

系统与amp;控制丛书 C₂

李少远 著

全局工况系统 预测控制及其应用



科学出版社
www.sciencep.com



(TP-3779.0101)

系统与amp;控制丛书

广义Hamilton控制系统理论——实现、控制与应用

王玉振

全局工况系统预测控制及其应用

李少远

时滞系统鲁棒控制——自由权矩阵方法

吴 敏 何 勇

科学出版社

电 话：010-64000249

E-mail: gcjs@mail.sciencep.com

ISBN 978-7-03-021257-3



9 787030 212573 >

销售分类建议：自动化-控制理论

定 价：35.00 元

系统与amp;控制丛书

全局工况系统预测控制 及其应用

李少远 著

科学出版社

北京



内 容 简 介

本书内容取材新颖、广泛,结合实际,针对复杂大工业系统全局工况系统的优化控制问题,从控制器参数的优化调整、多级串联系统的整体优化以及网络信息环境下的系统优化控制等几个方面阐述了近年来的最新成果。全书共分 10 章,其内容可以分为三部分。第一部分介绍针对大多数工业系统的底层控制回路所采用 PID 或者模糊控制器,研究提出了一种两层结构基于广义预测控制性能指标的控制器参数调整方法;第二部分针对具有多级串联结构的控制系统,提出了基于动态系统优化与参数估计集成方法的分布式预测控制算法,分析了算法的收敛性,证明了在满足某些假设条件下迭代收敛解满足原非线性优化问题的最优性必要条件;第三部分针对在网络信息模式下的串联结构系统,在基于 Nash 最优分布式预测控制的研究基础上,改进了优化性能指标的选取,提出了一种基于邻域优化的网络化预测控制策略,给出一种迭代的网络化 MPC 设计方法。

本书适于从事控制科学与工程、计算机控制、系统工程和信息工程等专业的广大科技人员阅读,也可供高等院校相应专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

全局工况系统预测控制及其应用/李少远 著. —北京:科学出版社,2008
(系统与控制丛书)

ISBN 978-7-03-021257-3

I. 全… II. 李… III. 工况-预测控制 IV. TK05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 029155 号

责任编辑:姚庆爽 于宏丽 / 责任校对:陈玉凤
责任印制:刘士平 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

丽源印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 5 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2008 年 5 月第一次印刷 印张:10 3/4

印数:1—3 000 字数:196 000

定价:35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))



《系统与amp;控制丛书》编委会

主 编:

郭 雷 院 士

中国科学院数学与系统科学研究院

副 主 编:

程代展 研究员

中国科学院数学与系统科学研究院

林宗利 教 授

University of Virginia, USA

编 委:

黄 捷 教 授

香港中文大学

谈自忠 教 授

Washington University, USA

陈 杰 教 授

北京理工大学

Prof. Hassan K. Khalil

Michigan State University, USA

Prof. Frank Lewis

University of Texas at Arlington, USA



编者的话

我们生活在一个科学技术飞速发展的信息时代，诸如宇宙飞船、机器人、因特网、智能机器及汽车制造等高新技术对自动化提出了更高的要求。系统与控制理论也因此面临着更大的挑战。它必须要能够为设计高水平的物理或信息系统提供原理和方法，使得设计出的系统能感知并自动适应快速变化的环境。

为帮助系统与控制专业的专家、工程师以及青年学生迎接这些挑战，科学出版社和中国自动化学会控制理论专业委员会合作，设立了《系统与控制丛书》的出版项目。丛书分中、英文两个系列，目的是出版一些具有创新思想的高质量著作，内容既可以是新的研究方向，也可以是至今仍然活跃的传统方向。研究生是本丛书的主要读者群，因此，我们强调内容的可读性和表述的清晰。我们希望丛书能达到这些目的，为此，期盼着大家的支持和奉献！

《系统与控制丛书》编委会

2007年4月1日



前 言

现代工业生产中的工艺过程日趋复杂,对控制系统的指标要求也越来越高,传统的单回路 PID 控制已经不能满足系统的需求,尤其在全局工况条件下系统参数发生变化,系统从一种操作环境突变到另一种操作环境,致使当前工作点远离常规控制器的初始设计工作点时,控制品质会显著下降。同时越来越多的实际工业过程通常是具有非线性、时变性、多变量紧密耦合、大时滞的控制对象,简单的控制结构和控制算法已经受到极大的挑战。

设计控制器首先要对被控对象特性进行全面的了解,其次才能设计控制器结构以及控制算法,这对于全局工况过程控制对象尤其重要。尽管全局工况系统在其理论上和方法的研究上已经取得了很多成果,但由于理论和实际的差别,仍然存在很多问题有待解决。

针对过程对象的特性选取适当的控制结构和控制算法。有些过程对象呈现大纯滞后、大时间常数特性,简单的单回路控制往往不能获得满意的控制效果,甚至高级的过程控制算法也不一定能取得良好的控制性能。因此如何选取控制结构,再确定相应的控制算法,尤其对全局工况系统,是个值得研究的课题。尽管高级控制算法层出不穷,但真正能运用到实际过程当中,却是很少数的一部分控制算法。这是因为:

第一,先进的控制算法在软、硬件方面缺乏有效的支持,特别是过程控制中 DCS 层上的实现,如果要引入先进控制算法,意味着整个硬件构造需要全部重新设计。

第二,由于先进控制算法的控制器参数和实际过程对象的物理特性缺乏明确的关联意义,因此对于已熟悉传统控制器参数的操作人员来讲,如何将高级算法和底层控制回路很好地结合起来,并让现场工作人员能够很好理解和接受是个亟待解决的问题。

第三,全局工况系统并行控制结构的参数优化问题。全局工况下的复杂系统可以划分为若干个子系统,但实际过程中,由于存在种种输入、输出约束问题,如何设计一个优化控制器既能满足子系统优化控制,又能满足系统约束是一个亟待解决的研究课题。

预测控制理论和算法是自 20 世纪 70 年代从工业系统的控制需要提炼和发展起来的一类先进的控制方法,从控制思想上分析,预测控制算法很好地结合了传统的信息反馈和利用系统全局信息进行最优控制,是适合在工业系统中进行滚动优

化控制的方法,因而自提出至今它一直是工业控制界和学术研究领域广泛关注和研究的问题。

预测控制算法在工业系统中的应用主要有两个方面:一是取代传统的控制算法,在实时控制回路中作为控制器发挥调节作用;二是针对复杂系统的不同结构,作为一种滚动优化方法它对不同系统进行结构的优化与控制,尤其在全局工况系统控制中,系统的控制结构与控制器的参数优化更为重要,包括在串级系统结构中的预测控制器设计、利用预测控制性能指标对控制器参数进行优化调整、全局工况系统的分层优化控制以及网络信息环境下的多级串联系统的优化控制等。关于预测控制算法本身已在很多专著和教材中进行了详细的阐述,但对于系统在全局工况时的优化控制却很少涉及。

本书正是基于上述认识和已有的成果,研究了复杂系统在全局工况运行时的优化控制问题,全书共分 10 章。第 1 章从频域角度分析了串级结构抗干扰性优于简单控制回路。其次针对过程控制的大纯滞后、有约束、大时间常数对象,提出了串级广义预测控制算法,阐述了全局工况下系统动态优化问题。第 2 章研究了全局工况下分层结构的控制器参数调整问题,提出一种两层结构基于广义预测控制性能指标的 PID 控制器。两层结构包括底层控制回路和上层优化回路,底层回路采用工业过程中常用的 PID 控制器。第 3 章提出全局工况下一类模糊控制器参数调整问题。首先,根据误差和误差变化率,选择三角形隶属度函数,构造了一类复合 PID 型模糊控制器;其次,根据广义预测控制性能指标的泰勒级数的二次展开式近似处理,直接得到次优的模糊控制器比例因子的调节规律。第 4 章研究全局系统工况系统并行结构的广义预测全局性能指标的稳态优化方法。首先采用动态优化方法,根据 Kalman 滤波器在线估计系统状态变量,通过构造子系统的优化问题设计状态观测器,然后采用稳态优化方法,根据系统的输入输出约束,采用约束广义预测全局性能指标构造 Lagrange 函数计算底层各个回路的优化设定值。第 5 章针对非线性串联结构系统的预测控制问题,提出了基于动态系统优化与参数估计集成方法的分布式预测控制算法,分析了算法的收敛性,证明了在满足某些假设条件下迭代收敛解满足原非线性优化问题的最优性必要条件。第 6 章针对在网络信息模式下的串联结构系统,在基于 Nash 最优分布式预测控制的研究基础上,改进了优化性能指标的选取,提出了一种基于邻域优化的网络化预测控制策略,给出一个迭代的网络化 MPC 算法,分析了无约束算法的收敛性和标称闭环系统的稳定性。第 7 章研究了串联结构系统的子目标鲁棒实时优化控制问题。其上层是一个基于产品质量优化模型的全过程优化器,根据最终产品质量和性能指标的要求,动态调整各子过程控制器的最优设定值;下层采取分布式广义预测控制(GPC)实现串联结构系统的在线控制,使各子过程的输出跟踪优化设定值。第 8 章研究了串联结构系统的子目标鲁棒实时优化问题,鲁棒实时优化的上层是一个

基于产品质量优化模型的全过程优化器,上层优化器根据最终产品质量和性能指标的要求,动态调整各子过程控制器的最优设定值,使各子过程的输出跟踪优化设定值。随机规划方法可有效处理经济和模型的不确定性,将机会约束规划引入到实时优化问题中,将优化问题中的不确定约束以一定的置信水平独立概率满足或联合概率满足,并给出了求解联合机会约束规划的算法。

本书的研究工作得到国家自然科学基金(60074004,60474051,60534020)、国家 863 计划(2002AA412130,2006AA04Z173)、教育部高校博士点基金(20060248001)和上海市科委科研计划(07JC14016)等项目的资助,在此表示衷心感谢。同时,作者所指导的博士研究生邹涛、陈庆、许敏、张艳等课题组成员在上述项目资助下对于全局工况系统的预测控制进行了系统性的研究工作,取得了较为系统性的研究成果,本书正是对这些成果的总结,在此一并表示感谢。

本书是作者最近几年研究工作的结晶,希望本书的出版能够进一步推动针对复杂工业大系统优化控制方面的学术研究和技术开发工作。由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

作者

2007 年 12 月



目 录

编者的话

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 复杂大工业过程的特点	2
1.3 复杂大工业过程的控制结构	3
1.4 复杂大工业过程的预测控制	6
1.5 复杂大工业过程的优化	8
1.6 本书的安排	9
第 2 章 串级广义预测控制算法和系统性能分析	11
2.1 引言	11
2.2 串级控制系统	12
2.2.1 串级控制系统的特点	12
2.2.2 串级控制系统性能分析	13
2.3 串级广义预测控制算法	17
2.3.1 基本广义预测控制算法	17
2.3.2 串级广义预测控制算法	19
2.3.3 控制算法步骤	20
2.3.4 数值仿真研究	22
2.4 锅炉控制系统实验研究	25
2.4.1 问题描述	25
2.4.2 实验框图	26
2.4.3 实验结果	28
2.5 本章小结	30
第 3 章 大范围工况系统 PID 控制器的参数调整	32
3.1 引言	32
3.2 两层结构预测 PID 控制算法	33
3.2.1 底层控制回路	35
3.2.2 优化层控制回路	36
3.3 控制算法步骤	39

3.3.1 基于滚动窗口数据辨识算法	39
3.3.2 控制算法步骤和流程图	40
3.4 控制算法性能分析	41
3.4.1 闭环系统稳定性分析	42
3.4.2 闭环系统鲁棒性分析	43
3.5 仿真实例	45
3.5.1 数值仿真	45
3.5.2 实验研究	47
3.6 本章小结	50
第4章 大范围工况系统模糊控制器参数优化	51
4.1 引言	51
4.2 一类PID型模糊控制器参数优化	52
4.2.1 一类PID型模糊控制器	52
4.2.2 基于多步预测性能指标的参数优化	57
4.2.3 控制算法步骤	60
4.3 控制算法性能分析	60
4.4 仿真实例	63
4.4.1 线性系统仿真	63
4.4.2 非线性系统仿真	66
4.5 本章小结	67
第5章 大范围工况系统并行结构优化算法	68
5.1 引言	68
5.2 大范围系统分散预测控制策略	69
5.2.1 分散控制和集中控制	69
5.2.2 分散型预测控制策略	70
5.3 动态优化控制	71
5.3.1 分散子系统描述	72
5.3.2 局部状态观测器	73
5.4 稳态优化问题	74
5.4.1 协调控制器	74
5.4.2 全局GPC优化指标	75
5.4.3 底层优化问题	77
5.4.4 上层优化问题	77
5.5 仿真实例	78
5.6 本章小结	81

第 6 章 基于 DISOPE 的串联结构系统的分布式预测控制	82
6.1 引言	82
6.2 非线性系统预测控制的一般描述	83
6.3 基于 DISOPE 的分布式预测控制策略	85
6.3.1 串联结构系统的非线性预测控制	85
6.3.2 DISOPE 方法的原理	86
6.3.3 线性模型	88
6.3.4 基于线性二次型问题的 DISOPE 单元	88
6.3.5 优化控制问题的求解	89
6.3.6 分布式预测控制算法步骤	91
6.4 算法性能分析	92
6.4.1 收敛性分析	92
6.4.2 最优性分析	95
6.5 实例仿真研究	97
6.5.1 燃油电力单元系统描述	97
6.5.2 燃油电力单元机组分布式预测控制	98
6.6 本章小结	99
第 7 章 基于邻域优化的串联结构系统的网络化预测控制	101
7.1 引言	101
7.2 串联结构系统预测控制问题描述	102
7.3 网络化预测控制策略	103
7.3.1 邻域优化	103
7.3.2 基于邻域优化的网络化预测控制	104
7.3.3 局部控制器设计	105
7.4 基于迭代的网络化预测控制算法	107
7.4.1 算法步骤	107
7.4.2 算法收敛性和最优性分析	108
7.4.3 闭环系统稳定性分析	110
7.5 具有一步时延通信的网络化预测控制算法	111
7.5.1 算法步骤	112
7.5.2 闭环系统稳定性分析	113
7.6 实例仿真研究	114
7.6.1 步进式加热炉控制问题描述	114
7.6.2 炉温网络化预测控制	114
7.7 本章小结	116

第 8 章 串联结构系统的子目标鲁棒实时优化	119
8.1 引言	119
8.2 问题描述	120
8.3 机会约束规划实现串联结构系统的实时优化	121
8.3.1 串联系统的鲁棒实时优化	121
8.3.2 机会约束的处理	123
8.3.3 联合机会约束规划的求解	125
8.4 数值仿真	126
8.4.1 示例 1	126
8.4.2 示例 2	127
8.5 实例仿真研究	128
8.5.1 步进式加热炉优化问题描述	128
8.5.2 炉温设定值优化	130
8.6 本章小结	133
第 9 章 空调系统的控制与优化	135
9.1 引言	135
9.2 空调系统的控制问题	136
9.2.1 主要控制回路	136
9.2.2 控制模型	138
9.2.3 全局优化指标	141
9.3 空调系统实验研究	142
9.3.1 串级广义预测控制算法	142
9.3.2 两层优化控制算法	145
9.4 本章小结	146
第 10 章 结束语	147
参考文献	150

第1章 绪 论

1.1 引 言

随着现代工业生产的发展,DCS、现场总线等技术的广泛应用和信息网络的建立,控制系统的结构越来越复杂,在炼钢、轧钢、炼油、发电、造纸、化工等生产过程中,系统由许多局部子系统组成,在子系统之间,不但有物质、能量的流通,而且大量的信息流通,子系统之间存在着复杂的关联。系统的外部环境和内部干扰是多变的、不确定的。同时对生产过程的优化目标提出了越来越高的要求,除了对单个生产装置或局部子系统实现优化控制外,追求整个系统的全局优化已是提高产品质量和降低成本的关键(万百五,2003;Skogestad,2000a)。传统的控制理论和方法一般将这类控制系统看做是一个多输入多输出的系统,用多变量系统的控制来概括,但是随着系统维数的不断增加,子系统之间关联复杂性的不断加强,采用传统的控制理论和方法已经不满足现代工业生产实时性发展的需要。现有的控制理论一般都是在回路中考虑问题,不考虑回路之间的关联,系统结构的复杂性的提高,以及工业生产过程的上述新特点,对现有的控制理论和方法提出了新的挑战。

在复杂大工业过程中普遍存在着一种具有多级串联结构的控制系统,由若干个子系统构成,每个子系统可看做是独立的局部控制系统,子系统之间存在着工艺流程方向上的关联作用,即仅前一子系统的输出影响后面的子系统,系统整体具有单向不可逆性。这类控制问题的控制目标多,例如,最终的产品质量、系统的总体能量消耗最小等,不但要求对局部子系统进行局部控制优化,而且要求最终实现系统的整体优化,同时每一个子系统又存在着局部的控制自由度和各种约束。

串联结构系统的控制和动态优化问题由于其特殊的控制结构,整个系统是由相继发生的多个局部子系统的综合作用,不能用简单的多变量控制来概括(Hua et al.,2004;Gawthrop et al.,1988),最终控制目标与各个局部子系统的控制量之间没有直接的定量关系,这类工业过程中存在着严重的非线性与网络延时,无法得到准确的机理模型,又存在着诸多干扰与各种不确定性因素,难以应用传统的基于模型的控制理论,同时工业现场更多地采用分布式控制结构和信息结构,这些都给这类问题的控制与优化带来了困难。

对这类系统的控制与动态优化问题的研究,目前并没有系统的方法,这种提法

在国内外也是新的,但由于这类复杂大工业过程的控制和优化问题的研究已成为自动化及相关领域中崭新的前沿研究方向,并且其研究成果的应用能给企业带来巨大的经济效益,具有实际意义。因此,以实现工艺指标和经济指标的多级串联系统的动态优化控制系统为背景,如何根据串联结构系统的结构特点,设计相应的控制结构,结合实际工程应用中存在的问题设计新的控制算法及优化策略,增强算法的有效性和实用性,以及如何根据系统存在诸多干扰与各种不确定性因素的情况下,研究系统整体控制目标与各子系统控制量之间的内在关系,充分考虑子系统之间的信息交换和智能协调,实现串联系统的整体优化和协调,这些都是研究的热点,也是本书讨论的主要问题和结果。

1.2 复杂大工业过程的特点

工业过程有多种分类方法,若组成工业过程系统的子过程或元部件较少且其关系比较单纯,则称为简单的工业过程;若组成工业过程系统的子过程或元部件很多或非常大且其关系复杂,则称之为大工业过程系统或全局工况系统(plantwide process)(Skogestad, 2000)。

传统控制理论和现代控制理论在解决复杂工业过程的控制方面,有很大局限性,主要表现在以下几方面(李少远等, 2003; 金以慧, 1998)。

1. 被控过程的复杂性

过程控制系统涉及不同的行业,既有石化过程的精馏塔、反应器和热工过程的换热器、锅炉,又有冶金过程的转炉、平炉、加热炉等。这些被控对象数学模型维数高、结构复杂,甚至有些过程特性至今尚未被人们所了解,这对于控制结构的选取带来一定的难度。另外,对控制对象的不了解也会给控制器设计带来一定的困难和盲目性。

2. 控制方案的多样性

由于被控对象的特性各异、工艺条件及要求的不同,系统的控制结构也非常丰富,既有简单回路控制、串级控制、前馈-反馈控制,也有为满足特定要求而开发的比值控制、均匀控制、选择性控制等。同样,控制算法也呈现多样性,例如,传统的PID控制、模糊控制、预测控制、最优控制等。因此,根据被控对象的特性,选择合适的控制结构和控制算法尤为重要。

3. 对象和环境的不确定性

工业过程对象一般难以用精确的数学模型描述,这极大地阻碍了基于精确数

学模型优化方法的发展。同时,对象的动态特性多呈现大惯性、大滞后,且具有非线性、分布参数和时变特性,经典的线性控制理论往往受到限制或只能应用于局部线性情况,尤其对一些复杂非线性或部分未知的工业系统控制问题,往往不能得到全局工况的优化解。此外,工业环境中存在各种扰动对过程的动态特性也带来很大的影响。

4. 性能要求的综合性

复杂工业过程的规模日益庞大,生产者已经不可能对全部生产过程参数提出控制要求,转而根据生产要求提出不同的性能指标,并尽可能综合考虑这些指标,从而改善控制系统的品质,追求动态品质的优化,提高生产经济效益。这就构成了复杂系统的最优控制问题,或者是在动态不确定性环境下的满意控制问题,复杂工业过程是一个具有高度复杂、不可确定、多层次、网络性的系统,在一个层次上是不可能把工业过程完全弄清楚,对其研究需要在多个层次上进行。

1.3 复杂大工业过程的控制结构

现代工业过程的控制已经从单变量、单一过程的控制发展到生产全过程的优化与控制。工业大系统的特点除了包含许多个互联子系统外,还有它的数学模型维数很高,地域上分布很广,关联非常复杂。此外,对系统的要求需要由多个目标函数来评价,系统内部有着动态进程快慢不同的子系统以及含有多种随机因素等。这些特点决定了不能用现代控制理论中常用的方法来研究它的优化控制问题。例如,若采用 Kalman 的状态反馈法进行最优控制,就需要测量所有子系统的全部状态,由于子系统数目众多,而且各子系统在地域上分布广阔,测量和进行信息传递的费用是非常大的,这种控制方式称为集中控制(centralized control)。因此,对于复杂的大系统常采用以下的三种控制方式来处理信息交换和施加控制。

1. 分散控制结构(decentralized control)

与集中控制相对的是分散控制(Gu, 1994),如图 1-1 所示,可以看出这是一种单级多目标的控制,其特点是,每个控制器仅获得大系统的一部分测量信息(子系统的信息),也只施加一部分的控制(对该子系统控制)。这种信息结构称为非经典的,每个控制器的地位是平等的,相互独立地进行工作。值得指出的是,在工业过程对压力、温度等每个参数单独实施的闭环反馈控制,就属于这种控制方法,即把每个控制回路看成是完全独立的,而把外界的影响、关联等看作扰动而设法加以抑制。实际上各个子系统是互相关联着的,因此在关联紧密的大工业过程的控制中,有时会出现几个参数甚至整个过程的动态特性不好的现象。学者们认为分散控制

的大系统缺乏稳定性,由于非经典信息结构的缺陷,一般只能得到次优控制(sub-optimal control)。

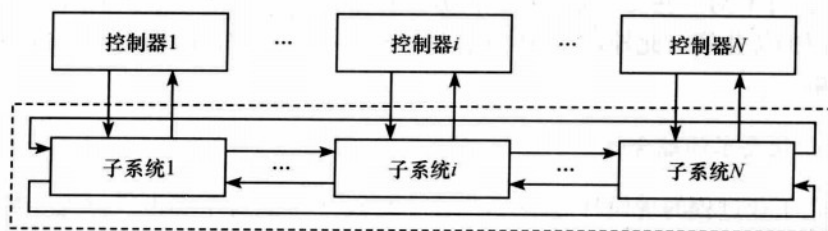


图 1-1 分散控制结构框图

2. 递阶控制结构(hierarchical control)

递阶控制主要包含多级和多层两种结构形式(Cervantes et al., 2002; Weng et al., 1997)。图 1-2 所示的递阶控制是多级结构形式(multilevel structure)。这里每级都有控制器,递阶排列呈金字塔形。习惯上将高级的控制器称作决策单元,同一级的决策单元是平等的,它们相互独立并平行地工作,并且只接收各自上一级决策单元的指令;而上一级决策单元也不逾越下一级决策单元,直接干预更下一级的工作。对于最高层决策单元(称作协调器),它间接拥有大系统的全部信息。

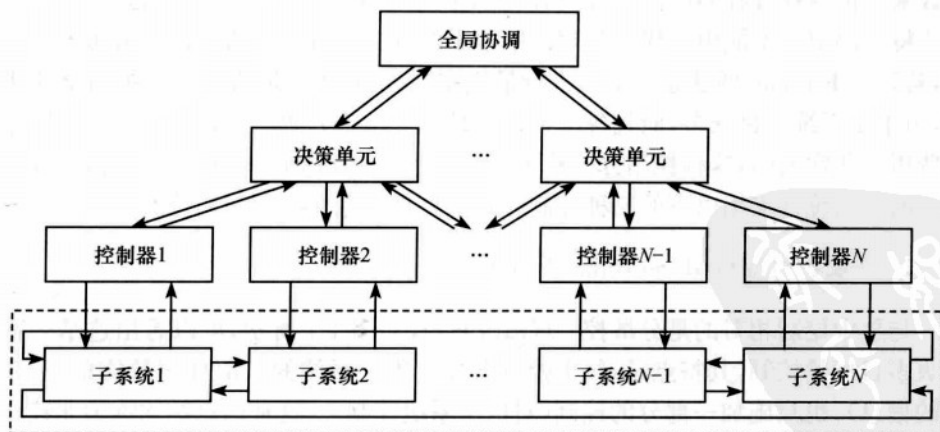


图 1-2 多级控制结构框图

在大工业过程中,计算机在线稳态优化控制常用的就是递阶控制结构(万百五,2003),如图 1-3 所示。这样的递阶结构可分为三层:下层是实际过程(层),中间是直接控制层,上层是优化层。而优化层本身又是一个两级结构,由局部决策单