



中国石油大学(北京)学术专著系列

过程控制与工艺设计一体化

——催化裂化装置动态机理建模 与控制分析设计

罗雄麟 许 锋/著



科学出版社

www.sciencep.com

中国石油大学(北京)学术专著系列

过程控制与工艺设计一体化

——催化裂化装置动态机理建模与控制分析设计

罗雄麟 许 锋 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书对工业上常用的催化裂化装置类型建立了严格的动态机理模型。首先,建立最基本的单提升管、单段密相床再生的催化裂化装置动态模型,在此基础上建立包括两段式提升管、两段密相床再生、前置烧焦罐式两段再生、催化剂循环系统、压力系统及分馏塔底和回炼系统等单元在内的扩展动态模型。然后,在催化裂化装置动态机理模型的基础上,对催化裂化装置的动态特性以及稳定性进行了分析。最后,运用过程控制与工艺设计一体化研究的方法,基于催化裂化装置动态数学模型,对其常规控制结构选择问题进行了分析和优化求解;从操作和控制的角度,对其裕量问题进行了动态分析;在此基础上,对其控制与工艺集成优化设计问题进行了研究。本书内容涵盖化工动态学、过程控制、化工系统工程等多个学科专业的知识,反映了最新进展。

本书可供从事过程控制的科研与工程技术人员,以及致力于过程系统优化研究的工艺设计人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

过程控制与工艺设计一体化/罗雄麟,许锋著. —北京:科学出版社,2008
(中国石油大学(北京)学术专著系列)

ISBN 978-7-03-021609-0

I. 过… II. ①罗… ②许… III. ①石油炼制—流化催化裂化—过程控制 ②石油炼制—流化催化裂化—工艺—设计 IV. TE624.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 048881 号

责任编辑:杨 震 黄 海/ 责任校对:陈玉凤

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 4 月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2008 年 4 月第一次印刷 印张:13 1/2

印数:1—2 500 字数:257 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(科印))

丛 书 序

大学是以追求和传播真理为目的,并为社会文明进步和人类素质提高产生重要影响力和推动力的教育机构和学术组织。1953年,为适应国民经济和石油工业发展需求,北京石油学院在清华大学石油系并吸收北京大学、天津大学等院校力量的基础上创立,成为新中国第一所石油高等院校。1960年成为全国重点大学。历经1969年迁校山东改称华东石油学院,1981年又在北京办学,数次搬迁,几易其名。在半个多世纪的历史征程中,几代石大人秉承追求真理、实事求是的科学精神,在曲折中奋进,在奋进中实现了一次次跨跃。目前,学校已成为石油特色鲜明,以工为主,多学科协调发展的“211工程”建设的全国重点大学。2006年12月,学校进入“国家优势学科创新平台”高校行列。

在学校发展历程中,有着深厚的学术记忆。学术记忆是一种历史的责任,也是人类科学技术发展的坐标。许多专家学者把智慧的涓涓细流,汇聚到人类学术发展的历史长河之中。据学校的史料记载:1953年建校之初,在专业课中有90%的课程采用前苏联等国的教材和学术研究成果。广大教师不断消化吸收国外先进技术,并深入石油厂矿进行学术探索。到1956年,编辑整理出学术研究成果和教学用书65种。1956年4月,北京石油学院第一次科学报告会成功召开,活跃了全院的学术气氛。1957~1966年,由于受到全国形势的影响,学校的学术研究在曲折中前进。然而许多教师继续深入石油生产第一线,进行技术革新和科学研究。到1964年,学院的科研物质条件逐渐改善,学术研究成果以及译著得到出版。党的十一届三中全会之后,科学研究被提到应有的中心位置,学术交流活动也日趋活跃,同时社会科学研究成果也在逐年增多。1986年起,学校设立科研基金,学术探索的氛围更加浓厚。学校始终以国家战略需求为使命,进入“十一五”之后,学校科学研究继续走“产学研相结合”的道路,尤其重视基础和应用基础研究。“十五”以来学校的科研实力和学术水平明显提高,成为石油与石化工业的应用基础理论研究和超前储备技术研究以及科技信息和学术交流的主要基地。

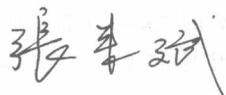
在追溯学校学术记忆的过程中,我们感受到了石大学者的学术风采。石大学者不但传道授业解惑,而且以人类进步和民族复兴为己任,做经世济时、关乎国家发展的大学问,写心存天下、裨益民生的大文章。在半个多世纪的发展历程中,石大学者历经磨难、不言放弃,发扬了石油人“实事求是、艰苦奋斗”的优良作风,创造了不凡的学术成就。

学术事业的发展有如长江大河,前浪后浪,滔滔不绝,又如薪火传承,代代相继,火焰愈盛。后人做学问,总要了解前人已经做过的工作,继承前人的成就和经验,在此基础上继续前进。为了更好地反映学校科研与学术水平,凸显石油科技特色,弘扬科学精神,积淀学术财富,学校从2007年开始,建立“中国石油大学(北京)学术专著出版基金”,专款资助教师们以科学研究成果为基础的优秀学术专著的出版,形成《中国石油大学(北京)学术专著系列》丛书。受学校资助出版的每一部专著,均经过初审评议、校外同行评议、校学术委员会评审等程序,确保所出版专著的学术水平和学术价值。学术著作的出版覆盖学校所有的研究领域。可以说,学术专著的出版为科学研究的先行者提供了积淀、总结科学发现的平台,也为科学研究的后来者提供了传承科学成果和学术思想的重要文字载体。

石大一代代优秀的专家学者,在人类学术事业发展尤其是石油石化科学技术的发展中确立了一个个坐标,并且在不断产生着引领学术前沿的新军,他们形成了一道道亮丽的风景线。“莫道桑榆晚,为霞尚满天”。我们期待着更多优秀的学术著作,在园丁们灯下伏案或电脑键盘的敲击声中诞生,展现在我们眼前的一定是石大寥廓辽远、星光灿烂的学术天地。

祝愿这套专著系列伴随新世纪的脚步,不断迈向新的高度!

中国石油大学(北京)校长



2008年3月31日

前 言

在传统的化工过程中,工艺设计和控制设计在完全分离的两个阶段中进行,存在着脱节的问题,这往往使化工过程无法从整体上达到预期的性能要求。对此,人们提出在化工过程设计阶段就研究过程的可操作性和可控制性性能,即过程控制与工艺设计一体化研究,通过对过程控制与工艺的集成设计,可使得过程设计具有一定的操作弹性,同时,又可以降低设备投资和操作费用。

催化裂化装置是现代炼油厂石油深度加工的主体装置,其过程设计中同样存在着工艺设计和控制设计脱节的问题,因此对催化裂化装置进行过程控制与工艺设计一体化研究具有非常重要的意义。通过对催化裂化装置的动态机理建模,研究催化裂化装置的动态行为,这是催化裂化装置控制分析设计、过程控制与工艺设计一体化研究的基础。本书对工业上常用的催化裂化装置类型建立了严格的动态机理模型,在此基础上,对催化裂化装置进行控制分析和设计,从过程控制与工艺设计一体化研究的角度对催化裂化装置的动态裕量以及控制与工艺集成优化设计问题进行了研究。本书内容涵盖化工动力学、过程控制、化工系统工程等多个学科专业的知识,反映了对催化裂化装置动态机理建模以及过程控制与工艺设计一体化研究的最新进展,对于从事过程控制和工艺设计的科研及工程技术人员,本书具有一定的学术价值和应用价值。

本书以过程控制与工艺设计一体化研究为主线,以催化裂化装置的动态机理建模为基础。共分9章:第1章为绪论;第2章对过程控制与工艺设计一体化研究的基础理论进行全面介绍;第3章介绍催化裂化装置基本动态机理模型,即单提升管单段密相床再生的催化裂化装置动态机理模型;第4章阐述催化裂化装置扩展动态机理模型,包括两段式提升管反应器动态机理模型、两段密相床再生器动态机理模型、前置烧焦罐式高效再生器动态机理模型、催化剂循环系统机理模型、压力系统动态机理模型、分馏塔底和回炼系统动态机理模型等;第5章在催化裂化动态机理模型的基础上,对催化裂化装置的动态特性及稳定性进行了分析;第6章对催化裂化装置进行了常规控制结构的分析与设计,通过混合整数动态优化对催化裂化装置的常规控制结构选择问题进行了求解;第7章运用化工系统工程的方法,基于催化裂化装置的动态机理模型,从操作和控制的角度,用动态优化求解的方法对催化裂化装置的裕量问题进行了动态分析,发现催化裂化装置的动态特性对催化裂化装置的设计裕量有着重要的影响;第8章对催化裂化装置进行过程控制与工艺集成优化设计,给出了催化裂化装置反应-再生系统控制与工艺集成优化设计问

题的数学描述,通过求解非劣解集合对工艺目标和控制要求进行折中处理,得到催化裂化装置的控制与工艺集成优化设计结果;第9章对过程控制与工艺设计一体化研究与催化裂化装置动态建模和控制分析设计的未来发展方向做了展望。

本书系中国石油大学(北京)学术专著系列之一,在此谨向校学术专著出版基金委员会致谢。

过程控制与工艺一体化方面的研究在国内刚刚起步,在国外也仅有十来年的研究历史,希望本书起到一个抛砖引玉的作用,不足之处在所难免,敬请读者提出宝贵意见。

目 录

丛书序

前言

第 1 章 绪论	(1)
第 2 章 过程控制与工艺设计一体化基础	(4)
2.1 背景	(4)
2.2 过程可控性分析	(6)
2.2.1 可控性开环指示	(7)
2.2.2 过程动态特性的经济分析	(8)
2.3 常规控制结构选择	(9)
2.3.1 多回路 PID 控制器超结构	(10)
2.3.2 常规控制结构选择问题的数学描述	(11)
2.4 控制与工艺集成优化设计	(12)
2.4.1 控制和工艺集成优化设计问题的数学描述	(13)
2.4.2 混合整数动态优化算法	(14)
2.4.3 集成优化设计与分步序贯设计的比较	(19)
2.5 合理设计裕量的确定	(21)
第 3 章 催化裂化装置基本动态机理模型	(23)
3.1 数学模型整体考虑	(23)
3.2 提升管反应器动态机理模型	(25)
3.2.1 提升管反应器动态模型的建立	(25)
3.2.2 原料性质对催化裂化反应动力学的影响	(32)
3.2.3 动态数学模型的空间离散化处理	(34)
3.3 汽提段动态机理模型	(36)
3.4 再生器动态机理模型	(37)
3.4.1 再生反应动力学与流化模型	(37)
3.4.2 再生器动态模型	(38)
3.5 考虑纯滞后的催化裂化装置动态数学模型	(40)
3.5.1 催化裂化装置中的纯滞后时间	(40)
3.5.2 纯滞后时间在催化裂化装置动态模型中的体现	(41)
3.6 催化裂化装置数学模型的求解和线性化	(42)

3.6.1	数学模型的求解	(42)
3.6.2	催化裂化装置动态数学模型的线性化	(45)
第4章	催化裂化装置扩展动态机理模型	(50)
4.1	两段式提升管反应器动态机理模型	(50)
4.1.1	第一段提升管动态模型	(51)
4.1.2	第二段提升管动态模型	(52)
4.1.3	两段式提升管反应器汽提段动态模型	(55)
4.2	两段密相床再生器动态机理模型	(56)
4.2.1	第一段再生器动态模型	(56)
4.2.2	第二段再生器动态模型	(59)
4.3	前置烧焦罐式高效再生器动态机理模型	(61)
4.3.1	烧焦罐动态模型	(61)
4.3.2	高效再生器二密相床动态模型	(68)
4.4	两器压力平衡与催化剂循环速率的计算	(71)
4.4.1	待生线路压力平衡	(71)
4.4.2	再生线路压力平衡	(72)
4.4.3	催化剂内循环线路压力平衡	(72)
4.5	压力系统动态机理模型	(73)
4.5.1	沉降器压力动态模型	(73)
4.5.2	分馏塔压力动态模型	(74)
4.5.3	分馏塔顶油气分离罐压力动态模型	(76)
4.5.4	再生器压力动态模型	(77)
4.6	分馏塔底和回炼系统动态机理模型	(78)
第5章	催化裂化装置动态特性及稳定性分析	(80)
5.1	催化裂化装置动态模拟结果	(80)
5.2	催化裂化装置动态特性分析	(93)
5.2.1	动态特性分析	(93)
5.2.2	动态特性分析结论	(97)
5.3	催化裂化装置稳定性分析	(98)
5.3.1	不作任何控制时系统的稳定性	(98)
5.3.2	在控制藏量的条件下系统的稳定性	(103)
5.3.3	系统稳定性分析综合仿真	(113)
5.4	两段式提升管催化裂化装置动态特性及稳定性分析	(116)
5.4.1	两段式提升管催化裂化装置反应温度控制开环动态模拟	(116)
5.4.2	两段式提升管催化裂化装置反应温度控制闭环动态模拟	(118)

5.4.3 两段式提升管催化裂化装置稳定性分析	(120)
第6章 催化裂化装置控制结构分析与设计	(121)
6.1 变量分析	(121)
6.2 催化裂化装置常规控制结构选择问题的数学描述	(123)
6.2.1 催化裂化装置过程动态数学模型	(124)
6.2.2 多回路数字 PID 控制器结构及其动态数学模型	(124)
6.2.3 目标函数	(125)
6.2.4 数学描述	(125)
6.3 混合整数动态优化算法	(126)
6.3.1 求解原理	(126)
6.3.2 简单示例	(128)
6.4 催化裂化装置常规控制结构选择问题的求解结果	(131)
第7章 催化裂化装置设计裕量的动态分析	(137)
7.1 稳态裕量和动态裕量	(137)
7.2 主风裕量的动态分析	(139)
7.2.1 主风稳态裕量的优化计算	(140)
7.2.2 主风动态裕量的优化计算	(141)
7.2.3 主风裕量的实例分析	(144)
7.3 藏量和主风裕量的综合动态分析	(152)
7.3.1 藏量和主风稳态裕量的优化计算	(152)
7.3.2 藏量和主风动态裕量的优化计算	(153)
7.3.3 藏量和主风裕量的实例分析	(156)
7.4 设计裕量与控制性能的关系	(164)
第8章 催化裂化装置控制与工艺集成优化设计	(168)
8.1 控制与工艺集成设计概述	(168)
8.2 催化裂化装置集成优化设计问题的数学描述	(169)
8.2.1 过程动态数学模型	(169)
8.2.2 控制器结构及其动态数学模型	(170)
8.2.3 过程不确定性数学模型	(171)
8.2.4 过程约束	(173)
8.2.5 目标函数	(174)
8.2.6 数学描述	(174)
8.3 催化裂化装置集成优化设计问题的求解方法	(175)
8.3.1 多目标优化	(175)
8.3.2 混合整数动态优化	(177)

8.3.3 权衡	(179)
8.4 集成优化设计结果	(179)
第9章 展望	(189)
附录 催化裂化装置反应-再生系统工艺计算	(191)
再生器燃烧计算	(191)
再生器热平衡计算	(193)
反应器热平衡计算	(195)
再生器烧焦计算	(197)
参考文献	(200)

第 1 章 绪 论

化工过程应该设计为能够在满足所有工艺要求和操作约束的条件下达到经济最优的一个系统,因此,希望设计能在经济最优的稳态点操作。然而,由于实际过程中存在着干扰等不确定因素,在工艺条件变化或存在干扰时,实际过程在操作运行时表现为动态变化,这会导致过程操作偏离稳态最优,甚至无法操作。

对此,人们提出在进行过程设计时,工艺设计的确定应当与过程的动态分析和控制系统的设计结合起来,进行过程控制与工艺设计一体化研究。通过对过程控制与工艺的集成设计,达到过程设计同时具有良好的经济性能和控制性能,在降低设备费用和实现良好的过程操作之间取得和谐的平衡,其意义是非常明显的。

人们很早就意识到进行过程控制与工艺设计一体化研究的优势,在早期的化工系统工程研究中对此方面的问题已经有了初步的数学描述。但由于过程控制与工艺集成设计需要求解规模很大的混合整数动态优化问题,而过程本身的复杂性导致其求解十分困难,在计算机运算速度没有获得明显提高以前,对其求解基本没有可能。

20 世纪 90 年代中期以后,随着计算机运算速度的极大提高,优化算法也获得进一步改善,过程控制与工艺设计一体化研究,特别是过程控制与工艺集成优化设计,在国外得到较大发展。Pistikopoulos、Perkins、Mohideen、Bansal、Kookos、Sakizlis、Schweiger、Floudas 等学者在这方面的研究取得了很多进展,特别是英国帝国大学对控制和工艺集成优化设计问题给出了统一的求解框架和求解方案,提出了有效的动态优化算法,开发了相关的流程模拟和动态优化软件,并在精馏塔的工艺设计上进行了应用,降低了过程的投资费用和操作费用,同时改善了系统的控制性能,使过程操作逼近了稳态最优点,具有更高的经济效益。

经过近十几年来的发展,国外过程控制与工艺设计一体化研究已经具备了一定的理论基础,在实际应用中也初步显示了优势,但在国内研究方面尚存在相当大的空白。主要原因是过程控制与工艺设计一体化研究需要控制、化工、计算机等多学科多专业的知识,而国内控制学科和化工学科分别设置,对于主要从事过程控制的科研人员来说,由于对炼油、化工过程了解不够,无法进行此方面的研究;对于从事工艺设计的科研人员来说,由于对过程控制也了解不够,对过程动态对工艺设计的影响不够重视,对化工系统工程方面的研究更侧重于研究过程稳态特性,包括过程灵敏度分析、稳态设计裕量的确定等。故过程控制与工艺设计一体化研究在国

内鲜见报道。

流化催化裂化装置(fluid catalytic cracking unit, FCCU)是现代炼油厂石油深度加工的主体装置,其中最重要和最复杂的部分就是反应-再生系统(简称反再系统或两器),其设计和控制是一个富有挑战性的课题。一方面从设计的角度看,催化裂化装置许多参数随时间变化并存在不确定性,如原料的频繁改变、生产方案调整、设备状况的变化,要求在过程设计时必须留出足够的设计裕量,以保证在过程条件发生变化时操作控制能够适应这些变化,满足生产和操作要求;另一方面从控制的角度看,催化裂化装置多目标、多变量互相关联,动态特性较为复杂,同时要求运行必须安全可靠,变量存在严格的约束限制,可调措施少,控制的难度也比较大。

当前催化裂化装置的过程设计存在着工艺设计和控制设计脱节的问题。工艺设计主要是在稳态条件下进行,工艺人员通常是根据设备条件以及工艺条件的可能变化,参考设计经验和一些设计准则来决定设计裕量的大小,对于为实现良好的操作而留出的裕量并没有进行自觉和定量的分析。于是,裕量太大,操作弹性虽然大,但设备投资增加;裕量太小,操作困难,有时无法满足过程条件的变化。

同时,由于实际过程在操作运行时表现为动态变化并且存在一定的控制系统,在工艺条件变化或存在干扰时,过程变量一般表现为随时间缓慢变化,并有可能出现衰减振荡,而非工艺设计中想像的阶跃或直线变化,设计裕量中应当考虑这种动态调节过程,否则操作将会是不可实现的。因此,在进行工艺设计时,设计裕量的确定应当与过程的动态分析和控制系统的设计结合起来,进行过程控制与工艺设计一体化研究。

由于催化裂化装置本身的复杂性,动态机理建模十分困难,模型维数高,不确定因素多,优化求解也比较困难,故对催化裂化装置进行过程控制与工艺设计一体化研究在国内外均未见报道。作者从 20 世纪 90 年代开始从事对催化裂化装置动态机理建模的研究,到目前已建立比较完善的各种类型的催化裂化装置的动态机理模型,模型精度较高,足以满足过程控制以及操作分析的各方面要求,已用于多套催化裂化装置的先进控制,这为催化裂化装置的过程控制与工艺设计一体化研究打下了坚实的基础。

本书从工艺设计和过程动态学两个角度对各种类型的催化裂化装置的动态机理模型进行了较为全面的分析与讨论。首先,建立最基本的单提升管、单段密相床再生的催化裂化装置动态机理模型,在此基础上建立包括两段式提升管、两段密相床再生、前置烧焦罐两段再生、催化剂循环系统、压力系统、分馏塔底和回炼系统等单元在内的扩展动态模型;然后,在催化裂化装置动态机理模型的基础上,以单提升管前置烧焦罐式催化裂化装置为例,对催化裂化装置动态机理模型进行阶跃测试,分析其动态特性,对非线性动态机理模型进行线性化,求取稳态工作点附近线性动态模型的特征值,分析其稳定性,并进一步对两段式提升管前置烧焦罐式催化

裂化装置的动态特性及稳定性进行了分析。

在催化裂化装置动态机理模型的基础上,可以对催化裂化装置进行过程控制与工艺设计一体化研究,对催化裂化装置的控制结构、设计裕量、集成优化设计等问题进行探讨。

本书首先对催化裂化装置的常规控制结构选择问题进行了分析和优化求解,然后通过动态分析的方法对催化裂化装置的设计裕量进行研究,主要针对催化裂化装置中的再生器进行设计裕量的动态分析,对再生器主风和藏量的设计裕量进行定量的分析和估算;最后对催化裂化装置进行控制与工艺集成优化设计,获得具有稳态工艺最优和良好动态性能的过程系统,在降低设备投资费用和实现良好的过程操作之间取得和谐的平衡。

本书基于催化裂化装置动态机理模型,在过程控制与工艺设计一体化研究方面主要有以下研究内容:

(1) 以单提升管单段再生的催化裂化装置为例,给出了常规控制结构选择问题的数学描述,将其转化为带有 0-1 变量约束的混合整数动态优化问题,并通过将 0-1 变量松弛化、引入附加等式约束的方法对其进行了求解,得到了催化裂化装置反应-再生系统多回路 PID 控制器优化的控制结构和控制器参数。

(2) 以单提升管单段再生的催化裂化装置为基础,分别用稳态优化和动态优化的方法对催化裂化装置再生器在不同控制系统、工艺条件和设备状况变化条件下的主风与藏量的稳态裕量和动态裕量进行了求解,研究不同过程动态特性以及控制系统对设计裕量的影响。

(3) 从过程动态模型、控制结构模型、过程不确定性模型、过程稳态起始点约束、生产要求和操作约束以及目标函数等方面给出了催化裂化装置反应-再生系统控制与工艺集成优化设计问题的数学描述,通过 ϵ -约束法将控制目标函数转化为一系列控制要求约束,求解非劣解集合进行折中处理,找到兼顾工艺要求和控制要求的催化裂化装置优化设计方案。

目前,随着流程工业对产品质量、经济效益和环境保护要求的日渐提高,越来越多的因素迫使工程设计人员必须在过程设计阶段考虑过程动态控制性能的影响;而且工业装置趋向于大型化、集成化、复杂化发展,各个工业单元之间具有复杂的相互影响,这些工业装置对于过程的动态性能和控制系统的设计提出了更高的要求,在过程工艺设计同时考虑过程可操作性和控制性能变得日益必要。过程的控制性能和动态操作在过程设计中的重要性日益提高,过程控制与工艺设计一体化研究必将受到国内外工艺设计领域和过程控制领域内研究人员的重视。

第 2 章 过程控制与工艺设计一体化基础

本章对过程控制与工艺设计一体化的基础理论进行了概括和阐述,从过程可控性分析、常规控制结构选择、过程控制与工艺集成优化设计、合理设计裕量的确定等方面介绍了其主要研究内容、基础理论、近年来的研究进展和取得的成果,分析了它们的优点和存在的问题,并对其未来发展进行了展望。

2.1 背 景

化工过程应该设计为能够在满足所有工艺要求和操作约束的条件下达到经济最优的一个系统,因此希望设计在经济最优的稳态点操作。然而,由于实际过程中存在着各种不确定因素,经常导致过程操作偏离稳态最优,甚至无法操作,因此过程的可操作性也是过程设计需要考虑的重要方面。

传统的化工过程工艺设计和控制设计在完全分离的两个阶段中进行,首先由化工工程师基于稳态模型和稳态设计方法,利用现有的稳态模型计算操作参数、设备结构参数,确定工艺设计;然后,在过程工艺设计完成以后由控制工程师以此作为被控对象,设计配套的控制系统使过程在设计的最优点保持稳定的操作,我们称其为过程工艺与控制序贯设计方法 (sequential design and control),具体过程如图 2-1 所示。

传统的过程设计方法只在第二阶段控制设计时才会考虑过程的可操作性。然而,一个系统能够控制得如何,首先取决于被控过程的特性。根据稳态最优准则设计的过程往往由于设计裕量不足而可操作性较差,在外界扰动比较严重的情况下可能无法操作。所以,上述将化工装置和控制系统设计分别考虑的做法往往使化工过程从整体上达不到预期的性能要求;为了满足更加平稳的生产操作要求,真正实现最优的工艺设计,必须结合控制与工艺,从整体上考虑化工过程的设计、操作、控制和优化。

此外,还有其他的因素迫使工程设计人员必须在过程设计阶段考虑过程动态控制性能的影响,如越来越严格的产品质量和环境要求往往迫使过程需要在接近操作约束处进行,市场条件的变化要求改变过程操作以取得更高的经济效益,要求过程设计必须能够适应以上的变化;而且工业装置趋向于大型化、集成化、复杂化发展,各个工业单元之间具有复杂的相互影响,这些工业装置对于过程的动态性能

和控制系统的的设计提出了更高的要求。基于以上这些原因,过程的控制性能和动态操作在过程设计中的重要性日益提高。因此,在过程工艺设计的同时考虑过程可操作性和控制性能变得日益必要。

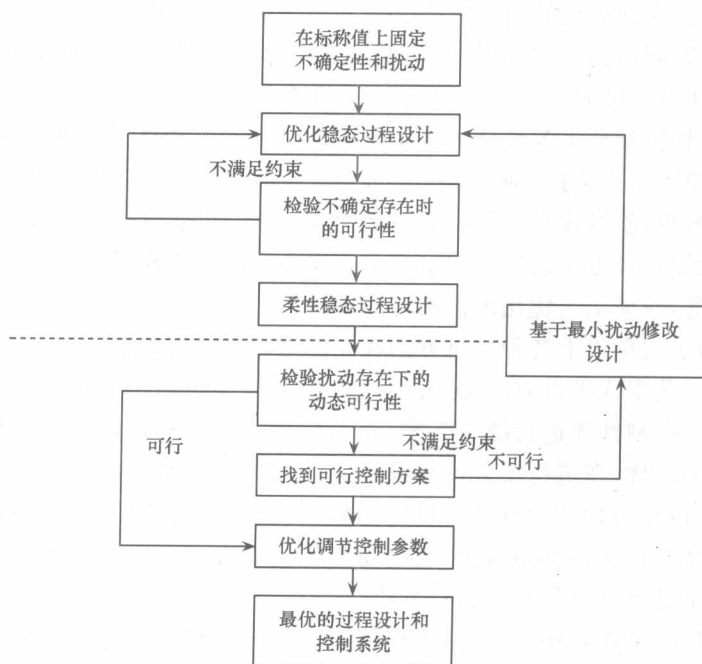


图 2-1 过程工艺与控制序贯设计方法

人们为了解决这一问题,提出在早期设计阶段,即化工过程工艺设计阶段,就研究过程的可操作性和控制性能,特别是对过程动态特性进行研究,这就是过程控制与工艺设计一体化研究问题。

从 20 世纪 90 年代开始,人们日益重视到过程控制与工艺设计一体化研究的重要性,已经提出一系列的方法用来确定过程控制和工艺设计的相互关系。研究方法主要集中在以下几个方面:

首先,人们容易想到的一个主要方法就是进行过程动态性能的仿真研究,以确定所设计的过程是否满足控制的特性要求。工程师通过进行多次动态仿真试验,采用试差(trial and error)的办法获得具有“良好”性能(如较低的操作费用和快速的动态响应)并满足过程操作约束的一系列过程参数。尽管这一办法简单而又直接,但这样不仅需要化工过程完善的动态模型;而且需要针对不同的输入、干扰、操作条件、控制器结构和控制器参数进行一系列的仿真实验,不仅费时,而且参数的搜索范围非常有限,特别是在参数数目增长的条件下,结果不能保证所得到的是

一个最优设计,甚至很难使所有约束都得到满足。

其次,对工艺设计所得的过程进行可控性分析,对不同设计方案的操作特点进行比较和评价,目的在于估计给定过程受控所能获得的利益,以及改善过程动态性能,从而在工艺设计最优的同时保证过程的良好操作性。这类可控性分析的方法简单直接,可以应用到大型过程;但是可控性指标和工艺设计参数没有直接联系,不同的可控性指标可能存在冲突,在应用时存在很大限制。

再次,过程控制与工艺设计一体化研究的另一个主要内容是对工艺所得的过程进行常规控制结构选择,确定多变量过程底层多回路常规 PID 控制器的控制结构及控制器参数,使过程具有较好的控制性能,及时克服实际过程中的各种干扰因素,使过程能够在接近工艺设计的最优稳态操作点附近操作,减少干扰引起的动态经济性能降低,保证工艺优化设计的可实现性。

最后,为了避免以上各种分析方法存在的诸多缺陷和限制,人们进一步提出了过程控制与工艺集成设计方法(simultaneous design and control)。该方法对过程的经济性能和控制性能进行统一考虑,要求设计方案具有良好控制性能的同时达到经济指标的最优,在进行工艺过程设计同时进行控制系统的设计。在设计过程中,考虑一个以经济性能为基础的目标函数,纳入可能的外界干扰,用动态模型描述系统在干扰条件下的动态行为,通过动态优化的方法获得在满足所有设计和操作约束条件下达到经济最优的过程系统。

从 20 世纪 90 年代中期开始,过程控制与工艺集成设计方法在国外得到很大发展,已经初步应用到两组分精馏塔(Bansal et al., 2000c)、反应精馏塔(Gerorgiadis et al., 2002)、多组分间歇精馏塔(Sharif et al., 1998)、废水处理(Walsh et al., 1994)等工业过程的设计中,通过对工艺和控制的一体化设计,降低了过程的投资费用和操作费用,同时改善了系统的控制性能,使过程操作逼近了稳态最优,具有更高的经济效益。

2.2 过程可控性分析

通过对工艺设计所得的过程进行可控性分析,从而对不同设计方案的操作特点进行比较和评价,从中挑选操作性能较好的设计方案,在工艺设计优化的同时保证过程的良好操作性。这类可控性分析的方法简单直接,目前也得到比较多的应用。

目前可控性分析的研究主要集中在以下几类:

(1) 关于过程可控性开环指示(open-loop indicator)的分析方法,如右半平面零点(RHP zero)、时间纯滞后(time delay)、相关增益矩阵(relative gain array, RGA)和系统条件数(condition number of the system)等(Perkins et al., 1985;