

《信息、控制与系统》系列教材

过程控制

金以慧
方崇智

主编
审校

清华大学出版社

过 程 控 制

金以慧 主编
方崇智 审校

清华大学出版社

内 容 简 介

本书是作者在清华大学工业仪表及自动化专业多年教学的总结,是在历年所用讲义的基础上经多次修改而写成的,书中包括了作者及本专业同事们在过程控制领域中的部分科研成果。

全书系统地阐述了简单和复杂控制系统的结构、原理、设计、分析和评价,深入解剖了两个典型生产过程控制系统的实例,力图从整个生产过程的特点出发,对控制系统进行综合设计和优选。在此基础上还介绍了几种比较成熟的高等过程控制策略,并力求反映近年来过程控制的新发展。

全书从数学和物理的基本概念着手,阐述过程控制问题的本质和特点以及掌握系统设计和分析的基本方法。全书共分 15 章,每章均有思考题和习题。

本书可作为高等院校自动控制类和相关专业的教材,并供有关科技人员参考。

(京)新登字 158 号

过 程 控 制

金以慧 主编

☆

清华大学出版社出版

北京 清华园

清华大学印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

☆

开本: 787×1092 1/16 印张: 25.75 字数: 623 千字

1993 年 4 月第 1 版 1993 年 4 月第 1 次印刷

印数: 0001—5000

ISBN 7-302-01115-X/TP·422

定价 7.00 元

《信息、控制与系统》系列教材

出版说明

《信息、控制与系统》系列教材是一套关于信息、控制和系统学科的基本理论和应用技术的高等学校教材。选题范围包括信号和信息处理、模式识别、知识工程、控制理论、自动化技术、传感技术、自动化仪表、系统理论、系统工程、机器人控制、智能控制、计算机应用和控制等方面。主要读者对象为自动控制、计算机、过程自动化、无线电等系科的高年级大学生和研究生,以及在这些领域和部门工作的科学工作者和工程技术人员。

信息、控制与系统科学是在本世纪上半叶形成和发展起来的新兴学科。它们的应用和影响已经遍及众多的部门和领域,贯穿其中的许多思想和方法已用于经济和社会现象的研究,而以这些学科为理论基础的自动化技术的广泛应用更是实现现代化的重要标志之一。这套系列教材,正是在这样的客观要求下,为适应教学和科研工作的需要而组织编写和出版的。它以清华大学自动化系近年来经过教学实践的新编教材为主,力求反映这些学科的基本理论和最新进展,并且反映清华大学在这些学科中科学研究和教学研究的成果。我们希望这套系列教材,既能为在校大学生和研究生的学习提供较为系统的教科书,也能为广大科技人员提供有价值的参考书。

组编和出版这套教材是一次尝试。我们热忱欢迎选用本系列教材的老师、学生和科技工作者提出批评、建议。

《信息、控制与系统》系列教材编委会

一九八七年三月

前 言

“过程控制”是一门与工业生产过程联系十分密切的课程。随着科学技术的飞速前进,过程控制也在日新月异地发展。它不仅在传统工业改造中,起到了提高质量,节约原材料和能源,减少环境污染等十分重要的作用,而且正在成为新建的规模大、结构复杂的工业生产过程中不可缺少的组成部分。

“过程控制”是清华大学工业仪表及自动化专业多年来为大学高年级学生开设的一门主干课。本书是在历年讲稿,讲义的基础上经多次修改完善而写成的,其中包括了作者及本专业同事们在过程控制领域中的部分科研成果。

本书共分五篇。第一篇简单控制系统是由何镇湖编写的,它是过程控制最基本的内容。第二篇复杂控制系统是由金以慧编写的,这部分内容是当前生产中常用的复杂系统。第三篇过程计算机控制系统共两章,分别由何镇湖、金以慧编写,主要讨论了计算机在过程控制中的应用。第四篇典型装置的控制系统的两章,分别由金以慧、徐博文编写,这一篇主要是详细解剖了大型火力发电站和精馏塔的控制系统的,可以作为前三篇的一个总结。第五篇高等过程控制系统是由王桂增、金以慧、谢新民和王诗宓等编写的,这一篇介绍了高等过程控制中的主要内容,希望能达到开扩学生眼界,拓宽知识面的目的。

本书在写作上注意深入浅出,讲清基本概念,同时力求反映近年来过程控制的新发展。由于内容较多,在讲授本课时,可以按篇来组合,例如第五篇就可以单独构成“高等过程控制”课。

本书在编写过程中,一直得到方崇智教授的指导和关心,并认真审阅了全文,提出了详细的修改意见,在此向他表示诚挚的感谢。由于作者水平有限,缺点和不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

金以慧

1991年8月

主要符号表

α	比例系数, 比值系数, 传热系数
δ	比例带
δ_{cr}	临界比例带
$\delta, 4:1$	衰减比例带
$\delta(t)$	脉冲函数
ε	飞升速度, 误差
η	效率
θ	温度
Λ	相对增益矩阵
λ	相对增益, 导热系数
ψ	衰减率
μ	阀门开度
ζ	阻尼比
$\xi(t)$	随机噪声
ρ	密度
σ	信号
τ	迟延时间
τ_d	纯迟延时间
τ_c	容积迟延时间
φ	角度
$\varphi(\omega)$	相频特性
ω	角频率
ω_{cr}	临界频率
ω_d	系统工作频率(阻尼自然频率)
ω_n	系统自然频率(无阻尼自然频率)
Δ	不灵敏区, 增量
A, B, C, D	状态空间模型的系数矩阵
$A(z^{-1}), B(z^{-1}), C(z^{-1}), D(z^{-1})$	迟延算子 z^{-1} 的多项式
a, b, c, d	多项式 $A(z^{-1}), B(z^{-1}), C(z^{-1}), D(z^{-1})$ 的系数向量
B	燃料量
CRT	阴极射线屏幕显示
c_p	比热容
C	电容, 热容

D 调节器的微分作用,蒸汽流量,系统干扰
 E 电压信号
 E 偏差矩阵
 $e(t)$ 偏差
 F 面积,调节器干扰系数
 f 频率
 G 传递矩阵
 $G(j\omega), G(s), G(z)$ 频率特性,传递函数,脉冲传递函数
 $g(k), g(t)$ 离散、连续脉冲响应
 H 变送器输出传递矩阵
 H 液位
 I 单位矩阵
 I 调节器积分作用,积分准则指标,电流信号
 K 系统或对象的静态增益
 K_C 调节器比例增益
 K_I 调节器积分增益
 K_D 调节器微分增益
 K_v 调节阀静态增益
 K_m 传感器静态增益
 k 采样序号
 M 质量
 m 操作量,调节量
 $M(\omega)$ 幅频特性
 m_p 最大过调量
 P 调节器比例作用
 p 压力
 Q 流量
 Q_h 热流量
 R 电阻,阻力,调节阀可调范围,理想气体常数
 $R(s), r(t)$ 设定值
 R_{xx} x 的自相关函数
 R_{xy} x 与 y 的互相关函数
 T 温度,时间常数
 T_a 飞升时间
 T_I 调节器的积分时间
 T_D 调节器的微分时间
 T_d 系统工作周期

T_{cr} 临界周期
 T_0 采样时间
 T_s 4:1 衰减响应曲线周期
 t_p 拐点时间,峰值时间
 t 时间
 u 控制向量
 u 调节器输出,控制量
 $U(s)$ 输入量拉氏变换
 $w(t)$ 过程输出侧白噪声
 w 流速
 $W(j\omega), W(s), W(z)$ 系统开环频率特性,传递函数,脉冲传递函数
 $W_c(j\omega), W_c(s), W_c(z)$ 系统闭环频率特性,传递函数,脉冲传递函数
 x 状态向量
 x 状态变量
 y 输出向量
 $y(t)$ 输出量,被调量
 $y(t_p)$ 最大动态偏差
 $Y(s)$ 输出变量的拉氏变换
 常用下标码含义
 c 调节器,控制器,闭环系统
 d 干扰通道
 F 滤波
 f 反馈
 ff 前馈
 i 输入
 o 输出
 p 对象通道
 s 标准状况,史密斯补偿器,蒸汽

目 录

绪论	1
一、生产过程自动化的发展概况和趋势	1
二、过程控制的任务和要求	4
参考文献	7

第一篇 简单控制系统

第一章 生产过程的动态特性	8	第三章 简单控制系统的整定	46
§ 1-1 过程控制系统的性能指标	8	§ 3-1 控制系统整定的基本要求	46
§ 1-2 被控对象的动态特性	10	§ 3-2 衰减频率特性法	48
一、基本概念	10	一、衰减频率特性和稳定度判据	48
二、若干简单被控对象的动态特性	11	二、衰减频率特性法整定调节器参数	50
三、工业过程动态特性的特点	19	§ 3-3 工程整定法	55
§ 1-3 过程数学模型及其建立方法	22	一、动态特性参数法	55
一、过程数学模型的表达形式与对		二、稳定边界法	57
模型的要求	22	三、衰减曲线法	57
二、建立过程数学模型的两个基本方法	23	§ 3-4 调节器参数的自整定	62
三、几个常用的经典辨识法	24	一、极限环法	63
		二、模式识别法	65
第二章 比例积分微分控制及其调节过程	31		
§ 2-1 基本概念	31	第四章 调节阀	67
§ 2-2 比例调节(P 调节)	33	§ 4-1 气动调节阀的结构	67
一、比例调节的动作规律,比例带	33	一、气动执行机构	67
二、比例调节的特点,有差调节	33	二、阀	67
三、比例带对于调节过程的影响	34	三、阀门定位器	69
§ 2-3 积分调节(I 调节)	35	§ 4-2 调节阀的流量系数	70
一、积分调节动作规律	35	一、流量系数的定义及其物理意义	70
二、积分调节的特点,无差调节	36	二、流量系数计算公式	71
三、积分速度对调节过程的影响	36	§ 4-3 调节阀结构特性和流量特性	75
§ 2-4 比例积分调节(PI 调节)	37	一、调节阀的结构特性	76
一、比例积分调节的动作规律	37	二、调节阀的流量特性	77
二、比例积分调节过程	37	§ 4-4 气动调节阀选型	82
三、积分饱和现象与抗积分饱和的措施	39	一、调节阀结构形式的选择	82
§ 2-5 比例积分微分调节(PID 调节)	42	二、调节阀气开、气关形式的选择	83
一、微分调节的特点	42	三、调节阀流量特性的选择	83
二、比例微分调节规律	42	四、调节阀口径的确定	84
三、比例微分调节的特点	43	第一篇小结	93
四、比例积分微分调节规律	44	思考题与习题	93
		参考文献	101

第二篇 复杂控制系统

第五章 串级控制系统与比值控制系统 103

§ 5-1 串级控制系统的概念 103

§ 5-2 串级控制系统的分析 108

§ 5-3 串级控制系统设计和实施中的几个问题 112

一、副回路的设计 113

二、主、副回路工作频率的选择 114

三、防止调节器积分饱和的措施 116

§ 5-4 调节器的选型和整定方法 117

一、逐步逼近法 117

二、两步整定法 118

§ 5-5 比值控制系统 118

一、比值系数的计算 119

二、比值系统中的非线性特性 121

三、比值系统的整定 121

四、常见比值控制系统 122

第六章 利用补偿原理提高系统的

控制品质 124

§ 6-1 概述 124

§ 6-2 前馈控制系统 125

一、基本概念 125

二、静态前馈控制 127

三、动态前馈控制 129

四、前馈-反馈控制系统 134

§ 6-3 大延迟系统 136

一、概述 136

二、采用补偿原理克服大延迟的影响 138

三、史密斯预估器的几种改进方案 140

§ 6-4 非线性增益补偿系统 145

一、概述 145

二、对象静态非线性特性的补偿 146

第七章 解耦控制 150

§ 7-1 相对增益 150

一、相对增益的定义 150

二、求取相对增益的方法 152

三、相对增益矩阵特性 156

§ 7-2 耦合系统中的变量匹配和

调节参数整定 159

一、变量之间的配对 159

二、控制回路之间的耦合影响及其整定 164

三、回路间动态耦合的影响 168

§ 7-3 解耦控制系统的设计 171

一、前馈补偿法 172

二、对角矩阵法 172

三、单位矩阵法 174

§ 7-4 实现解耦控制系统的

几个问题 175

一、解耦系统的稳定性 175

二、部分解耦 177

三、解耦系统的简化 178

第二篇小结 179

思考题与习题 183

参考文献 186

第三篇 过程计算机控制系统

第八章 直接数字控制系统 189

§ 8-1 直接数字控制系统的基本概念及其组成 189

§ 8-2 信号采集、数字滤波及数据处理 190

一、信号采集 191

二、数字滤波 193

三、数据处理 195

§ 8-3 DDC 的 PID 算式 196

一、PID 控制算式 196

二、PID 控制算式的改进 198

§ 8-4 数字式 PID 调节参数的整定 202

一、扩充临界比例带法 202

二、扩充响应曲线法 204

§ 8-5 DDC 应用举例 205

一、啤酒发酵过程对控制的要求 205

二、控制系统的组成 205

三、系统硬件 206

四、控制算法 207

五、控制效果 209

第九章 分布式控制系统 210

§ 9-1 概述	210	一、监督控制层的算法	220
§ 9-2 分布式控制系统的分析	212	二、计划调度层的算法	225
一、系统功能	213	附录	230
二、系统组态	215	第三篇小结	231
三、局部网络	216	思考题与习题	231
四、数据通信	218	参考文献	233
§ 9-3 分布式控制系统中的算法	220		

第四篇 典型装置的控制系统

第十章 火力发电厂大型单元机组的

自动控制

§ 10-1 大型单元机组的生产过程 及其对控制的要求	234
一、单元机组的出力控制	236
二、锅炉燃烧过程的控制	236
三、锅炉汽包水位的控制	236
四、过热蒸汽的温度控制	237
§ 10-2 单元机组出力控制系统	237
一、锅炉跟踪方式	237
二、汽机跟踪方式	238
三、机炉协调方式	238
四、出力控制系统的实例	239
§ 10-3 燃烧过程的控制系统	241
一、汽压调节对象的动态特性	241
二、燃料量控制系统	243
三、送风控制系统	246
四、负压控制系统	248
§ 10-4 锅炉的给水控制系统	249
一、给水调节对象的动态特性	249
二、汽包水位的三冲量控制方案	251
三、三冲量控制系统的工程整定	252
四、汽包水位的串级控制系统	254
§ 10-5 蒸汽温度控制系统	256
一、汽温调节对象的动态特性	256
二、带有导前微分信号的汽温控制系统	257
三、双信号汽温调节器的整定	258
四、汽温串级控制系统	259
五、蒸汽温度控制实例	260

第十一章 精馏塔的自动控制

§ 11-1 精馏过程	262
一、精馏原理	262
二、连续精馏装置和流程	264
三、精馏塔的基本型式	265
§ 11-2 精馏塔的控制目标	267
一、质量指标	267
二、产品产量和能量消耗	267
§ 11-3 影响精馏过程的因素	268
一、全塔物料平衡	268
二、能量平衡	269
三、内部物料平衡	270
四、动态影响分析	272
§ 11-4 精馏塔质量指标的选取	273
一、灵敏板的温度控制	273
二、温差控制	274
三、双温差控制	274
§ 11-5 精馏塔的基本控制方案	275
一、按精馏段指标控制	276
二、按提馏段指标控制	277
三、按塔顶塔底两端质量指标控制	278
§ 11-6 精馏塔的内回流控制和 进料热焐控制	279
一、内回流控制	279
二、进料热焐控制	280
§ 11-7 精馏塔的节能控制	281
一、产品质量指标的“卡边”控制	281
二、采用前馈控制方案	281
三、浮动塔压控制方案	282
结束语	284
思考题与习题	284
参考文献	285

第五篇 高等过程控制系统

第十二章 推理控制

§ 12-1 推理控制系统的组成	287
------------------------	-----

一、问题的提出	287
二、推理控制系统的组成	288
三、推理控制器的设计	290
§ 12-2 模型误差对系统性能的影响	291
一、扰动通道模型存在误差	291
二、控制通道模型存在误差	292
三、推理-反馈控制系统	293
§ 12-3 输出可测条件下的推理控制	294
一、系统组成	294
二、模型误差对系统性能的影响	294
三、自适应推理控制	296
四、预测推理控制	297
§ 12-4 多变量推理控制	298
一、控制器的 V 规范型结构	299
二、V 规范型控制器的设计	301
三、滤波阵的选择	306
§ 12-5 应用举例	307
一、应用实例	307
二、二次输出量的选择	309
三、控制作用的限幅	309
思考题与习题	310
参考文献	310
第十三章 预测控制	312
§ 13-1 概述	312
§ 13-2 预测控制的基本原理	313
一、内部模型	313
二、参考轨迹	316
三、控制算法	316
§ 13-3 预测控制方法的机理分析	319
一、内模控制结构法	319
二、状态空间表示法	324
§ 13-4 预测控制中的几个问题	326
一、系统的稳定性和鲁棒性	326
二、非最小相位系统中的预测控制	328
三、大延迟系统中的预测控制	331
§ 13-5 应用举例	335
思考题与习题	337
参考文献	338

第十四章 自适应控制	339
§ 14-1 概述	339
一、具有被控对象数学模型在线辨识 的自适应控制系统	339
二、参考模型自适应控制系统	340
§ 14-2 自校正控制	341
一、闭环可辨识的条件	341
二、自校正调节器	343
三、极点配置的自校正调节器	350
四、广义最小方差控制策略——自校正 控制器	354
§ 14-3 参考模型自适应控制系统	356
一、被控对象全部状态能直接获取的 自适应控制系统	357
二、根据对象输入输出设计参考模型 自适应控制系统	360
思考题与习题	366
参考文献	366
第十五章 多变量现代频域方法	367
§ 15-1 多变量系统的描述方法 ^[1]	367
§ 15-2 稳定性定理	370
§ 15-3 逆奈氏阵列法	372
一、对角优势	372
二、稳定性判据	373
三、运用 INA 方法的一些问题	374
§ 15-4 关于 INA 方法中闭环 特性的讨论	378
§ 15-5 INA 设计方法示例	380
§ 15-6 特征轨迹法	383
一、广义奈氏稳定性判据	383
二、互联作用	384
三、近似可交换控制器	384
四、设计方法和举例	386
§ 15-7 其它设计方法	390
一、并矢展开法	390
二、顺序回差法	393
§ 15-8 小结	396
思考题与习题	397
参考文献	398

绪 论

一、生产过程自动化的发展概况和趋势

自本世纪 30 年代以来,自动化技术获得了惊人的成就,已在工业生产和科学发展中起着关键的作用。当前,自动化装置已成为大型设备不可分割的重要组成部分。可以说,如果不配置合适的自动控制系统,大型生产过程是根本无法运行的。实际上,生产过程自动化的程度已成为衡量工业企业现代化水平的一个重要标志。

回顾自动化技术发展的历史,可以看到它与生产过程本身的发展有着密切的联系,是一个从简单形式到复杂形式,从局部自动化到全局自动化,从低级智能到高级智能的发展过程。自动化在工业生产中的作用,大致经历了三个发展阶段。

50 年代以前可以归结为自动化发展的第一阶段。在这一时期中,理论基础是用传递函数进行数学描述,以根轨迹法和频率法作为分析和综合系统基本方法的经典控制理论,因而带有明显的依靠手工和经验进行分析和综合的色彩。在设计过程中,一般是将复杂的生产过程人为地分解为若干个简单过程,最终实现如图 1 所示的单输入单输出的控制系统。其控制目标也就只能满足于保持生产的平稳和安全,属于局部自动化的范畴。当时,也出现了一些如串级、前馈补偿等十分有效的复杂系统,相应的控制仪表也从基地式发展到单元组合式。但总的说来,自动化水平还处于低级阶段。

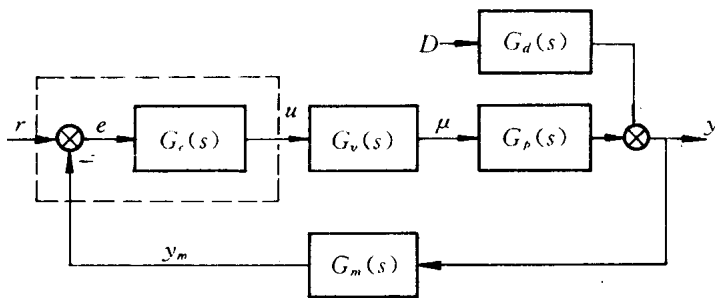


图 1 简单控制系统方框图

图中, $G_c(s)$ 为调节器传递函数; $G_v(s)$ 为执行器传递函数; $G_p(s)$ 为对象控制通道传递函数; $G_d(s)$ 为对象干扰通道传递函数; $G_m(s)$ 为检测变送器传递函数; r 为设定值; y_m 为被调量的测量信号; y 为被调量,又称输出量; μ 为执行器输出; u 为调节器输出; D 为干扰; e 为偏差, $e=r-y_m$ 。

60 年代的 10 年,可以认为是工业自动化发展的第二个阶段。50 年代末,由于生产过程迅速向着大型化、连续化的方向发展,工业过程的非线性、耦合性和时变性等特点十分突出,原有的简单控制系统已经不能满足要求,自动控制面临着工业生产的严重挑战。幸

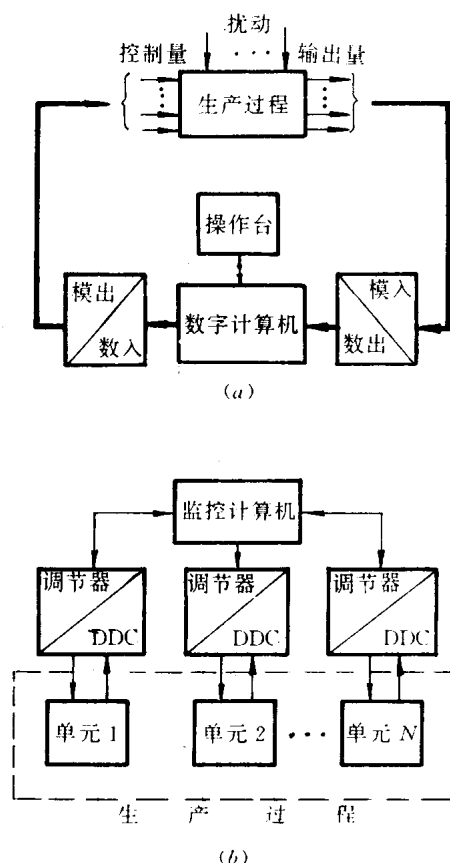


图2 电子计算机控制系统
(a) 直接数字控制系统; (b) 计算机监控系统

我国,也曾在发电厂和炼油厂进行了计算机控制的实验研究。当时由于电子计算机不但体积大,价格昂贵,而且在可靠性和功能方面还存在不少问题,计算机控制始终停留在试验阶段。此外,现代控制理论与工程实际之间还有很大的差距,这主要是由于生产过程机理复杂,建模困难,性能指标不易确定,控制策略十分缺乏等等,使得现代控制理论一时还难以应用于生产过程。尽管如此,在这一阶段中,无论在现代控制理论的移植应用,还是在计算机引入工业过程方面,都有了良好的开端和尝试。

70年代工业自动化的发展表现出两个明显的特点,它们正是进入第三个阶段的标志。就第一个特点来说,70年代初已开始出现了适合工业自动化的控制计算机商品化系列。由于大规模集成电路制造的成功和微处理器的问世,使计算机的功能丰富多彩,可靠性大为提高,而价格却大幅度下降。尤其是工业用控制机,在采用了冗余技术,软硬件的自诊断功能等措施后,其可靠性已提高到基本上能够满足工业控制要求的程度。值得指出的是,从70年代中期开始,针对工业生产规模大、过程参数和控制回路多的特点,为了满足工业用计算机应具有高度可靠性和灵活性的要求,出现了一种分布式控制系统(Distributed Control Systems, DCS),又称集散系统,如图3所示。它是集计算机技术、控制技

运的是,为适应空间探索的需要而发展起来的现代控制理论已经产生并已在某些尖端技术领域取得惊人的成就。它以状态空间分析方法为基础,内容包括了以最小二乘法为基础的系统辨识,以极大值原理和动态规划为主要方法的最优控制和以卡尔曼滤波理论为核心的最佳估计等三部分。值得注意的是,现代控制理论在综合和分析系统时,已经从外部现象深入到揭示系统内在的规律性,从局部控制进入到在一定意义下的全局最优,而且在结构上已从单环扩展到适应环、学习环等。可以说,现代控制理论是人们对控制技术在认识上的一次质的飞跃,为实现高水平的自动化奠定了理论基础。与此同时,电子数字计算机的发展与普及为现代控制理论的应用开辟了道路,为实现工业自动化提供了十分重要的技术手段。在60年代中期,已出现了如图2所示的用计算机代替模拟调节器的直接数字控制(Direct Digital Control, DDC)和由计算机确定模拟调节器或DDC回路最优设定值的监督控制(Supervisory Computer Control, SCC),并有一些成功的报导。60年代初,国外曾试图用一台计算机顶替全部模拟仪表,实现“全盘计算机控制”。在我

术、通讯技术和图形显示等技术于一体的计算机系统,一经问世,就受到工业界的青睐。目前世界上已有 60 余家公司先后推出各自开发的系统^[1]。我国有的单位也在研制自己的集散系统。这种系统在结构上的分散,即将计算机分布到车间或装置一级,不仅使系统危险分散,消除了全局性的故障节点,增加了系统的可靠性,而且可以灵活方便地实现各种新型控制规律和算法,便于系统的分批调试和投运。显然,这种分布式系统的出现,为实现高水平的自动化提供了强有力的技术工具,给生产过程自动化的发展带来深远的影响。可以说,从 70 年代开始,工业生产自动化已进入计算机时代。

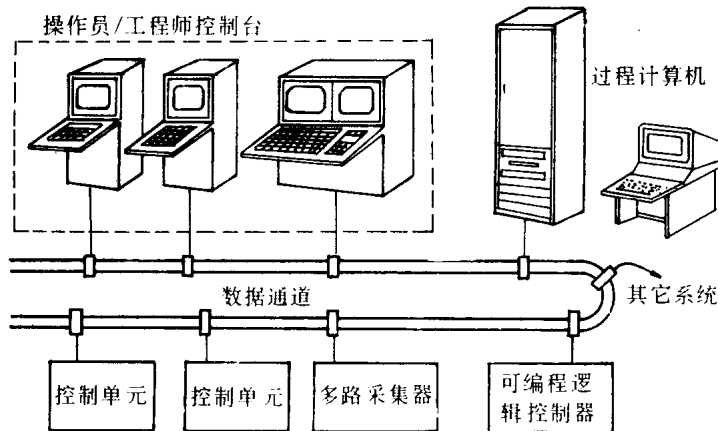


图 3 分布式计算机系统

第二个特点是控制理论与其它学科相互交叉,互相渗透,向着纵深方向发展,从而开始形成了所谓的第三代控制理论,即大系统理论和智能控制理论。众所周知,一类复杂的工业过程,如反应过程、冶炼过程和生化过程等,本身机理十分复杂,还没有被人们充分认识,而且这类过程往往还受到众多随机因素的干扰和影响,因而难以建立精确的数学模型,以满足闭环最优控制的要求。同时,这类过程的控制策略也有待进一步研究。目前已有的策略或是过于复杂,难以实行在线控制,或者过于粗糙,不能满足高水平的控制要求。解决这类问题的重要途径之一就是將人工智能、控制理论和运筹学三者相结合的智能控制。这一方面已受到国内外控制界的极大重视,并已有在化工、冶金和水泥工业中成功应用的报导^{[2]—[4]}。在我国,已出现了利用知识和推理的实时专家系统进行诊断、预报和控制的实例。另外,70 年代以来,由于世界范围内出现的能源危机和市场剧烈竞争,工业生产规模更趋庞大,如每个电站的功率已经从 20 万 kW 发展到 60 万、100 万 kW,石化工业中年产 30 万吨级甚至更大的乙烯、合成氨等工厂也大批建成。设备的更新换代,较大地提高了生产率。但要进一步提高产量,降低成本,节约原材料和减少能源消耗并非易事,必须在分散控制的基础上,从全局最优的观点出发对整个大系统进行综合协调。国内外已在造纸、冶金和石化系统中开展了这些方面的科研工作。可以说,工业生产实际提出的以优质、高产、低消耗为目标的控制要求,从客观上促进了第三代控制理论的形成和发展。尽管到目前为止,它还处在发展和完善过程中,但已受到极大的重视和关注,取得很大的进展。与此同时,在现代控制理论中,诸如非线性系统、分布参数系统、随机控制以及容错控制等

等也在理论上和实践中得到了发展。总之,在这个阶段中,工业自动化正在发生着巨大的变革,它已突破了局部控制的模式,进入到全局控制,既包含了若干子系统的闭环控制,又有大系统协调控制、最优控制以及决策管理,即人们称之为控制管理一体化的新模式。它的出现将使工业自动化系统在大量获取生产过程和市场信息的基础上,科学地安排、调度生产,充分发挥设备的生产能力,最终达到优质高产低消耗的控制目标。

从工业自动化发展的进程,可以得到如下结论:

(1) 工业自动化的发展与工业生产过程本身的发展有着极为密切的联系。工业生产本身的发展,诸如工艺流程的变革,设备的更新换代,生产规模的不断扩大等促进了自动化的进程,而工业自动化在控制理论和技术工具方面的新成就又保证了现代工业生产在安全平稳的前提下进行“卡边”运行,充分发挥设备的潜力,提高生产率,获取最大限度的经济和社会效益。

(2) 工业自动化已进入计算机时代,进入所谓的计算机集成过程系统(Computer Integrated Production Systems, CIPS)的时代^{[5]—[7]}。可是,当前面对琳琅满目的计算机系统,尽管已有许多现成的先进控制理论,却缺乏行之有效的控制方法去满足工业生产不断提出的高要求,因此,加强控制理论与生产实际密切结合,注意引入智能控制、专家系统,逐步形成不同形式的既简单又实用的控制结构和算法,是控制理论工程化的任务,是今后过程控制的主要研究内容。

二、过程控制的任务和要求

工业自动化涉及的范围极广,过程控制是其中最重要的一个分支。它主要针对所谓六大参数,即温度、压力、流量、液位(或物位)、成分和物性等参数的控制问题。它能覆盖许多工业部门,诸如石油、化工、电力、冶金、轻工、纺织等等,因而,过程控制在国民经济中占有极其重要的地位。

工业生产对过程控制的要求是多方面的,最终可以归纳为三项要求,即安全性、经济性和稳定性。安全性是指在整个生产过程中,确保人身和设备的安全,这是最重要的也是最基本的要求。通常是采用参数越限报警、事故报警和联锁保护等措施加以保证。现在,由于工业企业高度连续化和大型化的特点,提出了在线故障预测和诊断,设计容错控制系统等来进一步提高运行的安全性。这里还应特别指出,随着环境污染日趋严重,生态平衡遭到破坏,现代企业必须把符合国家制定的环境保护法视为生产安全性的重要组成部分。经济性,旨在生产同样质量和数量产品所消耗的能量和原材料最少,也就是要求生产成本低而效率高。近若干年来,随着市场竞争加剧和世界能源的匮乏,经济性已受到过去从未有过的重视。生产过程局部或整体最优化问题已经提上议事日程成为极需解决的迫切任务。最后一项稳定性的要求是指系统具有抑止外部干扰,保持生产过程长期稳定运行的能力。众所周知,工业生产环境不是固定不变的,例如原材料成分改变或供应量不同,反应器中催化剂活性的衰减,换热器传热面沾污,还有市场销售量的起落等等都是客观存在的,它们会或多或少地影响稳定生产。当然,对简单控制系统稳定性的判断方法已很成熟,但对大型、复杂大系统稳定性的分析就困难得多。随着工业生产的发展,为了满足上述三项

要求,在理论上和实践上都还有许多课题有待研究。

过程控制的任务就是在了解、掌握工艺流程和生产过程的静态和动态特性的基础上,根据上述三项要求,应用理论对控制系统进行分析和综合,最后采用适宜的技术手段加以实现。值得指出的是,为适应当前生产对控制的要求愈来愈高的趋势,必须充分注意现代控制在过程中的应用,其中过程模型化的研究起着举足轻重的作用,因为现代控制技术的应用在很大程度上取决于对过程静态和动态特性认识的深度。因此可以说,过程控制是控制理论、工艺知识、计算机技术和仪器仪表等知识相结合而构成的一门应用科学。文献[8]提出,在研究探索的实践中,可能形成一门更适合工业过程控制特点的新的控制理论,从而使过程控制迅速提高到一个新的水平,这不是没有道理的。

过程控制的任务是由控制系统的设计和实现来完成的。现在以一个再沸油加热炉的控制实例来加以说明。图4所示加热炉的设计和实现有如下步骤:

1. 确定控制目标 对于给定的被控过程,可以根据具体情况提出各种不同的控制目标。以加热炉为例,可以有以下几个不同的目标:

(1) 在安全运行条件下,保证热油出口温度稳定;

(2) 在安全运行条件下,保证热油出口温度和烟气含氧量稳定;

(3) 在安全运行条件下,保证热油出口温度稳定,而且加热炉热效率最高。

显然,为实现不同的控制目标就应有不同的控制方案。

2. 选择测量参数(被调量) 无论采用什么控制方案,都需要通过某些参数的测量来控制 and 监视整个生产过程。例如在加热炉中,热油出口温度、烟气含氧量、燃料油压力、炉膛负压等等,这些参数就是图1中所示的参数 y 。在确定了需要检测的参数后,就应选择合适的测量元件和变送器。应该注意,有些参数可能因某些原因不能直接测量,则应通过测量与之成一定线性关系的另一参数(又称为间接参数)来获取,或者利用参数估计的方法来得到。有些控制目标只能通过计算得到,比如加热炉中的热效率就是排烟温度、烟气中含氧量和一氧化碳含量的函数,必须分别测量这些参数并进行综合计算才能得到。蒸馏塔中回流比也属于这一类参数。

3. 操作量的选择 即指图1中操作量 μ 的选择。一般情况下,操作量都是工艺规定的,在控制系统设计中没有多大选择余地。但是在有多个操作量和被调量的情况下,用哪个操作量去控制哪个被调量还是要认真加以选择的。例如在耦合多变量系统中,必须就操作量和被调量如何配对问题作出抉择。在上述加热炉控制中,以燃油量作为操作量来控制热油出口温度,用烟道挡板改变烟气流量来保证烟气中含氧量,这些是由工艺规定的。但是,如果除了烟道挡板外,设备中还装有炉膛入口处的送风挡板,那末用哪个挡板来调节

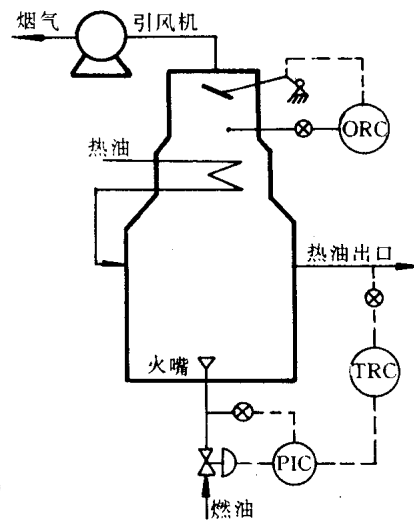


图4 加热炉控制流程图