

刘兴高 著

精馏过程的建模、 优化与控制



科学出版社
www.sciencep.com

精馏过程的建模、 优化与控制

刘兴高 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

节能与环保是当今世界科技发展的两大主题,精馏过程是石油、化工、冶金等行业使用最为广泛的一个操作单元,占其总能耗的三分之一,其节能优化控制潜力很大。本书系统阐述了精馏过程的建模、优化和控制三个层面上的理论、方法、研究成果和前沿动态,分为常规精馏过程的建模、优化与控制 and 先进精馏节能技术的建模、优化与控制两个篇章。内容包括:精馏过程节能与控制优化,乙烯生产分离过程的建模与仿真,空分过程的建模与优化,间歇精馏过程的控制策略,以及内部热耦合精馏节能技术的建模、优化与控制。

本书对于石油、化工、冶金、能源、机械等工业领域内从事精馏、分离和空分等工作,以及从事建模与优化控制工作的广大科技工作者是一本很有实用价值的参考书。可作为自动化、化工、系统工程、计算机、工业工程、低温工程等有关专业的高年级本科生或研究生的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

精馏过程的建模、优化与控制/刘兴高著. —北京:科学出版社,2007
ISBN 978-7-03-018323-1

I. 精… II. 刘… III. ①精馏-化工过程-建立模型 ②精馏-化工过程-最佳控制 IV. TQ028.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 033130 号

责任编辑:张 敏 / 责任校对:郑金红
责任印制:刘士平 / 封面设计:耕者工作室

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 3 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2007 年 3 月第一次印刷 印张:19 3/4

印数:1—2 500 字数:373 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

节能与环保是当今世界科技发展的两大主题。世界各国的经验表明,过程建模、先进控制、优化技术是提高企业的经济效益、降低能耗、确保安全稳定主要手段,它使人们从生产现场用主观经验操作和设计装置,转为用计算机对生产工况和过程设计进行分析优化研究,从而实现“桌面节能生产”过程和连续过程的概念设计和虚拟智能制造。

精馏过程作为石油、化工、冶金等行业使用最为广泛的一个操作单元,占其总能耗的三分之一,其节能控制潜力很大。本书从工业实际应用和概念设计的角度,系统阐述了精馏过程在建模、优化和控制三个层面上的理论方法、研究成果和前沿动态。分为常规精馏过程的建模、优化与控制 and 内部热耦合精馏节能技术的建模、优化与控制两个篇章,分别对常规精馏过程和先进的精馏节能过程进行了阐述。

全书分为 8 章。第 1 章从精馏过程的节能分析、节能方法、过程控制、过程优化和集成设计等方面,阐述了精馏过程节能与控制优化;第 2 章首先阐述了精馏过程建模和流程模拟,然后从平衡级和非平衡级的角度,阐述了乙烯实际工业生产分离过程的建模与仿真;第 3 章阐述了基于商业化软件平台和自主编程两种研究方法的低温空分过程的建模与优化;第 4 章对间歇精馏过程的控制策略进行了综述性研究,同时指出了相应的研究方案与策略。第 1~4 章构成上篇,阐述了常规精馏过程的建模、优化与控制。第 5 章阐述了内部热耦合精馏塔的模式化和稳态特性;第 6 章阐述了内部热耦合精馏塔的不同纯度下的动态特性;第 7 章阐述了内部热耦合精馏塔在不同纯度下的先控策略,包括预测、鲁棒、IMC、GMC、DMC 等;第 8 章阐述了基于节能潜力和操作费用节省等不同优化目标下,内部热耦合精馏塔的优化建模和集成优化研究。第 5~8 章构成下篇,阐述了迄今为止所提出的四大精馏节能技术中最具节能潜力,也是唯一没有工业化的内部热耦合精馏节能技术的建模、优化与控制前沿研究。

全书由清华大学徐用懋教授审阅,在此表示由衷的敬意和诚挚的感谢。作者的部分研究生及进行毕业设计的学生参与了一些计算机仿真等工作,在此一并致谢。

本书是作者近十年来从事精馏节能控制等方面研究工作的一个结晶。由于作者水平有限,难免存在不当之处,敬请读者批评指正。

刘兴高

2006 年 8 月

目 录

前言

上篇 常规精馏过程的建模、优化与控制

第1章 精馏过程节能与控制优化	3
1.1 引言	3
1.2 精馏过程的节能分析	5
1.2.1 热力学评价	5
1.2.2 推动力分析	7
1.2.3 操作线分析	8
1.2.4 热源和冷源	10
1.3 精馏过程的节能方法	10
1.3.1 单塔热回收	10
1.3.2 双效精馏	12
1.3.3 热泵精馏	13
1.3.4 全面热集成过程	15
1.4 精馏过程控制	17
1.4.1 控制科学与过程控制	17
1.4.2 精馏过程控制	18
1.4.3 常规控制系统	19
1.4.4 先进控制策略	19
1.5 精馏过程优化	24
1.5.1 过程优化	24
1.5.2 精馏过程优化模型	26
1.5.3 精馏过程优化方法	27
1.6 过程概念设计与集成设计	30
1.6.1 过程概念设计	30
1.6.2 过程集成设计	34
第2章 乙烯生产分离过程的建模与仿真	37
2.1 引言	37

2.2 精馏过程建模	40
2.2.1 概述	40
2.2.2 精馏塔通用动态模型	42
2.2.3 非平衡级精馏模型	47
2.3 精馏过程流程模拟	51
2.3.1 概述	51
2.3.2 过程仿真方法	52
2.3.3 商业化软件介绍	54
2.4 基于 PRO/II 模拟软件的流程模拟与分析	60
2.4.1 丙烯塔仿真结果与分析	60
2.4.2 脱丙烷塔仿真结果与分析	63
2.5 基于非平衡级精馏技术的流程模拟与分析	68
2.5.1 乙烯精馏塔仿真结果与分析	68
2.5.2 脱乙烷塔仿真结果与分析	71
第3章 空分过程的建模与优化	75
3.1 引言	75
3.2 低温空分技术进展	76
3.3 低温空分原理及热力学分析	82
3.3.1 低温空气分离原理	82
3.3.2 空分装置焓分析	83
3.4 基于 Aspen 软件平台的空分流程模拟与分析	88
3.4.1 引言	88
3.4.2 机理建模与参数修正	90
3.4.3 仿真结果	96
3.4.4 灵敏度分析与操作调优	96
3.5 低温空分过程自主建模	103
3.5.1 引言	103
3.5.2 物性计算与流程计算	104
3.5.3 数学模型的建立	110
3.5.4 自由度分析	113
3.5.5 操作参数的设定	114
3.5.6 求解方法和框架设计	114
3.5.7 仿真结果与分析	115
3.6 低温空分过程优化	117

3.6.1 优化模型数学描述	118
3.6.2 优化算法	121
3.6.3 优化结果与分析	123
第4章 间歇精馏过程的控制策略	125
4.1 引言	125
4.2 化工过程精细化与精馏	126
4.2.1 概述	126
4.2.2 精细化化工精馏过程模型化与控制优化	130
4.3 间歇精馏过程控制	133
4.3.1 PID控制	133
4.3.2 自适应控制	134
4.3.3 预测控制	135
4.3.4 模糊控制	136
4.3.5 推理控制	137
4.3.6 最优控制	137
4.4 高纯精馏过程控制	140
4.5 间歇精馏过程控制研究方案与策略	141
 下篇 内部热耦合精馏节能技术的建模、优化与控制	
第5章 内部热耦合精馏塔的模型化与稳态特性	147
5.1 内部热耦合精馏塔	147
5.1.1 结构原理和节能分析	147
5.1.2 研究现状	149
5.1.3 一种 SRV 填料塔静态设计	151
5.1.4 问题的起源	156
5.2 过程数学模型的建立	157
5.2.1 模型假设	157
5.2.2 模型推导	157
5.2.3 模型说明	161
5.3 简约方程联立法	162
5.4 稳态模型的仿真算法	164
5.4.1 牛顿-拉夫森法	164
5.4.2 稳态模型的仿真步骤	166
5.5 仿真概述与模型检验	167

5.5.1	仿真概述	167
5.5.2	模型检验	168
5.6	过程分析	169
5.6.1	基于过程操作费用的分析	169
5.6.2	基于过程能耗和热力学效率的分析	172
5.7	操作参数对组成的影响规律	174
5.7.1	苯-甲苯物系操作参数对组成的影响规律	174
5.7.2	乙醇-水物系操作参数对组成的影响规律	177
5.8	稳态特性与分析	179
5.8.1	操作参数评价	179
5.8.2	塔内部耦合分布规律	182
第6章	内部热耦合精馏塔的动态特性	185
6.1	引言	185
6.2	动态模型的仿真技术	186
6.2.1	残差方程形式的表述技巧	186
6.2.2	Gear 算法	187
6.2.3	动态模型的仿真步骤	190
6.3	仿真概述与模型检验	191
6.3.1	仿真概述	191
6.3.2	模型检验	191
6.4	自由度分析	194
6.5	全塔动态响应	195
6.5.1	苯-甲苯物系	195
6.5.2	乙醇-水物系	196
6.6	高纯下的动态特征与分析	198
6.6.1	系统描述	198
6.6.2	非线性和不对称特性	198
6.6.3	反向响应	200
6.6.4	外部扰动的强烈影响	202
6.6.5	模型失配	204
6.6.6	交互作用和过程定向增益	204
第7章	内部热耦合精馏塔的先控策略	206
7.1	PID 控制	206
7.1.1	单端组分 PID 控制(S-PID)	207

7.1.2 双端组分 PID 控制(M-PID)	208
7.1.3 单端、双端组分 PID 控制比较	209
7.2 P-PID 控制	210
7.2.1 设计概述	210
7.2.2 模型辨识	211
7.2.3 苯-甲苯物系 P-PID、M-PID 比较研究	212
7.3 IMC 控制	213
7.3.1 IMC 控制原理	213
7.3.2 内部热耦合精馏塔的内部模型	214
7.3.3 IMC 参数辨识与设计	215
7.3.4 仿真与分析	216
7.3.5 IMC、P-PID 进一步比较研究	219
7.4 非理想物系的鲁棒 PID 控制	221
7.4.1 基于闭环增益成形控制算法的 PID 控制原理介绍	222
7.4.2 最小二乘一次完成辨识方法	223
7.4.3 仿真与分析	224
7.4.4 鲁棒 PID 与预测 PID 的进一步比较	227
7.5 高纯内部热耦合精馏塔先控策略	229
7.5.1 高纯与非高纯操作下的响应特性比较	229
7.5.2 解耦 PID 控制	230
7.5.3 非线性一般模型控制	234
7.5.4 动态矩阵控制	240
7.5.5 内模控制和其改进	251
7.5.6 多回路 PID 控制及其改进	254
7.6 超高纯内部热耦合技术的动态特性分析和控制设计	257
第 8 章 内部热耦合精馏塔的集成优化	259
8.1 引言	259
8.2 优化策略和集成优化思想	261
8.2.1 优化策略	261
8.2.2 集成优化思想	262
8.3 集成优化数学模型的建立	262
8.3.1 模型假设	262
8.3.2 模型推导	263
8.3.3 模型说明	267

8.4 集成优化模型的求解策略	267
8.4.1 变分法与贝尔曼最佳原理	267
8.4.2 集成策略	268
8.4.3 算法选择与初值生成策略	272
8.5 节能潜力的优化研究	273
8.5.1 苯-甲苯物系	273
8.5.2 乙醇-水物系	277
8.6 操作费用节省的优化研究	278
8.6.1 苯-甲苯物系	278
8.6.2 乙醇-水物系	280
8.7 可控性检验	283
参考文献	285

上 篇

常规精馏过程的建模、 优化与控制

第 1 章 精馏过程节能与控制优化

1.1 引言

自 20 世纪 70 年代经历两次“石油危机”,能源成为全球关注的问题以来,节能作为解决能源危机问题的根本途径之一,逐渐受到各国的高度重视。

世界各国的经验表明,过程建模、先进控制与优化技术是提高企业的经济效益、降低生产成本的主要手段之一。原 SetPoint 公司总裁 D. C. White 指出,过程模型化、控制和优化具有投资低和收益高的特点。Chemshare 公司研究结果表明,实现过程优化是获得企业经济效益的关键,闭环在线优化所带来的经济效益相当于 DCS 和各种先进控制手段所带来的经济效益的总和,而其投资只有后者的三分之一。

精馏过程是石油炼制、石油化工和其他化工过程中应用最为广泛的传质单元操作过程,也是石油化工领域中能耗最大的单元操作之一,其能耗约占化工厂总能耗的三分之一,有时甚至还更多(Linhoff, 1983a)。美国的统计数据表明,在石油、化工领域的总能耗之中,大约有 40%~50% 的能量消耗在精馏过程。美国 1977 年化工炼油系统的精馏装置耗能相当于 5000 万 t 石油,如果实现节能 10%,那么每年便可以节省 500 万 t 石油。据 Mix 等人的研究(Mix, 1978),美国 1976 年精馏耗能约占全国总能耗的 3%,如果精馏过程节能 10%,相当于每天节省 100 000 桶石油,约 15.9×10^6 L,若以当时的每桶石油 40 美元来计算,相当于美国 1976 年的精馏过程的操作费用每天可以节省 400 万美元,全年仅精馏过程便可以节省约 15 亿美元。显然,精馏过程效率的提高将会对化工过程产生极大的影响,具有重要的意义。

随着全球范围的能源危机和日益高涨的环保需求,如何提高精馏过程的生产效率、降低过程的能耗已经引起各国关注。化工生产过程的控制已经有了系统的研究(周春晖, 1980; 蒋慰孙, 1988; 金以慧, 1993; 黄步余, 1994; 俞金寿, 1995); 而精馏过程作为化工生产过程中的高能耗装置自然成为人们最为关注的对象,精馏过程模型化、优化和控制作为达到上述目的最有效的手段,同样也受到了高度的重视。

通过机理建立精馏塔的稳态模型、动态模型,进行精馏塔的仿真研究、操作研究、控制研究和操作参数的优化研究,一方面,有利于已有精馏工艺流程的合理改

造和挖潜增效;另一方面,对于缩短先进的往往也是更为复杂的精馏节能过程的开发周期,大幅度地提高从实验室小试到工业规模的放大倍数,具有理论上的研究意义和实际应用上的指导意义。

从 20 世纪 70 年代以来,研究者已经从热力学、操作原理等角度提出了大量的精馏过程的节能方法(Tedder,1978;Umeda,1979;Fitzmorris,1980;陈丙珍,1986;余国琮,1996),例如多效精馏(Brousse,1985;Pemberton,1978)、热泵(heat pump, HP)(Canales,1992;Salim,1991)、热交换网络(heat exchange net, HEN)(Rathore,1974;Yee,1990;Linhoff,1978,1979;Morari,1980;Smith,1988)、夹点技术(pinch technology)(Linhoff,1983a,1983b;Krajnc,1995;Homsak,1996;Rev,1991)、Petlyuk(Fidkowski,1987,1990;李凤华,1995)、二次回流和蒸发(secondary reflux and vaporization, SRV)(Mah,1977;Batista,1979)等方法。这些方法的主要途径是利用精馏过程的大量吸热、放热环节,通过过程集成的方法将热源与冷源进行匹配,以达到能量再利用,提高精馏过程的热力学效率,从而达到节省能量的目的。

内部热耦合精馏塔(internal thermally coupled distillation columns,ITCDIC)是这些方法中最吸引人的一种,是目前精馏塔节能研究的一个前沿。ITCDIC 减少了常规精馏塔(conventional distillation columns,CDIC)的冷凝器和再沸器的热负荷,让热量从精馏段传向提馏段,因此精馏段需要工作在比提馏段高的压力和温度下。为了调节工作压力,一个压缩机和一个节流阀被安排在两部分之间。由于精馏段与提馏段的压力差和热耦合结构,一定数量的热量从精馏段传递给提馏段,从而给精馏段产生向下回流液,为提馏段产生向上蒸汽流。精馏段的流速向上递减而提馏段的流速向下递减。精馏段顶部和提馏段底部的气相流速非常小。通过热量的内部耦合,可以去掉常规的再沸器和冷凝器。大量的能量被再利用,从而大幅度地降低了能耗。日本的研究结果和我们的研究结果(Takamastu,1988;Liu,2000a,2001;刘兴高,2000a,2000b)都表明,内部热耦合精馏塔与常规精馏塔最小回流比下的能耗和操作费用相比还可以节省 30%以上,具有巨大的经济和社会价值。然而,由于内部热耦合精馏塔热耦合过程结构中高度耦合的存在和传热传质机理上的全新改变,给这一高效的精馏节能技术的操作、控制和设计都带来了困难,使平稳操作和控制设计成了阻碍这一高效精馏节能技术实际应用的主要障碍。

研究表明,精馏过程先进的节能方法在实际应用中往往存在三个主要问题(Glinos and Malone,1988)。首先,对设计和操作缺乏经验和认识,比如合适的独立操作变量数如何确定以及确定依据。其次,如何有效地进行控制。这些先进的节能方法理论上虽然可以提高精馏过程的热力学效率,但往往也使精馏过程的非线性和操作变量间的耦合关系更加复杂,实际操作中能否控制以及如何控制,控制变量和被控变量如何选择,虽然 CDIC 的控制经验或许可以借鉴到这些节能

方法上,但是仍未有细致的研究。最后,如何进行操作优化以及操作优化的结果是否切实可行,在最优操作条件下过程是否可控。

精馏过程模型化和优化控制技术的进步,已成为精馏行业消除“瓶颈”制约,努力增效创收的主要环节之一。世界各国的经验表明,以过程模型化和动态仿真技术为核心的控制优化和概念设计技术,是现有精馏过程降低能耗、提高经济效益、确保安全高效,以及全新的高效节能精馏过程开发的主要手段,它使人们从生产现场凭主观经验来设计装置和操作装置,转为坐到计算机前面用先进的科学方法对装置节能设计和节能工况进行分析综合和设计优化,从而实现“桌面节能生产”过程和“桌面节能设计”过程。该技术的推广和普及,将加速我国工业生产过程节能技术的进步,带动一大批的相关技术和产业的发展。

1.2 精馏过程的节能分析

1.2.1 热力学评价

精馏过程是一个不可逆过程,根据热力学第二定律,要实现这一过程,必须向系统做一定的功或提供一定的能量。在精馏过程中,所做的功或传递的能量大多以热能的形式来体现。

在衡量能量被利用的程度时,存在着两类效率,即根据热力学第一定律的热效率和根据热力学第二定律的热力学效率。前者只是反映过程中能量在数量上被利用的程度,不能反映出能量在转换过程中品位上的变化;后者则是能量在数量上和品位上被利用的综合反映,反映了过程的有效能被利用的程度。下面以精馏过程的热力学效率来考察过程的能量利用情况。

精馏过程的热力学效率(E)是过程的最小分离功($W_{\min}$)与有效能消耗(Q_{dic})的比,即

$$E = W_{\min} / Q_{\text{dic}} \quad (1.1)$$

对于可逆过程来说,过程的最小分离功与有效能消耗相等,热力学效率为 100%;对于实际的精馏过程来说,由于过程操作的不可逆,使得过程的有效能消耗远远大于最小分离功,一般实际精馏过程的热力学效率仅在 5%~10% 左右。

对于一个确定的精馏过程来说,过程的最小分离功($W_{\min}$)是一定的,因此提高过程热力学效率的关键在于降低有效能消耗(Q_{dic})。

可以对常规的精馏过程(如图 1.1 所示)进行如下

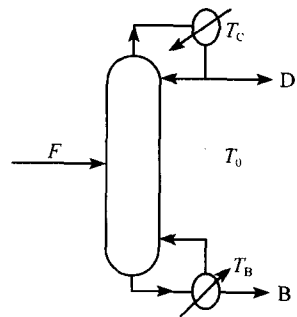


图 1.1 常规精馏塔示意图

的热力学简化分析。假设这是一个双组分精馏,塔顶产品 D 与塔底产品 B 的数量相等而且汽化潜热也相近,则再沸器的热负荷(Q_R)与冷凝器的热负荷(Q_C)相近,即

$$Q_R \approx Q_C = Q \quad (1.2)$$

可以从下式算出精馏所需的再沸器加热量:

$$Q = \Delta H_v (R+1)D \quad (1.3)$$

式中, ΔH_v 为汽化潜热, R 为回流比, D 为塔顶产物产量。

从热力学第一定律来看,塔底再沸器加入热量,又被冷凝器冷却水取走,热能浪费是很大的。

根据热力学第二定律,过程的有效能消耗为

$$Q_{dic} = QT_0 \left(\frac{1}{T_C} - \frac{1}{T_R} \right) \quad (1.4)$$

式中, T_0 为环境温度, T_R 和 T_C 分别为再沸器和冷凝器的温度。

从精馏塔的内部过程来看,塔底再沸器的能耗 Q 与上升的蒸汽量 V 成正比,因为 $V = (R+1)D$,从而式(1.3)可表示为

$$Q = \Delta H_v V \quad (1.5)$$

在最小回流比(R_{min})操作下,上升的蒸汽量最小(V_{min}),此时达到分离要求所需的理论塔板数为无穷大。而实际操作中的回流比和上升蒸汽量一般为最小值的 1.4~4.0 倍。

当相对挥发度为常数时,在最小回流比(R_{min})操作下,上升的蒸汽量最小值(V_{min})为

$$V_{min} = F\alpha/(\alpha-1) \quad (1.6)$$

由式(1.4)可见,当 T_R 和 T_C 较接近时,过程的有效能消耗 Q_{dic} 下降。因此减少精馏过程塔顶和塔底之间的温差,可以提高过程的热力学效率。可以通过精馏塔的压降,或是采用中间再沸器和中间冷凝器来实现。

由式(1.6)可见,相对挥发度 α 越大则 V_{min} 越小。可以通过减少 V_{min} 来降低过程的有效能消耗 Q 。由于相对挥发度与压力成反比,因此可以降低精馏过程的操作压力。如果塔顶压力不变,则塔的压降越小,过程的平均相对挥发度越大, V_{min} 越小,过程相对所需的加热量就会减少。

精馏过程的上升蒸汽量减少,则过程所需的加热负荷降低。因为 $V = (R+1)D$,所以使回流比降低,可以减少精馏过程的上升蒸汽量,从而使过程所需的加热负荷降低。为了达到同样的分离效果必须提高理论塔板数,可以采用高效塔板或是高效填料使每米的理论板当量数增大;此外,还可以通过改进自动控制,使回流比准确地控制在设定值上,以减小回流比裕度,达到降低回流比的目的。

从提高热力学效率的角度考虑,精馏过程的节能技术主要可通过以下几种方

式来实现:

- (1) 改进操作线和气液平衡状态,使之更接近于气液平衡过程;
- (2) 有效地进行热能回收利用;
- (3) 与其他系统相互配合提高热能利用率。

1.2.2 推动力分析

从能量的本质看,精馏过程将物理有效能转化为扩散有效能,同时伴随物理有效能的降阶损失。

精馏过程的有效能损失是由下列不可逆性引起的:

- (1) 流体流动的压力降;
- (2) 不同温度物流间的传热,或不同温度物流的混合;
- (3) 相浓度不平衡物流间的传质,或不同浓度物流的混合。

压差、温差和浓度差均是相应过程的推动力,推动力越大,则不可逆性越大,有效能损失也越大。因此,减少有效能损失的关键在于减小推动力,精馏过程的节能要求千方百计地减少推动力;但推动力又是实现精馏过程所不可缺少的,保持必要的推动力,精馏过程才能得以进行。

在精馏塔中上升蒸汽通过塔板产生压力降,塔板数较多时,压力降增大,对于板式塔而言,降低气速或是每块塔板上的液位高度可以降低压降。然而,减少气速,则同等生产能力下需增大塔径,就要增加设备投资。降低每块塔板上的液位高度,则可能使塔板效率降低。所以,必须根据各种影响因素来选择合适的塔径和液位高度。此外,将板式塔改为高效填料塔也是提高生产能力、降低压力降的一个途径。例如,30万t乙烯装置的脱甲烷塔由浮阀塔改为Intalox填料塔,压降由 $0.42 \times 10^5 \text{ Pa}$ 降低至 $0.12 \times 10^5 \text{ Pa}$,负荷提高10%后塔的压降也仅为 $0.123 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

在常规的精馏过程中,再沸器和冷凝器分别以一定的温度加入和移去热量。若使传热温差减少,则传热面积需要增大,从而使投资费用增大。因此,要选用高效换热器或是改进操作方式。例如,采用降模式再沸器、热虹吸式再沸器或是强制循环式再沸器等。

由式(1.4)可见,如果冷凝器冷却水的温度过低,净功消耗必定增加。因此,从冷凝器中将释放的能量进行回收利用,也是精馏过程降低净功消耗的一种有效的方法。

由于实际情况的复杂性,必须考虑各推动力之间的相互作用和影响。比如,用增加塔板数的方法来减小回流比,但要注意由于压力降的增大而可能导致有效能损失的增加,以及可能使塔底和塔顶的温差变大而导致传热有效能损失增加。又如,从原理上看,通过增大塔径和降低塔板上的液位,可使压降减小,但应注意可能导致的投资增大和板效率下降。因此,实际上需要综合协调这些相互作用的影响,