

[联邦德国] E. U. 施林德尔 主编

# 换热器设计手册

第一卷

换热器原理



HEAT EXCHANGER  
DESIGN  
HANDBOOK

1

Heat exchanger  
theory

机械工业出版社

01-555  
370  
101

# 换热器设计手册

第一卷

换热器原理

〔联邦德国〕 E. U. 施林德尔 主编

马庆芳 马重芳 主译

2001/8



机械工业出版社



## 内 容 简 介

本书是《换热器设计手册》的第一卷。该手册是在“国际传热传质中心”倡议和赞助下，由75位各国专家合作写成的，是一部内容详尽、新颖的权威著作。

本卷介绍换热器的基本理论、解释各种定义和概念。第一章简述各类换热器；第二章介绍有关物理量及联系它们的关系式；第三、四章分别叙述换热器方程的解析解法及数值解法；第五章讨论对数平均温差的计算方法。内容论述深刻精辟。本书可供化工、动力、冶金、交通、航空、航天等部门的换热器专业人员及传热学研究和教学人员参考。

### Heat Exchanger Design Handbook

vol. 1 Heat Exchanger Theory

Ernst U. Schlünder, Editor-in-chief

Hemisphere Publishing Corporation 1983

\* \* \*

### 换热器设计手册

第一卷 换热器原理

〔联邦德国〕 E. U. 施林德尔 主编

马庆芳 马重芳 主译

\*

责任编辑：蒋有彩

封面设计：郭景云

\*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·印张 7·字数 153千字

1987年7月北京第一版·1987年7月北京第一次印刷

印数 0,001—4,900·定价：1.75元

\*

统一书号：15033·6637

## 译者序

“换热器设计手册”(Ernst U. Schlünder 主编),是在“国际传热传质中心”(ICHMT)倡议和赞助下,由国际学术界、工业界和出版界合作,费时十年编写而成的大型工具书。其内容的完整、详尽和新颖,作者的权威性和资料的实用性,都超过以往任何一本换热器和传热传质学的专著或手册。因此本书受到世界各国学者和工程技术人员的重视和好评。

本书内容系统而完整,理论与实际并重。全书分为五卷:“换热器原理”、“流体力学与传热学”、“换热器的热设计与流动设计”、“换热器的机械设计”、“物理性质”。内容包含了换热器基本原理、设计方法、设计资料、制造、检验、贮存、成本估算等各个方面。同时五卷都能单独成篇,供某一专门领域的读者参考。原书有五千多个精选的计算公式和图表。各章节都是由本领域知名的75位专家撰写的,反映了换热器的最新发展水平。参加编写工作的有美、苏、英、德等国的学者,可以说本书是一部“世界级”的高水平换热器和传热学专业手册。

众所周知,换热器是传热过程必不可少的设备,几乎一切工业领域都要使用。化工、冶金、动力、交通、航空与航天等部门应用尤为广泛。近年来由于新技术发展和能源开发,改进换热器性能越来越受工业界重视。换热器设计资料和传热计算公式,散见于各种公开文献和各企业的内部资料中,设计师往往很难找到所需要的合适资料,有时面对几个不同公式,不知如何适从。本书经过国际第一流专家的多年努力,搜集大量换热器设计资料,并严格分析筛选,为解决上述问题作出了贡献。因此,我们愿意把本书介绍给我国读者,相信它将对换热器设计师和工程师、传热传质学的研究人员、教学人员和研究生有所裨益,有助于我国在这一领域尽快赶上世界先进水平。

第一卷“换热器原理”,阐述换热器基本理论、定义,并解释换热器设计与评价所需的全部参数及概念。其目的是为后续各卷提供理论基础。本卷第一章简要地介绍了各种类型换热器,从不同观点出发,对换热器进行分类;第二章叙述了换热器各有关物理量的定义,导出联系这些物理量的基本关系式和派生关系式;第三章讨论换热器有关微分方程的解析解法,包括均匀传热系数,无相变换热器方程的解析解法和其他类型的解析解法;第四章为换热器方程的数值解法。对预先给定流型的情况、流型有待计算确定的情况,以及数值解法的应用等,均作了讨论分析;第五章讨论对数平均温差的计算方法及各类换热器的平均温差图。

本卷作者都是世界知名的专家,有多年研究、教学经验和卓越的成就,对换热器理论理解透彻。所撰写的内容深刻精辟,简明扼要,深入浅出,值得认真阅读。

手册由中国空间技术研究院马庆芳、北京工业大学马重芳主译。第一卷由甘肃工业大学叶枝全、程兆雪翻译,西安交通大学张祉佑教授认真审校了本卷译稿,提出不少宝贵意见,译者在此表示真诚的感谢。对于中国科学院工程热物理研究所葛绍岩教授的热心指导和帮助,我们也一并在此致谢。限于我们的水平,译文中难免有错误和不妥之处,恳请读者批评赐教。

译者

1985年8月

# 总 序

编写一本换热器设计手册的想法，起源于1972年由“国际传热与传质中心”(ICHMT)在南斯拉夫Trogir组织召开的“换热器的最新发展”的学术讨论会上。

尽管现在已有许多传热数据及有关的关系式，但它们都分散在各种公开发行的文献中，或深藏在专有组织机构的档案里。对于传热设备的生产厂家、销售商与用户，不仅在获取日益增多的传热资料方面，而且在对不同来源的数据与关系式进行比较方面，都越来越感到困难。加之，这些来源不同的资料往往不相一致，因而用户就很难确定哪些数据和关系式对他们最为合适。再者，多年来许多传热方面的出版物，越来越具有分析性和学术性，这就影响了从事实际工作中的传热工程师们对它们的直接应用。

鉴于这种情况，一些传热专家决定根据现有的公开文献，同时也尽可能搜集专有资料，以形成传热资料的基础。在经过选择的实验资料基础上推荐的关系式，可作为各种换热器的设计资料。

尽管对这种想法的热情很高，但直到1974年在东京召开的第五届国际传热学术讨论会时，所取得的进展并不大。会后才把此想法具体化，决定在国际传热与传质中心的赞助下，由半球出版公司（该中心的出版机构）出版。由大学、工业界与专有机构的八位代表组成编委会，并立即着手制定本手册的范围与体制。作为共同努力的结果，计划出版下列五卷：

第一卷：叙述换热器原理、定义并解释在换热器热设计、流动设计以及评估时所必须的全部参数及概念。

第二卷：根据可用资料，推荐计算设计参数与评估参数的关系式。尽可能把试验数据与推荐公式一并提出，以便既揭示数据的一致性，也揭示公式的可靠性。

第三卷：指出在解决实际换热器设计及评估问题时，如何应用第一、二卷提供的材料。由于材料数量太大，不可能在该卷中包括所有已知种类的换热器。仅对大多数常用设备及其有关的装置进行详细的讨论，如冷却塔与燃烧室等。

第四卷：本卷致力于换热器的机械设计。实际上它与热力及水力设计是不可能分开的。本卷还包括一些主要国家标准在实用上的比较。

第五卷：包括其他四卷内的设计计算所需用的物理性质的数据。

这五卷中，每卷都有一名编委作为责任编辑。尽管每位责任编辑都接受了专门一卷的额外行政责任，但整个手册仍出于共同的努力，每位编辑都分担了对整个材料的审查与编辑工作。

许多作者都是本学科有名望的专家，对本手册作出了贡献。每篇手稿都经历了审核的过程，而且许多手稿都在定期的编委会议上讨论过。这种会议自从1975年以来，一直是每六个月举行一次。

尽管如此，本手册还应被看成是初步的，而且许多地方需要改进。

深切希望本手册的使用者与我们联系，以增补遗漏之处，并对改进本手册的内容及其适用性提出建议。这种读者与编者之间的相互交流与合作，不仅可以改善本手册的质量，而且会根据换热器设计的要求，更进一步地促进研究工作。

编委会在此对出版社及各位有贡献的作者所给予的十分有价值的合作表示感谢。

Ernst U. Schlünder

## 第一卷 序

本手册工作开始不久，第一卷的主体部分便已撰写完成。在等待后续各卷期间，我们有时得到编委会成员建设性的意见，因而手稿一直到最近才定稿。幸好本卷内容不是容易过时的材料，时间的流逝有助于进一步改进而不会带来什么损失。

正如 Schlüder 教授在总序中所指出的那样，第一卷作者的目的是为以后各卷提供理论基础。这一目的是通过下述五章实现的。

**第一章：**简要地介绍各种类型的换热器，并作了不同方式的分类。

**第二章：**给出了各有关物理量的定义，并导出联系它们的基本关系式和派生关系式。

**第三章：**描述有关微分方程的特解。

**第四章：**讨论数值解法。

**第五章：**本章专注于平均温差的计算方法及其结果的图示。

这五章的编写工作不等量地分给两位作者，作者间还多次交换了意见，并作了部分调整。通过这种做法，可消除在处理方法及符号使用上所存在的一切重大差异。英国原子能管理局 (UKAEA) 的 John Ward 先生提供了第五章中采用的各种图表，作者由衷感谢他的重要贡献。

此外，我还要热情地向 Sue Farmiloe 小姐，Maggie Dean 夫人与 Frith Oliver 夫人致谢。她们一遍又一遍地为本卷文稿打字，她们的工作值得颂扬。

D. Brian Spalding



# 符 号 表

## 1. 基本量

量	符 号	单 位
热流率	$\dot{Q}$	W
热量	$Q = \int \dot{Q} dt$	J
热流密度 (热通量)	$\dot{q} = \dot{Q}/A$	W/m <sup>2</sup>
时间	$t$	s
频率	$f$	1/s
质量	$M$	kg
质量流率	$\dot{M}$	kg/s
质量流速 (单位面积的质量流率)	$\dot{M}/S$	kg/m <sup>2</sup> ·s
质量通量 (质量流密度)	$\dot{M}_n/A$	kg/m <sup>2</sup> ·s
摩尔数	$N$	mol
摩尔流率	$\dot{N}$	mol/s
摩尔流速	$\dot{n} = \dot{N}/S$	mol/m <sup>2</sup> ·s
摩尔分子量	$\bar{M}$	g/mol
密度	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>
浓度	$c$	kg/m <sup>3</sup>
摩尔密度	$\bar{\rho}$	mol/m <sup>3</sup>
摩尔浓度	$\bar{c}$	mol/m <sup>3</sup>
质量百分数	$x_i, y_i$	kg <sub>i</sub> /kg
质量载荷 (mass loading)	$X_i, Y_i$	kg <sub>i</sub> /kg <sub>f</sub>
摩尔百分数	$\bar{x}_i, \bar{y}_i$	mol <sub>i</sub> /mol
摩尔载荷	$\bar{X}_i, \bar{Y}_i$	mol <sub>i</sub> /mol <sub>f</sub>
体积	$V$	m <sup>3</sup>
体积流率	$\dot{V}$	m <sup>3</sup> /s
速度	$u, v, w$	m/s
表面积	$A$	m <sup>2</sup>
横截面积	$S$	m <sup>2</sup>
长度或直径	$L, D, l, d, s$	m
坐标	$\psi, \varphi, r, x, y, z$	
空隙百分数	$\epsilon$	
体积流率百分数	$\epsilon$	
干度 <sup>①</sup>	$x$	
流量干度	$\dot{x}$	
功	$W$	J

① 干度 (Quality) 也称含气量、蒸气含量或蒸气品质, 为无量纲量。——译者注

## 2. 传输系数

量	符 号	单 位
传热系数①	$\alpha$	$W/m^2 \cdot K$
传质系数	$\beta$	$m/s$
总传热系数	$U$	$W/m^2 \cdot K$
阻力系数	$\xi$	
摩擦因子	$f$	
发射率 (辐射率、黑度)	$\epsilon$	
角系数 (形状系数)	$\varphi_{12}$	
导热系数	$\lambda$	$W/m \cdot K$
扩散系数	$\delta$	$m^2/s$
运动粘度	$\nu$	$m^2/s$
动力粘度	$\eta$	$kg/m \cdot s$
热扩散系数	$\kappa \equiv \lambda / \rho c_p$	$m^2/s$
表面张力	$\sigma$	$N/m$
切应力	$\tau$	$Pa (N/m^2)$
压力	$p$	$Pa (N/m^2)$
压降	$\Delta p$	$Pa (N/m^2)$

① 传热系数也称换热系数、给热系数，依据国家标准应称为传热系数。——译者注

## 3. 热力学量

量	符 号	单 位
比焓①	$h$	$J/kg$
比内能	$u$	$J/kg$
比Gibbs函数自由能	$g = h - Ts$	$J/kg$
比自由能	$f = u - Ts$	$J/kg$
比熵	$s$	$J/kg \cdot K$
化学势	$\mu$	$J/kg$
比热	$c_p, c_o$	$J/kg \cdot K$
温度	$T$	$K, ^\circ C$
对数平均温差	$\Delta T_{LM}$	$K, ^\circ C$

① 对于全量则用大写字母表示，例如焓以  $H$  表示。其它物理量也按此规则。——译者注

## 4. 化学反应量

量	符 号	单 位
反应热，相应能，潜热	$\Delta h$	$J/kg$
活化能	$\Delta E$	$J/kg$
平衡常数	$K$	各种单位
比率常数	$k$	各种单位
反应率	$\dot{r}$	$mol/m^3 \cdot s$
活度系数	$\gamma_i$	
逸度系数	$\gamma_g$	
化学计量因子	$\nu_i$	



## 5. 物理常数

量	符 号	单 位
气体常数	$\bar{R}$	8.314 J/mol·K
洛施米特数	$\bar{L}$	$6.0252 \times 10^{23}$
阿佛加德罗数	$\bar{L}$	1/mol
斯蒂芬-波尔兹曼常数	$C_s$	$5.6697 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
重力加速度	$g$	m/s <sup>2</sup>
标准重力加速度	$g_n = 9.80\cdots$	m/s <sup>2</sup>

## 6. 下标

量	符 号	量	符 号
壁面	$w$	液态	$l$
主体	$b$	气态	$g$
平均	$m$	进口	in
固态	$s$	出口	out

## 7. 常用无量纲数

名 称	符 号 及 定 义
阿基米德数	$Ar = g l^3 \Delta \rho / \nu^2 \rho = g l^3 \rho \Delta \rho / \eta^2$
比奥数	$Bi = a_g l / \lambda_s$ 或 $a_l l / \lambda_s$
效率	$E$
欧拉数	$Eu = \Delta p / (\rho u^2 / 2)$
傅里叶数	$Fo = \kappa t / l^2 = \lambda l / \rho c_p l^2$
弗劳德数	$Fr = u^2 / g l$
伽利略数	$Ga = l^3 g / \nu^2 = l^3 g \rho^2 / \eta^2$
格拉脱夫数	$Gr = g l^3 \Delta \rho / \nu^2 \rho = g l^3 \rho \Delta \rho / \eta^2$
格雷茨数	$Gz = u d^2 / \kappa l = u d^2 \rho c_p / \lambda l = Re Pr \frac{d}{l}$
克努森数	$Kn = l_0 / l$ , 式中 $l_0$ 为分子平均自由程
路易斯数	$Le = \kappa / \delta = \lambda / \rho c_p \delta$
马赫数	$Ma = u / u_{\text{sound}}$
传热单元数	NTU
努塞耳数	$Nu = a l / \lambda$
贝克来数	$Pe = u l / \kappa = u l \rho c_p / \lambda = Re Pr$
相变数	$Ph = c_p \Delta T / \Delta h_g$
普朗特数	$Pr = \nu / \kappa = \eta c_p / \lambda$
瑞利数	$Ra = Gr Pr$
雷诺数	$Re = u l / \nu = u l \rho / \eta = \dot{m} l / \eta$
施密特数	$Sc = \nu / \delta = \eta / \rho \delta$
舍伍德数 <sup>①</sup>	$Sh = \beta l / \delta$
斯坦顿数	$St = a / \rho u c_p = Nu / Re Pr$
斯特罗哈数	$St_r = f l / u$
韦伯数	$We = u^2 \rho l / \sigma$

① 无量纲传质数用无量纲传热数加 (') 表示, 例如  $Bi' = \beta l / \delta$ ; 又如  $Nu' = \beta l / \delta = Sh$ ,  $Pr' = \nu / \delta = \eta / \rho \delta = Sc_c$ 。  
——原注

# 目 录

译者序

总序

第一卷序

符号表

1.1 换热器类型概述 .....	1
1.1.0 本章的构成 .....	1
1.1.1 流动形态的类型 .....	1
A. 引言 .....	1
B. 逆流式 .....	1
C. 顺流式 .....	2
D. 错流式 .....	2
E. 错流逆流式 .....	2
F. 多程壳管式 .....	2
G. 一般情况 .....	3
H. 非同时流动形态(蓄热器) .....	3
I. 结论 .....	4
1.1.2 两股流体间相互作用的类型 .....	4
A. 传热 .....	4
B. 同时发生的传热与传质 .....	4
C. 相互作用系数 .....	5
1.1.3 温度变化方式的类型 .....	6
A. 单相换热器 .....	6
B. 锅炉与冷凝器 .....	6
C. 一般情况 .....	6
1.1.4 两股流体间界面的类型 .....	7
A. 引言 .....	7
B. 光管 .....	7
C. 肋管 .....	7
D. 基体布置 .....	7
E. 膜式 .....	7
F. 喷淋式 .....	8
G. 刮板式 .....	8
1.1.5 换热设备的类型 .....	8
A. 引言 .....	8
B. 无相变壳管式换热器 .....	8
C. 蒸发器、锅炉及重沸器 .....	9
D. 冷凝器 .....	9

E. 冷却塔	9
F. 干燥装置	10
G. 加热炉	15
1.1.6 不稳定运行	10
A. 稳态换热器的瞬态特性	10
B. 周期性运行的换热器(蓄热器)	11
1.2 换热器的有关定义及定量关系式	12
1.2.0 本章的构成	12
1.2.1 热力学重要概念的简要提示	12
A. 温度	12
B. 比内能	12
C. 比焓	13
D. 千度	13
E. 质量的百分数	14
F. 比热	14
G. 相际平衡	15
H. 守恒定律	15
1.2.2 通量关系式	16
A. 分项传热系数与总传热系数	16
B. 分项传质系数和总传质系数	17
C. 同时发生的传热与传质	18
D. 一般说明	19
1.2.3 传递系数的相关性	20
A. 引言	21
B. 斯坦顿数	21
C. 努塞尔数与舍伍德数	20
D. 摩擦系数 $f$	21
E. 雷诺数与贝克来数	22
F. 普朗特数、施密特数和路易斯数	23
G. 格拉晓夫数与瑞利数	24
H. 其它无量纲量	24
I. 关联式	25
J. 传热系数、传质系数与动量传递系数之间的关系	26
1.2.4 全设备的平衡方程	27
A. 焓变化间的关系	27
B. 温度变化间的关系	27
C. 浓度变化间的关系	27
D. 水-蒸气-空气系统的焓之间的关系	28
E. “平均”相互作用系数及驱动力	28
F. 传热单元数 NTU	29
G. 无相变换热器的效率	30
H. 无相变换热器特性的常规表示法	30
I. 压降与泵功率	33

J. 公式的选择 .....	34
1.2.5 制约流束的微分方程 .....	34
A. 焓微分方程 .....	34
B. 温度微分方程 .....	35
C. 浓度微分方程 .....	35
D. 蒸气-空气-水系统焓的近似微分方程 .....	36
E. 关于方程解的一些说明 .....	36
F. 结论 .....	36
1.2.6 相互贯穿连续介质的偏微分方程 .....	37
A. 引言 .....	37
B. 温度微分方程 .....	37
C. 速度与压力微分方程 .....	41
1.3 换热器方程的解析解法 .....	45
1.3.1 无相变换热器均匀传热系数的解 .....	45
A. 引言 .....	45
B. 单程逆流式 .....	45
C. 单程顺流式 .....	47
D. 错流式换热器 .....	48
E. 其它流动形态 .....	49
1.3.2 其它解析解法 .....	49
1.4 换热器方程的数值解法 .....	50
1.4.1 预先规定流型的情况 .....	50
A. 引言 .....	50
B. 离散化 .....	50
C. 有限差分方程 .....	52
D. 一种直接解法 .....	53
E. 更经济的解法 .....	53
F. 基于规定流动分布的计算法的应用 .....	54
G. 离散化点阵密度的影响 .....	54
1.4.2 流型必须计算的情况 .....	55
A. 引言 .....	55
B. 离散化 .....	56
C. 有限差分方程 .....	56
D. 一种直接解法 .....	57
E. 更经济的解法 .....	57
F. 能用数值解法解所有方程的一些应用场合 .....	57
G. 参考文献 .....	58
1.4.3 数值解法的特殊应用 .....	59
A. 两相流的预断 .....	59
B. 空腔中的湍流 .....	59
C. 包含化学反应的流动 .....	60
D. 包含辐射的流动 .....	61

E. 传热系数的计算 .....	61
1.1.0~1.4.3节参考文献 .....	61
1.5 各种形态工业换热器中的平均温差图 .....	65
1.5.1 引论 .....	65
A. 背景知识 .....	65
B. 有效性条件 .....	65
C. 各种量的定义 .....	66
D. $\Delta T_M$ - $\theta$ - $NTU_2$ - $F$ 图及其用法 .....	67
1.5.2 壳管式换热器的 $F$ 图与 $\theta$ 图 .....	69
A. 逆流式 .....	69
B. 顺流式 .....	69
C. TEMA E壳管流动布置 .....	70
D. TEMA J壳式分流式换热器 .....	82
E. 具有 $2N$ 管程 TEMA G壳式折流式换热器 .....	83
F. TEMA F壳式 .....	83
1.5.2节参考文献 .....	84
1.5.3 错流式布置的 $F$ 图及 $\theta$ 图 .....	84
A. 术语的定义 .....	85
B. 最常用错流形态 $\Delta T_M$ 的解 .....	86
1.5.3节参考文献 .....	97



## 1.1 换热器类型概述

D. Brian Spalding

### 1.1.0 本章的构成

1.1 章的目的是提供文字上的说明,以便能从实用的角度对各种类型的换热器分类。下面从六个不同的观点出发,对换热器进行分类。

1.1.1 节中,根据流动形态,将换热器分为逆流式、顺流式、错流式等。

1.1.2 节集中讨论流过换热器的两股流体相互作用方式的差异(即仅存在传热,或传热与传质同时发生),由此对相互作用系数下了定义。

1.1.3 节集中讨论两股流体在设备中的温度,随其位置不同而变化的各种方式。流道的两股流体间的界面,可以有许多不同的几何形状,其常见的类型在 1.1.4 节中叙述。

1.1.5 节给出按功能分类的换热设备类型。这里有无相变换热器、锅炉、冷凝器及其他类型的装置。最后,在 1.1.6 节中对运行随时间而变的不同方式加以区分。

还可采用其他的分类原则。例如,可以按设备的应用场合(航空、石油工业等)分类。本手册第一卷的作用,只是提供一个导论,而不是去取代后面各卷的内容。这个意图应能解释并证明本卷提供简短叙述是恰当的。

### 1.1.1 流动形态的类型

#### A. 引言

换热器使热量在流经设备的两股流体或多股流体之间传递。换热器设计的一个主要特征,是其相对的流动形态,即各股流体的几何关系。本节叙述较常用的流动形态类型。

必须强调,所叙述的各种形态是理想化了的实际过程。实际上,永远不可能使流动方式完全符合这种理想的方式。

#### B. 逆流式

在一个逆流式换热器中,两股流体相互平行流动,但方向相反。图 1 所示便为这种流动形态,用一根小直径管子装于一同心的大直径管子中。两股流体分别在小管内部与两管间环状空间中流动。实际上,可将大量的管子装在一个直径大得多的管内,即装在大家熟知的壳体内。

此处,符号  $T$  表示温度;下标 1 指第一股流体;下标 2 指第二股流体;下标 in 表示进口状态;下标 out 表示出口状态。

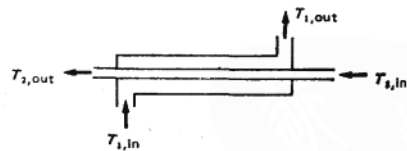


图 1 逆流换热器简图

逆流换热器是效率最高的换热器。它最好地利用了可用温度差，因而每股流体可得到最高的温度变化。这一点将在下面详述。

### C. 顺流式

在顺流式换热器中，两股流体相互平行地流动，且方向相同。图 2 所示便为这种形态。当两股流体的温度变化显著时，顺流式换热器对可用温差利用效果最差。如果在设计中效率是最主要的因素时，就不使用这种流动形态。但是，它确实能获得比逆流换热器更均匀的壁温。

### D. 错流式

在错流式换热器中，两股流体以相互垂直的方向流动。例如，流体 1 可以在排成管束的一组管子内流过，流体 2 一般可沿垂直于轴线方向、在管子之间的空间流过。错流式换热器示于图 3。它们的效率在顺流式与逆流式之间。考虑到将流体导向传热表面的实际原因，错流式将比顺流式或逆流式容易实现。汽车散热器便是错流式结构。

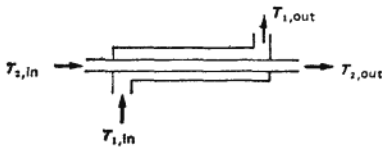


图 2 顺流式换热器简图

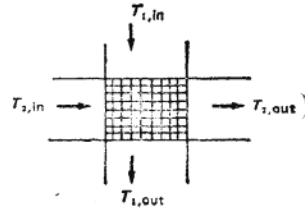


图 3 错流式换热器示意图

### E. 错流逆流式

有时，实际换热器的流动形态近于图 4 所示的理想情况，它们被称为错流逆流式换热器。这里列举二程、三程及四程等型式。当然，其可能的程数是没有限制的。

错流逆流式换热器，可视为兼顾高效以及易于制造的折衷方案。程数越多，经济性越接近逆流式。

### F. 多程壳管式

顺流式与逆流式的特点，可在同一个换热器中结合起来。如在单个壳体中，使管子一次或多次的折回，即可实现这种组合。用直管与适当分隔的封头，也可得到同样效果。U 型管式或“发夹式”布置具有容易制造的优点，因为只需在壳体的一个端头开孔，而不需要两端开孔。

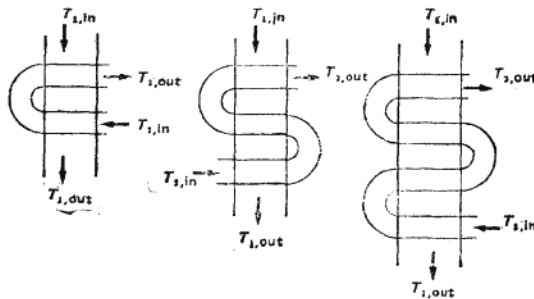


图 4 错流逆流式换热器示意图

图 5 所示是其理想形态的例子。图上还示出几个壳体联在一起的流动形态。当然不可能把实际中所遇到的或能构想出的所有可能的形态，都在此处表示出来，在第四卷第二章中将描

述一些常见的结构。

### G. 一般情况

上述各理想化的流动形态，都是相互贯穿的连续介质的多股流体的特例。其特点如下：

1. 几股流体从几个不同的进口进入共同的容腔，并且从几个不同的出口离去。

2. 每股流体在进入共同的容腔后，在其中分开，然后在出口处会合在一起。

3. 各股流体在换热器容腔之内相互进行热交换，并产生随之而来的温度变化。

图6是说明两股流体流动情况的示意图。流体在换热器容腔内以三维形式分布，而且其中可能出现流线闭合的环流区。图中只表示出两股流体。其中固体件，如管子、折流板等，并未表示出来。

### H. 非同时流动形态（蓄热器）

到目前为止，所举的例子都是指稳定的流动，而且两股流体同时流动。现在必须指出，这种含义只对称为“间壁式换热器”的一类才正确。还有另一类换热器叫“蓄热器”，其中两股流体交替地流入同一容腔。在蓄热器中，一种流体传给固体管壁的热量先储存在固体中，当第二种流体随后流过此容腔时，热量才传给第二种流体。

蓄热器可做成逆流式、顺流式及错流式等形态，如同间壁式换热器一样。因此，一个简单的逆流蓄热器就是一个水平直管（图7），一种流体从左向右流经该管，当第一种流体不流时，第二种流体从右向左流过该管。热量之所以能够传给管壁或从管壁传出，是因两股流体的进口温度之间有差别。结果自然是较热的流体变冷而较冷的流体变热。

蓄热器是周期性的流动装置，它常常安排成两股流体按规则的预先确定的节奏交替流动。

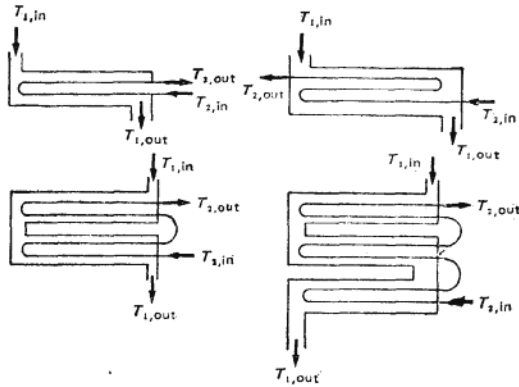


图5 多程式管式换热器流动形态简图

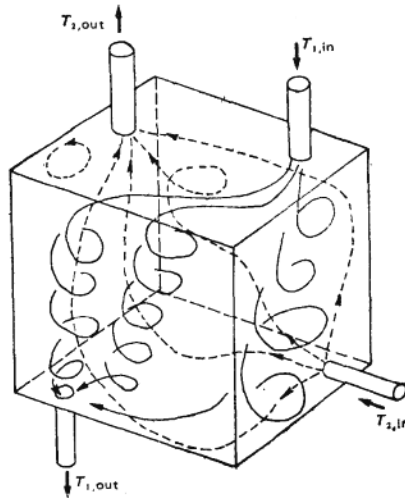


图6 相互贯穿连续介质一般情况示意图



图7表明如何用位于管端的回转阀恰当地控制流动。

### 1. 结论

为预断一换热器的特性，必须先确定：第一，流动形态的类型；第二，沿规定通道流量的大小；第三，换热器体积内每处热量由一股流体传到另一股流体的热阻。而后，确定每一股流体内的温度分布，这是一个数学问题。

当流动形态像B至F各段所述的那样简单，以及在整个体积内热阻均匀时，常常可用解析法去求解有关的性能方程。这种可能性将在本卷第三章中作全面的阐述。

另一方面，当流动形态复杂（如图6所示），或当各处热阻不同时，则有关方程只能用数值法求解。这个问题在本卷第四章中讨论。

当然，在实际换热器中，要知道热阻是多大的数值远非易事，而且热阻常常是随着热交换流体的局部温度而变的。本手册很大一部分篇幅，致力于建立确定热阻的计算公式。

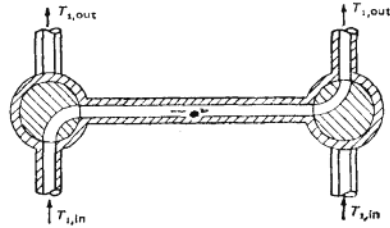


图7 蓄热式换热器示意图

## 1.1.2 两股流体间相互作用的类型

### A. 传热

传热是发生在两种物质之间的、由于温度不同而产生的相互作用。它是换热器设备中最普通的相互作用形式，因而它在本手册中占首要地位。

两股流体间的传热，通常是间接进行的。它们被固体材料，如金属管壁或金属板，以至塑料薄膜等隔开，热量从第一种流体通过固体材料传给第二种流体。传热的结果是较冷的流体温度局部升高，较热的流体温度局部降低，还可能导致一种或两种流体发生相变。

传热还可以发生在两种流体直接接触时。例如，一种流体是热水，另一种流体是冷空气的情况。直接接触传热是很常见的，热电站中的冷却水，在冷却阶段便属于此种情况，有关的换热装置叫作冷却塔。

有时，云雾状固体颗粒与一股流体进行热交换。在流化床换热器中，一种热气体可朝上流经一层雾状密集的固体颗粒，虽然颗粒以半随机特征作激烈的运动，但重力阻止着它们随气体上升。这些颗粒碰撞并将热量传给贯穿流化床的固体表面（如冷却水管）。

还有其他的传热方式：热量先从一种流体传给固体，然后再从固体传给第二种流体。这在本卷1.1.1.H中已提到过。

### B. 同时发生的传热与传质

直接接触的存在，使质量传递在两股流体之间发生，该过程常以部分液体气化，或气流中一个组份凝结的方式来实现，前者发生在刚讲过的冷却塔中，后者则发生在某些干燥设备中。

相变常伴随有与相变潜热有关的显著的热效应，而这些效应用于换热器的运行可能是最重要的。直接接触式（或湿式）冷却塔就是如此，对于一给定的水冷效果，这种塔大约只需要一个间接接触的、传质被阻碍的换热器（干式塔）所需接触表面总量的五分之一。