

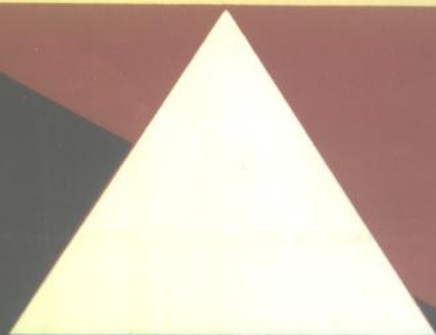
95 卷

大连理工大学教授学术丛书

全过程系统 能量优化综合

TOTAL PROCESS
ENERGY
INTEGRATION

姚平经 主编



大连理工大学出版社

726453

大连理工大学教授学术丛书 95 卷

全过程系统能量优化综合

姚平经 主编



大连理工大学出版社

**The Professors Academic Works Series
of the Dalian University of Technology'95**

Total Process Energy Integration

Yao Pingjing

Dalian University of Technology Press

(辽)新登字 16 号

图书在版编目(CIP)数据

全过程系统能量优化综合/姚平经主编. —大连:大连理工大学出版社, 1995. 12

ISBN 7-5611-1094-4

I. 全… II. 姚… III. 热能-最佳化 IV. TK1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 01820 号

全过程系统能量优化综合

姚平经 主编

* * *

大连理工大学出版社出版发行

(大连市凌水河 邮政编码 116024)

大连海事大学印刷厂印刷

* * *

开本: 850×1168 1/32 印张: 11.25 字数: 282 千字

插页: 5

1995 年 12 月第 1 版 1995 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1—3000 册

* * *

责任编辑: 刘晓晶 王君仁 责任校对: 杜祖诚

封面设计: 孙宝福

* * *

ISBN 7-5611-1094-4

TK · 28

定价: 16.00 元

本书由

国 家 自 然 科 学 基 金

大连市学术专著资助出版评审委员会

大连理工大学学术著作出版基金

资助

The book is financed by

**The National Natural Science Foundation
of China,**

**The Dalian Evaluation Committee for
Publishing Academic Works Financed**

and

**the Publishing Academic Works Foundation
of the Dalian University of Technology**

序

解决能源的合理利用,已成为我国推进现代化经济建设的战略重点之一。作为耗能大户的过程系统工业,包括化工、炼油、建材、冶金等在内,更是首当其冲。近年来,我国这些行业的能耗水平虽有较大进步,但整体来说仍远高于现代先进国家的水平。究其原因,能源未能充分地予以综合利用,是其中一个重要方面。

过程综合是当今工程节能中的主要手段。近二三十年来,世界许多传统化工生产的能耗一直处于逐年下降的趋势。然而这些进步很少是由于工艺或设备有什么革命性的改革或突破所导致,而主要是将已有的技术通过过程集成、综合匹配等手段,使之产生整体的节能效果。

过程综合,尤其是着眼于能量利用的过程能量综合,已经形成了一套比较完整的理论和方法。国外自70年代开创的夹点技术就是其中的一个主要方面。

过程综合,是化学工程、系统工程和计算机科学的交叉学科。在国内,有关这方面的技术还报道不多,而且往往语焉不详,未尽其内涵。本

书是作者多年研究和实践的结晶,书中将过程综合的原理和方法作了较为系统的介绍;尤其特点的是,在具体运算步骤和计算机应用上,不厌其详。相信读者通过学习本书能够掌握并运用这一技术,在节能工作中做出贡献。是为序。

袁一
一九九五年十一月

前 言

世界上对能源的需求量正迅速上升,随着越来越多的人口由农业转向工业,这种需求量还将以惊人的速度继续扩大。能源价格不断上涨,在产品总成本中,能源费用部分越来越大。节约能源已成为整个社会日益关心的问题,在能耗很大的工业部门,节能工作一直是发展生产技术、提高竞争能力的重要组成部分。

我国的能源供应短缺,长期处于紧张状态,而且能源利用效率与发达国家相比有很大差距,这严重地束缚了国民经济的正常发展,成为经济增长的“瓶颈”之一。

90年代,我国经济的发展速度,原定国民生产总值平均每年增长6%,2000年时需能源17~18亿吨标准煤,能源生产量约14亿吨标准煤,缺口能源3~4亿吨标准煤,基本上需要靠节能来弥补。中国共产党十四次代表大会指出,从国际国内形势的发展情况看,国民生产总值平均每年可以增长8%~9%,则2000年时比原来预测的能源需要量又将增加3~5亿吨标准煤,为弥补这么大的能源缺口,除了加速能源开发、生产和进口一部分能源外,主要仍需靠节能^[1]。

过程工业是广义的化学工业,包括化工、炼油、石油化工、冶金、轻工、建材等工业部门,是能源密集型工业。据我国1993年数据^[2],过程工业能源消耗约占全国能源消耗量的11%,为工业能源消费量的20%左右,是耗能大户。国家“七五”计划(1985年至1990年)期间,化工行业在节能方面取得显著成绩,万元产值能耗

以每年 3.78% 速率下降, 1992 年又比 1990 年下降了 10.6%, 但我国化工行业生产能耗仍然很高, 一般只相当于工业先进国家 70 年代的能耗水平。例如我国合成氨工业的能耗占化学工业的 52%, 是化工行业第一耗能大户。合成氨平均单耗比国际先进水平大约高出 50%。乙烯是石油化工最基础的原料, 国外乙烯装置能耗下降很快, 1976 年吨乙烯能耗为 1000 万大卡, 90 年代已降到 500 万大卡。我国吨乙烯能耗 1992 年平均值为 950 万大卡, 比国外高出近一倍。

一个国家、一个行业的产品能耗水平是由多种因素决定的, 但主要的因素是: 技术(装备水平、技术开发能力), 经济体制(经营模式、价格、节能投入), 以及政策(节能政策法规、环境法规等)。从技术的角度, 节能的原则途径有:

- (1) 增加高附加值、低能耗的高新技术产品的比重;
- (2) 装置采用先进的工艺路线, 并向规模大型化发展;
- (3) 对现有生产装置进行整体优化综合, 即实现全过程系统的能量集成;
- (4) 对各类人员进行节能技术与法规的培训。

节能工作的初始阶段, 一般着眼于生产过程中直接耗能的设备, 如燃烧炉、机、泵等, 提高单个设备的能源转换效率; 另一方面, 力图用投资不多的方法, 如改进控制系统、合理操作来降低能耗。随着节能工作的深入发展, 人们认识到更大的节能效果在于对整个过程系统的能量供求关系上进行分析, 从全局观点出发, 改进现有的工艺及设备, 达到合理有效利用能量的目标, 这就提出了全过程系统能量优化综合的问题。

在过程系统能量优化综合的研究工作中, 英国学者 *Linnhoff* 等提出的“夹点技术”在工业上卓有成效。80 年代初成功地用于换热器网络的优化综合, 而后扩大应用于包括公用工程、反应、分离系统在内的整个过程系统, 不仅用于节能, 而且用于增产中解除

“瓶颈”，减少环境污染等。这一方法的特点是运用拓扑学的概念和方法，对过程系统作出宏观、形象地描述与处理，工程技术人员容易掌握，并已成功地用于上千个工程实际项目，获得显著的经济效益。近 20 年来，热力学分析和热经济学分析在理论方面取得明显进展，阐明了对能量的认识不是单纯地从数量多少的角度，而更注重它的质量的高低或有效能的大小，并且定量地研究了有效能的性质、效率、费用及其与过程参数之间的关系，从用能的本质上对过程系统进行分析、评价、优化，为过程系统能量优化综合技术奠定了理论基础。过程系统模拟与优化技术的迅速发展为过程系统能量优化综合提供了有力的工具，得以采用数学规划法求出具有实际意义的严格最优解。人工智能技术是计算机科学的一个分支，它与过程系统工程学科相结合，在处理非数值型、离散型、以及不确定性等难于建立相应的数学模型的问题中发挥了关键作用，一定程度上解决了对过程系统进行分析、判断、推理和决策等方面的问题。

本书系统地阐述“夹点技术”的基础理论，并深入介绍采用夹点分析、热力学与热经济学分析、数学规划法以及人工智能技术进行过程系统用能状况的诊断与调优，并总结提出具有指导工程实践意义的“过程系统能量集成策略”；最后列出已开车成功的工程改造实例，介绍实施一项现有生产装置节能技术改造的方法与工作步骤，对于节能技术改造中关键换热设备的设计方法也提出了完整的设计计算书。

本书由姚平经主编。各章编写分工如下：第一章，姚平经；第二章，姚平经、李晖、王莉；第三章，范卫东；第四章，樊希山、范卫东；第五章，王世广、匡国柱。

国家自然科学基金委员会以及吉林化学工业公司、齐鲁石化公司、燕山石化公司、辽阳石油化纤公司、大庆石化公司、大连石化公司等部門对作者从事的科研与技术工作给予了资助，本书由袁

一教授审阅并作序,在此一并深表谢意。

-
- 1 苗天杰,在十四大精神鼓舞下,进一步作好节能工作.大连:全国第七届热力学分析与节能学术报告会论文,1994.8.
 - 2 杨友麒,曾广安.我国化工节能潜力与对策.大连:全国第七届热力学分析与节能学术报告会论文,1994.8.

Total Process Energy Integration

(summary)

This book describes the principles techniques and applications of process energy integration.

The material in this book is organized into five chapters. The first chapter is an introduction to the basis of pinch technology. Chapter 2 gives process synthesis approaches and strategies, its use is illustrated through a number of practical examples. Chapter 3 presents diagnosis and evolution of process energy utilization. We investigate the energy usage of total process and how energy usage can be economically reduced through process integration. The purpose of chapter 4 is to illustrate the application of the integration techniques in “real-life” case studies. There are two cases selected to illustrate the applicability of the techniques. Heat exchangers are key equipment items for process integration, chapter 5 gives computational procedure for designing reboiler and condenser in detail.

Pinch technology emerged as a tool for the analysis of process energy utilization. Its key contribution was to give the engineer simple concepts to use interactively. The founder of the pinch technology, Linnhoff explains the pinch technology as follows, “A major application of pinch technology has become targeting rather than design. It often is used for process analysis and therefore increasingly is referred to as pinch analysis rather than

technology...Process integration is a relatively new area for engineering design methodology. Until recently, engineers developed conceptual process methodology. In my opinion, many of the so-called mathematical methods simply introduced muscle before there was an eye. Pinch analysis contributed the eye. In this, pinch analysis was not alone. For example, Exergy Analysis and the heuristic approach recently summarized by Douglas attempt to do likewise. "We consider that these arguments are valuable.

This book can be used to introduce the basic concepts to the undergraduate and graduate students. It also contains material of interest to anyone who has previously used pinch technology. We hope that this book will help the reader to use integration techniques successfully in practice.

The authors acknowledge financial support provided for this research by the SINOPEC and the National Natural Science Foundation of China. The authors wish to express their thanks to Professor Yuan Yi for his kind advice in this work.

Yao Pingjing

June 1995

目 录

序

前言

第一章 夹点技术的基础理论	1
1.1 过程系统的夹点及其意义	1
1.1.1 $T-H$ 图(温-焓图)	1
1.1.2 组合曲线	4
1.1.3 在 $T-H$ 图上描述夹点	7
1.1.4 用“问题表格法”确定夹点	10
1.1.5 夹点的意义	16
1.2 准确地确定过程系统的夹点位置	20
1.2.1 准确地确定夹点位置——操作型夹点计算	20
1.2.2 合理地设计夹点位置——设计型夹点计算	25
1.3 过程系统的总组合曲线	27
1.3.1 总组合曲线的绘制	27
1.3.2 总组合曲线的意义	33
1.4 多夹点问题	33
1.5 无夹点——门槛问题	35
1.6 平衡的总组合曲线	37
1.6.1 公用工程总组合曲线	37
1.6.2 平衡的总组合曲线	38
1.6.3 平衡的总组合曲线的应用	39
参考文献	42
第二章 全过程系统的能量优化综合	43

2.1 换热器网络的综合	44
2.1.1 根据 $T-H$ 图综合换热器网络	46
2.1.2 夹点设计法	53
2.1.3 数学规划法	70
2.2 多组分分离序列的综合	95
2.2.1 分离序列综合问题	95
2.2.2 分离过程的能耗	100
2.2.3 直观推断规则	102
2.2.4 有序直观推断法	103
2.3 公用工程系统的综合	106
2.4 全过程系统的能量集成	111
2.4.1 蒸馏过程与系统的热集成	112
2.4.2 公用工程与过程系统的能量集成	122
2.4.3 热泵技术应用于精馏系统	127
参考文献	134
第三章 过程系统用能状况的诊断及调优	136
3.1 夹点分析法	137
3.1.1 概述	137
3.1.2 过程系统用能状况诊断的思想	140
3.1.3 过程系统用能状况的诊断工具	141
3.1.4 诊断的步骤	148
3.1.5 能量泵(Energy Pump)	148
3.1.6 精馏塔的剖面分析	150
3.1.7 调优	152
3.1.8 实例	153
3.2 热力学分析诊断法与热经济分析法	161
3.2.1 热力学分析法的基本概念和定律	161
3.2.2 热力学分析法	172

3.2.3 热经济学分析法	193
3.3 数学规划法在化工装置全系统调优中的应用	199
3.3.1 概述	199
3.3.2 全过程系统综合的步骤	200
3.3.3 反应、分离子系统的 MILP 模型	202
3.3.4 实例	205
3.4 人工智能技术在过程系统用能状况诊断中的应用 ...	210
3.4.1 人工智能和专家系统	210
3.4.2 专家系统有关的几个概念	212
3.4.3 人工智能在化工过程系统中的应用	213
3.4.4 人工神经网络——专家系统的有益补充	215
参考文献	216
第四章 工程应用实例	217
4.1 乙烯水合乙醇装置的能量集成	217
4.1.1 生产装置基本概况	217
4.1.2 基本数据的选取	218
4.1.3 原生产装置的夹点分析	224
4.1.4 调整过程物流间的传热温差	240
4.1.5 调整过程系统的操作条件	248
4.1.6 能量集成的实施情况	262
4.2 乙烯装置的用能诊断及调优	264
4.2.1 概述	264
4.2.2 工艺流程描述	266
4.2.3 数据的提取	269
4.2.4 用能状况诊断	272
4.2.5 调优	277
参考文献	282
第五章 换热设备设计计算	283