



流动和传热传质过程的多目标构形优化

陈林根 冯辉君 著



科学出版社

国家自然科学基金项目(No. 51176203, No. 51506220)

国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(No. 2012CB720405)

资助出版

流动和传热传质过程的 多目标构形优化

陈林根 冯辉君 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

基于现代传热传质优化理论,本书对钢铁、化工、能源、电力、农业和军事等领域广泛涉及的流体流动和传热传质问题开展了多学科、多目标、多尺度构形优化研究。本书汇集了作者的多年研究成果,第1章介绍了构形理论的产生、发展,并回顾了与本书相关的构形优化问题的研究现状。第2~11章分别对简单流体流动网络、热水用户网络、肋片、冷却通道、脉管网络、换热器网络、多孔介质传质网络、气固反应器、固体氧化物燃料电池、广义流动、钢铁生产流程和广义传递过程构形优化问题进行了研究,提出了钢铁生产流程广义热力学优化理论,给出了解决不同构形设计问题的统一方法。

本书对多学科交叉融合、不同优化准则与不同尺度下的流动和传热传质问题进行了构形优化研究,内容丰富、结构严谨、概念新颖、难易适中,可供微电子器件设计、钢铁行业节能设计、换热设备设计等众多工程设计领域的科技人员参考,也可作为高等学校能源动力类相关专业本科生和研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

流动和传热传质过程的多目标构形优化/陈林根,冯辉君著. —北京:科学出版社,2017.1

ISBN 978-7-03-049742-0

I. ①流… II. ①陈… ②冯… III. ①传热传质学—研究 IV. ①TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 208016 号

责任编辑:耿建业 陈构洪 赵微微 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟 / 封面设计:铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年1月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017年1月第一次印刷 印张:25 3/4

字数:504 000

定价:158.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

能源问题是世界各国普遍关注的焦点问题,高效地利用能源已成为人类可持续发展的必由之路。合理的能源系统结构对能源系统、能源利用率的提高有重要的促进作用,因此,对能源系统结构进行优化已成为能源系统优化设计的重要研究方向之一。熵产生最小化理论、场协同理论、焓理论和构形理论等各种传热传质优化理论为能源系统的结构优化设计提供了重要的理论基础。

本书在全面深入地了解熵产生最小化(有限时间热力学)理论、场协同理论、焓理论和构形理论等各种传热传质优化理论的基础上,提出广义构形优化思想,并进一步总结出广义传递过程(传递强化和传递弱化过程)的广义势差和广义流量极值原理及广义耗散极值原理;在全面系统地总结前人现有研究成果的基础上,遵循从单纯的热力学和传热学到多学科交叉融合、从单目标优化到多目标优化的原则,基于广义构形优化思想、广义势差和广义流量极值原理及广义耗散极值原理,对流体流动过程、肋片、脉管网络和换热器对流换热过程、多孔介质传质过程以及气固反应器和固体氧化物燃料电池传热传质过程进行多学科、多目标、多尺度构形优化,得到不同优化目标下各种传递过程最优构形。最后针对各种传递过程建立广义传递过程模型,基于广义构形优化思想给出解决各种传递过程构形问题的统一方法,得到其最优构形,提出钢铁生产流程广义热力学优化理论。本书取得了一些具有重要理论意义和实用价值的研究成果,可为各种传递过程和系统的结构设计及性能优化提供科学依据和理论指导。

本书主要由以下五个部分组成。

第一部分研究流体流动过程构形优化问题。第2章在管道总表面积一定的条件下,以最大压差最小为目标对圆盘区域内对称树状流动网络,以总泵功率最小为目标对圆盘区域内非对称树状流动网络分别进行构形优化;建立新的流动网络模型——释放管道夹角约束的线-线流动网络模型,分别在管道总体积和表面积约束条件下以最大压差最小为目标对其进行构形优化,并对两种管道约束条件下的流动网络最优构形进行比较。第3章建立同时考虑热水传热和流动性能的两个新目标——压差和温度复合函数目标及焓耗散率目标,并建立新的热水用户网络模型——X形热水用户网络模型;分别以压差和温度复合目标最小及焓耗散率最小为目标,对矩形内H形热水用户网络模型进行构形优化;分别采用以热水用户网络总压降最小和用户温度最大的分步优化方法及以压差和温度复合目标最小的全局优化方法,对矩形内X形热水用户网络进行构形优化,并对两种优化目标下的

热水用户网络最优构形进行比较。

第二部分研究肋片、冷却通道、脉管网络和换热器对流换热构形优化问题。第 4 章建立了两种新的肋片模型——一级叶形肋片和包含内热源的舵形肋片,分别以最大热阻最小和当量热阻最小为目标对其进行构形优化,得到两种目标下最优构形;以当量热阻最小为目标在对流和复合传热边界条件下对 T-Y 形肋片和复杂肋片进行构形优化,得到整体传热性能最优的肋片最优构形。第 5 章在总加热率一定的条件下,分别以最大温差最小和焓耗散率最小为目标对燃气涡轮叶片冷却通道进行构形优化,并对两种目标下的冷却通道最优构形进行比较;在总泵功率一定的条件下,分别以最大温差最小和焓耗散率最小为目标对圆盘产热体冷却通道进行构形优化,得到两种目标下最优构形。第 6 章建立了两种新的脉管网络模型——线热流边界条件下矩形内 X 形脉管网络和圆盘内非对称树状脉管网络模型,在脉管管道总体积一定的条件下,分别以熵产率最小和焓耗散率最小为目标对其进行构形优化,并对两种目标下的脉管网络最优构形进行比较。第 7 章提出了焓耗散有效性这一新的优化目标,建立了新的换热器模型——矩形内 X 形换热器模型;分别以热有效性最大和焓耗散有效性最大为目标,对矩形内 H 形和 X 形换热器、圆盘内树状换热器进行构形优化,并对两种目标下的换热器最优构形进行比较。

第三部分研究多孔介质传质构形优化问题。第 8 章建立了两种新的多孔介质传质模型——“体点”传质的三角形单元构造体和圆柱形单元构造体模型,分别以最大压差最小和质量积耗散率最小为目标对其进行传质构形优化,并对两种优化目标下的构造体最优构形进行比较;建立“盘点”传质的存在通道间隙的圆盘构造体模型,以最大压差最小为目标在未释放和释放上一级构造体最优的条件下对其进行传质构形优化,并对两种构造形式下的构造体最优构形进行比较。

第四部分研究气固反应器和固体氧化物燃料电池传热传质构形优化问题。第 9 章建立了新的传热传质气固反应器模型——“盘点”气固反应器模型,以熵产率最小为目标对其进行构形优化;将焓理论引入该模型的研究中,以焓耗散率最小为目标对其进行构形优化,与熵产率最小的最优构形进行比较,并分析释放上一级构造体最优的构形设计方法对其传热传质性能的影响。第 10 章将构形理论引入管式固体氧化物燃料电池的优化中,在管式固体氧化物燃料电池体积和电解质(或阴阳极)体积约束条件下,以输出功率最大为目标对单管式固体氧化物燃料电池进行构形优化;进一步对固体氧化物燃料电池与燃气轮机混合系统进行构形优化,得到最佳电解质(或阴阳极)厚度、燃料电池最佳长度和燃气轮机最佳压气机压比、工质热容率和换热器热导率分配比。

第五部分研究广义流动构形优化问题、钢铁生产流程广义构形优化问题、钢铁生产流程广义热力学优化问题和广义传递过程广义构形优化问题。第 11 章建立

了圆盘内广义流动模型,研究最大流动时间最小和平均流动时间最小的广义流动构形优化问题,得到不同优化目标下的流动系统最优构形;提出广义构形优化思想,将其应用到板坯连铸过程和带钢层流冷却过程的优化中,并进一步提出钢铁生产流程广义热力学优化理论;总结出广义传递过程(传递强化和传递弱化过程)的广义势差和广义流量极值原理及广义耗散极值原理;对第 2~10 章构形问题进行归纳总结,建立广义传递过程模型,根据广义传递过程的广义势差和广义流量极值原理及广义耗散极值原理,研究其广义构形优化问题,给出解决不同构形设计问题的统一方法,得到各种传递过程和系统的最优构形,对广义传递过程开展多学科、多目标、多尺度的广义构形优化是打开各种过程和系统“几何哲学”之门的新钥匙。

最后,感谢国家自然科学基金项目(No. 51176203, No. 51506220)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(No. 2012CB720405)的资助,使得流动和传热传质过程多目标构形优化的研究工作不断拓展和深化。

由于时间仓促,本书在撰写过程中难免出现一些疏漏,不当之处请批评指正。

陈林根 冯辉君

2016 年 7 月

目 录

前言

| | |
|------------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 引言 | 1 |
| 1.2 传递过程优化的基本原理 | 2 |
| 1.2.1 熵产生最小化原理 | 2 |
| 1.2.2 场协同原理 | 3 |
| 1.2.3 焓耗散极值原理 | 4 |
| 1.3 构形理论的产生、发展和内涵..... | 7 |
| 1.3.1 构形理论的产生和发展 | 7 |
| 1.3.2 构形理论与分形理论 | 8 |
| 1.4 流体流动过程构形优化研究现状 | 9 |
| 1.4.1 简单流体流动网络构形优化 | 9 |
| 1.4.2 热水用户网络构形优化 | 10 |
| 1.4.3 广义流动过程构形优化 | 10 |
| 1.5 对流换热过程构形优化研究现状..... | 11 |
| 1.5.1 热沉和热源构形优化 | 11 |
| 1.5.2 冷却通道构形优化 | 13 |
| 1.5.3 脉管网络构形优化 | 14 |
| 1.5.4 换热器构形优化 | 15 |
| 1.6 多孔介质传质过程构形优化研究现状..... | 17 |
| 1.7 传热传质过程构形优化研究现状..... | 18 |
| 1.7.1 气固反应器构形优化 | 18 |
| 1.7.2 燃料电池构形优化 | 19 |
| 1.8 钢铁生产流程构形优化研究现状..... | 20 |
| 1.9 本书的主要工作及章节安排..... | 21 |
| 第 2 章 简单流体流动网络构形优化 | 24 |
| 2.1 圆盘内树状流动网络构形优化..... | 24 |
| 2.1.1 管道表面积约束下的对称树状流动网络构形优化 | 24 |
| 2.1.2 管道表面积约束下的非对称树状流动网络构形优化 | 34 |
| 2.2 矩形内释放管道夹角约束的线-线流动网络构形优化 | 38 |

| | | |
|------------|-----------------------------|-----|
| 2.2.1 | 管道体积约束下的线-线流动网络构形优化 | 38 |
| 2.2.2 | 管道表面积约束下的线-线流动网络构形优化 | 43 |
| 2.3 | 本章小结 | 45 |
| 第3章 | 热水用户网络构形优化 | 47 |
| 3.1 | H形热水用户网络构形优化 | 48 |
| 3.1.1 | 基于压差与温度复合函数最小的热水用户网络构形优化 | 48 |
| 3.1.2 | 基于焓耗散率最小的热水用户网络构形优化 | 57 |
| 3.2 | X形热水用户网络构形优化 | 62 |
| 3.2.1 | 基于总压降最小和用户热水温度最大的热水用户网络构形优化 | 62 |
| 3.2.2 | 基于压差与温度复合函数最小的热水用户网络构形优化 | 70 |
| 3.3 | 本章小结 | 75 |
| 第4章 | 肋片构形优化 | 76 |
| 4.1 | 叶形肋片构形优化 | 77 |
| 4.1.1 | 基于最大热阻最小的叶形肋片构形优化 | 77 |
| 4.1.2 | 基于当量热阻最小的叶形肋片构形优化 | 84 |
| 4.2 | 舵形肋片构形优化 | 95 |
| 4.2.1 | 基于最大热阻最小的舵形肋片构形优化 | 96 |
| 4.2.2 | 基于当量热阻最小的舵形肋片构形优化 | 101 |
| 4.3 | T-Y形肋片当量热阻最小构形优化 | 107 |
| 4.3.1 | T-Y形肋片模型 | 107 |
| 4.3.2 | 对流传热边界条件下T-Y形肋片构形优化 | 108 |
| 4.3.3 | 复合传热边界条件下T-Y形肋片构形优化 | 111 |
| 4.4 | 复杂肋片当量热阻最小构形优化 | 115 |
| 4.4.1 | 复杂肋片模型 | 115 |
| 4.4.2 | 对流传热边界条件下复杂肋片构形优化 | 116 |
| 4.4.3 | 复合传热边界条件下复杂肋片构形优化 | 119 |
| 4.5 | 本章小结 | 120 |
| 第5章 | 冷却通道构形优化 | 122 |
| 5.1 | 燃气涡轮叶片冷却通道构形优化 | 122 |
| 5.1.1 | 燃气涡轮叶片冷却模型 | 122 |
| 5.1.2 | 基于最大温差最小的涡轮叶片构形优化 | 125 |
| 5.1.3 | 基于焓耗散率最小的涡轮叶片构形优化 | 128 |
| 5.2 | 圆盘产热体冷却通道构形优化 | 132 |
| 5.2.1 | 基于最大温差最小的圆盘产热体冷却通道构形优化 | 132 |
| 5.2.2 | 基于焓耗散率最小的圆盘产热体冷却通道构形优化 | 142 |

| | |
|-----------------------------------|-----|
| 5.3 本章小结 | 148 |
| 第 6 章 脉管网络构形优化 | 149 |
| 6.1 矩形内 X 形脉管网络构形优化 | 149 |
| 6.1.1 基于熵产率最小的脉管网络构形优化 | 150 |
| 6.1.2 基于焓耗散率最小的脉管网络构形优化 | 159 |
| 6.2 圆盘内树状脉管网络构形优化 | 167 |
| 6.2.1 基于焓耗散率最小的对称脉管网络构形优化 | 167 |
| 6.2.2 基于熵产率最小的非对称脉管网络构形优化 | 175 |
| 6.2.3 基于焓耗散率最小的非对称脉管网络构形优化 | 185 |
| 6.3 本章小结 | 187 |
| 第 7 章 换热器构形优化 | 189 |
| 7.1 矩形内 H 形换热器构形优化 | 189 |
| 7.1.1 基于热有效性最大的换热器构形优化 | 189 |
| 7.1.2 基于焓耗散有效性最大的换热器构形优化 | 195 |
| 7.2 矩形内 X 形换热器构形优化 | 198 |
| 7.2.1 基于热有效性最大的换热器构形优化 | 198 |
| 7.2.2 基于焓耗散有效性最大的换热器构形优化 | 206 |
| 7.3 圆盘内树状换热器构形优化 | 210 |
| 7.3.1 基于热有效性最大的换热器构形优化 | 210 |
| 7.3.2 基于焓耗散有效性最大的换热器构形优化 | 217 |
| 7.4 本章小结 | 221 |
| 第 8 章 多孔介质传质构形优化 | 223 |
| 8.1 基于三角形单元体的多孔介质“体点”传质构形优化 | 224 |
| 8.1.1 基于最大压差最小的“体点”传质构形优化 | 224 |
| 8.1.2 基于质量积耗散率最小的“体点”传质构形优化 | 232 |
| 8.2 基于圆柱形单元体的多孔介质“体点”传质构形优化 | 234 |
| 8.2.1 基于最大压差最小的“体点”传质构形优化 | 234 |
| 8.2.2 基于质量积耗散率最小的“体点”传质构形优化 | 240 |
| 8.3 存在通道间隙的多孔介质“盘点”传质构形优化 | 245 |
| 8.3.1 上一级构造体最优的“盘点”传质构形优化 | 245 |
| 8.3.2 释放上一级构造体最优的“盘点”传质构形优化 | 253 |
| 8.4 本章小结 | 258 |
| 第 9 章 气固反应器构形优化 | 259 |
| 9.1 盘点气固反应器构形优化 | 259 |
| 9.1.1 熵产率最小的气固反应器构形优化 | 259 |

| | | |
|---------------|------------------------------|-----|
| 9.1.2 | 烟耗散率最小的气固反应器构形优化 | 268 |
| 9.2 | 释放上一级构造体最优时的盘点气固反应器构形优化 | 278 |
| 9.2.1 | 一级树状圆盘模型 | 278 |
| 9.2.2 | 一级树状圆盘构形优化 | 279 |
| 9.3 | 本章小结 | 280 |
| 第 10 章 | 管式固体氧化物燃料电池构形优化 | 282 |
| 10.1 | 单管式固体氧化物燃料电池构形优化 | 282 |
| 10.1.1 | 管式固体氧化物燃料电池模型 | 282 |
| 10.1.2 | 基于输出功率最大的管式固体氧化物燃料电池构形优化 | 288 |
| 10.2 | 管式燃料电池与燃气轮机混合系统构形优化 | 294 |
| 10.2.1 | 管式燃料电池与燃气轮机混合系统模型 | 294 |
| 10.2.2 | 基于输出功率最大的管式燃料电池与燃气轮机混合系统构形优化 | 297 |
| 10.3 | 本章小结 | 299 |
| 第 11 章 | 广义传递过程构形优化 | 301 |
| 11.1 | 圆盘内广义流动过程构形优化 | 302 |
| 11.1.1 | 最大流动时间最小的广义流动过程构形优化 | 302 |
| 11.1.2 | 平均流动时间最小的广义流动过程构形优化 | 309 |
| 11.2 | 板坯连铸过程广义构形优化 | 311 |
| 11.2.1 | 板坯连铸过程模型和温度场验证 | 311 |
| 11.2.2 | 广义构形优化思想 | 314 |
| 11.2.3 | 基于热损失的板坯连铸过程广义构形优化 | 315 |
| 11.2.4 | 基于烟耗散的板坯连铸过程构形优化 | 322 |
| 11.3 | 带钢层流冷却过程广义构形优化 | 325 |
| 11.3.1 | 带钢层流冷却过程模型 | 325 |
| 11.3.2 | 基于烟耗散的带钢层流冷却过程构形优化 | 328 |
| 11.4 | 钢铁生产流程广义热力学优化 | 333 |
| 11.5 | 广义传递过程的广义构形优化 | 335 |
| 11.5.1 | 广义传递过程模型 | 335 |
| 11.5.2 | 广义构形优化中的广义势差和广义流量极值原理 | 336 |
| 11.5.3 | 广义构形优化中的广义耗散极值原理 | 337 |
| 11.5.4 | 广义传递过程广义构形优化的应用 | 338 |
| 11.6 | 本章小结 | 347 |
| 第 12 章 | 全书总结 | 349 |
| | 参考文献 | 357 |
| | 附录 主要符号说明 | 394 |

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

20 世纪 70 年代的石油危机敲响了能源危机的警钟,能源问题由此成为世界各国普遍关注的焦点问题。各国政府十分注重建立自己的能源保障体系,并把提高能源利用率作为解决能源短缺问题的重要手段之一。李克强总理在 2014 年的《政府工作报告》中指出^[1]:“要建设生态文明的美好家园,推动能源生产和消费方式变革,加大节能减排的力度”。能源利用技术是提高能源利用率的主要瓶颈,因此,寻求各种高效的节能技术,以充分挖掘各行业的节能潜力,减少环境污染,是一件利在当代、功在千秋的大事,是实现中华民族伟大复兴梦的重要前提。

在钢铁、化工、能源、交通运输、电力、机械制造和航天航空等涉及国计民生的重要领域,传热传质现象普遍存在。如何使得高密度的热流从微电子器件内部高效地导出控制体外?如何设计热水管道网络使得其热水用户用水温度最佳且泵功率最小?如何设计各种换热系统使得其换热性能最好?如何对复杂多孔介质系统进行布置使得其传质性能最佳?如何设计化学反应器使得其产量最大?如何设计燃料电池使得其输出功率最大?这些问题涉及导热、对流和辐射换热、流体流动和化学反应等各种传热传质过程以及广义流动过程,如采用高效的传热传质控制技术,对各种传热传质过程以及广义流动过程进行优化,将大大提高各行业能源系统的能源利用率,具有十分可观的节能潜力。

构形理论^[2-17]是 20 世纪末出现的一种新兴的传热传质优化理论,它为各种传热传质过程以及广义流动过程的性能优化提供了一种新的“几何哲学”。它使得生物学家、地质学家、医学家、社会学家、物理学家和化学家以往无法从理论角度解释的困扰已久的自然界和工程界的难题迎刃而解,也为以前仅靠经验进行工程设计的各行业的工程师提供了有理有据的能够指导工程实践的工程构形设计方案。

本书将针对钢铁、化工、能源、交通运输、电力、机械制造、航天航空、农业和军事等领域广泛涉及的流体流动问题、对流换热问题、多孔介质传质问题和热、质耦合问题开展多学科、多目标、多尺度广义构形优化,得到多学科交叉融合、不同优化准则和不同尺度下的广义传递系统最优构形,将为微电子器件设计、钢铁行业节能设计、流动通道设计、换热设备设计、化工设备设计、电池及混合动力装置设计等众多工程设计问题提供理论指导和最优设计方案,对民用系统和军事装备性能的提

升和能源利用率的提高具有重要意义。

本章将在概括传热过程优化基本原理的基础上,详细介绍构形理论的产生、发展以及它与分形理论的区别和联系,然后对构形优化问题的研究现状进行全面回顾,并着重介绍构形理论与熵理论结合的发展现状。

1.2 传递过程优化的基本原理

近年来,传热优化基础理论取得了长足的进步,具有代表性的理论有熵产生最小化理论^[18-25]、有限时间热力学理论^[26-33]、场协同理论^[34-36]、熵理论^[37-45]、分形理论^[46-51]、构形理论^[2-16]和广义热力学优化理论^[30,52-55]等,这些理论的提出使得热科学及相关学科领域得到了蓬勃的发展。在以上传热优化基础理论中,熵理论是不同于熵产生最小化理论的新传热优化理论的代表。熵概念的提出填补了传热优化过程中基本物理量的空白,揭示了传热的本质属性,基于熵耗散极值原理的传热优化开辟了传热优化的新方向。有限时间热力学是“热力学优化”在物理学领域的另一称谓^[24,25]。随着有限时间热力学理论的发展,它的研究内容得到了极大的拓展,从传统的热力循环^[56-81]研究逐步拓展到各种“类热机”^[82,83]的研究中。由于能量变换的广义多变过程可用来统一描述存在守恒和耗散作用的系统^[52],陈林根等^[30,53,54,62,83]将传统的热过程以及机械、电、磁、化学、气动等过程和装置采用统一处理思想和方法进行了分析和优化,并提出了各种过程装置设计和运行优化的理论——“广义热力学优化理论”。构形理论是从热力学优化基础上发展起来的理论,它为自然界和工程界中各种流动系统的性能优化提供了一种新的“几何哲学”,因此具有十分广阔的应用前景,是广义热力学优化发展的一个新方向^[55]。在 21 世纪热力学发展的进程中,熵理论和构形理论的产生和发展具有重要的意义,必将产生重大影响。

下面将从熵产生最小化理论、场协同理论和熵理论对应的基本优化原理来概述传热过程优化的基本原理。

1.2.1 熵产生最小化原理

“熵”是用来描述传递过程不可逆程度的物理量,它由德国物理学家克劳修斯于 1854 年提出。熵为传递过程方向的判定、能否实现、是否可逆提供了判据,实现了热力学第二定律的量化。在初期,熵主要用来描述准静态热力学过程,随后熵逐渐推广到非平衡热力学过程的分析中。1931 年,Onsager^[18]提出了非平衡热力学中的重要关系——Onsager 倒易关系,并由广义流和广义力的点积得到了不可逆过程的熵产。在 Onsager 倒易关系的基础上,Prigogine^[19,20]进一步提出了近平衡态区域的熵产最小原理,为线性非平衡热力学奠定了基础。考虑到线性非平衡热

力学仅适用于近平衡态区域, Prigogine 进一步提出了适用于远离平衡态区域的超熵概念和耗散结构理论, 使得不可逆热力学从线性非平衡热力学发展到非线性非平衡热力学的新阶段。此外, 熵概念还被拓展到控制论、概率论、数论、天体物理和生命科学等领域, 由此产生了信息熵^[84, 85]和生态熵^[86]等新的熵概念。

对于工程界广泛存在的传热、流动过程和热力循环系统, Bejan^[23]在导出闭口和开口系统熵产表达式的基础上, 得到对流换热过程单位体积的熵产率为

$$\dot{S}_{\text{gen}}'' = \frac{-1}{T^2} q'' \cdot \nabla T + \frac{\mu}{T} \Phi'' \quad (1.1)$$

式中, T 为流体温度, q'' 为热流密度, μ 为动力黏度, Φ'' 为单位体积黏性耗散函数。由式(1.1)的熵产率基本公式, Bejan 进一步对换热器、肋片和绝热系统进行了分析和优化。在换热器的熵产分析和优化中, Bejan^[87-89]发现换热器熵产与其效能并不对应, 提出了“熵产悖论”。针对“熵产悖论”这一问题, 一些学者基于熵产定义了各种修正目标试图解决这一悖论^[90-98]。在此基础上, 许多学者基于熵产生最小化理论^[99-103]进一步对导热过程^[104-108]、肋片^[109-113]、换热器^[114-117]、热管^[118, 119]、太阳能热光伏系统^[120]、化学反应过程^[121, 122]和热力循环系统^[123-127]等各种传热传质过程和系统进行了分析和优化。

1.2.2 场协同原理

过增元^[34, 128]采用将对流换热的对流项比拟为内热源方法对对流换热问题进行了研究, 提出了对流换热中速度场和温度场必须协同的“场协同原理”, 并将速度场和温度场的协同关系表示为

$$Nu_x = Re_x Pr \int_V (\tilde{U} \cdot \nabla \tilde{T}) d\tilde{V} \quad (1.2)$$

式中, Nu_x 、 Re_x 和 Pr 分别为努赛尔数、雷诺数和普朗特数, \tilde{U} 和 $\nabla \tilde{T}$ 分别为无量纲速度场和温度梯度场。由式(1.2)可知, 通过合理地调整 \tilde{U} 和 $\nabla \tilde{T}$ 使得两者的点积最大时, 对流换热过程换热能力得到提高。基于该原理, 流体流动并不总是提高对流换热的本质原因得到了解释, 同时文献[34]还给出了实现速度场和温度场协同的具体途径。王松平等^[129]在考虑能耗约束的条件下, 对对流换热过程的温度梯度场和速度场重新进行了协同分析, 阐述了强化换热与能耗矛盾的统一性, 得到了指导该过程优化的原则。与对流传热过程类比, 陈群等^[130, 131]分析了对流传质过程中速度场与浓度场的协同关系, 提出了该过程的“场协同原理”, 并将其应用到通风排污过程^[131]和光催化氧化反应过程^[132]的研究中。吴良柏等^[133]在对流换热和对流传质场协同原理的基础上, 提出了传热传质过程的“场协同原理”, 并分析了速

度场和焓值梯度场的协同关系对系统换热性能的影响。在此基础上,许多学者进一步对换热器换热^[134-139]、管内和通道流动^[140-150]、磁场对流换热^[151]、多孔介质对流换热^[152]、湍流换热^[153,154]、管内对流换热实验^[155]等多物理场协同问题进行了分析和优化。

从场协同原理的发展历程可以看出,场协同原理将成为各种传递系统广义流之间协同一致的基本原则,具有丰富的内涵。对于自然界和工程界广泛存在的多物理场(温度场、压力场、浓度场、速度场、引力场、电磁场、声场、应力场、湿度场和强力场等)耦合问题,由于各物理场之间相互影响,它们之间能否协同一致直接关系到传递系统性能的优劣。因此,采用场协同原理对各种多物理场耦合的传递系统进行优化还可以开展大量的研究工作,该研究领域具有广阔的发展前景。

1.2.3 焓耗散极值原理

为了解决传热优化过程中基本物理量的缺失,过增元等^[35,37,38]通过热电比拟定义了用来描述传递热量能力的新物理量——“焓”(文献[39]曾称之为热量传递势容):

$$E_{vh} = \frac{1}{2} Q_{vh} U_h = \frac{1}{2} Q_{vh} T \quad (1.3)$$

式中, $Q_{vh} = Mc_v T$ 为物体的定容热容量, U_h 或 T 是温度, 即热势。由此得到了单位时间单位体积内焓的耗散, 称为焓耗散函数 $\dot{E}_{h\phi}$:

$$\dot{E}_{h\phi} = -\dot{q} \cdot \nabla T = k(\nabla T)^2 \quad (1.4)$$

式中, \dot{q} 为热流密度矢量, ∇T 是温度梯度。

整个控制体体积中的焓耗散率 $\dot{E}_{vh\phi}$ 为

$$\dot{E}_{vh\phi} = \int_v \dot{E}_{h\phi} dV = \int_v |\dot{q} \cdot \nabla T| dV \quad (1.5)$$

式中, v 为控制体的体积。

在此基础之上, 可得到给定热流边界条件的多维导热问题, 物体的当量热阻 R_h 为

$$R_h = \dot{E}_{vh\phi} / \dot{Q}_h^2 \quad (1.6)$$

式中, \dot{Q}_h 是传热率。对应的平均温差 $\Delta \bar{T}$ 为

$$\Delta \bar{T} = R_h \dot{Q}_h \quad (1.7)$$

此外, 胡幅杰和过增元^[156]还提出了传热过程的焓传递效率:

$$\eta = \frac{\dot{E}_{v\phi, \text{use}}}{\dot{E}_{v\phi, \text{in}}} \quad (1.8)$$

式中, $\dot{E}_{v\phi, \text{in}}$ 和 $\dot{E}_{v\phi, \text{use}}$ 分别为输入系统的焓流率和可用焓流率。

韩光泽等^[157, 158]和朱宏晔等^[159]分别从导热机理、电热模拟试验等角度对焓的物理意义作了进一步地阐述。对于扩散传质过程过程, 陈群等^[130, 160, 161]通过热、质类比的方法定义了扩散传质过程单位体积内的质量积耗散为

$$\phi_m = -q_m \cdot \nabla Y = \rho D |\nabla Y|^2 \quad (1.9)$$

式中, q_m 为质量流量, Y 为组分质量分数, ρ 为密度, D 为质量扩散系数; 并由此提出了扩散传质过程的积耗散极值原理。Liu 等^[162]进一步拓展了热量焓的概念, 将传输过程的广义积耗散定义为广义流和广义势差的乘积, 并推导出了传输过程单位时间内的积耗散:

$$\dot{J}_{vm\phi} = \dot{m}^* \Delta \bar{P} \quad (1.10)$$

式中, \dot{m}^* 为净流量, $\Delta \bar{P}$ 为平均势差。基于文献^[162]传输过程积耗散的定义, 陈林根等将其用于多孔介质传质构形优化, 得到了多孔介质传质过程单位时间单位体积内的质量积耗散^[44, 163]:

$$\dot{J}_{m\phi} = \dot{m}''' \Delta P \quad (1.11)$$

式中, \dot{m}''' 为单位体积内的质量流率, ΔP 为压差。整个体积内的质量积耗散率 $\dot{J}_{vm\phi}$ 为

$$\dot{J}_{vm\phi} = \int_v \dot{J}_{m\phi} dv \quad (1.12)$$

对于给定质流边界条件的多维传质问题, 其当量流阻 R_m 和平均压差 $\Delta \bar{P}$ 可分别表示为

$$R_m = \dot{J}_{vm\phi} / \dot{m}^2 \quad (1.13)$$

$$\Delta \bar{P} = \dot{J}_{vm\phi} / \dot{m} \quad (1.14)$$

式中, \dot{m} 是质量流率。程雪涛等^[164]将传热焓和质量积推广到广义流动过程, 定义了积、积流、积耗散等概念, 得到了广义流动系统的积耗散极值原理和最小广义流阻原理。

基于焓耗散率的定义, 导热过程“焓耗散极值原理”可表述为^[35, 37, 38]: 对于具有一定的约束条件并给定热流边界条件时, 当焓耗散最小时, 导热过程最优(平均温差最小); 在给定温度边界条件时, 焓耗散最大, 则导热过程最优(平均热流最大)。

对于绝热过程,冯辉君等^[165]与导热过程类比,提出了绝热过程“焓耗散极值原理”,即对于具有一定的约束条件并给定热流(热损失)边界条件,当焓耗散最大时,绝热过程最优(平均温差最大);在给定温度边界条件时,焓耗散最小,则绝热过程最优(平均热损失率最小)。焓耗散与焓耗散极值原理的提出,为传热系统的优化提供了新目标,该目标可以作为系统整体传热能力的特性描述。基于焓耗散率这个物理量定义的当量热阻(平均热阻)反映了传热过程中的传热性能,即对于强化传热过程,当量热阻越小,则导热性能越优,系统内的平均温度越低,传热效率越高。程雪涛等^[164]进一步将传热过程焓耗散极值原理推广到广义流动过程(流动强化过程)积耗散极值原理,即给定广义流边界时寻求最小广义传递势差,等价于寻求系统积耗散最小;给定系统当量广义传递势差时寻求系统最大广义流传递量,等价于寻求系统积耗散最大。本书进一步将广义流动强化过程积耗散极值原理推广到广义传递过程(传递强化过程和传递弱化过程)广义耗散极值原理,即对于传递强化过程,在广义流边界给定的条件下,广义耗散最小时,则传递强化过程最优;在广义势边界给定的条件下,广义耗散最大时,则传递强化过程最优;对于传递弱化过程,在广义势边界给定的条件下,广义耗散最小时,则传递弱化过程最优;在广义流边界给定的条件下,广义耗散最大时,则传递弱化过程最优(详见本书第11章)。

焓理论自提出之后得到了蓬勃的发展^[40-45],一大批学者基于焓理论分别对导热问题^[166-171]、对流换热问题^[172-185]、辐射换热问题^[186-192]、换热器设计问题^[193-223]、热功转化问题^[224-244]、传质问题^[162,245-252]、构形设计问题^[43,44,163,165,253-258]和其他问题^[259-275]进行了大量研究,并定义了焓耗散均匀性系数^[219]、焓经济性^[220]、焓耗散有效性^[258]等与焓有关的新概念和能量耗散^[276-278]等焓的衍生概念,进一步拓展了焓的内涵。这些工作体现了焓理论的优越性和科学性,说明其在传热、传质等各种传递过程优化方面可发挥出不可估量的作用。

焓理论揭示了传递过程的本质属性,是不同于熵产生最小化理论和场协同理论的新传热优化理论,它代表了现代传热优化理论的发展前沿。据不完全统计,截至2015年年初,已有200多篇与焓理论相关的文献发表,包括专著和文集4部^[35,279-281]、专题综述10篇^[40-45,231,237-239]和博士论文18篇^[130,253-255,282-295]。

熵是决定自然过程方向的时间之矢,是热学核心概念的重要组成部分。但由于在换热设备优化中熵产最小与其效能并不总是对应、基于熵产最小原理导出的导热系统热导率与其当地温度成反比,而焓耗散与换热设备效能可以对应,依据最小作用原理^[296,297]导出的导热问题最小作用量为焓^[130,298],因此焓理论扮演着弥补熵产生最小化理论的不足,揭示传递过程本质属性的重要角色,可称为热学核心概念的“另一半”。虽然也有个别学者对焓理论有所质疑^[299,300],但这些质疑本身是基于误解或曲解的;对此,过增元已给予了详细回应^[301]。科学发展史上每一次新

概念的提出都或多或少会遭受质疑,相信熵理论在各个领域被广泛推广和应用之后,它对科学的发展将做出重要贡献。熵产生最小化理论在自然界和工程界均有广泛应用,随着熵理论的发展,它的应用范围将会进一步拓展。

1.3 构形理论的产生、发展和内涵

1.3.1 构形理论的产生和发展

Bejan^[302]在1996年对城市内部街道网络的成因进行深入分析后,提出了构形理论^[2-17]。他进一步考虑了街道交叉角度对最优出行时间的影响^[303],首先将构形理论应用到电子元件的冷却问题中^[304],并提出了构形定律^[3,9,304]:“对于一个沿时间箭头方向(或为适应生存环境)进行结构演化的有限尺寸流动系统来讲,为流过其内部的‘流’提供越来越容易通过的路径是决定其结构形成的根本原因。”或可更简单地表述为^[55]:事物结构源自于性能达到最优。“构形”中文译名最早由陈林根等^[53]提出,既暗含事物的内部结构与外部形状之意,又表达了与分形(Fractal)理论相对的从小到大的构造过程,与其英文原名“Constructal”一词原意吻合^[55]。

在对连铸二冷过程配水优化的研究中,Feng等^[305,306]通过与轧钢加热炉壁绝热过程构形优化^[165]类比,对连铸二冷区水量分配比进行了“广义构形优化”,并由此提出了广义构形优化思想,即对于任意有形结构参数和无形性能参数的传递系统,在一定的传输材料体积、系统体积和其他参数总量的约束下,可寻求一种最佳系统结构和最佳性能参数使得传递系统内部的流越来越容易(或越来越难)从其内部通过,这一优化方法可称为“广义构形优化”,对应的最佳系统结构和最佳性能参数称为“广义最优构形”(详见本书第11章)。广义构形优化使得传递系统有形结构参数和无形性能参数的优化同时得到兼顾。

构形理论是在热力学优化的基础上提出来的,可称为“非平衡系统构型问题的热力学”,为统一解释自然界各种流动系统结构形成的根本原因提供了理论基础;同时也为工程界各种流动系统结构设计提供了指导,可被称为一种新的几何哲学。自构形理论提出以来,一大批学者应用该理论进行了大量的优化研究。据不完全统计,截至2016年年初,已有700多篇与构形理论相关的文献发表,包括专著和文集17部^[2-17,307]、不同时期的专题综述近67篇^[55,308-373]、博士学位论文59篇^[253-255,282,289,374-428]和专利1项^[429]。

构形理论的研究内容涉及叶脉、根系、血管、气管和神经等脉管系统和生命体运动、全球大气回流和洋流、河岸地貌、河道网络、闪电、裂纹等自然问题;城市居民点的分布、交通网的生成和发展、移民问题、市政工程设计、和平进程、历史进程、政权体制、文字手写体的构造、黄金分割点问题、人类年龄及死亡问题等社会问题;城