

过程系统工程理论与实践丛书



过程系统节能技术

李有润 著



中国石化出版社

过程系统工程理论与实践丛书

过程系统节能技术

李有润 著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书是《过程系统工程理论与实践丛书》之一。该丛书是普及型高科技系列读物, 主要介绍过程系统工程这门新型学科, 其应用领域包括化工、石油化工、冶金、轻工、建材等物流型工业。

本书在热力学及数学基础上, 介绍了换热网络、蒸汽动力系统及总能系统的节能技术, 重点介绍了运用夹点技术等新型节能技术的实践与分析, 并展望了节能技术的发展前景。

本丛书各分册都具有普及性、实用性和可操作的特点。适用于过程工业的技术人员、管理人员以及大、中专学校师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

过程系统节能技术/李有润著. —北京: 中国石化出版社, 2001. 1

(过程系统工程理论与实践)

ISBN 7-80043-542-3

I. 过… II. 李… III. 过程系统-节能 IV. N94

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第86862号

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市东城区安定门外大街58号

邮编: 100011 电话: (010)84271859

<http://press.sinopec.com.cn>

海丰印刷厂排版

海丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

787×1092毫米 32开本 7.75 印张 172 千字 印 2001-3000

1994年9月第1版 2001年1月第1版 第2次印刷

定价: 13.00元

主 编 成思危

编委会 (按姓氏笔划为序)

申同贺	许锡恩	成思危	陈丙珍
周瑞康	俞金寿	顾 炎	麻德贤
韩方煜	谭昌元	魏寿彭	

序

过程系统工程是在系统工程、化学工程、过程控制、计算数学、信息技术、计算机技术等学科的边缘上产生的一门综合性学科。它以处理物料—能量—信息流的过程系统为研究对象，其核心功能是过程系统的组织、计划、协调、控制和管理。它广泛地用于化学、冶金、建材、食品等过程工业中，目的是在总体上达到技术上及经济上的最优化。

过程系统工程大约是在60年代开始形成一门独立学科的，此后得到了迅速的发展，在各种期刊杂志上及三年一度的过程系统工程国际会议上发表了大量的文章，其中一些关键技术，如过程模拟、过程分析、过程综合、过程预测、过程评价、过程可靠性分析等日益成熟，应用领域也不断扩展，已经成为过程工业发展中不可缺少的一门高新技术。

二十多年来，我国学者及工程技术人员在努力学习国外先进技术的基础上，在实践中积累了不少经验，在技术上也有一些进展。但由于彼此之间缺乏联系及交流，在过程系统工程方面尚未能形成一支强大的人才队伍，有不少好的成果得不到应有的推广。有鉴于此，我国著名的系统工程专家钱学森教授在1988年12月23日给我的来信中，倡议成立一个全国性的学术团体。他在信中指出：“我想中国系统工程学会似尚缺少一个专门搞生产流程的委员会，而生产流程的系统工程对化学工业特别重要。您如同意，您可作为发起人向学会的秘书长或副秘书长建议成立这个委员会。”

在钱老的大力推动下，中国系统工程学会系统工程专业委员会于1991年宣告成立。在成立大会上，不少代表建议要

大力普及过程系统工程的基本知识。因此在第一次理事会上便决定要编辑出版一套《过程系统工程理论与实践丛书》，并为此组成了编辑委员会，确定了丛书的选题及作者。在中国石化出版社的大力支持下，这套丛书得以顺利地出版。在此我仅代表中国系统工程学会过程工程专业委员会向各位编委、各位作者、以及中国石化出版社的有关人员表示深切的感谢。

这套丛书共分10册，基本上覆盖了过程系统工程的主要领域。出版这套丛书的目的是宣传并普及过程系统工程的基本知识，以引起读者进一步学习的兴趣。其读者对象是过程工业领域内大专以上文化程度的中青年工程技术人员。我们希望这套丛书能达到以下三点基本要求：

1. **系统性：**框架完整，逻辑清晰，每部书相对独立，深度相近，彼此之间有联系而不重复。
2. **科普性：**深入浅出，定性叙述与定量分析相结合，尽量避免复杂的数学推导。
3. **实用性：**理论与实践相结合，有一定数量的实例及应用软件介绍。

由于这套丛书是我们在过程系统工程领域内编写高级科普读物的第一次尝试，是否真正达到了上述要求，还有待读者的检验。我们热诚地希望读者能将对本书的宝贵意见通过中国石化出版社告诉我们，以便再版时加以改进。

中国系统工程学会过程系统工程
专业委员会主任委员

成思危

目 录

第一章 绪论	1
第一节 过程系统节能的意义.....	1
一、能量系统的范畴.....	3
二、能量系统节能潜力分析.....	5
三、过程系统节能实践.....	11
第二节 过程系统节能方法.....	15
一、热力学方法.....	16
二、数学规划法.....	17
三、基于知识的人工智能专家系统.....	19
第三节 过程系统节能研究的发展及本书内容 安排.....	20
参考文献.....	22
第二章 过程系统节能的热力学基础	24
第一节 能量平衡及能分析.....	24
一、热力学第一定律.....	24
二、能量平衡及能分析.....	26
第二节 焓、焓平衡及焓分析.....	31
一、焓的计算.....	32
二、焓损失及焓平衡方程式.....	35
三、焓效率.....	38
四、过程系统焓分析.....	40
参考文献.....	49

第三章 过程系统节能优化的数学基础	50
第一节 线性规划	51
第二节 非线性规划	54
一、单变量搜索	55
二、无约束非线性规划	57
三、有约束非线性规划	58
第三节 混合整数规划	61
参考文献	62
第四章 换热网络优化综合	63
第一节 引言	63
第二节 换热网络的表达方式	68
第三节 夹点理论及换热网络设计目标	72
一、夹点的形成及能量目标的确定	74
二、换热单元数目目标	82
三、换热网络面积目标	84
四、最优夹点温差的确定	86
第四节 夹点设计方法	93
第五节 调优合并换热器	100
一、识别热负荷回路	101
二、维持最小传热温差的合并	103
第六节 多级公用工程	108
一、总组合线图	110
二、多级公用工程的配置	112
三、多级公用工程夹点设计	116
第七节 阈值问题	120
第八节 换热网络优化综合实例	125
一、乙烯装置换热网络改造	125

二、常减压装置原油预热换热网络优化综合	130
参考文献	144
第五章 换热网络模拟及数学规划优化	145
第一节 换热网络模拟	145
一、单元模块数学模型	147
二、换热网络系统的模拟	149
三、换热网络模拟软件	150
第二节 换热网络优化综合的数学规划法	152
一、确定最小公用工程费用的转运模型	152
二、最小换热单元数目的MILP模型	155
三、非线性规划 (NLP) 超结构模型	158
参考文献	165
第六章 热能动力系统的优化综合	166
第一节 引言	166
第二节 热机与热泵	168
一、热机与热泵的基本原理	168
二、实际热机循环	169
三、实际热泵循环	170
第三节 热机、热泵设置的基本原则	172
第四节 热机、热泵设置的极限情况	175
第五节 实际热机循环与过程的匹配	179
一、朗肯循环与过程的匹配	179
二、燃气透平循环与过程的匹配	181
三、热泵与过程的匹配	182
四、与过程匹配的热机的选择	183
第六节 热能动力系统综合举例	184
第七节 热能动力系统优化的数学规划法	188

一、热能动力系统数学模型的建立	189
二、热能动力系统MILP求解实例	192
第八节 全厂总能系统的优化	196
参考文献	202
第七章 过程系统节能技术的进展	204
第一节 换热网络改造综合	204
一、研究改造综合的意义	204
二、换热网络改造目标的确定	205
三、换热网络改造步骤	208
四、以剩余面积不变确定改造目标	212
五、分流约束和压降约束下的改造目标	215
第二节 换热网络综合研究的其它进展	221
一、换热网络柔性研究	221
二、双最小温差法综合换热网络	223
三、同步综合优化法	224
第三节 能量系统优化软件	225
一、HEXTRAN	225
二、ADVENT	226
三、SUPERTARGET	227
四、ESOP	228
参考文献	230
附录	233
最优夹点温差的解析解	233

第一章 绪 论

第一节 过程系统节能的意义

国民经济的发展和人民生活水平的提高始终与能源消费的增长紧密相关。统计资料表明,我国能源消费总量从1980年602.75Mt标准煤逐年增长,至1991年已达1023.0Mt标准煤,见表1-1^[1]。

表 1-1 中国能源消费总量

年 份	1980	1981	1982	1983	1984	1985
能源消费/(Mt 标煤/a)	602.75	594.47	626.46	660.40	709.04	766.82

年 份	1986	1987	1988	1989	1990	1991
能源消费/(Mt 标煤/a)	808.50	866.32	929.97	969.34	987.03	1023.00

从表1-1中可以看出随着国民经济的发展,能源的消费量也在不断增长。

为了满足国民经济发展对能源需求的不断增长,一方面要大力发展能源生产,但因为受到能源储量、资金和技术水平的制约,难以保持高速度的增长。另一方面则是提高能源的有效利用率,即所谓节能。开发能源和节约能源始终应是同样重要的两条途径。

节能，按照世界能源大会节能委员会的报告，是指：采用技术上可行的，经济上合理的，以及环境和社会可接受的措施，来更有效地利用能源。简言之，就是提高能源的有效利用率，以较少的能源达到同样的生产目标和生活水准。

在各个国家的能源消费总量中，过程工业所消耗的能源一般都占相当高的比例。过程工业是指以处理物料流和能量流为目的的行业，如化工、冶金、炼油、造纸、水泥等行业。过程工业中的生产系统称之为过程系统。我国各类过程工业1990年能源消耗量及占全国能源消费总量的比例见表1-2。由表可知，在1990年全国总能源消耗中，过程工业的能

表 1-2 中国过程工业能源消耗量

行 业	化工	冶金	炼油	造 纸	水泥建材	总 计
能源消耗量/(Mt 标煤/a)	109.86	124.48	17.06	16.94	97.22	365.54
占全国总消费比例/%	11.1	12.6	1.7	1.7	9.8	36.9

源消耗占36%。由此可见，过程工业的节能工作具有十分重要的意义。另一方面，我国过程工业主要产品的能源消耗与国外先进水平差距较大，说明我国过程工业节能有着巨大的潜力。表1-3列出了1990年国内外几种主要过程工业产品单位能耗的比较^[2]。由表可知，由于有些工厂规模小，技术落后，管理不善等等原因，我国主要过程工业产品单耗比国外平均高50%左右。说明，即使用国外目前先进水平衡量，我国过程工业的节能潜力也是很可观的，更何况随着技术进步，国外上述产品单耗还在不断下降。

过程工业的节能工作包括多层次、多方面的内容。粗分起来，可有以下几方面。

表 1-3 国内外过程工业产品单耗比较(1990年)

	国内平均	国际先进	国内比国际高%
吨钢可比能耗/(kg 标煤/t)	1034	629	64.4
合成氨能耗(大型天然气)/(kg 标煤/t)	1290	930	38.7
乙烯能耗/(kg 标煤/t)	1392	671	107.4
原油加工综合能耗/(kg 标煤/t 原油)	148.94	71.68	107.7
水泥综合能耗/(kg 标煤/t 熟料)	201.0	113.2	77.6
火电供电煤耗/(kg 标煤/t)	0.427	0.325	31.4

1. **加强管理** 包括建立能源管理制度, 搞好各种用能设备的计量、管理, 减少跑、冒、滴、漏, 加强保温, 减少设备散热损失等等。

2. **改进设备, 提高单台设备的能量利用率** 例如改进锅炉(或加热炉)设备, 提高锅炉效率, 采用强化换热设备等等。

3. **采用新工艺** 包括采用新流程, 新催化剂等。例如钢铁工业中的连铸连轧工艺, 石油炼制中的干式减压蒸馏、水泥生产中的干法窑等都会使产品单耗有明显的降低。

4. **能量系统节能** 是指对生产过程中与能量的转换、回收、利用等有关的系统, 从系统合理用能的角度所进行的节能工作。

本书所涉及的领域即是过程工业中能量系统的节能技术, 称之为过程系统节能技术。

一、能量系统的范畴

在过程工业的生产系统中, 由原料到产品的连续流动生

产过程，始终伴随着能量的供应、转换、利用、回收、排弃等环节。例如，物流需加热，就必须消耗燃料或蒸汽；产品需冷却或冷凝，就必须消耗冷却水或进行空气冷却；泵和压缩机的运行需消耗电力或由蒸汽透平直接驱动；冷、热物流之间进行换热就构成了热回收换热系统，等等。从系统工程的角度来看，可以把过程工业的生产系统分成如下三个子系统：工艺过程子系统，热回收换热网络子系统，和蒸汽动力公用工程子系统，见图1-1。其中热回收换热网络子系统和蒸汽动力公用工程子系统构成了过程工业生产系统中的能量系统。

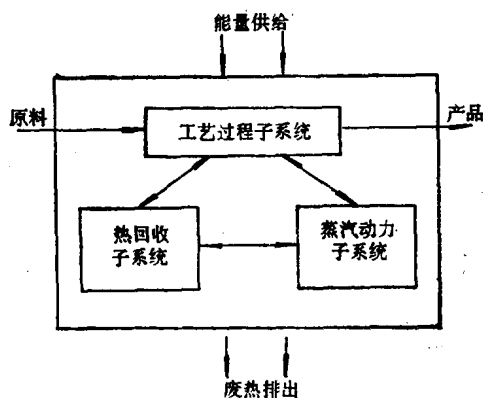


图 1-1 过程系统框图

工艺过程子系统是指由反应器、分离器等单元设备组成的由原料到产品的生产流程，它是过程工业生产系统中的主体。热回收换热网络子系统是指在各生产过程中由换热器、加热器、冷却器组成的，目的是在于回收热物流的热量，并把冷物流加热到所需温度，把热物流降低至要求温度的换热系统。回收的热量愈多，则生产过程所消耗的加热公用工程量和冷

却公用工程量愈少,能耗也就愈低。蒸汽动力公用工程子系统是为生产过程提供各种级别的蒸汽和动力的子系统。它包括锅炉、蒸汽透平、废热锅炉、除氧器、给水泵、蒸汽管网等设备。蒸汽动力系统的优化设计和优化操作对降低整个生产过程的能耗起着十分重要的作用。

从能量利用角度看,这三个子系统相互影响又密切相关。例如工艺条件的改变将首先影响对换热网络和蒸汽动力系统的要求;换热网络回收率的提高也将影响着对燃料和蒸汽加热的需求;蒸汽压力级别的确定影响着回收工艺热量发生蒸汽的多少。因此,严格地讲,若想获得能量的最优利用,应当进行系统整体优化,即三个子系统的联合优化,而这无疑是十分困难的。一个有效的解决方法是系统分解法,即对各子系统分别加以优化,再在大系统范围内加以协调。本书在介绍能量系统的优化和节能技术时,先以其工艺过程子系统的流程结构和参数固定为前提,分别对换热网络和蒸汽动力系统加以优化,然后再在更大范围内对由换热网络和蒸汽动力子系统构成的总能系统进行优化。

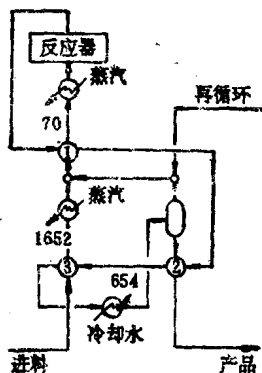
二、能量系统节能潜力分析

满足工艺生产过程对各种形式能量需求的能量系统(包括换热网络和蒸汽动力系统)的设计方案是多种多样的。不同的设计方案其流程结构和操作参数会有很大的区别。尽管这些方案均能满足工艺生产对能量的需求,但各方案之间在设备投资和能量消耗方面都有很大的差异。这里就存在一个问题:什么样的能量系统设计方案是经济上合理的、技术上可行的、投资和能耗费用最小的方案?通过什么方法可以获得这样的设计方案。

下面举例来分析不同能量系统的能量利用效率，意在说明，利用过程系统节能技术所设计的能量系统与一般的传统设计方案相比，在降低生产能耗、提高能量有效利用率方面，都可取得重大的经济效益。

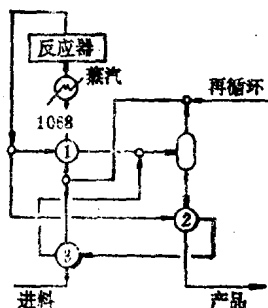
例1-1：某一简单生产过程及其热回收换热系统的流程图（见图1-2）。原料物流由5℃加热至200℃进入反应器进行反应，反应后产物由200℃冷却至35℃进入分离器，分离塔底产品由200℃冷却至125℃出装置，而塔顶轻组分则返回，与反应进料混合。

按传统的设计方法如图1-2(a)，为了回收反应产物和塔底产品的热量，使其与进料冷物流进行换热，按温位的高低设置了三台换热器，换热过程最小传热温差 ΔT_{min} 按10℃计。进料预热的不足部分由蒸汽来补充，而反应产物冷却不足部分则由冷却水进一步冷却。按照这样的流程经过定量计算可



加热公用工程=1722
冷却公用工程=654
换热单元=6

(a) 传统设计方案



加热公用工程=1068
冷却公用工程=0
换热单元=4

(b) 夹点技术设计方案

图 1-2 不同换热网络方案节能分析比较

知，其换热网络所需加热公用工程量为1722kW，冷却公用工程为654kW。此换热网络方案初看起来是合理的，但还有无改进的余地？或者说在维持最小传热温差 $\Delta T_{\min}$ 不变的情况下，能否有其它设计方案可进一步回收热量，进而减少加热和冷却公用工程的用量。实际证明，若按英国学者B. Linnhoff所提出夹点技术^[8] (Pinch Point Technology) 来设计换热网络，则能得到更优的方案，见图1-2(b)。此换热网络设计方案可使加热公用工程减至1068kW，减少了40%；冷却公用工程减为零，而且总换热单元数目由传统方案的6台降至4台，大大降低了生产过程的能量消耗，而且也降低了换热网络的设备投资。此例说明，按过程系统节能的夹点技术来指导换热网络的设计，比传统设计方法设计的换热网络具有更大的节能效果。

例1-2：设某生产过程需要蒸汽加热量 Q_{in} 和电力 W ，一种方案是热、电分供，如图1-3(a)所示。热机吸收热是 Q ，作功 W 后排向冷源热量为 $Q-W$ ，而过程中所需加热热量 Q_{in} 由外界直接供给，过程排向外界废热为 Q_{out} 。此方案共需外界提供热量为 $Q+Q_{in}$ ，废热总计为 $Q-W+Q_{out}$ 。而采用热电联产方案，如图1-3(b)，即将热机排放热 $Q-W$ 直接用于过程加热。热电联产需外界提供的热量为 $Q_{in}+W$ ，而对外排放废热只有 Q_{out} ，从而大大节约了能量，提高了能量的利用率。此例是极为简单的蒸汽动力系统，可根据热力学的基本原理一目了然地分出优劣。而对于较为复杂的蒸汽动力系统，例如有不同压力级别的蒸汽管网，有不同类型的透平，就不能简单地确定出能耗最低的系统流程，而需通过一定的优化方法才能在众多可行方案中选择出最优的方案。

由上述例子的分析可以看出，能量消耗的增加，将引起