

高等学校教学用

傳熱學基礎

M. A. 米海耶夫著

高等学校教学用书



传 热 学 基 础

M. A. 米海耶夫著
王 补 宣 译

高 等 教 育 出 版 社



107
本書原系根据苏联国立动力出版社(Государственное энергетическое издательство)出版、米海耶夫(М. А. Михеев)院士所著“传热学基础”(Основы теплопередачи)1949年第二版譯出,并根据1956年修訂第三版修訂。原書經苏联高等教育部多科性工学院及机器制造高等学校主管司审定为高等学校动力与电工院系教科書。

本書叙述了换热的物理基础及其在热装置工作的分析中的应用,并依次研究各基本現象(导热、对流换热和热辐射),复杂的傳热过程,以及换热器的热計算和流体力学計算。

在修訂过程中,譯者接受了原著者的建議,对于原書的若干个地方在譯文中作了修正。

本書可供高等工业学校动力机械系及电工系作为教材。

傳 热 学 基 础

М. А. 米海耶夫著

王朴宣譯

高等教育出版社出版 北京宣武門內承恩寺7号
(北京市书刊出版业营业許可證出字第054号)

商务印书館上海厂印刷 新华书店发行

統一書号 15010·237 开本 850×1168 1/32 印張 14 8/16
字數 352,000 印數 13,301—16,800 (平裝本 3,150)
定价(10) 2.10

1954年9月第1版 1958年9月第2版(修訂本)
1958年9月上海第9次印刷

譯 者 序

本書係根據作者多年教學經驗，結合國內外最新研究成果，精心編寫而成。本書內容充實，重點突出，由淺入深，循序漸進，力求做到概念清晰，論證嚴謹，例題豐富，練習題多樣，力求做到既注重基礎知識的掌握，又注重能力的培養。本書可作為高等院校相關專業教材，也可作為從事相關工作的技術人員參考。

圖 4-9 和圖 4-11、以及另一些修正的建議。交通大學熱工教研組等先後對前版原著和譯文提出若干寶貴意見，在這次修訂時譯者再一次予以全面的慎重考慮。譯者願意在這裡對他們表示謝意。

王補宣於清華大學

一九五八年三月

原 序

本書供高等工業學校學生作為教科書之用。全書的篇幅，材料的選擇、編排和講述方式，都根據這一宗旨來確定。為了能同時滿足一般課程和專門課程的要求，本版將全書劃分為兩篇。

第一篇只講解在穩定熱狀態時的傳熱學基礎知識。這樣一些根本的知識，不管哪一種專業的工程師都是必需的。根據教育學上的觀點，一切材料都按“由淺入深，循序漸進”的原則而編列。因此，本書把複雜的傳熱過程安排在基本現象——導熱、對流換熱和熱輻射的講述之後來研究。至於流體力學問題，則視需要和換熱問題一起討論。

第二篇講解傳熱學上更複雜和更新穎的問題——不穩定導熱、具有內熱源時的導熱、換熱的流體動力學理論、傳熱實驗研究法、以及其他一些問題。這一篇算作是全書的第二階段。作為入門性質的教科書來說，這樣的編排順序，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。書中並已廣泛地採用了傳熱方面的最新資料。

著者

基本符号表

- r —半徑, [公尺]。
 d —直徑, [公尺]。
 l —長度, 特徵尺度, [公尺]。
 δ, Δ —厚度, [公尺], [公厘]。
 f —橫截面積, [(公尺)²]。
 F —換熱面積, [(公尺)²]。
 τ —時間, [小時], [秒]。
 V —容積, [(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 —流体温度, [°C]。
 Δt —溫压, [°C]。
 δt —沿流动方向流体溫度的改变值, [°C]。
 θ —過余溫度, [°C]。
 Q —熱量, 熱流量, [大卡], [大卡/小時]。
 q —比熱流量, [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]①。
 c —熱容量(比熱容量), [大卡/(公斤)°C]。
 γ —重度(比重), [公斤/(公尺)³]。
 v —比容積, $\frac{1}{\gamma}$, [(公尺)³/公斤]。
 α —導溫係數, $\frac{\lambda}{c_F \gamma}$, [(公尺)²/小時]。

c_p 代表比熱容量 [大卡/(公斤)°C]

① 在第六章討論熱輻射時, λ 則代表波長——譯者注。

ρ —密度, $\frac{\gamma}{g}$, [(公斤)(秒)²/公尺⁴].

μ —粘度(粘性系数), [(公斤)秒/公尺²].

ν —运动粘度(运动粘度系数), $\frac{\mu}{\rho}$ [(公尺)²/秒], [(公尺)²/小时].

S —力, [公斤].

s —每单位面积的摩擦阻力, [公斤/(公尺)²].

α —放热系数, [大卡/(公尺)²(小时)[°]C].

k —传热系数, [大卡/(公尺)²(小时)[°]C].

r —汽化潜热, [大卡/公斤].

C —辐射系数, [大卡/(公尺)²(小时)[°]K].

ξ —摩擦阻力系数。

ζ —局部阻力系数。

無因次綜合量——相似准則

$$Re = \frac{wd}{\gamma} \text{—雷諾准則;}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \text{—柏朗特准則;}$$

$$Pe = Re \cdot Pr = \frac{wl}{a} \text{—貝克列准則;}$$

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \text{—努謝爾特准則;}$$

$$Gr = \frac{gl^3}{\nu^2} \beta \Delta t \text{—葛拉曉夫准則;}$$

$$Ho = \frac{w\tau}{l} \text{—均時性准則;}$$

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2} \text{—歐拉准則;}$$

$$Fr = \frac{gl}{w^2} \text{—傅魯德准則;}$$

$$Ga = Fr \cdot Re^2 = \frac{gl^3}{\nu^2} \text{—伽利略准則;}$$

$$Ar = Ga \cdot \frac{\rho - \rho_0}{\rho} = \frac{gl^3}{\nu^2} \frac{\rho - \rho_0}{\rho} \text{—阿基米德准則;}$$

$$Fo = \frac{a\tau}{l^2} \text{—傅立叶准則;}$$

$$Bi = \frac{\alpha l}{l_w} \text{—畢渥准則。}$$

目 录

譯者序

原序

基本符号表

緒論 1

第 一 篇

第一章 导热 5

- √ § 1-1. 导热的基本定律 5
- § 1-2. 平壁的导热 11
- § 1-3. 圆筒壁的导热 20
- § 1-4. 球壁的导热 27
- § 1-5. 不规则形状物体的导热 29

第二章 对流换热 32

- § 2-1. 换热过程的进行 32
- § 2-2. 换热的微分方程式 37
- § 2-3. 换热过程的相似 47
- § 2-4. 实验结果的处理和综合 63

第三章 流体自由运动时的放热 76

- § 3-1. 无限空间中的放热 76
- § 3-2. 有限空间中的放热 85

第四章 流体受迫运动时的放热 90

- § 4-1. 流体在管内流动时的放热 90
- § 4-2. 流体横向流过管面时的放热 108
- § 4-3. 流体沿平壁流动时的放热 120

第五章 流体集态改变时的放热 124

- § 5-1. 液体沸腾时的放热 124
- § 5-2. 蒸汽凝结时的放热 148

第六章 热辐射161

§ 6-1. 一般概念和定义	161
§ 6-2. 热辐射的基本定律	166
§ 6-3. 物体之间的辐射换热	177
§ 6-4. 气体辐射	191
§ 6-5. 火焰辐射	201

第七章 傳热209

§ 7-1. 复杂换热和傳热	209
§ 7-2. 通过平壁的傳热	213
§ 7-3. 通过圆筒壁的傳热	217
§ 7-4. 通过球壁的傳热	221
§ 7-5. 通过肋壁的傳热	222
§ 7-6. 通过流体夹層的傳热	226
§ 7-7. 傳热的增强	230
§ 7-8. 热絕緣	235

第八章 换热器的計算247

§ 8-1. 热計算的基本原理	247
§ 8-2. 平均溫压	251
§ 8-3. 傳热系数	256
§ 8-4. 工作流体終溫度的計算	257
§ 8-5. 换热器內流体力学的計算	266
§ 8-6. 最有利的組合和换热器效率	279

第九章 热设备的模化287

§ 9-1. 問題的提法	287
§ 9-2. 模化的条件	289
§ 9-3. 模化的实例	292

第 二 篇

第十章 不稳定导热299

§ 10-1. 过程总說	299
§ 10-2. 分析解法	303
§ 10-3. 有限差值法	316
§ 10-4. 元体平衡法	319
§ 10-5. 正常情况法	330

第十一章 傳热的个别問題	338
§ 11-1. 通过樞軸的热量傳遞	338
§ 11-2. 通过肋的热量傳遞	345
§ 11-3. 具有內热源的物体的导热	354
§ 11-4. 电热器計算	362
§ 11-5. 换热的流体动力学理論	365
§ 11-6. 气体高速流动时的放热	370
§ 11-7. 熔化金屬的放热	377
§ 11-8. 回热式和混合式换热器	378
第十二章 傳热的实验研究法	390
§ 12-1. 观察与計量的方法	390
§ 12-2. 导热系数和导溫系数的測定	398
§ 12-3. 放热系数的測定	398
§ 12-4. 輻射系数的測定	402
§ 12-5. 流动阻力系数的測定	402
§ 12-6. 换热器的試驗	403
附录 热参数表、計算换热所必需的某些核算量和函数值	405
参考書刊	438
人名索引	446
名詞索引	449

緒 論

傳熱學——關於熱的傳播過程的學問——是整個熱學的一部分。熱學的基础早就由 M. B. 羅蒙諾索夫院士(1711—1765)所奠定;他創立了熱的機械論,并最先確定了物質和能量不滅定律。

這以後,熱學作為物理學的一個分支而日益發展起來,它研究了一些普遍的原理。由於蒸汽機、汽輪機和內燃機的相繼出現,當時的注意力主要被吸引在由熱變功的一類問題上。後來,隨著技術的發展和單個聯動機的功率被大量提高,傳熱過程在熱機工作中所起的作用越來越大,而在建築、冶金、制冷、機器製造和電工等其他技術部門里,也開始對傳熱過程給予很大的注意。

儘管如此,甚至在本世紀初葉,換熱的學說還處在萌芽狀態,只不過彙集了某些個別的經驗數據罷了。但是,近數十年來物理學上的成就,尤其是關於流体“層流”和“湍流”(亦譯“紊流”)情況的研究及對於靠近壁面處層流邊界層的發現等等,使得有可能更深刻地揭示出換熱過程的物理本質。同時,也創立了一整套關於研究、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础。其次,在換熱方面一切已有的數據都已重新經過審定和修正,并把它們整理成明確的系統。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”的理論基础。

在推動換熱學說的發展方面,和其他國家的研究家們一樣,俄羅斯的學者們曾有过卓越的貢獻。例如,遠在1904年所發表的A. A. 拉次克的論文里,就分析了汽缸壁的傳熱情況對蒸汽機工作

的影响。在蒸汽鍋爐方面，俄羅斯的許多熱工學家——B. T. 舒霍夫，K. B. 基爾師等——也都提供了類似的著作。

在蘇聯，從本世紀二十年代起，蘇維埃物理熱工學派創始人 M. B. 基爾比巧夫院士一直領導着換熱問題的研究。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，都擬出了一套獨特的方法。這一學派的很多工作推動了換熱學說進一步的發展。

蘇維埃的學者們擬訂了各種獨特而有效的實驗測定法和後列各種計算法：計算導熱的“正常情況法”和“元體平衡法”；由熱邊界層計算對流換熱的方法；液體沸騰和蒸汽凝結時的放熱計算法；在各種不同的放熱情況下、特別是在高壓下過熱蒸汽的放熱計算法；物體間相互輻射和爐內輻射換熱的計算法。其次，蘇維埃學者們還制訂了一些關於放熱和導熱的實驗研究的獨特方法；進行了各種液體、氣體和高壓高溫蒸汽的導熱系數的測定，編訂了蒸汽表和其他工質的圖表。在蘇聯，“相似理論”已經被公認為實驗的理論，並且得到了很大的發展；根據相似理論又創立了工藝設備的“熱模化理論”。

所有這些成就，都是蘇維埃學者們集體工作的結果。在蘇聯，主要由於蘇維埃政府為科學的發展創造了許多有利的條件，科學與實踐密切相聯系，並且在社會主義制度下對工業企業、發電廠等進行科學研究的廣泛可能性，使換熱學說能夠得到迅速而且全面的發展。

許多研究表明：換熱是一種複雜的過程。所以，在研究換熱時，人們常常把它分成幾種簡單的现象來考慮。一般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分的直接接觸、彈性波的作用、原子或分子的擴散、以及自由電子的擴散等所引起的能量的交換。

“对流”现象只能在液体和气体中出现。这种现象是指各部分发生相对位移而引起的能量的转移。此时，流体的状态和流体运动的性质就非常重要。对流现象常同时伴随着导热现象。

“热辐射”现象是一种以电磁波传播能量的过程。这种现象本质上与导热和对流不同，并且伴随着能量的两种转化——热能转化为辐射能，相反地，辐射能又转化为热能。

实际上，上述各种换热的基本形式很少能单独遇到。在大多数的情况下，常常是一种形式伴随着另一种形式而同时出现。以蒸汽锅炉为例：从炉烟到沸水管外表面的传热过程常同时兼备导热、对流和辐射三种换热的形式；从沸水管外表面通过粘附于管壁周围的烟渣层、金属管壁、水垢层到沸水管内表面的热量传递完全依靠导热；最后从沸水管内表面到水流就只依靠对流来传递热量。由此可见，在热量所通过的沿路各个区段，换热的各种基本形式常是极不相同地组合在一起，很难把它们明显地划分开来。对于这一类复杂的过程，在实际计算里，有时就适宜地把它当作一种整体的过程来看待。例如，把热量从热流体穿过隔壁传至冷流体的过程就叫做“传热过程”。本教程的任务就是要讨论所有这些单元的和更复杂的过程所进行的规律性。

第一篇

第一章 导热

§ 1-1. 导热的基本定律

“导热”是指依靠物体各部分直接接触的能量傳播过程。此时,能量的轉移在气体中依靠分子和原子的扩散,在液体和介电質固体中依靠彈性波的作用。在金屬内部,能量的轉移主要依靠自由电子的扩散,至于晶格的彈性振动,对导热則只起次要的作用。

热的傳播过程,包括导热过程在內,特別和温度的分布有着密切的关系。因此,首先必須建立起与温度分布有关的温度場和温度梯度的概念。

1. 温度場 大家都知道温度是物体状态的参数,用來說明物体温暖的程度。在一般情况下,温度 t 是坐标 x, y, z 和時間 τ 的函数,即:

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

在某一瞬間,所有空間各点温度的总計,叫做温度場。上列 (a) 式就代表这样一种場的数学公式。如果温度跟時間而改变,就說場不靜止或不稳定。如果温度并不因为時間变迁而起改变,就說場靜止或稳定。

温度場可以是三个坐标、两个坐标或一个坐标的函数。所以,温度場也有三度、二度与一度的分別。一度稳定温度場的方程式具有最簡單的形式:

$$l=f(x)。(b)$$

2. 温度梯度 具有同一温度的点的軌迹構成一个等温面。因为空間的同一个点不能同时有两个不同的温度,所以温度不同的等温面絕不会彼此相交。一切等温面或者是完全封閉的曲面,或者就終止在物体的边緣。

只有在穿过等温面的方向(例如圖 1-1 中的 x 方向),才能观察到物体内部温度的改变。同时,最显著的温度变化是在等温面的法綫 n 方向。温度差 Δt 对于沿法綫方向兩等温面之間距离 Δn 的比值的極限,就叫做温度梯度,常用下列标志中的任何一种来表示:

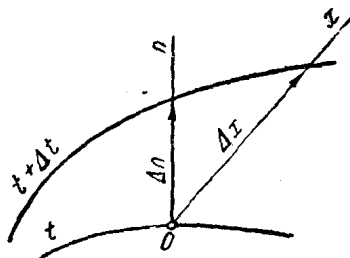


圖 1-1. 关于温度梯度的定义。

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

温度梯度是一种沿等温面法綫方向的向量,它的正方向朝着温度增加的一面。負的温度梯度叫做温度降度。

3. 热流量 热能常只朝温度降低的方向傳播。所傳遞的热量叫做热流量 (Q); 这个量通常以單位時間即每小時計量。每單位面积的热流量叫做比热流量或加热面的热載荷 (q)。采用工

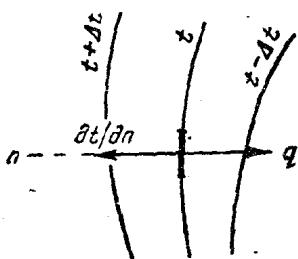


圖 1-2. 傅立叶定律。

程單位制时,热流量的測量單位是[大卡/小时],而比热流量的測量單位則是[大卡/(公尺)²(小时)]。

Q (以及 q) 是和热量傳播方向相同而和温度梯度方向相反的向量(參看圖 1-2)。

4. 傅立叶定律 傅立叶氏在研