

当代化工学术精品译库

Aspen模拟软件 在精馏设计和控制中的应用

(原著第二版)

DISTILLATION
DESIGN AND CONTROL
USING ASPENTM
SIMULATION

(SECOND EDITION)

[美] William L. Luyben 著 马后炮化工网 译



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

当代化工学术精品译库

Aspen 模拟软件在精馏 设计和控制中的应用

(原著第二版)

Distillation Design and Control Using
Aspen™ Simulation (Second Edition)

[美] William L. Luyben 著

马后炮化工网 译



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

· 上海 ·

.....

图书在版编目(CIP)数据

Aspen 模拟软件在精馏设计和控制中的应用(原著第二版) / (美)鲁平(Luyben, W. L.)著;马后炮化工网译. —上海:华东理工大学出版社,2015. 6

(当代化工学术精品译库)

ISBN 978-7-5628-4274-3

I. ①A… II. ①鲁…②马… III. ①精馏—化工过程—应用软件
IV. ①TQ028. 3-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 102876 号

Distillation Design and Control Using Aspen™ Simulation / William L. Luyben. -2nd ed.

原著 ISBN: 978-1-41143-8

Copyright © 2013 by John Wiley & Sons, Inc.

All Rights Reserved. This translation published under license.

著作权合同登记号:图字 09-2015-347 号。

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

当代化工学术精品译库

Aspen 模拟软件在精馏设计和控制中的应用(原著第二版)

著 者 / [美]William L. Luyben

译 者 / 马后炮化工网

责任编辑 / 周 颖

责任校对 / 金慧娟 成 俊

出版发行 / 华东理工大学出版社有限公司

地 址: 上海市梅陇路 130 号, 200237

电 话: (021)64250306(营销部)

(021)64251837(编辑室)

传 真: (021)64252707

网 址: press.ecust.edu.cn

印 刷 / 上海中华商务联合印刷有限公司

开 本 / 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 / 25.75

字 数 / 524 千字

版 次 / 2015 年 6 月第 1 版

印 次 / 2015 年 6 月第 1 次

书 号 / ISBN 978-7-5628-4274-3

定 价 / 98.00 元

联系我们: 电子邮箱 press_wy@ecust.edu.cn

官方微博 e.weibo.com/ecustpress

天猫旗舰店 <http://hdlgdxcb.tmall.com>



译者前言(1)

上古结绳纪事之世,有圣王伏羲氏者,始画八卦,筮问凶吉,易演阴阳,由是数术生矣。先贤因之,理穷造化,数演天机,后世鬼谷、麻衣之辈皆承其末道而以数术之技名世。

爰及十五世纪,泰西诸国,代有大贤辈出,穷推数理,格物致知。数术之技一变而为数理之道,推衍而生物理、化学。会民智渐开,颇有因化学之道,炼矿设厂,以丰仕民之用,泰西诸国竟缘之而富国强兵,雄霸寰宇四海也。

彼时中土会满清羸弱,颇有开明洋务志士,师夷长技,意图报效。维清光绪元年(1875年),徐寿、傅雅兰等建格致书院于沪上;至光绪二十六年(1900年),乃有国人创办之首部自然科学期刊《亚泉杂志》于京师,化学之道遂大传于中土。会此时也,红夷戴维斯者,首倡化学工程之义理,遂归纳单元操作之规律,著书立说,刊行于世。化学工程之学科于是诞生矣。

白驹过隙,尔来百有余年矣。其间科技昌明,教化大兴。然得汗青留名者,唯电子计算机之发明欤?

子曰:“工欲善其事,必先利其器。”自十七世纪以降,泰西高等数学大成,贤达竞相以数值计算方法研究为己任,牛顿-拉普森法、高斯迭代法、欧拉法灿若晨星,后人诚宜铭记彼等前辈筚路蓝缕之功绩。然空有卓越之思路算法,了无迅速解算之器具,虽手运筹算若飞,皓首而难竟全功,诚可悲夫。电子计算机者,殆是此利器乎?

自是以来,化工模拟计算始日新月异,蓬勃而兴。初,人自为战,家异其法。虽其难唯一,算法程序则纷繁浩杂,不可穷举。至若石油巨头、化工巨擘,更以专利目之,藏之秘府阁,不示外人。不意十余年间,软件编程语言发展日日恒新,遂使往日之专利程序,翻为明日黄花,竟至维护虚费府帑,公私不胜其烦。而后商业化之稳态仿真软件乘势崛起,而今已执化工模拟之牛耳矣。

考 Aspen 软件之缘起,实维七十年代后期,美国能源署与麻省理工学院

(MIT)合作开发之“过程工程的先进系统”(Advanced System for Process Engineering, ASPEN),至1981年底事成,遂以Aspen Tech之产品发行于世。至今日其功用则穷推造化,演示玄机,天人之际,微妙莫名,渐有王者之气,天之命其在诸?

今以余观之,夫化工模拟计算,若天有四时,地有四方,人有四体,必有四维。四维者何?曰肇因乎化工热力学之平衡,得益于单元操作之实际,归纳以数学模拟之方程,解算以数值计算之策略。天道渺渺,不可言喻,模拟之道,上应造化之理,下具知著之行。此四维缺一而不得与论化工模拟计算之堂奥矣!

然则模拟之理易知而其实践维艰,何哉?当非利器之不备,学识之不足也,凡有志化工模拟之学子,必也闻见于师长前辈,心慕手摹。所缺者唯切磋琢磨之良师益友尔。化工之模拟,本发端于生产实践,虽以数学模型归纳,数值算法解析,倘敝帚自珍,无化工生产之真实数据作比,全失其模拟之初衷。或熟稔化工生产之工程师,胼手胝足之余,更有心以模拟指导生产者,鲜矣。若追慕模拟计算之徒,方醉心其道之余,更有心以模拟数据与生产数据相发明者,百无一人矣。是故,良师难寻,咨疑无门,所谓识见障也。

威廉·鲁平教授之新作《用Aspen软件模拟精馏的设计和控制》,文辞质简,义理深远,以化工操作之实际例题,论化工模拟之思路分析,考据翔实,立论严谨,约文申义,敷畅厥旨。破此识障,独辟蹊径,真学者之典范,后进之福音也。

今余以闲暇,敢竭愚诚,译为中文,务求畅彼我之意趣,通华夷之心怀。而今小成,由浅及深,由静及动,庶几有助于国内之好学者。

序者,所以为译者之浅意,引之冠于卷首。若有好学博雅之君子,唯祈斥余乖谬之余,不吝斧正,咸襄盛举,共传此道。斯固余之私愿,亦后学之洪福也。

公子小白

己丑年孟冬之月于九合斋

译者前言(2)

这本译著得以出版经历了太长的时间,也经历了生离死别。原著第一版的中译稿电子版在网上流传了很久,大家都通过这本书认识了译者公子小白,却一直不知道他的真名,现在可以公之于众了,公子小白的本名是仲庆,就职于中建安装工程有限公司石化工程设计院,只是2014年11月他却永别了我们。

在我们的生命中,总是存在着很多的意外或者说是偶然,所有经历过的事、擦肩而过的人,似乎都是命中注定。小白的突然离开,让我们每一个爱他的人无不震惊和悲痛,以至于直到此时此刻,我们都不能相信,不能相信他已经离我们而去,阴阳永隔,唯有祝福他,天堂之路一路走好。

笔者于2008年和师父李小龙(华东理工大学设计院总工程师)去南京出差时和仲庆见过一次,那时候他才翻译了第一版的1~6章,然后2011年时小白把后面翻译的几章全部发给笔者,笔者全部整理好后发布在马后炮化工论坛。有次问小白,既然这本书这么经典,我们一起把它的中文版出版吧,小白说“你愿意折腾就试试吧,我把翻译的版权全部授权给你,我的想法也只是为国内的化工行业做一点小小的贡献而已”,于是笔者发邮件联系威廉·鲁平教授,然后辗转联系到Wiley国内版权公司,并且在这本书出来第二版的时候,重新组织了论坛的朋友,开始对新增的章节进行翻译,同时对修订的章节进行重新翻译和校核。

本书第二版的内容相比较第一版新增了7个章节,包括石油分馏的控制,隔壁塔(热偶精馏),动态安全分析,二氧化碳的补集等,同时对原有的部分内容进行了修订。本书的计算案例采用Aspen Plus V7.3版本,对于书内的计算案例,我们也将马后炮化工论坛的Aspen版块进行更深入的交流和学习。

感谢所有无偿参与本书翻译的马后炮化工论坛的兄弟,感谢出版之前就众筹付费支持我们的朋友,感谢所有关注我们论坛发展的朋友。因为有你们的支持,我们所有的努力都是值得的。

限于译者水平,若有不妥之处,望读者指正。

本书各章参与翻译的人员名单如下,谨致以最诚挚的感谢。

第1章至第6章 翻译:仲庆(中建安装工程有限公司石化工程设计院);
补充校核:王广全(浙江工业大学),汤磊(南京工业大学)。

第7章至第11章 翻译:王佳兵(中建安装工程有限公司石化工程设计院);
补充校核:马永刚(深圳巨涛机械设备有限公司)。

第12章 翻译:戚玉(北京化工大学);校核:王广全。

第13章 翻译:王士宁(北京化工大学);校核:马永刚。

第14章 翻译:周印羲;校核:杨声(大连理工大学)。

第15章 翻译:黄佳玮(英国曼彻斯特大学);校核:王广全。

第16章 翻译:王广海(北京石油化工工程有限公司);校核:刘剑(液化空气澳大利亚有限公司)。

第17章 翻译:马永刚;校核:王广全。

第18章 翻译:杨声;校核:吴成双。

最后再次特别感谢王广全教授、马永刚、汤磊对整个翻译文稿的通读校阅,尤其是在后期的校审中,汤磊对全书的插图进行了大量的整理工作,非常感谢你们的大力支持。

关于马后炮化工网

马后炮化工论坛(bbs. mahoupao. net)是一家专注于化工行业技术交流和信息共享的互动新媒体,是目前国内在化工设计以及工艺流程模拟计算领域最专业、最具人气的交流网站之一。自2009年建立以来,马后炮化工技术论坛便以其“专业、专注、专心”的服务态度和开放、包容的特色,获得了大量化工同行的青睐。六年内一跃成为业内名列前茅的技术交流平台。作为化工行业的专业技术网站,马后炮化工论坛汇聚了一批出色的化工行业人才,包括化工设计院、工程公司、化工高校以及化工生产企业等专业人士,实时从多方面、多角度关注化工行业动态和技术发展趋势。

马后炮工程威客平台(weike. mahoupao. net)是化工行业首创的工程研发设计服务交易平台。依托马后炮化工论坛六年以来积累的技术资源,让企业可

以充分利用互联网的工程师资源,解决企业自身的人才需求和技术需求。让企业可以少花钱、少养人却能有效地进行工程研发设计。对于专家工程师,可以通过工程威客平台实现其自身智慧价值的最大化,使其智慧(知识、技能、经验、技巧等)快速、有效变现。

马后炮化工网创始人 陈赞柳

2014年12月20日

第二版前言

在如今能源密集型社会,精馏基本原理没有改变,精馏的重要地位和地位也 同样没有改变,改变的是精馏有了更广泛的应用范围和更深入的分析方法,以 及稳态设计和动态控制的改善。在本书的第一版出版后的七年时间里,许多新 的概念和应用已得到开发并发表于文献中。

随着热耦精馏塔(Petlyuk)在工业应用中得到广泛的推广,本书增加了复 杂精馏塔的设计和控制章节。在新章节中使用动态模拟的方法定量探讨了快 速瞬态响应对主工艺造成紊乱和故障的安全问题,并概述了如何采用更多的构 造法进行控制结构的选择,以便给大量的可替代控制结构的分类整理提供帮 助。一个简单精馏塔都存在多达 120 种可替代控制结构,所以需要将其降低至 一个可操作的数目以便于进行稳态和动态性能的比较。

随着工业生产中二氧化碳捕集塔的关注日趋增多,所以本书新增了研究 低压胺液吸收/解吸系统和高压物理吸附吸收/解吸系统的设计和控制章节,新 版本的 Aspen 软件已经增加了这个功能和特性。化工工厂的发展伴随着电厂 或绿化能源(风能或太阳能)的发展,大大提高了精馏塔操作弹性的重要性。本 书新增了一个章节讲述如何有效地处理这些操作弹性相关的精馏塔控制结构。

笔者希望本书的新版是实用且通俗易懂的。本书所覆盖的内容是非常简 易和实用的,因此,书中所载内容有很大的实际应用价值。笔者衷心祝愿您在 精馏设计和控制的事业上好运,您会发现从事精馏设计和控制相关的工作非常 具有挑战性,同时也是有趣的。

William L. Luyben

前 言

近年来快速上升的原油价格(截至 2005 年)及其导致令人震惊的油价使得各大科学协会、工程协会最终认识到,现在是时候对有些事情轻重缓急做一番客观检验了。能源问题是这个世界所要面对的现实问题,而且能源问题不会因为近来流行的生物技术和纳米技术而得以解决。能源消耗是二氧化碳的主要来源,因此它与全球变暖问题直接相关。

我们需要对能源供给和消费系统做彻底的重新评估。现代社会各领域对能量可怕的低效率的使用必须停止。我们的运输系统在高油耗的 SUV 车和捉襟见肘的铁路系统上浪费了能量。我们的供水系统耗费能量去生产饮用水,而后又将其冲了厕所。这又使得废弃物处理系统不堪负荷,消耗更多的能量。我们在食品供给系统上也耗费着能量:生产化肥、除草剂、杀虫剂、耕作、运输、为了顾客的方便将食物分包,这些都需要大量的能量。旧式的农民市场所提供的食物更好,而且价格低,消耗的能量也少。

精馏是供能系统中最重要技术之一。大体上说,我们所有的运输燃料从原油到加油泵的路上最少也要经过一个精馏塔。巨大的精馏塔被称为“Pipestills”(管式精馏釜,以下称大型炼油精馏塔),能将原油分割成多种基于不同沸点的石油馏分。中间馏分直接成为汽油,较重馏分经过催化裂化或热裂化生产更多的汽油,而轻质馏分则经过化合也成为汽油。在所有这些过程中都要应用到精馏。

即使我们转而开始开发“可再生能源”,比如生物质,最有可能的运输燃料将是甲醇。最有可能的流程是将生物质部分氧化得到合成气(一种氢气、一氧化碳和二氧化碳的混合物),之后再彼此反应得到甲醇和水。通过精馏将甲醇和水分离是流程中重要的一步。精馏还用于生产部分氧化时用到的氧气。

因此,精馏才是化工和石油行业的最主要的分离手段,而且在 21 世纪也将保持这一地位。在给现代社会提供食物、热量、遮蔽物、衣服、运输等诸方面,精

馏操作的重要性是不容置疑的。在提供我们所需的能量诸多方面都涉及精馏操作。世界各地正在使用的精馏塔数目成千上万。

对精馏塔的分析、设计、操作、控制和优化所做的详尽研究几乎已持续了一个世纪之久。直到计算机问世,研究中得到广泛应用的是手算-图表法。大约自1950年起,人们使用了模拟式和数字式计算机模拟解决众多的工程问题。精馏分析中所包含的汽-液相平衡迭代计算以及逐板组分平衡问题都很适合数字计算。

开始时大多数工程师都自己写程序,解的是描述精馏塔稳态操作的非线性代数方程组和描述其动态状态的非线性常微分方程组。许多化学公司、石油公司都自己开发了内部用的工艺模拟程序,其中精馏都是一种重要的单元操作。1980年代中期,商业化的稳态模拟软件逐步崛起,现在已经主宰了这一领域。

商业化的动态模拟软件是此后稍晚才开发出来的。因为动态模拟要等到计算机技术的发展能提供计算所需的足够快的机器。目前的情况是,精馏塔稳态和动态操作的模拟器已经在行业内和大学中获得了广泛的使用。

笔者个人的技术经验与精馏模拟的历史十分地吻合。笔者的实际经验始于高中化学课上所做的间歇精馏。而后,精馏理论大量出现,笔者在宾州大学期间做的间歇精馏中试装置,当时老师是 Arthur Rose 和“Black”Mike Cannon。此后笔者作为技术服务工程师在 Exxon 的炼油厂工作了5年,积累了对大型炼油精馏塔、减压塔、轻组分装置和烷基化装置的工业经验,所有这些装置都大量使用了精馏操作。

在此期间,笔者所知道的唯一的计算机应用就是炼油厂规划和调度安排中使用计算机解线性规划问题。直到1960年笔者回到大学重拾研究生学业才开始使用模拟计算机和数字式计算机。Bob Pigford 教我们如何使用 Bendix G12 数字式计算机编程,当时使用的是纸带,计算机的内存很小,程序的长度和内存需求都受到严格的限制。Dave Lamb 教我们使用模拟计算机模拟,Jack Gerster 教我们精馏操作。

此后笔者在杜邦公司的工程部工作了4年,处理的是工艺控制问题,其中很多都涉及精馏塔。模拟式和数字式模拟都应用得很多。笔者从一群优秀的

工程师那里学到了很多有用的知识,他们是 Page Buckley, Joe Coughlin, J. B. Jones, Neal O'Brien, 还有 Tom Keane,等等,在此就不一一具名了。

最后,笔者在里海(Lehigh)大学做了 35 年的教研工作,其间很多本科生和研究生都在使用精馏塔模拟程序,有单塔的,也有全厂模拟,用以学习多种形式的精馏塔上基本的精馏原理并开发有效的控制结构。在本科生和研究生的设计课上,自己研发的软件和商业模拟软件都得到了应用。

本书试图从关于精馏设计和控制的大量经验提取一些要点,以使大学生和年轻的工程师们遇到精馏塔有关的问题时有所参考。本书所涵盖的不仅仅是使用模拟软件的技巧,而是意在使用软件的指导,通过简单实用的手段,研发最优化的、经济合理的稳态精馏系统设计。所强调的问题是究竟使用单端点还是双组分控制,如何确定温度控制塔盘的位置,以及过度的自由度应如何确定。

笔者并没有声称所有的内容都是新的。稳态精馏的方法在大多数的设计教科书中都有所讨论。关于动态精馏的资料则散布在为数众多的论文和书籍之中。本书只是将这些资料汇集起来,探讨彼此间的联系,以便查阅。本书的另一个特色则是在同一本书中结合了精馏塔的设计和控制内容。

做工艺设计有三步。第一步是概念设计,用简单粗略的办法计算得出初步的流程。这一步骤中关于精馏系统的计算已经在另一本书中有了详尽的讨论(Conceptual Design of Distillation Systems, 2001, McGraw-Hill)。之后就是初步设计,在此要使用严格的模拟方法评估所提流程的稳态性能和动态性能。最终的步骤就是详细设计,在此步骤中要给出设备硬件的详细规格,比如塔盘的种类、筛板塔盘的开孔数、进料管和回流管定径、泵的规格、换热器面积以及阀门的规格。本书讨论的是第二步,即初步设计的内容。

精馏模拟的题目包含的内容广泛,要想涵盖完全则需要很多本书,结果就是像百科全书似的厚重一本,使得刚入门的工程师茫然不知所措。因此,本书将范围限制在笔者认为是最为基础和最为有用的方面。本书只考虑了连续精馏的内容。关于间歇精馏的内容繁多,应另做论述。本书只讨论已经获得了多年成功运行经验的多级精馏塔。从根本上说,基于流量的模型更为严格,但是需要知道或估计的参数更多。

本书中只使用了严格精馏模拟。关于概念设计中的稳态精馏系统所用的近似算法在 Doherty 和 Malone 所著的书中已有详细讨论,对相关内容感兴趣的读者可自行查阅。

笔者希望读者能觉得本书是实用且通俗易懂的。将精馏塔设计和操作中的某些神秘之处揭示出来正是笔者致力于完成本书的乐趣所在。

William L. Luyben

目 录

第 1 章 汽-液相平衡(VLE)基础	1
1.1 蒸气压	1
1.2 二元体系 VLE 相图	2
1.3 物性方法	5
1.4 相对挥发度	6
1.5 泡点计算	7
1.6 三元相图	8
1.7 VLE 的非理想性	9
1.8 三元体系的剩余曲线	13
1.9 精馏边界	17
1.10 结论	20
第 2 章 精馏塔的分析	21
2.1 设计的“自由度”	21
2.2 二元体系 McCabe-Thiele 法	21
2.2.1 操作线	23
2.2.2 q 线	24
2.2.3 逐板法求塔板数	25
2.2.4 各参数的影响	25
2.2.5 限制条件	26
2.3 多元体系的近似方法	26
2.3.1 Fenske 方程求最少塔板数	27
2.3.2 Underwood 方程求最小回流比	27
2.4 结论	27
第 3 章 建立一个稳态精馏模拟	29
3.1 新建一个模拟例子	29
3.2 定义化学组分及物性方法	34
3.3 定义物流性质	38
3.4 定义设备参数	39
3.4.1 塔 C1	39

3.4.2 阀门和泵	41
3.5 运行模拟算例	43
3.6 使用“DESIGN SPEC/VARY”功能	44
3.7 寻找最佳进料位置以及最小操作条件	55
3.7.1 最佳进料位置	55
3.7.2 最小回流比	55
3.7.3 最少塔板数	55
3.8 精馏塔尺寸设计	56
3.8.1 塔高	56
3.8.2 塔径	56
3.9 概念设计	58
3.10 结论	61
第4章 精馏的经济优化	62
4.1 启发式优化法(Heuristic Optimization)	62
4.1.1 将总塔板数定为最少理论板数的两倍	62
4.1.2 将回流比定为最小回流比的 1.2 倍	63
4.2 经济核算依据	64
4.3 结果	65
4.4 操作优化	68
4.5 真空精馏塔压力的优化	73
4.6 结论	74
第5章 复杂体系的精馏模拟	75
5.1 萃取精馏	75
5.1.1 设计	77
5.1.2 模拟难点	79
5.2 乙醇脱水	81
5.2.1 VLLE 行为	83
5.2.2 工艺流程模拟	84
5.2.3 收敛流程	87
5.3 变压共沸精馏	89
5.4 双塔热耦合精馏	93
5.4.1 流程	93
5.4.2 净操作的收敛	94
5.5 结论	97

第 6 章 通过稳态计算选择控制结构	98
6.1 控制结构选择	98
6.1.1 双组分控制	98
6.1.2 单端控制	98
6.2 进料组成灵敏度分析(ZSA)	98
6.3 温度控制板的选择	100
6.3.1 方法总结	100
6.3.2 丙烷/异丁烷二元体系	101
6.3.3 苯/甲苯/二甲苯(BTX)三元体系	105
6.3.4 三元共沸体系	107
6.4 结论	111
第 7 章 由稳态模拟转换为动态模拟	112
7.1 设备定径	112
7.2 导入 Aspen Dynamics	114
7.3 在 Aspen Dynamics 中打开动态模拟	115
7.4 安装各基本控制器	117
7.4.1 回流	122
7.4.2 重点	123
7.5 添置温度和组分控制器	123
7.5.1 塔板温度控制	124
7.5.2 组分控制	129
7.5.3 组分-温度串级控制	130
7.6 性能评估	131
7.6.1 安装一个曲线图	131
7.6.2 将动态结果导入 Matlab 中	133
7.6.3 再沸器热量输入与进料流量比例	136
7.6.4 带有 CC-TC 串级控制的温度控制结构比较	137
7.7 结论	138
第 8 章 复杂精馏塔的控制	139
8.1 萃取精馏工艺	139
8.1.1 设计	139
8.1.2 控制结构	140
8.1.3 动态性能	142
8.2 部分冷凝的精馏塔	143
8.2.1 全汽相采出	143

8.2.2 汽/液相采出	159
8.3 热耦合精馏塔的控制	165
8.3.1 工艺研究	166
8.3.2 热耦合关系式	167
8.3.3 控制结构	168
8.3.4 动态性能	170
8.4 共沸精馏塔/倾析器体系的控制	173
8.4.1 转化为动态模拟和闭合循环回路	173
8.4.2 安装控制结构	175
8.4.3 动态性能	178
8.4.4 数值积分问题	181
8.5 非常规控制结构	182
8.5.1 工艺研究	183
8.5.2 稳态设计经济优化	185
8.5.3 选择控制结构	186
8.5.4 动态模拟结果	190
8.5.5 可替代的控制结构	191
8.5.6 小结	196
8.6 结论	196
第 9 章 反应精馏	197
9.1 引言	197
9.2 反应精馏体系的种类	198
9.2.1 单进料反应	198
9.2.2 重组分产物的不可逆反应	198
9.2.3 净操作与使用过量反应物的比较	199
9.3 TAME 流程基本点	201
9.3.1 预反应器	202
9.3.2 反应精馏塔 C1	202
9.4 TAME 反应动力学和 VLE	204
9.5 全厂控制结构	208
9.6 结论	211
第 10 章 侧线精馏塔的控制	212
10.1 液相侧线精馏塔	212
10.1.1 稳态设计	212
10.1.2 动态控制	213