

化工自动化丛书

精馏塔的自动调节

龚剑平 编

化学工业出版社

化工自动化丛书

精馏塔的自动调节

龚剑平 编

化学工业出版社

内 容 提 要

《精馏塔的自动调节》一书是《化工自动化丛书》的一个分册，共分六章。第一章介绍精馏塔的调节要求、约束条件和影响因素，并对设置精馏塔控制方案的一些基本观点作一简要的概述；第二章从精馏塔的静态和动态特性及调节系统间的相互关联出发，讨论精馏塔的基本控制方式，并对产品质量指标及其检测点位置的合理选取等作了介绍；第三章进一步介绍了一些特殊调节系统在精馏塔中的应用；第四章是讨论与精馏过程密切相关的再沸器和冷凝器的自动调节，并结合冷凝器的调节介绍了精馏塔压力的调节方式；第五章对一些特殊精馏塔的自动调节进行了讨论；第六章介绍精馏塔的最优控制，并对精馏塔控制作了简要的回顾和展望。

本书可供从事化工、炼油及轻工等生产自动化的科技工作者阅读使用，也可供有关工艺人员及大专院校的师生参考。

化工自动化丛书 精馏塔的自动调节

袁剑平 编

责任编辑：李诵言

封面设计：任 辉

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ 印张 $8\frac{3}{4}$ 字数197千字印数1—5,800

1984年4月北京第1版1984年4月北京第1次印刷

统一书号15063·3563定价0.92元

编写说明

近年来，随着化学工业和自动化科学技术的迅速发展，化工自动化技术有了新的进展。以现代控制理论为基础的各种新型控制方法和调节系统相继成功地应用于化工生产；新型的自动控制技术工具以及电子计算机也日益广泛用于化工自动化领域。

为了总结交流我国化工生产应用自动化技术的经验，介绍新的调节理论和控制方法，提高从事化工自动化工作的工人和技术人员的理论和技术水平，促进化工自动化工作的发展，一九七五年，在炼油、化工自动控制设计业务建设会议上，决定由化工部炼油、化工自动控制设计技术中心站负责，组织有关院校、科研设计单位和工厂，编写一套《化工自动化丛书》。

《化工自动化丛书》是在普及的基础上侧重提高的一套读物，主要包括经典和现代控制理论，各类调节系统和化工单元操作控制等方面的题材。“丛书”内容力求密切反映化工应用的特点，做到理论联系实际，既阐明基本概念，作出理论分析，又叙述工程应用方法和应用实例，说明具体实施方案和现场运行经验。

《化工自动化丛书》编委会成员

- 主任委员 周春晖（浙江大学）
- 副主任委员 蒋慰孙（华东化工学院）
万学达（化工部化工设计公司）
王骥程（浙江大学）
沈承林（北京化工学院）
- 委员 韩建勋（天津大学）
庄兴稼（抚顺石油学院）
李乾光（化工部第一设计院）
林秋鸿（北京燕山石油化学总公司
设计院）
王 翼（南开大学）
徐炳华（化工部第三设计院）
钱积新（化工部自动控制设计技术
中心站）
俞金寿（华东化工学院）
孙优贤（浙江大学）
罗秀来（上海炼油厂）
蔡鸿雄（兰州化学工业公司石油化工厂）

前 言

作为典型的化工单元之一，精馏塔常常是化工厂的关键设备，它的操作直接影响整个工厂的产品质量、生产成本和利润。因此，精馏塔的自动调节长期以来为人们所重视。本书作为《化工自动化丛书》之一，对精馏塔的自动调节进行了专门的介绍。

对一个精馏塔进行自动调节，重要的是首先要了解它的调节要求、静态和动态特性、扰动的种类和性质、以及自动调节在哪些范围（即约束条件）内是行之有效的，而这些又与精馏操作的特点紧密相关。因此在本书第一章概论中，结合精馏过程的物理基础对上述内容进行了介绍，同时也综合了有关精馏塔控制的一些基本观点。

从本质上来说，精馏塔自动调节的目标是使利润最大或成本最小。但实际上在生产中通常更直接的是产品质量，因为任何不符合质量规格的调节均将增加成本和减少利润。另外，虽然许多新的控制方案得到了应用，但关键却仍是基本控制方案的合理选取。因此，在第二章中，根据第一章中的一些基本观点，从塔的静态和动态特性及调节系统间相互关联的分析出发，结合质量指标的控制，重点介绍了精馏塔基本控制方案的选取，这也是全书的核心问题。而一些新的特殊调节系统在精馏塔中的应用，由于内容较多，只能选取一些有代表性的、而且比较有成效的方式，在第三章中进行介绍。一些特殊精馏塔的自动调节，作为一些控制原则和控制方案的具体应用示例，

在第五章做了介绍。

关于精馏塔控制方案的选取,某些文献着重进行自由度分析,但鉴于自由度分析并不能对精馏塔的控制作出严格而明确的描绘^[8],本书没有进行介绍。

精馏塔的附属设备再沸器和冷凝器的调节问题,在第四章单独进行了介绍。塔的压力控制在精馏塔自动调节中是一个比较重要的课题,考虑到本书的体系,并考虑到塔压通常较普遍的是用冷凝器冷凝速率来调节,书中把这部分内容与冷凝器的自动调节结合在一起进行介绍。

由于精馏塔的动态特性非常复杂,它的辨识尚待作出进一步的研究,现代控制理论的一些具体应用还仅仅是开始,并不成熟。因此,本书第六章主要是介绍精馏塔的静态局部最优控制问题,并对精馏塔控制作了简要的回顾与展望。

本书在有关章节中也介绍了精馏塔的节能控制问题。

关于精馏塔的自动调节,国内外有许多文献,也有一些专著^[1,8],有些却并不那么令人信服,编者根据自己的选择把一些主观认为较好的内容进行了综合,反映在本书之中。由于编者水平所限,书中可能有许多错误,欢迎读者指正。也由于有关内容较多,本书不可能一一作出介绍,有志于进一步研究的读者,可以参阅本书所列参考文献及这些文献的参考文献。

全书承蒙华东化工学院蒋慰孙教授仔细审阅,并提出了许多宝贵的意见,在此深表感谢。

编者 1980年11月

目 录

前言

第一章 概论	1
第一节 精馏塔的调节要求和约束条件	1
一、调节要求	1
1. 质量指标 (产品纯度)	2
2. 产品产量 (或回收率)	4
3. 能量消耗要求	5
二、约束条件	7
1. 最小气相速度限或漏液限	8
2. 最大气相速度限或液泛限	8
3. 最大操作压力限	9
4. 再沸器加热限制	9
5. 蒸汽冷凝量限或蒸汽量限	10
6. 冷凝器冷却限制	11
第二节 影响精馏塔操作的因素	13
一、精馏塔中的静态关系	13
1. 二元精馏塔的静态特性	13
2. 多元精馏塔的静态特性	17
3. 内部平衡关系	19
二、静态影响关系和可供选取的调节参数	25
1. 静态影响关系	25
2. 可供选取的调节参数	28
三、动态影响分析	29
1. 上升蒸汽和回流的影响	29

2. 组分滞后的影响	30
3. 回流罐引起的滞后影响	30
4. 塔底蓄液量的滞后影响和塔底液位的反向响应	32
5. 能量变化的影响	34
四、各参数之间的相关影响	35
第三节 设置精馏塔控制方案的基本观点	37
一、按物料及能量平衡关系进行调节	37
二、设置质量调节系统	39
三、考虑调节系统的静态和动态响应	41
四、考虑调节系统间的相关影响	42
1. 相关影响的定量分析方法	42
2. 2×2 变量调节系统间相关影响的定性分析方法	46
3. 动态影响	50
五、考虑整个工艺生产过程的平稳操作	51
六、塔压调节与浮动压力操作问题	52
七、根据热力学观点等选取节约能量的方案	56
第二章 精馏塔的基本控制方式	59
第一节 传统的物料平衡控制	60
一、F 和 D 进行流量调节	61
二、F 和 B 进行流量调节	67
第二节 有产品质量指标反馈的控制	69
一、产品质量指标的选取	70
二、质量指标反馈控制的基本型式	82
第三节 控制一个产品质量	83
一、采用温度作为间接质量指标的控制方案	83
1. 能量平衡控制	83
2. 物料平衡控制	86
3. 能量平衡控制和物料平衡控制方案的特点及选用原则	89
二、采用其它质量指标的控制方案	92

1. 能量平衡控制	92
2. 物料平衡控制	93
三、直接质量指标控制应用中的一些注意事项	94
1. 采样点选取问题	94
2. 采样调节问题	95
3. 调节系统的动态响应问题	95
四、检测元件安装位置选取的一些原则	96
第四节 控制两个产品质量	105
一、两个产品质量均用能量平衡控制	106
二、一个产品质量用能量平衡控制, 另一个产品质量用物料 平衡控制	108
三、二元精馏塔中两个质量调节回路间相关影响的定量分析	110
第三章 特殊调节系统的应用	112
第一节 前馈调节	112
一、静态前馈模型	113
1. 恒定分离度 S	116
2. 恒定塔内气相流量 V	118
3. 对塔压变化的补偿	120
二、动态补偿	121
三、改变调节回路的动态响应进行动态补偿	123
第二节 解耦调节	125
一、静态解耦	126
1. 理想静态解耦	126
2. 简化解耦	128
二、动态补偿	129
三、部分解耦	130
第三节 内回流调节和进料热焐调节	131
一、内回流调节	131
二、进料热焐调节	132

第四节 塔板负荷调节	134
第五节 有关约束条件的调节	140
一、约束条件的基本调节方法	141
二、精馏塔的限值调节（或约束调节）	143
三、精馏塔的自动开停车措施	156
第四章 再沸器和冷凝器的调节	159
第一节 再沸器的调节	159
一、概述	160
二、蒸汽加热再沸器的常见控制方式	165
1. 调节阀安装在蒸汽管线上的情况	166
2. 调节阀安装在冷凝液排出管线上的情况	168
三、加热介质没有相变的再沸器的控制方式	171
第二节 冷凝器的调节	174
一、全凝器	175
1. 水冷冷凝器	175
2. 冷却介质蒸发的冷凝器	184
3. 空气冷却冷凝器（风冷器）	187
4. 减压塔情况	190
二、分凝器	192
1. 塔顶采出产品为分凝器中未冷凝的气相	192
2. 塔顶产品以气相和液相两种形式采出	197
第五章 特殊精馏塔的自动调节	201
第一节 侧线塔的自动调节	201
一、提馏段气相侧线采出	202
二、精馏段液相侧线采出	211
第二节 原油常压精馏塔的自动调节	215
一、操作要求	215
二、基本控制方案的设置	217
三、特殊调节系统的应用	219

第三节 共沸精馏塔的自动调节	223
一、概述	223
二、二元均相共沸物组成对压力变化灵敏的分离情况	225
三、二元非均相共沸物分离的情况	228
第四节 萃取精馏塔的自动调节	233
一、概述	233
二、基本控制特点	233
第五节 间歇精馏塔的自动调节	235
一、恒定塔顶产品流量的控制方式	236
二、恒定塔顶产品成分的控制方式	238
第六节 其它特殊精馏塔的调节问题	239
一、有多处进料的精馏塔	239
二、有中间再沸器的精馏塔	240
三、大压降精馏塔	240
第六章 精馏塔的最优控制及展望	242
第一节 目标函数和最优控制方法	243
一、最优化等级	243
二、目标函数	244
三、实现最优控制的方法	246
1. 搜索法	246
2. 模型法	247
四、静态最优化与动态最优化	248
第二节 精馏塔局部最优控制的一些示例	250
一、保证一个产品符合规格时的最优控制	250
二、保证两个产品符合规格时的最优控制	255
三、两个产品的质量都不必保证规格时的最优控制	255
四、最优进料流量	260
第三节 精馏塔控制的回顾与展望	264
一、简要回顾	264
二、一些展望	265
全书主要参考文献	266

第一章 概 论

精馏是广泛用于混合物分离的一种传质过程。在化学工业和炼油工业中，许多原料、中间产品或粗产品是由若干种组分所组成的混合物。炼油工业中的原料石油就是多种碳氢化合物的混合物，需要通过精馏操作把原油分离成多种馏分、作为产品出售。石油化工生产中的中间产品裂解气，需要通过精馏操作进一步分离成纯度要求很高的乙烯、丙烯、丁二烯及芳烃等化工原料。这些都是应用精馏操作分离混合物的典型例子。精馏过程利用混合液中各组分具有不同的挥发度，即在同一温度下各组分的蒸气压不同这一性质，使液相中的轻组分转移到气相中，同时使气相中的重组分转移到液相中，从而实现分离的目的。

和其它化工过程一样，要使精馏过程达到分离混合物的预期要求，就必须实施有效的操作和控制。本章主要讨论精馏过程的控制目标，说明精馏塔的操作要求，分析影响精馏操作的因素，这些都是必要的工艺过程物理基础。作为概论，本章也简要地介绍精馏塔自动调节的一些基本观点。至于精馏塔及其附属设备的具体控制方法的详细讨论，则是本书其余各章的任务。

第一节 精馏塔的调节要求和约束条件

一、调节要求

要对精馏塔实施有效的自动调节，必须首先了解精馏塔的

控制目标，亦即调节要求。一般说来，精馏塔的控制目标，应该从质量指标（产品纯度）、产品产量（回收率）和能量消耗三个方面进行考虑。

1. 质量指标（产品纯度）

既然精馏操作是为了将混合物分离为产品，产品质量指标（产品的纯度）就必须符合预定的要求。这就是说，塔顶或塔底产品之一应该保证合乎一定的规格，而另一产品也应当维持在规定的范围之内。或者，塔顶和塔底的产品均应保证一定的纯度要求。

就二元精馏说来，情况比较简单。一般二元混合物可以在一个精馏塔中进行分离。质量指标的要求就是要使顶部产品中轻组分（或重杂质）含量和底部产品中重组分（或轻杂质）含量符合一定的规格。

在实际生产中，混合物分离属于二元的毕竟是少数，大量存在的是分离多于两种组分的多元精馏。例如，石油裂解气分离装置中，除了作为成品塔的乙烯精馏塔和丙烯精馏塔可以按二元精馏来处理以外，其余的均是切割馏分的多元精馏塔。

多元精馏塔中，通常仅仅可以控制关键组分。所谓关键组分，是指对产品质量影响较大的组分。挥发度较大从而由塔顶馏出的关键组分称为轻关键组分，挥发度较小从而由塔底流出的关键组分称为重关键组分。例如，在石油气分离中的脱乙烷塔（图1-1），目的是把来自脱甲烷塔底部产品的进料进行分离，把乙烷（ C_2H_6 ）和更轻的组分从顶部分离出去，比乙烷重的组分从底部分离出去。就这个塔说来，对产品质量影响最大的组分显然是乙烷和丙烯（ C_3H_6 ），其中乙烷是轻关键组分，而丙烯则是重关键组分。这里，顶部产品中的甲烷（ CH_4 ）和乙烯（ C_2H_4 ）的含量是不作控制的，它们取决于进料中甲烷和

乙烯的含量，亦即取决于前一个塔的分离情况。这很容易从这两个组分的物料平衡关系看出。对于甲烷来说，它必须全部由顶部馏出，于是：

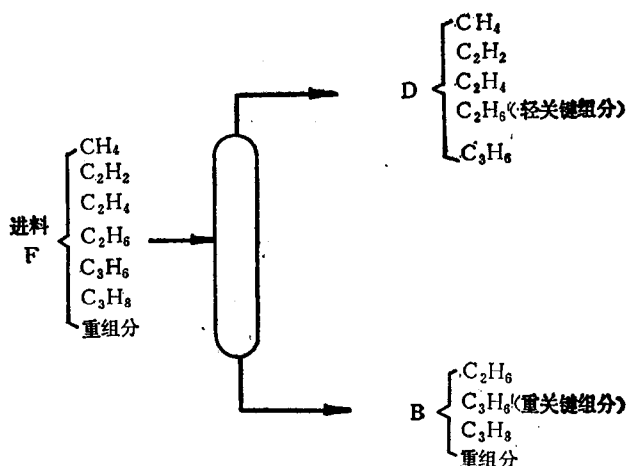


图 1-1 脱乙烷塔顶和底部产品中的组分分配图

$$F \cdot z_{\text{CH}_4} = D \cdot y_{\text{CH}_4}$$

$$\therefore y_{\text{CH}_4} = \frac{F}{D} \cdot z_{\text{CH}_4}$$

对乙烯来说，它也必须从顶部产品中馏出，因此

$$F \cdot z_{\text{C}_2\text{H}_4} = D \cdot y_{\text{C}_2\text{H}_4}$$

$$\therefore y_{\text{C}_2\text{H}_4} = \frac{F}{D} \cdot z_{\text{C}_2\text{H}_4}$$

以上各式中，F和D分别为进料和顶部产品的流量，用下标表示组分的Y和Z分别为相应组分在顶部产品和进料中的含量。可见，当前一个塔来的F、 z_{CH_4} 和 $z_{\text{C}_2\text{H}_4}$ 取一定数值时，只要顶

4

部产品量 D 一定， y_{CH_4} 和 $y_{C_2H_6}$ 就完全确定，无法改变。同样，底部产品中比丙烯更重的组分也是不能控制的。在顶部产品中，除了轻关键组分乙烷和比乙烷更轻的组分甲烷和乙烯之外，必定还有少量重关键组分丙烯。因为如果要使 $y_{C_3H_6}=0$ ，在不增加能量消耗时，底部出料中乙烷的含量必然要增加，大量乙烷从底料中排出，增加了底料进一步分离的负担，这当然是不期望的。同样，底部产品中也必定含有少量的轻关键组分乙烷。因为如果要使底部产品中乙烷的含量为零，在不增加能量消耗时，顶部产品中丙烯的含量要增加，大量丙烯从顶部丢弃，影响底部产品中重要组分丙烯的回收，这也是不期望的。在进料情况不变时，顶部产品中丙烯的含量如控制一定，乙烷的含量也就一定；同样，塔底产品中乙烷的含量控制一定，丙烯的含量也就一定。因此，可以控制塔顶产品中重关键组分（重杂质）和塔底产品中轻关键组分（轻杂质）的含量；或者控制塔顶产品中轻关键组分和塔底产品中重关键组分的含量。这就是多元精馏塔中对质量指标的调节要求。

在精馏塔的操作中，使产品质量合格显然是重要的。如果产品质量不合格，它的价值就远远低于合格产品的价值。但决不是说质量愈高愈好。因为常常是这样的情况，质量超过规格，产品的价格并不因此而增加，产量却反而下降了，总的价值也因此而下降了，同时操作成本（主要是能量消耗）也化费得多。由此可见，除了要考虑使产品符合规格外，还应考虑使产品不要太超过规格。也就是应同时考虑产品的产量和能量消耗。

2. 产品产量(或回收率)

控制产品的质量指标达到一定分离要求，虽然是精馏操作的主要目标，但并不是唯一的目标。另一个重要目标是产品的

产量，也就是产品的回收率。在达到一定质量指标要求的前提下，得到尽量高的产量，使产品的回收率提高，显然是有利的。产品的回收率定义为：

$$R_i = \frac{P}{F \cdot z_i} \quad (1-1)$$

式中：P是产品量，F是进料量， z_i 是进料中*i*组分的浓度。

式(1-1)中并不包含产品质量规格，因此仅从式(1-1)并不能看出产品回收率与产品纯度之间的直接关系。产品纯度与产品回收率之间的关系还必须考虑能量因素才能最后确定。由精馏原理可知，用精馏塔进行混合物的分离是要消耗一定能量的。要使分离所得的产品纯度愈高和产量愈多，所需的能量就愈大。在能耗一定的情况下，产品纯度增加，必然会使产品的回收率下降，从而使该产品的经济收益下降，虽然另一产品的产量（或回收率）可以增加，但在另一产品的价格低于该产品的情况下，总的经济收益也会下降。这也就说明，在精馏操作中，主要产品的质量指标最好恰是达到质量的规格要求。低于要求的纯度将使产品不合格，而超过纯度要求也会降低产量。当然，刚好达到纯度要求是不现实的，但也不能使纯度超过太多。

3. 能量消耗要求

精馏过程中消耗的能量，主要是再沸器的加热量和冷凝器的冷却量消耗，此外塔和附属设备及管线也要散失一部分能量。

在一定的纯度要求下，提高产品的回收率，必定要增加塔内的上升蒸气量V，而塔内上升蒸气量增加得愈多，意味着再沸器的能量消耗要增加，然而，任何事物总是有一定限度的，单位进料量的能耗（可用塔内上升蒸气量V与进料量F之比V/F来表示）增加到一定数值以后，再继续增加V/F，产品回