



国外优秀科技著作出版专项基金资助

能量的有效利用

——夹点分析与过程集成

Pinch Analysis and Process Integration

A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy

(原著第二版)

Second Edition

[英] 伊恩 C. 肯普 (Ian C. Kemp) 著

项曙光 贾小平 夏力 译 杨友麒 审订



化学工业出版社



国外优秀科技著作出版专项基金资助

能量的有效利用 ——夹点分析与过程集成

Pinch Analysis and Process Integration

A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy

(原著第二版)

Second Edition

[英] 伊恩 C. 肯普 (Ian C. Kemp) 著

项曙光 贾小平 夏力 译 杨友麒 审订



化学工业出版社

·北京·

本书汇总了近30年来有关夹点分析与过程集成研究及应用成果,通过对基本原理进行翔实的理论剖析,以实际应用的逐步指导相结合,通过实例使读者明白夹点分析的基本原理,如何进行夹点分析?如何设计和改进换热网络?公用工程节能与全局分析,如何通过工艺过程改变实现进一步节能降耗?不仅包括大规模的连续过程,而且还包括时变过程,几乎涉及所有耗能的场合。本书是从事节能减排、工艺开发、过程设计等技术人员实用工具书和指南,可作为高校本科生、研究生的教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

能量的有效利用——夹点分析与过程集成:第2版./[英]肯普(Kemp, I. C.)著;项曙光,贾小平,夏力译.—北京:化学工业出版社,2010.7

书名原文:Pinch Analysis and Process Integration: A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy

ISBN 978-7-122-08694-5

I. 能… II. ①肯…②项…③贾…④夏… III. 能源-综合利用 IV. TK01

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第095997号

Pinch Analysis and Process Integration: A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy, 2nd edition/by Ian C. Kemp

ISBN: 978-0-75068-260-2

Copyright © 2007 by Elsevier. All rights reserved.

Authorized simplified Chinese translation edition of English Edition jointly published by Chemical Industry Press and Elsevier (Singapore) Pte Ltd., 3 Killiney Road, #08-01 Winsland House I, Singapore 239519.

978-981-272-299-7

Copyright © 2010 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd.

Copyright © 2010 by Chemical Industry Press

All rights reserved.

This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书中文简体字翻译版由化学工业出版社与Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 在中国大陆境内合作出版。本版仅限在中国境内(不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区)出版及标价销售。未经许可,不得随意向其他国家和地区出口。

本书封底贴有Elsevier防伪标签,无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号:01-2009-2594

责任编辑:王丽

文字编辑:杨欣欣

责任校对:吴静

装帧设计:张辉

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市万龙印装有限公司

720mm×1000mm 1/16 印张22¼ 字数411千字 2010年8月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:68.00元

版权所有 违者必究

国外优秀科技著作出版专项基金

FUND FOR FOREIGN BOOKS OF
EXCELLENCE ON SCIENCE AND TECHNOLOGY
(FFBEST)

管理委员会名单

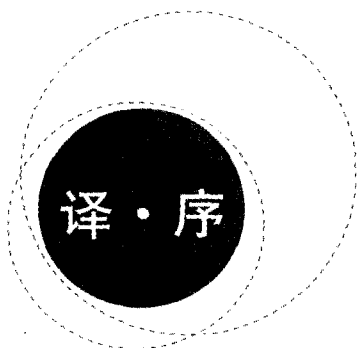
名誉主任：成思危 原全国人大常委会副委员长
主任委员：谭竹洲 中国石油和化学工业协会名誉会长
副主任委员：李学勇 王心芳 阎三忠 曹湘洪
潘德润 朱静华 王印海 龚七一
俸培宗 魏 然

委 员 (按姓氏笔画顺序排列)：

王子镐	王心芳	王印海	王光建	王行愚
申长雨	冯 霄	冯孝庭	朱家骅	朱静华
刘振武	杨晋庆	李 彬	李伯耿	李学勇
李静海	吴剑华	辛华基	汪世宏	欧阳平凯
赵学明	洪定一	俸培宗	徐 宇	徐静安
黄少烈	曹 光	曹湘洪	龚七一	盛连喜
阎三忠	葛 雄	焦 奎	曾宝强	谭竹洲
潘德润	戴猷元	魏 然		

秘 书 长：魏 然

副 秘 书 长：徐 宇

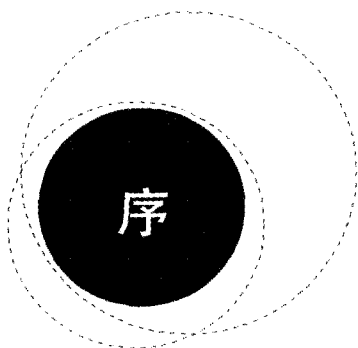


早在 20 世纪 80 年代初，原著第一版 “User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy” 的出版在国际学术界及工业界引起了极大的反响，书中提出的夹点分析方法概念清晰、表达简单，易于广大读者所接受。自那时起至今的 28 年期间，夹点分析技术在许多领域的能量有效利用方面得到了不断应用和发展，开发了许多新技术。本书作为原著再版的中文译作，围绕原创的核心概念，综述了自 20 世纪 80 年代以来该方法在理论上及应用上的主要进展，内容丰富、全面，几乎涉及所有耗能的场合。书中用具体案例展示了夹点分析不仅适合于像炼油和化工这样大规模的复杂过程，同时也可以用于解决诸如化学品、食品饮料以及消费品等相对规模较小的生产过程的能量有效利用问题。

当前，我国正在加快经济发展方式向低碳经济转变的步伐，节能减排已成为实现低碳经济的有效措施之一。无疑，夹点分析技术为实现过程工业的节能降耗提供了一种高度有效的设计及改造的工具。在此背景下，本书译者把这本书译成中文献给读者，将有利于系统节能观念的传播，促进节能降耗的实践活动。本译著不仅可以作为高校本科生、研究生及化学工程师等从事过程设计人员的参考书，而且在学术上可望进一步推动过程集成技术的发展与应用。

中国工程院院士 陈丙珍

2010 年 3 月



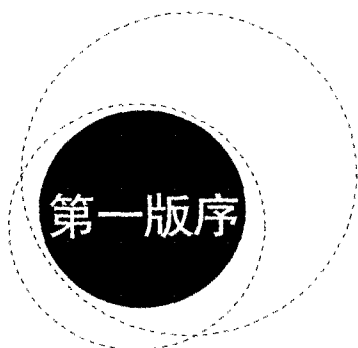
本书第一版出版于 20 多年前，这就像一粒橡树子最终成长为一棵橡树。

创新是令人陶醉的。Jonn Lennon 曾经说过：“通情达理的人适合于世界，不通情达理的人希望世界适合于他。因而所有创新归于不通情达理的人。”

Ian Kemp 当初加入我们这个发明了一种新颖且非传统过程设计中能量管理方法的团队时，我从来没有将 Ian Kemp 看做是不通情达理的人，而是一名年轻的工程师。他是我记忆中遇到的最忠诚的从业者之一。Ian 经过 20 多年持续努力劳动完成了第二版。第二版的页数是第一版的两倍以上。

详细、综合和透彻的书籍是成熟的标记。在技术发展过程中，书会变得越来越厚。虽然常常是不讨好的事情，但这是普遍的趋势。作为许多过程设计工作者的代表，我认为 Ian 完成了这件事。

Bodo Linnhoff
2006 年 10 月 30 日于柏林



在解决工业技术问题方面，常常会出现概念和实现上表现卓越的方法。当然，这种方法既简单又实用，由于这些特点，从而对专业和学科的科学技术发展做出重要贡献。

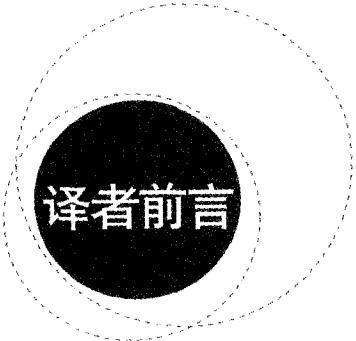
Bodo Linnhoff 和他团队的其他成员通过他们的工作对化学工程做出了重要贡献。这已在世界范围内得到公认，我个人也有同样看法。本书中提到的技术已在美国得到公认。

化学工业是消耗燃料和原料的大户，因此没有强调更有效地利用能量的必要性。同样，为减少投资成本和操作费用，必须从更高层次的概念考虑，才能保持工业技术不断取得进展。本书提供了完成这一任务的新工具，该工具促使能够使技术取得重大进展的、想象力丰富的想法得以实现。

其次，本书强调在过程设计中要激发无需比袖珍计算器更复杂的工具就能简单且容易实现的新概念。在许多应用科学严重地趋向于数学理论和需要高级计算机程序的今天，一种高度有效的、简单的能够使过程设计优异的工具应运而生。

R. Malpas

Halcon 国际公司主席、首席执行官



译者前言

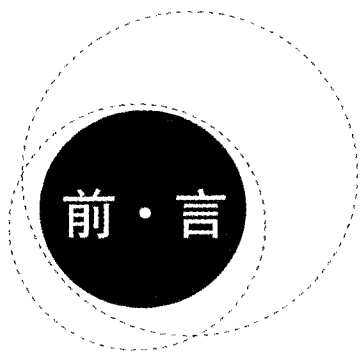
夹点技术自 1978 年发明以来,经过三十多年的不断发展和深化,已发展成为系统、科学、成熟的技术。夹点概念的提出,基于严格的热力学目标,使工程技术人员可以清楚地看到过程什么地方浪费了能量、浪费的原因及如何改善来实现目标。本书第一版自 1982 年问世以来,由于直观、简单、明了、实用及没有高深理论,已成为广大科技工作者从事节能的实用工具书和参考指南,经过十余次重印,终于在 2007 年诞生了第二版。第二版遵循了第一版的足迹,用那时以来的主要进展和成果对其进行了更新,特别在夹点分析实际应用方面总结了最有用的夹点技术进行补充和完善。本书第二版补充了如何通过工艺过程改变实现更大的节能;补充了夹点分析在间歇过程、开车与停车等时变过程的应用;加强了如何在实际工业装置上应用夹点分析(特别是常被忽略的物流数据提取问题)方面的内容。

本书第二版在翔实阐述夹点分析基本原理的同时,以实际应用的逐步指导相结合,通过实例介绍了夹点分析的基本原理,如何进行夹点分析?如何设计和改进换热网络?公用工程节能与全局分析,如何通过工艺过程改变实现进一步节能降耗?不仅包括大规模的连续过程,而且还包括时变过程,几乎涉及所有耗能的场合。在低碳发展、绿色发展的今天,在国内流程工业能耗普遍高于国外先进水平的现状情况下,本书第二版是一本难得的过程节能减排工具书和参考书。故将其译成中文,以期推动国内流程工业节能减排工作的开展与深入。

本书翻译主要由项曙光、贾小平、夏力完成。第 1~3 章、第 10 章由项曙光翻译,第 4~6 章由夏力翻译,第 7~9 章由贾小平翻译,项曙光进行了全书统稿。杨友麒教授对全书进行了审订,并提出了许多有益建议和意见,为全书的翻译增色不少。参加本书翻译的还有韦海鸥、栾秋芹、秦昌、李秀丽等同学。在全书翻译过程中,本着忠于原著、尊重原著和对读者认真负责的态度,力求做到翻译的准确性和灵活性的有效结合,但由于译者水平和能力所限,肯定存在不当之处,欢迎读者批评指正(xsg@qust.edu.cn)。

译者

2009 年 12 月于青岛



当过程集成用户指南第一版 1982 年问世时，立刻被公认为概念高雅、简洁，表达清楚的典范。没有大量的方程或复杂的计算机模型，而是直接识破过程能量的利用本质，给出技术的基本原理。基于严格的热力学目标，使工程师可以清楚看到过程中浪费了能量的地方、浪费的原因及如何改正。关键的领悟是夹点温度的存在，从而导致“夹点分析”这一新方法的诞生。

从那时起，夹点分析在许多方面得到了不断发展和深化，现在夹点分析已成为成熟的技术。虽已完成了许多研究、开发了许多新技术，但原创的核心概念仍正确有效。本书的目标是遵循原用户指南的足迹，用那时以来的主要进展对其进行更新，使这一技术几乎应用到任何耗能的场合，但并不企图复制或代替过去 25 年来出现的详细研究论文和相关教科书，而是作为其合适的参考。

第 1 章做准备。第 2 章介绍关键概念：能量目标化、用组合曲线和总组合曲线图形表示能量目标和夹点思想，并展示其如何作为核心来找到满足能量目标的换热网络。但愿这能激起读者的兴趣来详细研讨能量、面积和费用的目标化（第 3 章）和换热网络设计和最优化（第 4 章）。第 5 章讨论热量与动力系统的相互作用，包括热电联产、热泵和制冷系统，并对全局进行分析。第 6 章讨论有益操作条件改变的识别，特别对精馏、蒸发和其他分离过程。第 7 章描述在间歇过程、开车与停车和其他时变过程的应用。第 8 章将近距离看看在实际工业装置上如何应用提出的方法，包括重要的但常被忽略的物流数据提取问题。

两案例研究贯穿于全书，用于演示各种技巧与方法。第 9 章包括五个更完整的实例。书中还提到其他例子。

夹点分析不仅适合于像炼油和大宗化学品工厂这样的大规模复杂过程，即使在复杂换热网络不必要或不合适的场合，夹点分析技术也是理解其能量流和确保最可能的设计与操作的关键，正如本书中，特别是案例研究中，大家看到的相对小规模化学品过程、食品与饮料、消费品生产、批加工甚至建筑这样的非过程情况。通常，小的、简单的工厂仍然有节省的价值，因为过去没有人真正系统地寻找过机会。减少能量用量使公司减少直接费用，从而节省每一英镑、美元或欧元成本，并直接达到低线而增加的收益，同时还可以减少化石燃料用量和低排放，使公司和环

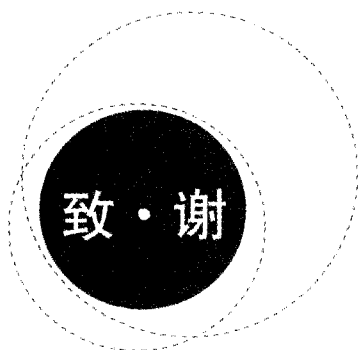
境都受益。即使是没有多大经济效益的项目，工程师仍能从对工厂的充分理解和感知中受益。在数个案例中，夹点研究已导致改进操作方法，得到真实的节省——零费用。

夹点分析更广泛的应用障碍是缺乏能买得起的软件。为解决此问题，英国化学工程学会组织了年轻会员进行竞赛，编制用于夹点分析的电子表格软件。参加者充分展示了其创造能力，在没有广泛使用编程技巧的情况下（例如宏），最终演示了关键的目标计算和绘制图形。特别值得祝贺的是 Gabriel Norwood，他的获奖作品随本书读者可以免费得到。

因此，当前每个工厂没有进行夹点分析、没有物料衡算和能量衡算、没有工艺流程图和管线仪表图将不再有理由。（也就是说，这对了解有多少公司没有更新、检验过的物料与能量衡算是有益的；即物料与能量衡算常常是夹点研究最有价值的副产品之一。）

我希望本次改版将被证明比原版成功，希望鼓舞新一代工程师、科学家和工程技术人员在远超越原使用的过程和场合中应用夹点分析。

Ian C. Kemp
于阿宾顿，牛津郡



本书中许多材料已经受过时间的检验，重复劳动没有意义。本书中第1~5章和第9章大部分文字和图取自第一版，常常是一字不差。感谢英国化学工程师协会 (ICChemE) 和 Bodo Linnhoff 教授允许使用这些材料，从而使本书的写作成为可能和可管理的任务，我太幸运了以至于怎么也不能报答原版作者团队：B. Linnhoff、D. W. Townsend、D. Boland、G. F. Hewitt、B. E. A. Thomas、A. R. Guy 和 R. H. Marsland，还有其他贡献者 J. R. Flower、J. C. Hill、J. A. Turner 和 D. A. Reay。

许多其他人对本书也有影响。我非常幸运地参加了 Bodo Linnhoff 在 UMIST 的早期课程，并受到了 ICI 研究和应用团队数名先驱成员的培训，特别是 Jim Hill, Ajit Patel 和 Eric Hindmarsh。我衷心地感谢他们，同样要感谢在 Harwell 的同事，特别是 Ewan Macdonald 在我作为年轻工程师时给了我许多有价值的指导。在影响我多年的许多其他人中，特别要提到 John Flower 和 Peter Heggs。

与我一起工作的 Robin Smith、Geoff Hewitt、Graham Polley 和 Alan Deakin 首先提出了本书第二版的想法，并做出了重要贡献。同样要感谢英国化学工程师协会的 Audra Morgan 和 Caroline Smith、Elsevier 出版社的 Jonathan Simpson 和他的同事，他们的实际帮助使本书在长期酝酿后成为现实。

最后但同样重要的，要感谢我妻子 Sue 的支持和耐心，特别是在适合于许多书和软件项目的格言——“最初的 90% 的工作占用 90% 的时间，最后的 10% 的工作又用掉 90% 的时间……”^①，再次被证明是正确的时候。

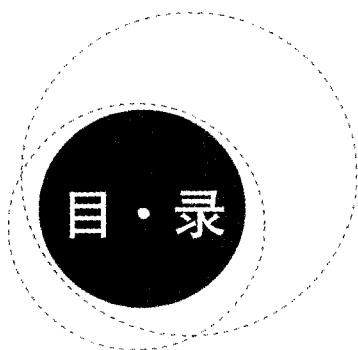
① 即 90-90 法则，意寓比原期望要多付出 80% 的时间。



作者感谢下列公司和出版商允许从他们的出版物中引用插图：

- [1] Elsevier Ltd for Figure 3.20 from Linnhoff, B. and Ahmad, S. (1990) . *Computers and Chemical Engineering* , vol. 7, p. 729 and Figure 5.19 from Klemes, J. *et al.* (1997), *Applied Thermal Engineering* , vol. 17, p. 993.
- [2] John Wiley and Sons for Figures 5.20, 5.21, 5.22, 5.24 and 6.16 from Smith, R. (2005) . *Chemical Process Design and Integration* .
- [3] Johnson Hunt Ltd for Figure 4.4 and Table 4.2.
- [4] The Institution of Chemical Engineers (IChemE) for Figure 6.15, from Smith, R. and Linnhoff, B. (1988), *TransIChemE Part A*, vol. 66, p. 195.

特别感谢英国化学工程师协会和 Bodo Linnhoff 教授允许使用第一版书中的许多图。



第 1 章 绪论	1
1.1 什么是夹点分析?	1
1.2 历史和工业经历	2
1.3 夹点分析是干什么的?	3
1.4 过程综合的概念	5
1.5 过程设计中热力学的作用	8
1.5.1 如何实际应用热力学	8
1.5.2 投资费用和能量费用	8
1.6 学习和应用夹点技术	10
参考文献	10
第 2 章 夹点分析的关键概念	12
2.1 热回收与热交换	12
2.1.1 热交换的基本概念	12
2.1.2 温焓图 (temperature-enthalpy diagram)	13
2.1.3 组合曲线 (composite curve)	14
2.1.4 目标化 (targeting) 方法: 问题表法 (the “problem table”)	17
2.1.5 总组合曲线与位移组合曲线	20
2.2 夹点及其意义	22
2.3 换热器网络设计	24
2.3.1 网格 (network grid) 表示	24
2.3.2 “通常” 网络设计	24
2.3.3 最大能量回收网络设计	26
2.3.4 设计策略概述	30
2.4 $\Delta T_{\min}$ 选择: 超级目标化 (supertargeting)	30

2.4.1 $\Delta T_{\min}$ 选择的深层含意	30
2.5 夹点分析方法论	32
2.5.1 夹点分析技术范围	32
2.5.2 如何进行夹点研究	32
练习	33
参考文献	34

第3章 数据提取与能量目标化

35

3.1 数据提取	35
3.1.1 能量平衡与物料平衡	35
3.1.2 物流数据提取	36
3.1.3 热负荷与热容量计算	37
3.1.4 物流选择	38
3.1.5 混合	40
3.1.6 热损失	40
3.1.7 小结	41
3.2 案例研究：有机蒸馏装置	42
3.2.1 过程描述	42
3.2.2 能量与物料衡算	42
3.2.3 物流数据提取	44
3.2.4 费用数据	44
3.3 能量目标化	45
3.3.1 个别物流的 $\Delta T_{\min}$ 贡献	45
3.3.2 阈值问题	46
3.4 多公用工程	47
3.4.1 公用工程的类型	48
3.4.2 合理配置原理	48
3.4.3 恒温公用工程	50
3.4.4 公用工程夹点	51
3.4.5 变温公用工程	51
3.4.6 平衡组合曲线与平衡总组合曲线	53
3.4.7 多公用工程级别选择	56
3.5 更先进的能量目标化	57

3.5.1 分区目标化·····	57
3.5.2 压降目标化·····	58
3.6 换热单元数、面积、壳数目标化·····	59
3.6.1 设备单元数目标化·····	59
3.6.2 最小设备单元数目标化·····	61
3.6.3 面积目标化·····	63
3.6.4 偏离纯逆流·····	65
3.6.5 壳数目标化·····	65
3.6.6 现有系统的性能·····	66
3.6.7 拓扑陷阱·····	66
3.7 超目标化：最优 $\Delta T_{\min}$ 的费用目标化·····	68
3.7.1 选择 $\Delta T_{\min}$ 的权衡·····	68
3.7.2 2 股物流例子演示·····	69
3.7.3 影响最优 $\Delta T_{\min}$ 的因素·····	70
3.7.4 理想 $\Delta T_{\min}$ 的近似估计·····	72
3.8 有机蒸馏装置目标化的案例研究·····	73
3.8.1 能量目标·····	73
3.8.2 面积目标化·····	73
3.8.3 费用目标化·····	74
3.8.4 分区目标化·····	76
3.8.5 包含公用工程物流的目标化·····	78
3.9 附录：问题表算法与组合曲线算法·····	81
3.9.1 问题表与总组合曲线·····	81
3.9.2 组合曲线·····	82
习题·····	83
参考文献·····	83

第 4 章 换热网络设计

85

4.1 引言·····	85
4.2 热交换设备·····	85
4.2.1 换热器的类型·····	85
4.2.2 管壳式换热器·····	86
4.2.3 板式换热器·····	89

4.2.4	回热式换热器	91
4.2.5	固体热回收	91
4.2.6	多物流换热器	92
4.3	物流分流和循环匹配	92
4.3.1	分流	92
4.3.2	循环匹配	98
4.3.3	远离夹点设计	98
4.4	网络松弛	101
4.4.1	回路和路径的使用	101
4.4.2	网络温差与换热器温差	106
4.4.3	可选网络设计和松弛策略	106
4.5	更复杂的网络设计	108
4.5.1	阈值问题	108
4.5.2	约束	111
4.6	多夹点和近夹点	113
4.6.1	定义	113
4.6.2	多夹点网路设计	113
4.7	网络改造设计	115
4.7.1	过程改造的可选策略	115
4.7.2	网络最优化	117
4.7.3	网络夹点	117
4.7.4	网络改造设计实例	118
4.7.5	自动的网络设计	125
4.8	可操作性、多基准工况设计	126
4.9	有机物蒸馏网络设计实例研究	129
4.9.1	独立单元	129
4.9.2	单元集成	132
4.9.3	包括公用工程物流	134
4.9.4	多公用工程	135
4.10	结论	137
	练习	137
	参考文献	138

5.1 概念	140
5.1.1 引言	140
5.1.2 热电系统的类型	140
5.1.3 热机和热泵的基本原理	141
5.1.4 热机与热泵的适宜配置	143
5.2 CHP 系统	144
5.2.1 实际热机	144
5.2.2 CHP 系统的选择	146
5.2.3 全厂热与动力系统	150
5.2.4 经济评价	154
5.2.5 有机物朗肯循环	158
5.3 热泵和制冷系统	160
5.3.1 热泵循环	160
5.3.2 制冷系统	163
5.3.3 轴功分析	166
5.3.4 冷却水系统	168
5.3.5 小结	168
5.4 全局分析	168
5.4.1 总全局能量目标化	169
5.4.2 全局温焓曲线	170
5.4.3 通过全局蒸汽系统的实际热回收	171
5.4.4 间接热传递	172
5.4.5 联产目标估计	174
5.4.6 排放目标化	175
5.5 实例：有机物蒸馏装置	175
5.6 案例研究和例子	178
5.6.1 威士忌酒厂	178
5.6.2 具有地热区域供热的 CHP	180
5.6.3 热带地区电力生产与海水淡化	181
5.6.4 医院	182
练习	182
参考文献	183