\frac{\Delta t}{\Delta n}\right)_{\Delta n \rightarrow 0} = \frac{\partial t}{\partial n} = \text{grad } t \text{ } ^\circ\text{C}/\text{公尺}。 \quad (\text{c})$$

溫度梯度是一種沿等溫面法線方向的向量。它的正方向是朝着溫度增加的一面。負的溫度梯度叫做“溫度降度”。

3. 傅立葉定律 傅立葉氏研究了固體的導熱現象後，確定了所傳遞的熱量與溫度降度、時間和垂直於熱量傳播方向的截面積成正比。如果計算每單位時間內每單位截面積所傳遞的熱量，那末，就可以把所確定了的關係式寫成：

$$q = -\lambda \text{ grad } t。 \quad (1)$$

式(1)是導熱基本定律的數學式，叫做“傅立葉定律”。

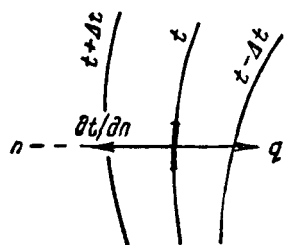


圖2. 傅立葉定律。

數量 q 代表每單位時間內通過每單位表面積所傳遞的熱量，叫做“熱流量”，這是一種和熱量傳播的方向相同、和溫度梯度的方向相反的向量(參看圖2)，式(1)裏的負號就指出了這一點。在工程單位制裏，熱流量的因次是“(大卡)/(公尺)²(小時)”。

4. 導熱係數 式(1)裏的比例乘數 λ ，叫做“導熱係數”。它是物質的一種物理參數，說明物質導熱的能力：

$$\lambda = -\frac{q}{\text{grad } t} = \frac{Q}{F \tau \Delta t, l} \text{ “} \frac{\text{大卡}}{(\text{公尺})^2(\text{小時})^\circ\text{C}/(\text{公尺})} \text{”}$$

[或“(大卡)/(公尺)(小時)^{°C}”]。 (d)Θ

由此可見，導熱係數的大小就是每單位時間內，每單位溫度降度(即在單位長度內溫度降低 1^{°C})時，每單位表面積所容許通過的熱量。

對於各種不同的物質，導熱係數是不同的；對於每一種物質來說，

Θ 譯者註：在這裏， Q 代表 τ 時間內通過表面積 F 所傳遞的總熱量。 Δt 代表表面溫度和沿導熱方向 l 深度處的溫度之間的差額。(可參看本書所列“基本符號表”)。

導熱係數的數值也還要取決於該物質的結構、容積重量、濕度、壓力和溫度。所有這些因素總合起來，就使得導熱係數正確數值的確定很困難。在工程上計算，導熱係數的數值，通常都是從一些參考圖表裏挑選。此時，必須注意到材料各有關物性（結構、容積重量、濕度、溫度）的實際情況。某些材料的導熱係數的數據，已被分別引列在圖3、圖4、圖5、圖6和書後附錄中。對於一些重要的計算，則要藉助於所用材料的實驗室研究法確定導熱係數的數值。

因為熱量傳播時，物體各部份的溫度不一樣，所以首先就必須知道導熱係數的數值依溫度而改變的情況。經驗證明：對於絕大多數的材料都得到一條直線的關係：

$$\lambda = \lambda_0(1 + bt); \quad (e)$$

此處， λ_0 代表 0°C 時導熱係數的數值， b 代表實驗所測定的常數。

在實際計算中，導熱係數的數值照例是根據物體溫度兩極端數值的算術平均值計算，並且就把這種數值當作常數處理。正好像 T. M. 康德拉契葉夫[41]⊙所指出，對於穩定導熱，這種代替是合理的，而且也是唯一正確的方法。

(甲) 氣體導熱係數 氣體導熱係數的數值是從 $\lambda = 0.005$ “大卡/(公尺)(小

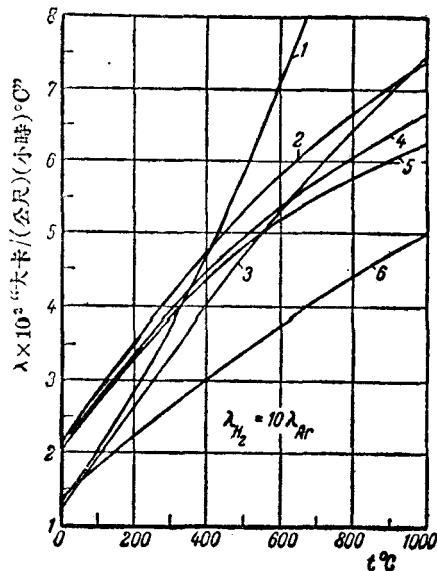


圖3. 各種氣體的 $\lambda = f(t)$:

1. 蒸汽; 2. 氧; 3. 碳酸氣(CO_2);
4. 空氣; 5. 氮; 6. 氫。

⊙ 譯者註：引號[]內的數字表示書後“參考書目”裏所引列的參考書刊的順序。

時) $^{\circ}\text{C}$ ”到 $\lambda=0.5$ “大卡/(公尺)(小時) $^{\circ}\text{C}$ ”。溫度升高時, λ 跟着增高(圖3)。除非壓力太高(超過2,000“氣壓”)或過低(小於20“公厘汞柱”),氣體的導熱係數事實上與壓力無關。

H. B. 華爾加夫契克在全蘇熱工研究所(BTH)裏所得到的新的實驗數據[11]是這方面最可靠的資料。這些數據引列在表1和圖3中。

表 1 各種氣體在大氣壓力下的導熱係數

溫 度 $t, ^{\circ}\text{C}$	$\lambda \times 10^3$ “大卡/(公尺)(小時) $^{\circ}\text{C}$.”						
	空 氣	氮	氧	蒸 汽	碳 酸 氣	氫	氫
0	21.0	20.9	21.2	13.9	12.6	150.0	14.0
100	27.6	27.1	28.3	20.6	19.6	186.0	18.1
200	33.8	33.1	35.0	28.4	26.6	222.0	22.2
300	39.6	38.6	41.3	37.3	33.6	258.0	26.2
400	44.8	43.6	47.3	47.3	40.6	294.0	30.0
500	49.4	48.0	52.9	58.4	47.2	330.0	33.7
600	53.5	51.9	58.0	70.7	53.4	366.0	37.3
700	57.2	55.2	62.6	84.2	59.2	402.0	40.7
800	60.6	58.0	66.8	98.8	64.6	438.0	44.0
900	63.7	60.3	70.5	114.5	69.6	474.0	47.1
1000	66.5	62.2	73.8	131.0	74.2	510.0	50.1

混合氣體的導熱係數祇能由實驗測定它的數值,因為相加定律對於 λ 是不適用的。

(乙)液體導熱係數 液體導熱係數的數值是從 $\lambda=0.08$ “大卡/(公尺)(小時) $^{\circ}\text{C}$ ”到 $\lambda=0.6$ “大卡/(公尺)(小時) $^{\circ}\text{C}$ ”。溫度升高時,大多數液體的 λ 反而減小(參看圖4),祇有水和甘油是例外。根據A. C. 蒲列伏季切列夫的公式[77]和H. B. 華爾加夫契克的公式[11],可以用計算的方法求出液體的導熱係數: