

# 工业大系统优化 与产品质量控制

◎ 万百五 著



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 工业大系统优化与产品质量控制

万百五 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书是系统介绍工业大系统、大工业过程计算机在线优化控制和工业生产的产品质量控制的专著,内容包括稳态模型的辨识、产品质量模型和产品质量控制模型、基于模型的优化新算法、系统优化与参数估计集成研究法的新算法、广义稳态优化控制、具有模糊参数时递阶稳态优化控制的各种分解-协调算法、迭代学习控制以及上述诸方面的应用实例。

本书可供高等院校自动控制、仪表与自动化、系统工程、过程控制等专业的研究生、教师以及从事生产过程控制和管理的科技人员阅读,对在化工、石油、冶金、金属加工、制造、轻工业等领域从事大型公用事业管理和大工厂产品质量控制的科技人员也有参考价值。

### 图书在版编目(CIP)数据

工业大系统优化与产品质量控制/万百五著. --北京:科学出版社,2003  
ISBN 7-03-011507-4

I. 工… I. 万… III. ①工业生产-计算机控制②工业产品-产品质量-质量控制 IV. F406

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 042538 号

责任编辑:马长芳 李淑兰/责任校对:刘小梅  
责任印制:刘秀平/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>

丽源印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2003年9月第一版 开本:787×1092 1/16

2003年9月第一次印刷 印张:20 1/2

印数:1-2 000 字数:483 000

定价:45.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

## 前 言

多年来,工业大系统计算机在线稳态优化控制的理论、技术和应用一直是一个热门领域,蕴藏着极大的经济效益,在国内外有着广泛的研究、开发和应用。国内已有四川省化工总厂的合成氨装置、沧州化肥厂的合成氨装置和尿素装置、上海炼油厂的催化裂化装置等一批计算机在线稳态优化成功的先例。工业过程在实现计算机控制化后,其计算机在线稳态优化控制则代表着自动化的进一步发展方向。

本书是一本讨论工业大系统计算机在线优化控制和工业生产的产品质量控制的新专著,是在我和黄正良教授的专著《大工业过程计算机在线稳态优化控制》(科学出版社,1998年)一书完稿后,我和课题组研究工作的新发展、新成果的汇集,但又独立成册。《大工业过程计算机在线稳态优化控制》一书首印1200册,第二年7月即告售罄。我认为,这是因为国内外还没有这样一本基于大工业过程在线稳态递阶优化控制的大系统理论与应用的专著。它是从理论和实践两个方面对大工业过程在线稳态递阶优化的最新研究成果,特别是对我和课题组从20世纪80年代初到90年代初10余年的研究成果作了较详细的介绍。该书曾得到国内外某些研究单位、大学和工业部门的注意,并在研究和技术工作中加以引用,而且作为优秀参考资料向专业会议的与会代表推荐。

我和课题组在这方向上的研究始于1979年。这一年国家教育委员会在全国几所著名高等院校设置系统工程研究所,西安交通大学是其中之一。研究所之下成立有大系统理论和应用研究室,我被任命为主任。1980~1981年我被国家派往英国进修,作为访问高级研究员,参与了英国伦敦City University的控制工程研究中心P. Roberts教授所领导的递阶控制小组,并进行合作研究工作,从此开始了该中心与作者所在单位——西安交通大学系统工程研究所10余年的科研合作。双方多次互派学者访问,学术交流迄今不断。近20年来我四次访问该中心,除参与合作研究外,还曾应聘担任访问教授。Roberts教授也三次来我研究所访问、讲学。这种学术交流给彼此带来许多裨益。

我领导的大系统研究课题组20多年来共发表学术论文200余篇,取得了一批在工业过程和工业生产线优化控制和产品质量控制理论和实际应用的重要成果。“工业过程稳态大系统优化理论研究”获得1990年国家教委科技进步二等奖;“工业过程随机稳态优化控制理论与算法”获得1994年国家教委科技进步二等奖;“利用动态信息的随机稳态最优控制方法”获得1991年陕西省科学技术协会授予的陕西省自然科学优秀学术论文一等奖。我的前博士生、西安理工大学副校长刘丁教授在大电站锅炉回转式空气预热器漏风系统智能控制的博士论文中,采用了我的神经网络稳态建模及稳态优化方法,对漏风系统建立了神经网络稳态模型并对之进行在线稳态智能优化控制。实际应用表明,他的研究成果成功地解决了工程实际问题,已在全国20多座电站投入实际运行,经济效益与社会效益显著。为此,以他为第一完成人,以“漏风系统稳态智能优化控制”为核心的“电站锅炉空气预热器间隙测控系统”项目荣获1997年国家科技进步三等奖。

阅读本书前,要求读者对“过程控制”、“计算机控制”、“随机过程”、“系统辨识”以及

《大工业过程计算机在线稳态优化控制》一书有一定的了解。本书的某些证明运用了泛函分析等高深的数学知识,初读者或偏重应用的读者,可以略过这些证明。

本书集中反映了近 10 年来我和课题组继续对工业大系统计算机在线递阶优化控制和产品质量控制进行研究取得的一批最新成果。

第一章简单阐述工业大系统的数学描述和优化问题的提法,并扼要介绍近 10 年来我和课题组取得的一批最新研究成果。

第二章先介绍工业系统稳态模型的稳态辨识方法,以补充前书中以动态信息建立稳态模型的辨识方法;其次介绍集成辨识的新方法,它用来得到有些非线性动态工业系统的动态模型;另外还阐述了应用自适应模糊推理神经网络的建模。

第三章介绍工业过程和工业生产线的产品质量模型和产品质量控制模型的新概念,并研究了基于高维 BP、小波神经网络模型和模糊神经网络模型的辨识方法。

第四章阐述工业大系统基于模型的优化新算法,其中包括不可分稳态序贯工业大系统的分解-协调算法、可分非凸稳态工业系统的递阶全局优化算法、不可分稳态工业大系统的递阶优化控制算法、基于知识的混合算法以及稳态工业大系统多目标递阶优化控制算法等。

第五章介绍系统优化与参数估计集成研究法的新算法。首先介绍基于神经网络的系统优化与参数估计集成研究法 (ISOPE 研究法),然后详尽介绍非线性动态大工业系统的系统优化与参数估计集成研究法 (DISOPE 研究法)。研究法随着所假定的不同粗动态模型而不同。

第六章介绍工业过程广义稳态优化控制。广义稳态是随机稳态概念的进一步推广。本章对工业过程广义稳态及其优化控制做了深入的分析 and 系统的研究,包括工业过程稳态的平均度量、工业过程广义稳态优化控制及其算法、广义稳态优化控制算法的收敛性和最优性研究、工业过程混沌稳态研究等。

第七章介绍大工业过程具有模糊参数、模糊模型时递阶稳态优化控制问题、各种分解-协调算法。由于大工业过程模型参数难以确切辨识,所以采用模糊模型的研究方法非常重要,而且优化控制的效果比采用精确模型的方法要好。本章还对上述过程具有全局反馈的各种分解-协调算法进行了分析和讨论。

第八章讨论大工业过程递阶稳态优化控制时迭代学习控制的重要应用。它使得大工业过程的各控制器设定点的变动量能一次全量加上,并保持各子过程的动态进程有优良的动态品质。本章介绍工业过程控制系统具有严重非线性、噪声以及大工业过程的迭代学习控制问题。对算法的可达性和收敛性等也进行了分析、论证。

第九章介绍工业过程与生产线在线优化与产品质量控制应用实例。其中有:大电站锅炉回转式空气预热器漏风系统智能控制和在线稳态智能优化控制;闪速冶炼过程的冰镍产品质量控制以及钢板多辊热连轧机的板材质量控制;炼油蒸馏装置的智能优化、质量控制等。

第十章结语,是对全书的总结和对工业大系统优化与产品质量控制研究和应用的展望。

本书由我执笔并引用、摘录课题组以前博士研究生们的合作论文,或由他们协助写成部分章节的初稿,再由我仔细修改和统稿,因此也将他们列为撰写人(见本书目录)。本书

每章后的评注均由我撰写。此外,阮小娥博士是我撰写和出版本书的重要助手,她为撰写、校对、出版本书付出了辛勤的劳动。

参与我课题组这一研究工作的还有西南工学院、我以前的博士生黄正良教授和他课题组的刘知贵副教授等;我的课题组成员除于乃润、牟建华、李换琴等博士生外,还有夏常第博士后研究人员以及硕士研究生郑磊、高红霞、贾磊。感谢他们的新研究成果为本书提供了具有创新性的内容。所以本书是集体成果,融合了我和上述诸位同事、同行以及博士后、研究生们最近 10 年的心血。

本书在写作上既注意说明基本概念、面向应用,又注意理论上较严格的论证,以适应程度不同读者的要求。但是受篇幅所限,一些严格的数学证明或材料不得不略去。感兴趣的读者可自行查阅有关文献。

20 年来,我的研究工作得到所在单位西安交通大学给予的经费资助,国家自然科学基金委员会多个自然科学基金的支持、教育部博士点基金的支持、国家高技术发展 863 项目的研究基金支持以及浙江大学工业控制国家重点实验室两个研究基金支持,使得这些研究得以完成,在此向上述五家单位表示衷心的感谢。我还要诚挚感谢协作研究的两个单位:上海宝山集团宝钢公司自动化研究所和金川有色金属公司自动化研究所,它们给我和课题组以大力的支持和帮助。

此外,为力求本书内容全面,我在本书中引用、摘录、简介了浙江大学工业控制研究所周春晖、高衿畅教授,中国科技大学自动化系孙德敏教授研究、开发的工业过程稳态优化控制的成功实例,特表示深切感谢。

中国科学院科学出版基金对本书的出版给予了资助,科学出版社李淑兰、马长芳同志为本书出版做了许多工作,在此一并致谢。

谨以此书献给我国自动化界和我的母校——西安交通大学,以此迎接 21 世纪中华民族的伟大复兴。

由于作者水平所限,书中错误、遗漏之处在所难免,恳望读者批评指正。

万百五

于西安交通大学系统工程研究所

# 目 录

前言	万百五
<b>第一章 引论</b> .....	1
1.1 大系统、工业大系统及其优化.....	1
1.2 工业大系统及其稳态优化的数学描述 .....	4
1.3 工业大系统递阶稳态优化的三种协调方法 .....	6
1.4 工业大系统递阶稳态优化的迭代校正 .....	9
1.5 系统优化与参数估计集成研究法.....	12
1.6 递阶稳态优化的五个发展阶段.....	14
1.7 工业大系统递阶稳态优化近十年的进展.....	18
参考文献 .....	20
	万百五
<b>第二章 工业系统模型的稳态辨识与集成辨识</b> .....	23
2.1 线性工业大系统稳态模型的稳态辨识.....	23
2.2 动态大工业过程稳态模型的分散稳态辨识.....	29
2.3 非线性工业系统的集成辨识.....	41
2.4 双线性 Hammerstein 系统的集成辨识.....	43
2.5 一类双线性 Hammerstein 系统的集成辨识.....	48
2.6 Wiener-Hammerstein 非线性系统的集成辨识 .....	50
2.7 应用自适应模糊推理神经网络的辨识.....	53
2.8 评注.....	59
参考文献 .....	60
	万百五、刘知贵、孔金生、罗旭光
<b>第三章 工业生产产品的质量模型和质量控制模型的辨识</b> .....	62
3.1 数据库知识发现技术.....	62
3.2 应用 KDD 于工业生产线的产品质量研究 .....	64
3.3 基于高维输入 BP 神经网络的生产线产品质量模型 .....	68
3.4 基于 BP 神经网络的生产线产品逆质量模型和质量控制模型 .....	78
3.5 基于模糊神经网络的生产线产品质量模型.....	80
3.6 基于多种产品质量模型的新产品新工艺设计.....	84
3.7 工业过程的产品质量模型.....	88
3.8 工业过程产品的质量控制器.....	95
3.9 评注.....	96
参考文献 .....	97

万百五、邢进生、万维汉

<b>第四章 工业大系统不可分、全局优化与多目标优化问题研究</b> .....	99
4.1 不可分稳态序贯工业大系统的分解-协调算法 .....	99
4.2 可分非凸稳态工业大系统的全局递阶优化 .....	106
4.3 不可分稳态工业大系统的递阶优化控制算法 .....	112
4.4 非凸稳态工业大系统基于知识的混合算法 .....	118
4.5 稳态工业大系统多目标递阶优化控制算法 .....	123
4.6 评注 .....	130
参考文献.....	131

万百五、钱富才

<b>第五章 系统优化和参数估计集成研究的新算法</b> .....	133
5.1 基于神经网络稳态模型的改进 ISOPE 算法 .....	133
5.2 基于动态神经网络模型的改进 ISOPE 算法 .....	136
5.3 基于时变线性模型的非线性时变连续系统 DISOPE 算法 .....	141
5.4 基于分段线性化多模型的非线性离散动态系统 DISOPE 方法 .....	148
5.5 具有不等式约束的非线性离散动态系统 DISOPE 方法 .....	156
5.6 非线性动态大系统 DISOPE 递阶算法 .....	160
5.7 评注 .....	169
参考文献.....	170

万百五、李俊民、孔金生

<b>第六章 工业过程广义稳态优化控制</b> .....	173
6.1 从工业过程的随机稳态到广义稳态 .....	173
6.2 工业过程广义稳态的平均度量 .....	174
6.3 工业过程广义稳态优化控制及其算法 .....	181
6.4 广义稳态优化控制算法的收敛性和最优性研究 .....	188
6.5 基于 AFNI 网络的工业过程广义稳态建模及其优化控制 .....	191
6.6 评注 .....	195
参考文献.....	196

万百五、罗旭光

<b>第七章 大工业过程的模糊稳态优化</b> .....	198
7.1 引言 .....	198
7.2 大工业过程的模糊价格协调法 .....	198
7.3 大工业过程的模糊直接协调法 .....	209
7.4 大工业过程的模糊混合协调法 .....	213
7.5 具有矩形模糊参数的大工业过程价格协调法 .....	218
7.6 具有模糊约束的大工业过程价格协调法 .....	221
7.7 基于模糊模型的大工业过程价格协调法的收敛性 .....	224
7.8 评注 .....	231
参考文献.....	232

顾佳晨、万百五



<b>第八章 大工业过程的迭代学习控制</b> .....	234
8.1 工业过程稳态优化中迭代学习控制的特点和结构 .....	234
8.2 非线性工业过程稳态优化中的迭代学习控制 .....	237
8.3 具有滞后的饱和非线性工业过程的迭代学习控制 .....	244
8.4 工业过程稳态优化中的滤波型迭代学习控制 .....	248
8.5 大工业过程的迭代学习控制 .....	255
8.6 多输入-多输出工业过程以及迭代学习算法增益的优选等问题 .....	269
8.7 评注 .....	270
参考文献 .....	271

阮小娥、万百五

<b>第九章 工业大系统在线优化与产品质量控制应用实例</b> .....	272
9.1 空气预热器供风系统的模糊控制、模型辨识与稳态优化控制 .....	272
9.2 闪速炉的神经网络冰镍质量模型与稳态优化控制研究 .....	278
9.3 热连轧机板材的高维输入神经网络质量模型(一) .....	283
9.4 热连轧机板材的高维输入神经网络质量模型(二) .....	288
9.5 热连轧机的基于板材各类质量模型、质量控制模型的板材质量设计 .....	294
9.6 基于小波神经网络的生产线产品质量模型 .....	298
9.7 闪速炉冰镍的 TSK 质量控制模型 .....	302
9.8 丙烯腈装置的自适应在线稳态优化 .....	306
9.9 炼油厂常压塔的产品质量协调控制和优化决策 .....	308
9.10 评注 .....	311
参考文献 .....	312

万百五、刘丁、邢进生、万维汉、李换琴

<b>第十章 结语</b> .....	314
参考文献 .....	316

万百五

# 第一章 引 论

## 1.1 大系统、工业大系统及其优化

大系统按其自然属性,可分为工业大系统、经济大系统、水利(水资源)大系统、生态大系统、环境大系统等等。本书是研究工业大系统的专著。工业大系统也有许多种类,如电力大系统、冶金大系统、化工大系统、轻工业大系统等等。工业大系统中的典型代表,一类为大工业过程(large-scale industrial process),另一类为各种制造、加工生产线(manufacturing or production line)。而大系统按其时间特性可分为动态大系统和稳态大系统。事实上,工业大系统中存在着各种物料的生产、加工以及各类快、慢扰动,所以其动态性质是绝对的,而稳态性质则是工业大系统在某些假定下的抽象,是相对的。

大工业过程是指以化工、石油化工、冶金、制药等为代表的大型车间或企业。它们总是进行着连续生产,从产品生产的角度来看,长期地处于某种稳态工况下运行。这类大工业过程是一类特殊的大系统,称为稳态大系统(steady-state large-scale systems),或稳态大工业过程。它们的优化控制问题,称为大工业过程的稳态优化控制。

制造、加工生产线是指以金属、纸张等制造、加工的大型生产线、计算机集成制造系统(CIMS)、柔性制造系统(flexible manufacturing system)等。它们在“大系统理论与应用”这个研究方向中称为串联型(serially connected)工业大系统。一般地,人们注意研究它们的动态,当然它们也有稳态。研究动态,是指对单个工件加工的研究,如制造、加工进程中的降低能耗问题等;而研究稳态,是指对一大批工件加工的研究,如产品质量分析和建模等。

工业大系统由一些相互连接的子系统组成。例如,合成氨生产过程就是一个大工业过程,它由转化、变换、吸收、甲烷化、压缩、合成等六个主要子过程组成。它们的稳态工况是由一系列物理量如温度、压力、液位等的值所规定,而后者由子过程的控制器(常规的控制器或电子计算机控制)的设定点(controller set-points)所决定<sup>[1]</sup>。

钢板材连铸、热连轧生产线是工业大系统的另一实例,即生产要历经炼铁、炼钢、连铸、热连轧等子系统才能完成;而子系统的工况由子系统的控制器所决定,或者由一些由计算机设定的决策变量(如初轧阶段温度,精轧阶段温度等)所决定。

大系统的各子系统之间有着各种连接。例如,大工业过程中有着管道连接,运送着固体、液体或气体形式的原料、成品、半成品和子过程生产后的剩余物。而制造、加工生产线中有着各类传送带或运输装置。从大系统理论的研究角度来看,这称做“关联”(interconnection)。

对于稳态工业大系统而言,稳态的工况决定着它的生产效益。例如,人们在大工业过程的设计时总是将它的稳态工况处于效益最优的工况点,这称为最优稳态工况。稳态大工业过程的特点是:工况的短暂波动、偶发的外界扰动在子过程控制器的作用下很快回到原来的工况点或其附近。控制器设定点的变动和外界扰动引起的暂态进程与整个生产周期相比是很短的,稳态工况是影响生产效益的决定因素。工业过程稳态优化控制的目的是为

了克服环境变化、各种原材料和触媒剂成分变化等因素形成的慢扰动,使工业过程运行于最优工况之下,以达到增加产量、减少消耗、提高产品质量的目的。稳态优化控制就是要在各种慢扰动作用下,在大工业过程的工况偏离最优点时,寻找甚至搜索这个最优工况点,并通过改变子过程控制器的设定点将大工业过程重新置于最优工况点。

工业大系统的稳态优化或最优工况,需要用—个目标函数(objective function)来定量表征。它可以是对利润、产量、能源使用效率等取极大值,或者是对能耗、原料消耗等取极小值。最优工况点的寻找或搜索在数学上是一个求解最优化(optimization)问题,它是在—定条件下进行的,这种条件称做“约束”(constraints)。这个最优化问题是一个静态优化,即将工业大系统在稳态时的行为表征量以代数方程式和不等式表示。这就是等式约束和不等式约束。其中工业大系统和子系统的数学模型就是等式约束。因为方程式中的一些量很难测量或量化,因此找到的往往仅是一个近似模型。不等式约束往往涉及变量在工业系统的上限和下限,是任何优化方案都不能违反的。

所谓优化问题就是依据过程的数学模型,在约束条件下优化其目标函数。从数学角度来看,这类稳态优化问题常常是一有约束的非线性规划问题。目前在工业系统优化求解中都采用微型电子数字计算机。对于工业大系统,一般都采用分布式计算机控制系统(distributed computer control systems)用下位机来完成对子系统的计算机控制(用作子系统控制器),同时在每个子系统它又兼作优化计算之用(用作子系统的局部决策单元)。所以对工业大系统的稳态优化,上述优化问题的求解都是以子系统为单元进行的。因此求出子系统优化解以后要将结果传输给上位机(协调器),而由它作出权衡是否达到全局最优;若是,则停止计算并命令各局部决策单元将各新决策变量值(有关控制器的新设定值)同时加到实际工业大系统中去,经过一段暂态以后,系统趋向稳态,这时它处于新最优工况;若否,则上位机(协调器)通过对协调策略的计算,对下级各局部决策单元发出干预信息,要求它们按新的要求重新优化,直到达到全局最优为止。这样便结束一次优化计算,即寻找子系统控制器新设定值的进程。由于慢扰动的存在,经过—段时间以后,系统又开始偏离它的最优工况,这样寻找最优设定值的进程周期性地重复进行,这个周期称为优化周期,由设计者根据工业大系统暂态的历时、慢扰动变化的快慢等因素决定。

从以上叙述可以看出,工业大系统的稳态优化或寻找最优工况点,是以分解-协调的形式进行的。由于工业大系统的复杂性和变量众多,寻找甚至搜索最优工况点的寻优变量或称决策变量(或操作变量)也很多。这样形成的大型有约束的非线性规划问题,求解较费时。近年来由于计算机的计算速度和存储容量大大提高和增大,求解速度已大大加快。但是人们已采用了分布式计算机控制系统,它本身就具有分散的多套下位机。这样,系统的控制和优化仍在分解成子系统的基础上进行,便于提高计算机控制和优化实施的快速性、可靠性。其结构框图如图 1.1 所示。

在图 1.1 中,工业大系统被分解成  $N$  个子系统,它们相互按生产的组织连接,这种连接以关联矩阵  $H$  表示,具体将在下节加以阐明。每个子系统都受各自的控制器控制,而分布式计算机控制系统所属的子系统既承担着工业子系统控制器的任务,同时又承担着该工业子系统的局部决策单元的任务。各局部决策单元存有各自工业子系统的数学模型和约束,并在这个基础上求解子系统的优化问题。分布式计算机控制系统的上位机承担着协调器的任务,从而形成了金字塔式的递阶结构。

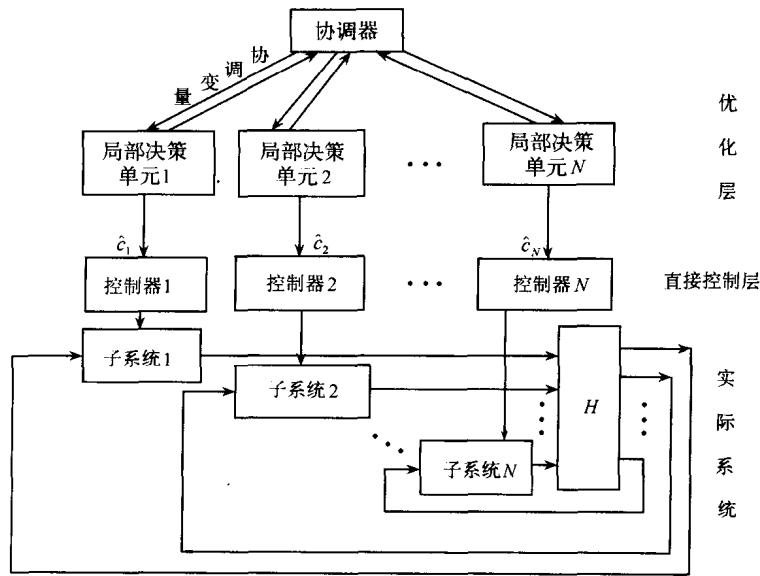


图 1.1 工业大系统的稳态优化的结构框图

这样的递阶结构可分为三层：下层是实际系统(层)，中层是直接控制层，上层是优化层。而优化层又分为两级：局部决策单元级(下级)和协调器级(上级)。下层只受相应的上层直接控制，而同层或同级横向之间没有信息交换。

工业大系统递阶稳态优化的另一个关键问题是协调。协调器的任务是通过通过对下层各局部决策单元的干预，来保证它们分别找到的决策能满足整个工业大系统的总体目标函数最优化的要求。因此，协调器不断地和下级局部决策单元交换信息，同时按一定的协调规则进行计算，并发出对各个子系统局部决策单元的干预信息(协调作用)。

工业(大)系统稳态优化是一项有生命力的技术，它是过程工业全盘(综合)自动化的一个组成部分，或者又称为计算机集成过程系统(computer integrated process system, 简称CIPS)的一部分<sup>[2]</sup>。国内外的实践证明，这项稳态优化技术实施后的经济效益是好的，一般每年可以提高总产值约1到几个百分点的经济效益。对于一大企业来说，这笔钱已经足以支付分布式计算机控制系统的投资和软件开发费用。如果在这样的硬件环境下，附加产品质量控制模型和装置以及开发故障诊断、预报、检测、定位和处理的专家系统，其经济效益更为巨大。因此可以断言，(大)工业过程稳态优化代表着过程工业在其计算机控制化后自动化的发展方向。换言之，过程工业以微型计算机控制代替常规仪表控制后，其进一步自动化的发展方向就是实施计算机监控系统(包括管理、稳态优化、产品质量控制和故障检测、预报及诊断)。

工业大系统中的串联型制造、加工生产线的系统优化，是动态优化，是以各动态子系统的状态方程为基础，在给定时段内来优化其目标函数，这类问题属于自动控制中的最优控制(optimal control)问题。它也采用两级递阶控制结构，并进行分解-协调<sup>[3]</sup>。文献[3]中对串联型制造、加工生产线，特别是英国钢铁公司 Spencer 钢厂的一组加热炉-粗轧-精轧-卷取生产线，进行了以温度和功率的各自误差平方形式的目标函数的在线最优控制的研究。

在制造、加工生产线中,产品质量控制问题已经引起工业界和学术界的极大关注。过去因缺乏在线检测手段,使得产品质量的在线检测非常困难。而现在有了一些软测量和智能的方法来解决这个问题,并同时对产品可以进行在线质量控制,这是工业生产发展的重要方向。国内有的大型钢铁联合企业正在为钢板材连铸热连轧生产线开发和建立板材质量模型,并期望通过产品质量模型来对工业生产的产品质量进行控制,并对新产品设计和新工艺设计提供了新的方便的途径。

国内在实施工业过程稳态优化上已取得长足的进展,除四川化工总厂的合成氨部分实施稳态优化外,上海炼油厂的原油蒸馏及催化裂化装置、沧州化肥厂的合成氨及尿素等一些大型企业全部实施了递阶稳态优化。更有一些大型石油化工企业还购买了国外的专利实施了稳态优化和故障诊断技术。

本书致力于研究工业大系统的稳态优化控制和产品质量控制问题,因此主要研究工业大系统,包括制造、加工生产线的稳态问题。

## 1.2 工业大系统及其稳态优化的数学描述<sup>[1,4]</sup>

一个由  $N$  个子系统组成的工业大系统(包括它的直接控制器)可用关系式表示为

$$y_i = F_i^*(c_i, u_i, z_i), \quad u_i = \sum_{j=1}^N H_{ij} y_j, \quad i \in \overline{1, N} \quad (1.2.1)$$

式中  $y_i, u_i, c_i$  和  $z_i$  分别为第  $i$  个子系统的输出、关联输入、控制变量和扰动;  $H_{ij}$  是布尔型矩阵,其元素由 0 和 1 组成;  $F_i^*: \mathcal{C}_i \times \mathcal{U}_i \times \mathcal{Z}_i \rightarrow \mathcal{Y}_i$  为第  $i$  个子系统的输入-输出映射,  $\mathcal{C}_i, \mathcal{U}_i, \mathcal{Z}_i$  和  $\mathcal{Y}_i$  为有限维的欧氏空间。也可以紧凑地表示为

$$y = F^*(c, u, z), \quad u = Hy \quad (1.2.2)$$

式中

$$F^*(c, u, z) = \begin{bmatrix} F_1^*(c_1, u_1, z_1) \\ F_2^*(c_2, u_2, z_2) \\ \vdots \\ F_N^*(c_N, u_N, z_N) \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} H_1 \\ \vdots \\ H_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} \cdots H_{1N} \\ \vdots \\ H_{N1} \cdots H_{NN} \end{bmatrix}$$

$$c = (c_1^T, \dots, c_N^T)^T \in \mathcal{C}_1 \times \mathcal{C}_2 \times \dots \times \mathcal{C}_N = \mathcal{C}$$

$$u = (u_1^T, \dots, u_N^T)^T \in \mathcal{U}_1 \times \mathcal{U}_2 \times \dots \times \mathcal{U}_N = \mathcal{U}$$

$$y = (y_1^T, \dots, y_N^T)^T \in \mathcal{Y}_1 \times \mathcal{Y}_2 \times \dots \times \mathcal{Y}_N = \mathcal{Y}$$

$$z = (z_1^T, \dots, z_N^T)^T \in \mathcal{Z}_1 \times \mathcal{Z}_2 \times \dots \times \mathcal{Z}_N = \mathcal{Z}$$

这里规定:小写字母(如  $y_i$ )表示标量或向量;大写斜字母(如  $F$ )表示集合、函数、映射或泛函;大写草体字母(如  $\mathcal{Z}$ )表示空间。根据图 1.2 可写出大系统的关联关系如下:

$$u_1 = y_{21}, \quad u_{21} = y_1, \quad u_{22} = y_3, \quad u_3 = y_{22}$$

于是

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_{21} \\ u_{22} \\ u_3 \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_{21} \\ y_{22} \\ y_3 \end{bmatrix}, \quad u = Hy = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} y$$

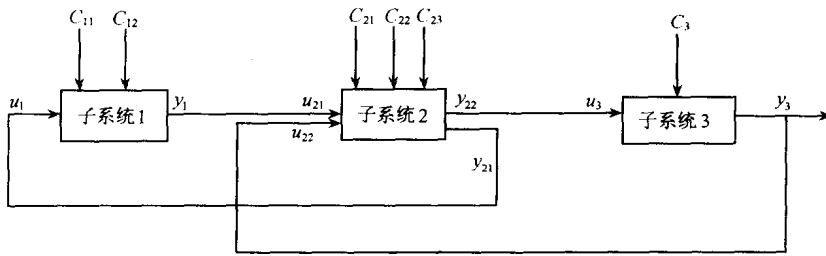


图 1.2 工业大系统实例

假定对于加到工业大系统的每一个控制  $c$  和扰动  $z$ , 工业大系统将产生惟一的输出  $y$ , 则输入-输出关系可用映射  $K^*: \mathcal{C} \times \mathcal{Z} \rightarrow \mathcal{Y}$  表示, 即有

$$y = K^*(c, z) \quad (1.2.3)$$

必须指出,  $F^*(c, u, z)$  或  $K^*(c, z)$  就是本书 1.1 节中所说的等式约束(实际工业大系统的数学描述)。这种关系式不可能精确知道, 因此必须采用数学模型来代替, 这个模型是实际关系式的一个近似。

$$y_i = F_i(c_i, u_i, z_i), \quad i \in \overline{1, N} \quad (1.2.4)$$

$$y = F(c, u, z) \quad (1.2.5)$$

$$y = K(c, z) \quad (1.2.6)$$

式中,  $F_i, F$  和  $K$  相应地为  $F_i^*, F^*$  和  $K^*$  的模型。

本书中讨论的工业系统, 对于像触媒老化这样一类慢扰动而言是一个快系统。工业系统中的扰动有两种: 一种是快扰动, 它的影响可以被闭环自动控制系统所抑制, 只在工业系统中引起变量  $u_i$  或  $y_i$  很短时的波动, 这种波动对目标函数计算的影响是可以略去不计; 另一种是慢扰动  $z_i$ , 它是时间的未知函数, 很难精确地估计。但是在所感兴趣的一个优化周期内, 这些慢扰动可以用它们的估计值来近似, 它们可被假定为常数。因此在下文中就把它们从所有映射中删掉, 从而简化了表达式, 如  $y = K^*(c), y = F^*(c, u)$  等。因为  $z$  是时间的未知函数, 所以过程的关系式  $F^*$  或  $K^*$  以及它们的模型  $F, K$  都是时变的, 因此在每个优化周期开始都有个模型更新 (updating) 的问题。

此外, 从系统的中系统设备的物理性能以及实际条件限制和系统的安全等方面考虑, 子系统的关联输入  $u_i$  和控制变量  $c_i$  之间往往还受到一定的约束, 这些约束条件可以由一组不等式约束所规定的集合  $CU_i$  表示, 一般形式为

$$(c_i, u_i) \in CU_i = \{(c_i, u_i) \in \mathcal{C}_i \times \mathcal{U}_i; G_{ij}(c_i, u_i) \leq 0, j \in J_i\}, \quad i \in \overline{1, N} \quad (1.2.7)$$

式中  $J_i$  表示一组整数。更为广泛的约束还涉及子系统的输出  $y_i$ , 称为输出关联不等式约束 (output dependent inequality constraint)。对它的处理是较为困难的, 因为预先 (在优化时) 并不知道输出是多少。

对每个子系统, 要求给出一局部的目标函数  $Q_i$ , 它可以是  $c_i, u_i$  的显函数, 记作  $Q_i(c_i, u_i)$ 。工业大系统的总目标函数常常具有如下形式:

$$Q = \sum_{i=1}^N Q_i \quad (1.2.8)$$

一般地可写成:  $Q=Q(Q_1, \dots, Q_N)$ 。为了将一工业大系统能用分解-协调的方法进行优化, 它必须是单调的, 或者说各子系统之间必须是和谐的, 即任一  $Q_i$  的增大(减少)必使得总体  $Q$  的增大(减少), 这称为“保序”(order preserving)性。

汇总以上关系, 可以将一工业大系统稳态优化问题表示为

$$(ROP) \begin{cases} \min_{c,u} Q(c,u,y) \\ \text{s. t. } y = F^*(c,u) \\ u = Hy \\ G(c,u,y) \leq 0 \end{cases} \quad (1.2.9)$$

式中  $G=(G_{11}, \dots, G_{1J_1}, \dots, G_{N1}, \dots, G_{NJ_N})^T$ 。基于模型的稳态优化问题可表示为

$$(MOP) \begin{cases} \min_{c,u} Q(c,u,y) \\ \text{s. t. } y = F(c,u) \\ u = Hy \\ G(c,u,y) \leq 0 \end{cases} \quad (1.2.10)$$

类似地, 对于目标函数和约束中未含输出  $y$  的情况, 也可写出其稳态优化表达式。在某些情况下, (MOP)问题也可采用如下的等价形式:

$$\begin{cases} \min_c Q(c, Hy, y) \\ \text{s. t. } y = K(c) \\ G(c, Hy, y) \leq 0 \end{cases} \quad (1.2.11)$$

关于(ROP)问题的解的存在性定理, 参阅文献[1]的定理 1.2.1。在  $F^*$  已知时, 求解(ROP)问题要采用一些非线性规划的子程序; 未知时, 要用在线搜索和逐步逼近的算法。

### 1.3 工业大系统递阶稳态优化的三种协调方法

如上节所讨论的工业大系统递阶稳态优化, 是在一两层结构下进行的: 各局部决策单元并行进行相应子系统的优化, 由上一级协调器进行协调。协调器对各局部决策单元的干预称为协调作用, 这是通过改变协调变量来进行的。协调器用来处理关联问题, 各局部决策单元和协调器相互迭代找到最优解。本节将介绍三种常用的求解(MOP)的协调方法: 直接法(direct method)、价格法(price method)和混合法(mixed method)。

为方便起见, 引进符号  $\nabla$ , 其涵义为: 对任意的实函数  $F$ ,  $\nabla_x F = [\partial F / \partial x]$ 。

#### 1.3.1 直接法

直接法又称关联预测法(interaction prediction method, 简称 IPM), 这种协调方法由协调器直接指定各子系统的输出变量的  $y_i$  值, 同时也就规定了关联输入变量  $u_i$  的值。下层各局部决策单元按预测的关联变量求解各自的优化问题, 然后将解出的决策变量的值  $\hat{c}_i$  传输给协调器, 以便对  $y$  进行总目标函数的优化。从而问题(MOP)可分为子系统优化与协调两部分。子系统优化可描述如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{对于协调器给定的 } y \in Y \\ \text{求出 } \hat{c}_i(y) \text{ 使得} \\ \hat{c}_i(y) = \arg \min Q_i(c_i, H_i y, y_i) \\ \text{s. t. } y_i = F_i(c_i, H_i y_i) \\ (c_i, H_i y_i, y_i) \in CUY_i \end{array} \right. \quad (1.3.1)$$

式中,

$$Y \triangleq \{y \in \mathcal{Y} : C_i(y) \neq \emptyset, i \in \overline{1, N}\},$$

$$C_i(y) \triangleq \{c_i \in \mathcal{C}_i : y_i = F_i(c_i, H_i y_i), (c_i, H_i y_i, y_i) \in CUY_i\}$$

在求出  $\hat{c}_i(y)$  以后,各局部决策单元把相应的目标函数  $Q_i(\hat{c}_i, H_i y, y_i)$  传输给协调器。协调器的任务是求出协调变量  $\hat{y} \in Y$ , 使得

$$\sum_{i=1}^N Q_i(\hat{c}_i(\hat{y}), H_i \hat{y}, \hat{y}_i) = \min_{y \in Y} \sum_{i=1}^N Q_i(\hat{c}_i(y), H_i y, y_i) \quad (1.3.2)$$

整个优化问题的求解是通过逐次修正协调变量(关联输出  $y$  的预测值),并相应地重复求解各局部决策单元的优化问题这样一个迭代进程来实现的。这种协调原则由于直接对关联输入和关联输出进行预估或指定,所以又称作关联预测法。这相当于图 1.1 上协调器向下传输的协调变量是  $y$ ,各局部决策单元向上传输给协调器的变量是  $Q_i(y)$ 。又因为每次都从上一级指定关联变量的值使子系统优化中的模型发生变化,因此这种方法又称为模型协调法(model coordination method)。由各子系统优化求得的  $\hat{c}_i(y)$  的,虽然不是最终的优化解,但是如果把它们加到系统中去,模型和约束条件都能满足,因此这些  $\hat{c}_i(y)$  都是可行的(feasible),故直接法又称作可行法(feasible method)。

在直接法中,需要确定可行集  $Y$ ,而用解析法确定是一件十分困难的事情,这就是直接法的一个缺点。又因为优化中没有应用目标函数对  $y$  的导数,因此优化工作收敛较慢。除此之外,直接法要求各子系统关联输出变量数不能多于该子系统的控制变量数<sup>[4]</sup>。

### 1.3.2 价格法

价格法又称为关联平衡法(interaction balance method,简称 IBM),它的基本思想是“割断”各子系统之间的关联,而各局部决策单元则把关联输入当作寻优变量来处理。通过引入对关联的约束  $u = Hy$  的 Lagrange 乘子向量  $\lambda$ ,将关联归并到目标函数中作为对目标函数的修正,Lagrange 函数为

$$L(c, u, y, \lambda) = Q(c, u, y) + \lambda^T (u - Hy) \quad (1.3.3)$$

式(1.3.3)可以分解为

$$L = \sum_{i=1}^N L_i = \sum_{i=1}^N \{Q_i(c_i, u_i, y_i) + \lambda^T u_i - \sum_{j=1}^N \lambda_j^T H_{ji} y_j\} \quad (1.3.4)$$

式中  $L_i$  是修正后的第  $i$  子系统的目标函数。通过协调器对 Lagrange 乘子  $\lambda_i$  的不断修正来调整各子系统的目标函数,以最后满足关联约束条件,所以该协调法又称为目标协调法(goal coordination method)。因此在价格法中,协调变量是乘子  $\lambda$ 。

局部决策单元的任务为

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{对于协调器给定的 } \lambda \\ \text{求出 } \hat{c}_i(\lambda) \text{ 和 } \hat{u}_i(\lambda), \text{ 使得} \\ \text{s. t. } (\hat{c}_i(\lambda), \hat{u}_i(\lambda)) = \arg \min L_i(c_i, u_i, y_i, \lambda) \\ (c_i, u_i, y_i) \in CUY_i \end{array} \right. \quad (1.3.5)$$



协调器的任务是

$$(CP) \begin{cases} \text{求出协调变量 } \hat{\lambda} = (\hat{\lambda}_1, \dots, \hat{\lambda}_N), \text{ 使得} \\ \hat{u}(\hat{\lambda}) = H\hat{y}(\hat{\lambda}) \end{cases} \quad (1.3.6)$$

式中  $\hat{y}(\hat{\lambda}) = F(c(\hat{\lambda}), u(\hat{\lambda}))$ 。这相当于图 1.1 上协调器向下传输的协调变量是  $\lambda$ , 各局部决策单元向上传输给协调器的变量是  $\hat{c}_i, \hat{u}_i$ 。依据 Lagrange 对偶优化定理可以进一步简化协调器的工作。定义 Lagrange 对偶函数  $D(\lambda)$  如下:

$$D(\lambda) \triangleq L(c(\hat{\lambda}), u(\hat{\lambda}), F(c(\hat{\lambda}), u(\hat{\lambda})), \lambda) \quad (1.3.7)$$

如果  $L(c, u, y, \lambda)$  具有鞍点, 则必有

$$\max_{\lambda} D(\lambda) = \min_{c, u, y} Q(c, u, y) \quad (1.3.8)$$

而且鞍点处的  $(c, \lambda)$  就是问题的解, 并且有

$$\nabla D(\lambda) = \hat{u} - H\hat{y} \quad (1.3.9)$$

因此对  $\lambda$  的修正公式为

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + \epsilon_k \nabla D(\lambda^k) \quad (1.3.10)$$

式中  $\epsilon_k$  是步长因子。这样, 就可以采用有效的梯度搜索优化技术来解协调问题, 因而整个算法收敛较快。

价格法的一个缺点是, 关联平衡一直要到迭代的最后才能达到, 如果迭代能收敛, 只有最后的解是可行的, 并可加到实际系统中。因此该法又称为不可行法 (infeasible method)。

从以上的讨论可知, 为了保证价格法的收敛性和最优性, 一充分必要条件是  $L(c, u, y, \lambda)$  存在鞍点, 有关收敛性定理可参阅文献[1]。

### 1.3.3 混合法

混合法协调, 不言而喻是将上述两种协调方法合并起来的方法。它又称为关联预测平衡法 (interaction prediction and balance method), 被认为是最有效的方法之一。这时, 关联输出和 Lagrange 乘子同时作为协调变量。本节介绍其中的一种输出预测和平衡方法 (output prediction and balance method, 简称 OPBM)。事实上, 为了加速求解迭代的收敛, 常采用增广的 Lagrange 函数, 即在其中加了一罚项, 所以这种混合法也可以认为是大系统求解的罚函数研究法的一种。文献[4]对此作了研究, 现叙述如下:

$$\left. \begin{array}{l} \text{对协调器给定的 } y \text{ 和 } \lambda \text{ 以及给定的罚系数 } \rho \\ \text{求出控制变量 } \hat{c}_i(y, \lambda) \\ \hat{c}_i(y, \lambda) = \arg \min L_i(c_i, H_i y, \lambda, ) \\ \text{s. t. } c_i \in C(y) \\ \text{式中 } L_i(c_i, H_i y, \lambda, ) = Q_i(c_i, H_i y_i) + \langle \lambda_i, H_i y \rangle \\ \quad - \sum_{j=1}^N \langle \lambda_j, H_{ji} F_j(c_j, H_j y_j) \rangle + \frac{\rho}{2} \| y_i - F_i(c_i, H_i y) \|^2 \end{array} \right\} \text{LP}_{i \in 1, N} \quad (1.3.11)$$

式中  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  是向量空间的内积算子。

在局部问题中, 协调器已规定了子系统的输出和价格参数  $\lambda$ , 也就是规定了子系统的所有关联。局部问题的解  $\hat{c}_i(y, \lambda)$  被假定为对于每个  $(y, \lambda), y \in Y, \lambda \in \Lambda \subset \mathcal{U}$  是惟一的。协