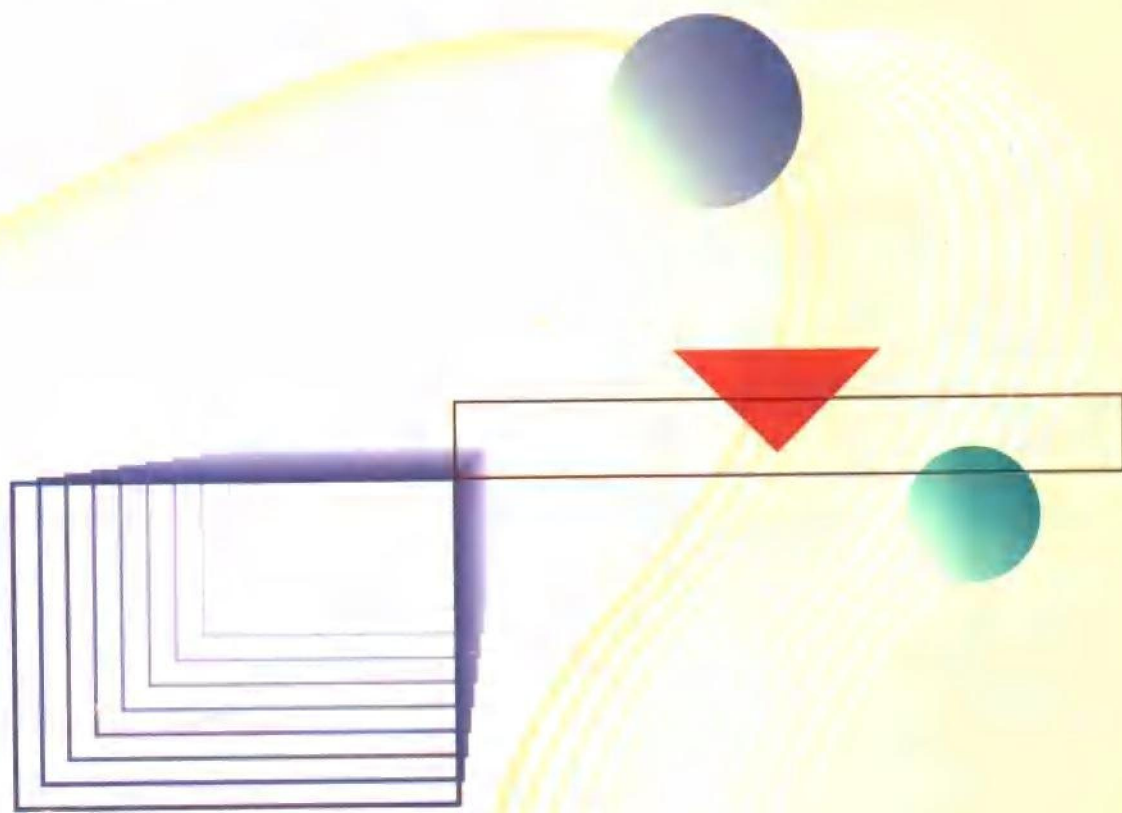


B 普通高等教育机电类规划教材

过程控制与 自动化仪表

西安理工大学 侯志林 主编



机械工业出版社
China Machine Press

普通高等教育机电类规划教材

过程控制与自动化仪表

主 编 侯志林
副主编 潘永湘
参 编 李守智
主 审 施 仁

ND28/30



机械工业出版社

本书基于生产实际和工程应用,在介绍了生产过程中的自动控制、自动化仪表的工作原理及使用要求的基础上,重点介绍了过程模型的建立,各种过程控制系统的分析、设计、参数整定及工程应用等问题。书中除了叙述常用过程控制系统外,还对多变量解耦控制、适应型控制、推断控制、预测控制和模糊控制等实用型控制策略进行了分析和讨论。此外,对代表当前过程控制发展方向的集散控制系统也进行了较为全面、系统的介绍。

全书结构体系和内容安排,充分体现了从实际出发,应用各种控制规律,达到解决生产实际问题的目标和原则。

图书在版编目 (CIP) 数据

过程控制与自动化仪表/侯志林主编.—北京:机械工业出版社,
1999. 11

普通高等教育机电类规划教材

ISBN 7-111-07090-9

I. 过… II. 侯… III. ①过程控制-高等教育-教材②自动化仪表-
高等教育-教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 45931 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:刘 辉 版式设计:张世琴 责任校对:张 佳

封面设计:姚 毅 责任印制:何全君

三河市宏达印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·18.75 印张·459 千字

0 001 - 5000 册

定价:24.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、68326677 - 2527

前 言

本书是根据 1997 年 4 月和 1998 年 5 月全国高等工业院校电工及自动化类专业教学指导委员会第二次和第三次会议精神与《过程控制与自动化仪表》课程基本要求所确定的编写大纲编写的。它是自动化专业的一门必修课教材。也可供各工业部门从事过程控制工作的工程技术人员和大专院校相关专业师生参考。

本课程是在学完电子技术基础、自动控制理论和微型计算机原理等课程以后所开设的自动化类专业课程。通过本书的教学或自修可以了解和掌握典型的过程检测和控制仪表的工作原理与工作性能，并能根据生产过程的特点和控制要求，选用适当的自动化仪表或计算机，组成实用型过程控制系统。全书以典型工业过程控制系统的构成为目标，以应用自动控制理论设计过程控制系统为主线，重点介绍了过程建模、系统分析和设计以及参数整定方法。在内容的叙述上，以理论联系实际为原则，特别注重简明扼要、通俗易懂，努力使系统性与典型性相统一，技术先进性与工程实用性相融合。全书自始至终体现了“从生产实际出发，应用各种控制规律实现过程控制，达到解决生产实际问题的目的”的特点。在知识结构的安排上，不仅考虑与前置课程知识的合理衔接，而且还使各部分内容的安排次序上顺理成章。使读者阅读时通达顺畅。

全书共分十章。其中包括第一章绪论，第二章被控过程的数学模型，第三章过程参数的检测与变送及选用方法，第四章过程控制仪表及使用，第五章简单过程控制系统的方案设计和调节器参数的工程整定方法，第六章常用高性能过程控制系统，第七章特殊工艺要求的过程控制系统，第八章复杂工业过程控制系统，其中包括多变量过程的解耦控制，以及推断控制、预测控制和模糊控制等，第九章集散控制系统（DCS），第十章典型装置的过程控制。每章后均附有思考题和习题。本书由西安理工大学侯志林教授任主编，潘永湘副教授任副主编，李守智副教授参编。其中第三章由侯志林教授编写，第二、五章由李守智副教授编写。第一、四、六、七、八、九、十章由潘永湘副教授编写。西安交通大学施仁教授审阅全稿，并对本书提出了许多宝贵意见和建议，这对提高本教材的质量起了重要作用，对此表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中，得到了高等学校自动化专业教学指导委员会主任委员上海大学陈伯时教授和专业委员会委员西安理工大学徐平教授的热情关怀和指导，特此表示敬意和感谢。在本书的组稿和出版过程中，机械工业出版社教材编辑室编辑韩雪清同志曾给予了大力支持并付出了辛勤劳动，对此表示诚挚的谢意。另外还参阅了大量书刊文献和资料，在此对有关单位和作者一并致谢。

本书参考教学时数为 60 学时，其中包括 8 学时实验。

由于编者水平有限，书中的缺点和错误在所难免，敬请各大专院校师生和广大读者批评指正。

编 者
1998 年 12 月

目 录

前 言	
第一章 绪论	1
第一节 过程控制的发展概况	1
第二节 过程控制的特点、任务和要求	2
第三节 过程控制系统的分类及其性能指标	5
思考题与习题	8
第二章 被控过程的数学模型	9
第一节 过程建模的基本概念	9
第二节 解析法建立过程数学模型	13
第三节 响应曲线法辨识过程的数学模型	21
第四节 相关函数法辨识过程的数学模型	31
第五节 最小二乘法估计系统模型参数	41
第六节 计算机在辨识数学模型中的应用	44
思考题与习题	46
第三章 过程参数检测与变送	49
第一节 过程参数检测概述	49
第二节 温度检测与变送	58
第三节 压力检测与变送	88
第四节 流量检测仪表	103
第五节 液位检测仪表	111
第六节 成分分析仪表	115
思考题与习题	125
第四章 过程控制仪表	127
第一节 DDZ-Ⅲ型调节器	127
第二节 执行器	138
第三节 可编程序数字调节器	147
思考题与习题	162
第五章 简单控制系统的设计及参数整定方法	164
第一节 过程控制系统设计概述	164
第二节 过程特性对控制质量的影响及控制方案的确定	166
第三节 调节规律对控制质量的影响及调节规律的选择	173
第四节 调节器参数的工程整定方法	177
第五节 单回路控制系统设计原则应用举例	183
思考题与习题	186
第六章 常用高性能过程控制系统	190
第一节 串级控制系统	190
第二节 前馈控制系统	201
第三节 大时延过程的补偿控制系统	206
思考题与习题	208
第七章 实现特殊要求的过程控制系统	210
第一节 比值控制系统	210
第二节 均匀控制系统	216
第三节 分程控制系统	218
第四节 选择性控制系统	222
思考题与习题	225
第八章 复杂过程控制系统	229
第一节 多变量解耦控制系统	229
第二节 适应过程参数变化的控制系统	238
第三节 推理控制系统	242
第四节 预测控制系统	248
第五节 未知模型的模糊控制技术	252
思考题与习题	263
第九章 集散控制系统 (DCS)	265
第一节 集散控制系统概述	265
第二节 集散控制系统的分层结构及硬件功能	271
第三节 集散控制系统的软件配置及组态方法	275
第四节 集散控制系统的网络通信	278
第五节 集散控制系统的设计及其实施程序	281
第六节 集散控制系统的进一步发展	283
思考题与习题	285
第十章 典型过程的控制工程	286
第一节 电厂锅炉的过程控制	286
第二节 精馏塔的过程控制	290
思考题与习题	292
参考文献	294

第一章 绪 论

第一节 过程控制的发展概况

自本世纪 30 年代以来,自动化技术获得了惊人的成就,已在工业生产和国民经济各行业起着关键的作用。自动化水平已成为衡量各行各业现代化水平的一个重要标志。

过程控制通常是指石油、化工、电力、冶金、轻工、建材、核能等工业生产中连续的或按一定周期程序进行的生产过程自动控制,它是自动化技术的重要组成部分。在现代工业生产过程中,过程控制技术正在为实现各种最优的技术经济指标、提高经济效益和劳动生产率、改善劳动条件、保护生态环境等方面起着越来越大的作用。

过程控制的发展,大致经历了以下几个阶段:

一、仪表化与局部自动化(50 ~ 60 年代) 阶段

50 年代前后,过程控制开始得到发展。一些工厂企业实现了仪表化和局部自动化。这是过程控制发展的第一个阶段。这个阶段的主要特点是:采用的过程检测控制仪表为基地式仪表和部分单元组合式仪表,而且多数是气动仪表;过程控制系统的结构绝大多数是单输入—单输出系统;被控参数主要是温度、压力、流量和液位四种工艺参数;控制的目的是保持这些工艺参数的稳定、确保生产安全;过程控制系统分析、综合的理论基础是以频率法和根轨迹法为主体的经典控制理论。

二、综合自动化(60 ~ 70 年代中期) 阶段

在 60 年代,随着工业生产的不断发展,对过程控制提出了新的要求;电子技术的迅速发展,也为自动化技术工具的不断完善提供了条件,过程控制开始进入第二阶段。在这一阶段中,工业生产过程出现了一个车间乃至一个工厂的综合自动化,其主要特点是:大量采用单元组合仪表(包括气动和电动)和组装式仪表。与此同时,计算机开始应用于过程控制领域,实现了直接数字控制(DDC)和设定值控制(SPC)。在过程控制系统的结构方案方面,相继出现了各种复杂的控制系统,如串级控制、前馈—反馈复合控制、Smith 预估控制以及比值、均匀、选择性控制等,一方面提高了控制质量,另一方面也满足了一些特殊的控制要求。过程控制系统的分析与综合的理论基础,由经典控制理论发展到现代控制理论。控制系统由单变量系统转向多变量系统,以解决生产过程中遇到的更为复杂的问题。

三、全盘自动化(70 年代中期至今) 阶段

70 年代中期以来,随着现代工业生产的迅猛发展,微型计算机的开发与应用,使过程控制的发展达到了一个新的水平,实现了全车间、全工厂、甚至全企业无人或很少人参与操作管理、过程控制最优化与现代化的集中调度管理相结合的方式,即全盘自动化的方式,过程控制发展到现代过程控制的新阶段,这是过程控制发展的第三阶段。这一阶段的主要特点是:在新型的自动化技术工具方面,开始采用以微处理器为核心的智能单元组合仪表(包括可编程序控制器等);成分在线检测与数据处理的应用也日益广泛;模拟调节仪表的品种不断增加,可靠性不断

提高,电动仪表也实现了本质安全防爆,适应了各种复杂过程控制的要求。在过程控制系统的结构方面,由单变量控制系统发展到多变量系统,由生产过程的定值控制发展到最优控制、自适应控制,由仪表控制系统发展到计算机分布式控制系统等。

在控制理论的运用方面,现代控制理论移用到过程控制领域,如状态反馈、最优控制、解耦控制等在过程控制中的应用,加速了过程建模、测试以及控制方法设计、分析等控制技术和理论的发展。

当前,过程控制已进入了计算机时代,进入了所谓计算机集成过程控制系统(Computer Integrated Process System, CIPS)的时代。CIPS利用计算机技术,对整个企业的运作过程进行综合管理和控制,它包括市场营销、生产计划调度、原材料选择、产品分配、成本管理,以及工艺过程的控制、优化和管理等全过程。分布式控制系统,先进过程控制策略以及网络技术、数据库技术等将是实现 CIPS 的重要基础。可以预计,过程控制将在我国社会主义现代化建设过程中得到更快的发展。

第二节 过程控制的特点、任务和要求

一、过程控制的特点

与其他控制系统相比,过程控制有以下几方面的特点:

1. 系统由系列化生产的过程检测控制仪表组成

在大部分工业生产部门中,锅炉是一种不可缺少的动力设备。下面以发电厂锅炉过热蒸汽温度控制为例,介绍过程控制系统的组成。如图 1-1 所示,由锅炉汽鼓出来的饱和蒸汽经过热器加热成为过热蒸汽,而过热蒸汽的温度是保证发电厂的汽轮机组正常运行的一个重要条件,必须对其进行严格控制。通常在过热器之前或中间串接一个减温器,通过改变减温水流量大小来控制过热蒸汽的温度。为达此目的,通常采用系列化生产的 DDZ-III 仪表构成控制系统,即用热电阻 1 检测过热蒸汽的温度,经温度变送器 2,将测量信号送至调节器 3 的输入端,并与代表蒸汽温度的给定值(图中未画)进行比较,调节器按此偏差发出控制命令,来控制调节阀 4 的开启度,从而改变减温水流量,达到控制过热蒸汽温度的目的。

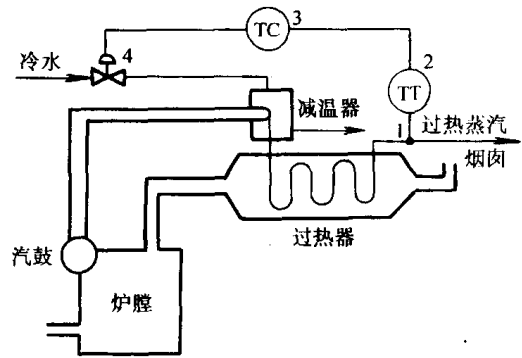


图 1-1 锅炉过热蒸汽温度控制示意图
1—热电阻 2—变送器 3—调节器 4—调节阀

图 1-2 所示为系统的框图。

由上可以看出,一个简单的过程控制系统是由被控过程和过程检测控制仪表(包括测量元件、变送器、调节器和调节阀)两部分组成。为了设计系统方便和得到预期的控制效果,根据生产工艺要求,通过选用系列化生产的过程检测控制仪

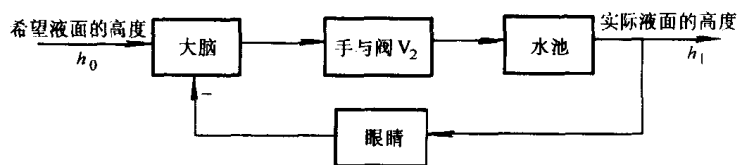


图 1-2 锅炉过热蒸汽温度控制框图

表,组成过程控制系统,并通过对控制系统调节器参数的整定,使系统运行在最佳状态,实现对生产过程的最佳控制。

2. 被控过程多种多样

在现代工业生产过程中,由于生产规模大小不同,生产工艺要求各异,生产的品种多种多样,因此过程控制中的被控过程的形式也是多种多样的。有些生产过程是在较大的设备中进行的,它们的动态特性一般具有大惯性、大时延(大滞后)的特点,而且常伴有非线性特性。例如热工过程中的锅炉、热交换器、动力核反应堆;冶金过程中的平炉、转炉;机械工业过程中的热处理炉;石油化工过程中的精馏塔、化学反应器、流体输送设备等,这些过程的工作机理复杂,有些至今尚未被人们所认识,因此很难用解析方法得出其精确的动态数学模型,要设计能适应各种过程的通用控制系统是比较困难的。

3. 控制方案十分丰富

由于被控过程的多样性,即大多属多变量、分布参数、非线性、大惯性、大时延过程。为了满足生产中越来越高的要求,控制方案也越来越丰富。通常既有单变量控制系统,也有多变量控制系统;有常规仪表控制系统,也有计算机控制系统;有提高控制品质的控制系统,也有实现特殊工艺要求的控制系统;有传统的 PID 控制,也有新型的自适应控制、预测控制、推理控制、模糊控制等。这些都说明过程控制的控制方案是十分丰富的。

4. 控制过程多属慢过程参量控制

由于被控过程大多具有大惯性、大时延(滞后)等特点,因而决定了控制过程是一个慢过程。另外,在一些生产过程中,例如石油、化工、冶金、电力、轻工、建材、制药等生产过程中,常常用一些物理量来表征生产过程是否正常,这些物理量多半是温度、压力、流量、液位(物位)、成分等,对它们的控制多半属参量控制。

5. 定值控制是过程控制的一种主要形式

在目前的多数过程控制系统中,其给定值是恒定的或保持在很小范围内变化。控制的主要目的是在于如何减小或消除外界扰动对被控量的影响,使生产稳定,保证产品的产量和质量。因此,定值控制是一种主要形式。

二、过程控制的任务和要求

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,这是最重要也是最基本的要求。为达此目的,通常采用参数越限报警、联锁保护等措施加以实现。随着工业生产过程的高度连续化和大型化,还提出在线故障诊断和预测、设计容错控制系统等来提高运行的安全性;经济性,是指生产同样质量和数量产品所消耗的能量和原材料最少,即要求生产成本低而效率高;稳定性是指系统具有抑制外部干扰,保持生产过程长期稳定运行的能力。

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、动态特性的基础上,根据上述三项要求,应用控制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。因此,过程控制是控制理论、工艺知识、计算机技术和自动化仪表等知识相结合而构成的一门应用科学。现以具体实例来说明过程控制任务的具体实现。

图 1-3 为加热炉控制流程图。对该加热炉的控制设计和实现步骤如下所示。

1. 确定控制目标

对于给定的加热炉,可以有以下几个不同的控制目标:

- (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,而且要求加热炉热效率最高。

显然,为实现不同的控制目标就应有不同的控制方案。

2. 选择被控参数

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。在该加热炉中,热油出口温度、烟气含氧量、燃料油压力、炉膛负压等,都可以选作被控参数,都需要进行检测。若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)来得到,或者利用参数估计的方法来得到;还有些参数只能通过计算得到,如加热炉中的热效率就是通过排烟温度、烟气中含氧量和一氧化碳含量进行综合计算得到的。

3. 操作量(又称控制介质)的选择

一般情况下,操作量都是由工艺规定的,在控制系统设计中没有多大选择余地。但在多个操作量和多个被控量的情况下,用哪个操作量去控制哪个被控量还是要认真加以选择的。在上述加热炉控制中,以燃料油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,这通常是由工艺规定的。但是,如果除了烟道挡板外,还装有炉膛入口处的送风挡板,那么用哪个挡板来调节烟气含氧量还是有选择余地的。

4. 控制方案的确定

控制方案与控制目标有密切的关系。在加热炉的控制中,如果只要求达到第一个控制目标,则只要采用热油出口温度简单控制系统的方案(即 SISO)就可满足。对于第二个控制目标,只要再加一个烟气含氧量简单控制系统,用两个单回路即可完成控制任务。如果生产对被控量的控制精度要求较高,又由于两个单回路之间存在耦合关系,则分别采用两个单回路的控制方案已不能满足要求,而要把加热炉看作一个多输入多输出系统(即 MIMO 系统)。对于第三个控制目标,除了分别对温度和含氧量采用定值控制外,还要随时调整含氧量的设定值以保证加热炉热效率最高,这就需要建立燃烧过程的数学模型,设计比较复杂的控制方案来达到目的。

由此可以看到,控制方案是随控制目标和控制精度要求的不同而有所不同,它是整个设计过程的关键。

5. 选择控制策略

控制方案决定了控制算法。在很多情况下,只需选择商品化的常规 PID 调节器即可达到控制目的。对于需要采用高级过程控制算法,如推理控制、预测控制、解耦控制、自适应控制等等,由于涉及到较多的计算,只能借助于计算机才能实现。控制方案和控制策略构成了系统设计的核心内容。

6. 执行器的选择

在确定了控制方案和控制策略之后,就要选择执行器。目前可供选择的商品化执行器有气动和电动两种,尤以气动执行器的运用最为广泛。这里最关键的问题也是最容易被人们忽视的

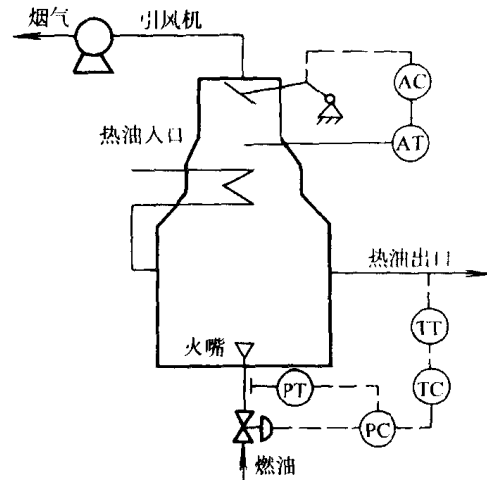


图 1-3 加热炉控制流程图

问题就是如何根据操作量的工艺条件和对调节阀流量特性的要求来选择合适的调节阀。调节阀的规格选得过大或过小,流量特性不匹配,控制系统就难以达到预期的控制目标,有的甚至使系统无法运行,因此,应该引起充分的重视。

7. 设计报警和联锁保护系统

对于关键参数,应根据工艺要求规定其高低报警值。报警系统的作用在于及时提醒操作人员密切注视生产状况,以便采取措施减少事故的发生。联锁保护系统是指当生产出现严重事故时,为保证设备、人身安全,使各个设备按一定次序紧急停止运转的系统。例如当加热炉运行中出现严重事故而必须紧急停止运行时,联锁保护系统必须先停燃油泵,后关燃油阀,经过一定时间后,再停引风机,最后切断热油阀。这一套联锁保护程序将避免事故发生。不然的话,若先关热油阀则可能烧坏油管;或先停引风机,会使炉内积累大量燃油气,使再次点炉时出现爆炸事故,损坏炉体。因此,正确设计报警和联锁保护系统是保证生产安全的重要措施。

8. 控制系统的调试、投运和调节器的参数整定

控制系统安装完毕后,就应随着生产过程进行试运行,按控制要求检查和调整各控制仪表和设备的工作情况,包括调节器的参数整定等,依次将全部控制系统投入运行。

以上简单地介绍了一个过程控制系统从设计到实现的全过程。由此可见,对一个从事过程控制的工作者来说,除了掌握控制理论、计算机、仪器仪表知识以及现代控制技术之外,还要十分熟悉生产过程的工艺流程,从控制的角度理解它的静态和动态特性,这是设计和实现一个好的控制系统的必要基础。与此同时,还要对控制方案及其实现所需经费进行比较和分析,使之既要满足控制要求又要尽可能降低成本,这里就不再赘述了。

第三节 过程控制系统的分类及其性能指标

一、过程控制系统的分类

过程控制系统的分类方法很多,若按被控参数的名称分,有温度、压力、流量、液位、成分等控制系统;若按被控量的多少分,有单变量和多变量控制系统;若按完成特定工艺要求分,有比值、均匀、分程和选择性控制系统等;若按常规仪表和计算机分,有常规仪表过程控制系统和计算机过程控制系统等。此外,若按系统的某些特点分类还有下列几种。

1. 按系统的结构特点分

(1) 反馈控制系统 反馈控制系统是根据系统被控量与给定值的偏差进行工作的,偏差值是控制的依据,最后达到减小或消除偏差的目的。反馈控制系统由被控量的反馈构成一个闭合回路,所以又称闭环控制系统。反馈控制系统是过程控制系统中的一种最基本的控制形式。此外,当反馈信号有多个、构成多个闭合回路时,则称为多回路控制系统。

(2) 前馈控制系统 前馈控制系统是根据扰动量的大小进行工作的,扰动是控制的依据。由于前馈控制没有被控量的反馈,因此也称为开环控制系统。图 1-4 所示为前馈控制系统框图。扰动 $f(t)$ 是引起被控量 $y(t)$ 变化的原因,通过前馈控制可以及时消除扰动 $f(t)$ 对被控量 $y(t)$ 的影响。但是,由于前馈

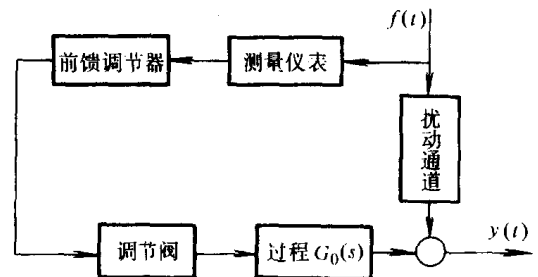


图 1-4 前馈控制系统框图

控制是一种开环控制,又不检查控制的最终结果,所以在实际生产过程中不单独采用。

(3) 前馈—反馈复合控制系统 图 1-5 所示为复合控制系统框图。前馈控制的主要优点是能及时迅速克服主要扰动对被控量的影响。反馈控制又能检查控制的效果。所以,在反馈控制系统中引入前馈控制,构成复合控制系统,可以大大提高控制质量。

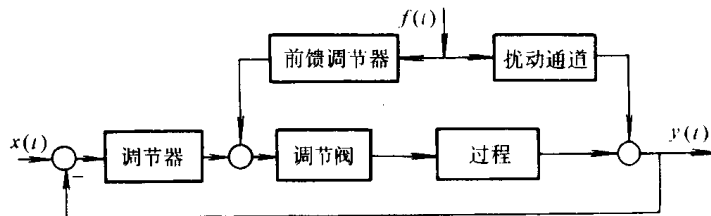


图 1-5 复合控制系统框图

2. 按给定值信号的特点分

(1) 定值控制系统 定值控制

系统是工业生产过程中应用最多的一种过程控制系统。在运行时,系统被控量(温度、压力、流量、液位、成分等)的给定值一般来说是固定不变的,有时则根据生产工艺要求,允许在规定的范围内变化。对于大多数定值控制系统来说,由于给定值不变,所以系统的输入是扰动信号。

(2) 随动控制系统 随动控制系统是被控量的给定值随时间任意变化的控制系统。它的主要作用是克服一切扰动,使被控量随时跟踪给定值。例如,在锅炉燃烧控制系统中,要求空气随燃料量的变化而成比例地变化,以保证燃料经济地燃烧,而燃料量又随负荷而变,其变化规律是随机的,这就是随动控制系统。

(3) 顺序控制系统 顺序控制系统是被控量的给定值按预定的时间程序变化的控制系统。例如机械工业中的热处理炉的温度控制系统,其给定值是按升温、保温和逐次降温等程序变化的,这就是顺序控制系统。

二、过程控制系统的性能指标

对于每一个控制系统来说,在设定值发生变化或系统受到扰动作用时,被控量应该平稳、迅速和准确地趋近或回复到设定值。因此,通常在稳定性、快速性和准确性三个方面提出各种单项性能指标,并把它们组合起来;也可以提出各种综合性性能指标。

过程控制系统的性能指标又有时域和频域之分。现以时域为例说明其性能指标的确定方法。

系统的时域性能指标,通常以阶跃作用下的过渡过程为准。图 1-6a 和 b 所示分别是设定值和扰动作阶跃变化时的过渡过程的典型曲线。

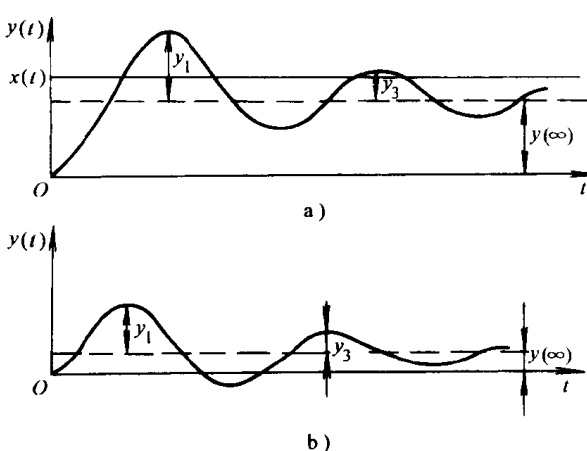


图 1-6 阶跃变化时的过渡过程曲线
a) 设定值阶跃响应曲线 b) 扰动值阶跃响应曲线

主要的时域指标包括衰减比和衰减率、超调量与最大动态偏差、残余偏差、调节时间和振荡频率。下面结合图 1-6 的曲线作一些说明。

(1) 衰减比和衰减率 衰减比是衡量一个振荡过程的衰减程度的指标,它等于两个相邻的同向波峰值之比,即衰减比

$$n = \frac{y_1}{y_3} \quad (1-1)$$

衡量衰减程度的另一种指标是衰减率,它

是指每经过一个周期以后,波动幅度衰减的百分数,即衰减率

$$\psi = \frac{y_1 - y_3}{y_1} \quad (1-2)$$

衰减比与衰减率两者有简单的对应关系,例如衰减比 n 为 4:1 就相当于衰减率 $\psi = 0.75$ 。为了保证控制系统有一定的稳定裕度,在过程控制中一般要求衰减比为 4:1 到 10:1,这相当于衰减率为 75% 到 90%。这样,大约经过两个周期以后就趋于稳态,看不出振荡了。

(2) 最大动态偏差和超调量 最大动态偏差是指设定值阶跃响应中,过渡过程开始后第一个波峰超过其新稳态值的幅度,如图 1-6a 中的 y_1 。最大动态偏差占被控量稳态变化幅度的百分数称为超调量,即

$$\sigma = \frac{y_1}{y(\infty)} \times 100\% \quad (1-3)$$

对于二阶振荡过程,超调量与衰减比有严格的对应关系,即

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{n}} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中, n 为衰减比。

对于扰动作用下的过渡过程(见图 1-6b),由于 $y(\infty)$ 为零或是很小的数值,用 σ 作为超调情况的指标就不合适了,此时用 $|e_{\max}| = |y_1 + y(\infty)|$ 作为一项指标。

(3) 残余偏差 残余偏差是指过渡过程结束后,被控量新的稳态值 $y(\infty)$ 与设定值 r 之间的差值,它是控制系统稳态准确性的衡量指标。即

$$e(\infty) = r - y(\infty) \quad (1-5)$$

在定值控制系统中, $r = 0$, 因此 $e(\infty) = -y(\infty)$ 。

(4) 调节时间和振荡频率 过渡过程要绝对地达到新的稳态值,需要无限长的时间,而要进入稳态值附近 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 以内区域,并保持在该区域内,需要的时间是有限的。因此,调节时间就是从扰动开始到被控量进入新稳态值的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 范围内的这段时间,在图中以 t_s 表示。调节时间是衡量控制系统快速性的指标。

在同样的衰减比下,振荡频率越高,调节时间越短,因此,振荡频率也在一定程度上可作为衡量控制快速性的指标。

以上列举的都是单项性能指标。人们还时常用误差积分指标衡量控制系统性能的优良程度。它是一类综合指标,希望它愈小愈好。常用的有以下几种:

(1) 误差积分(IE)

$$IE = \int_0^{\infty} e(t) dt \quad (1-6)$$

(2) 绝对误差积分(IAE)

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (1-7)$$

(3) 平方误差积分(ISE)

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (1-8)$$

(4) 时间与绝对误差乘积积分(ITAE)

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (1-9)$$

以上各式中, $e(t) = y(t) - y(\infty)$ 。

采用不同的积分公式意味着估计整个过渡过程优良程度的侧重点不同。例如 ISE 着重于抑制过渡过程中的大误差, 而 $ITAE$ 则着重惩罚过渡过程时间过长。

误差积分指标有一个缺点, 即不能保证控制系统具有合适的衰减率, 特别是一个等幅振荡过程, 它的 IE 却等于零, 显然是极不合理的。为此, 通常是先规定衰减率, 然后再考虑使某种误差积分为最小。

思考题与习题

- 1-1 简述过程控制的发展概况。
- 1-2 简述过程控制的特点。
- 1-3 举例说明过程控制的任务。
- 1-4 简述图 1-7 所示液位控制系统的工作原理并画出控制系统的框图。

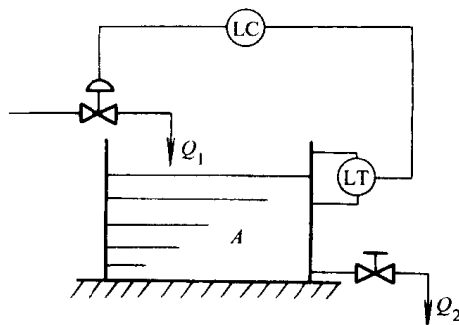


图 1-7 液位控制系统示意图

- 1-5 通常过程控制系统可分为哪几种类型?
- 1-6 过程控制系统的性能指标是怎样表示的?各自的定义是什么?
- 1-7 误差积分指标有什么缺点?怎样运用才较合理?

第二章 被控过程的数学模型

过程的数学模型,是分析和设计过程控制系统的基础资料或基本依据。要对现代日益复杂和庞大的被控过程进行研究分析、实施控制,尤其是进行最优设计时,必须首先建立其数学模型。因此,数学模型对过程控制系统的分析设计、实现生产过程的优化控制具有极为重要的意义。

第一节 过程建模的基本概念

一、过程的数学模型

被控过程的数学模型,是反映被控过程的输出量与输入量之间关系的数学描述。或者说,是描述被控过程因输入作用导致输出量(被控变量)变化的数学表达式。

被控过程可能既受控制输入的作用,也受扰动量影响。控制输入总是力图使被控过程按照某种期望的规律变化,而扰动量一般总是影响被控过程偏离期望运行状态。但从系统角度来看,无论是控制输入还是扰动,都属于输入量,因为它们都会影响输出的变化。

有些被控过程可能会有多个输入输出变量。各个输入作用除了影响“自己的”被控(输出)变量之外,或多或少还会影响其它的被控变量,即在多个输入输出之间存在某种耦合关系。这些过程中的调节阀个数一般与被控变量个数相等,对此经常采用解耦控制以减少问题的复杂性。被控过程也有线性与非线性、集中参数与分布参数之分等等。为简单起见,本章仅讨论只有一个输出变量、集中参数、线性或可线性化系统的数学模型问题,由此了解建立被控过程数学模型的基本方法。

二、数学模型的作用与要求

被控过程数学模型的作用很多,归纳起来主要有以下几点:

1. 设计过程控制系统及整定调节器参数

在设计过程控制系统时,选择控制通道、确定控制方案、分析质量指标、探讨最佳工况以及调节器参数的最佳整定等都以被控过程的数学模型为重要依据。尤其是实现生产过程的最优控制,如果没有充分掌握被控过程的数学模型,就无法实现最优设计。因此,建立数学模型也是实现最优控制的必要前提。

2. 指导生产工艺及其设备的设计与操作

通过对生产工艺过程及其相关设备数学模型的分析或仿真,可以确定有关因素对整个被控过程特性的影响,从而指导生产工艺及其设备的设计与操作。

3. 对被控过程进行仿真研究

通过对过程的数学模型进行仿真试验,在计算机上进行计算、分析,以获取代表或逼近真实过程的定量关系,可以为过程控制系统的设计与调试提供所需的信息数据,从而大大降低设计实验成本,加快设计进程。

被控过程数学模型的部分应用以及对其精确度的要求(在输入输出特性方面)可归纳如

表 2-1 所示。

表 2-1 对被控过程数学模型应用的要求

应用目的	过程模型类型	精确度要求
调节器参数整定	线性、非线性、时间连续	较低
前馈、解耦、预估系统设计	线性、参量或非参量、时间连续	中等
系统 CAD	线性、参量或非参量、时间离散	中等
自适应控制	线性、参量、时间离散	中等
最优控制	线性、参量、时间连续或离散	高

对建立被控过程数学模型的具体要求,随其用途不同而异,但总的来说,一是应该尽量简单,二是应该正确可靠。

要求数学模型正确可靠是因为数学模型是实际过程的数学描述,如果误差较大,就可能导致分析中的错误结论,从而系统综合就可能出现失误。

要求数学模型简单的原因也很明了。如果数学模型复杂,对过程实施控制的规律也会随之复杂,工程难以实施。如果用于在线实时最优控制,按照目标函数计算最优控制作用就会很费时,计算量很大,控制的实时性就要受到影响。复杂的数学模型用于参数估计,会增加需估参数的数目,从而增加参数估计的难度。因此,过程控制中实际应用的数学模型、传递函数的阶次一般不高于三阶。有时宁可用具有时滞的二阶形式也不采用三阶形式。最常用的是带有时滞的一阶惯性传递函数形式。

三、建立过程数学模型的途径

建立被控过程数学模型的方法目前主要有三种:一是机理演绎方法;二是实验辨识方法;三是机理演绎与实验辨识相结合的混合方法,下面分别加以简要说明。

1. 用机理演绎法建立被控过程的数学模型

所谓机理演绎法又称解析法,它是根据被控过程的内在机理,运用已知的静态和动态物料平衡、能量平衡等关系,用数学推理的方法求取被控过程的数学模型。

通常的静态物料或能量的平衡关系是单位时间内进入被控过程的物料或能量等于单位时间内从被控过程流出的物料或能量。

通常的动态物料或能量的平衡关系是单位时间内进入被控过程的物料或能量减去单位时间内从被控过程流出的物料或能量等于被控过程内物料或能量贮存量的变化率。

由过程机理推导数学模型需要有足够和可靠的验前知识,否则,推导的结果就可能出现失真。这种方法的突出优点是,在过程控制系统没有建立之前就先推导出数学模型,对于系统的事先设计和方案论证是十分有利的。

一般情况下,由过程机理推导的原始微分方程往往比较复杂,这种情况下就需要进行模型简化。模型简化通常有三种方法:一是在开始推导时就引入简化假定,使推导出的方程形式在反映主要客观事实的基础上尽量简单些;二是在得到较复杂的原始方程后,用低阶的微分或差分方程加以近似;三是把原始方程求解或用计算机仿真,得到一系列响应曲线(阶跃响应或频率特性),依据这些特性,用低阶的传递函数去近似。如有可能,还应对所得的数学模型进行验证,与实际过程的响应曲线相比较,若差别较大,则对数学模型还要进一步修正和完善。

需要指出的是,在实际中只有为数不多的被控过程能够用机理方法推导出数学模型。许多

过程由于内在机理比较复杂,人们对过程的变化机理知之甚少,在这种情况下,数学模型就需要采用实验辨识或其它方法去求得。

2. 用实验辨识方法求取被控过程的数学模型

实验辨识方法又称系统辨识与参数估计方法,即根据过程输入、输出的实验测试数据,通过过程辨识和参数估计得出数学模型。过程辨识是根据测试数据确定模型结构(包括形式、方程阶次及时滞情况等)。在已定模型结构的基础上,再由测试数据确定模型的参数称为参数估计。也有人将此统称为系统辨识。

系统辨识的一般程序如图 2-1 所示。

下面予以简要说明。

首先应明确数学模型的应用目的及相应要求,如表 2-1 中所示,应用目的不同,对模型的形式要求也不同。

其次应掌握足够的验前知识。验前知识主要来自对过程内在物理化学规律的了解、事先的测试数据、日常操作记录分析等。如过程是否接近线性、时滞和时间常数的大小如何等对模型结构的假定、确定辨识方法以及实验设计等都有很大影响。验前知识越丰富,辨识就越容易进行,越能迅速得出正确结果。

实验设计包括下列因素的选取和确定:输入信号的幅值和频谱、采样周期、总的测试时间、信号发生、数据存储、计算装置、开环或闭环辨识、离线或在线辨识、信号滤波及漂移处理方法等。

信号发生、测量、数据存储是指由信号发生器、特性测试仪或计算机产生输入信号,用记录仪、测试仪或计算机对输出信号进行测量处理,将结果存储起来。输入信号应能激发过程特性的全部模态,幅值大小要顾及测量数据精度的要求,同时也要考虑工艺的容许限度。

辨识方法应用是指用阶跃响应、频率响应、频谱分析、相关函数或参数估计等方法来建立过程的模型。若得到的是图形或曲线,称为非参量方法;若得到的是参数,则称为参量方法。

对于模型结构,包括模型形式、时滞情况及方程阶次等的确定,通常总是先作假定,再通过实验加以验证。例如,先假定为二阶,可得到一组估计参数;再假定为三阶,又可得到一组估计参数。然后根据估计参数和输入求取模型的输出,哪种模型的估计误差最小又最简单,就作为被选的结构。

模型验证有两种方式:一是自身验证,把在测试时所得同一输入下实际过程的输出与模型的计算输出加以比较。但用这种方式所得的结论,推广到其他输入情况下不一定可靠;另一种方式是所谓交叉验证的方法,即多进行一次测试,把另一组输入下的过程实际输出与模型的计算输出加以比较,一般说来交叉验证方式比自身验证方式所得的结论要更可靠些。

采用如上步骤后,若所得模型不能满足精度要求,则要重新修正实验设计,修正假定结构,反复几次,直到达到要求为止。

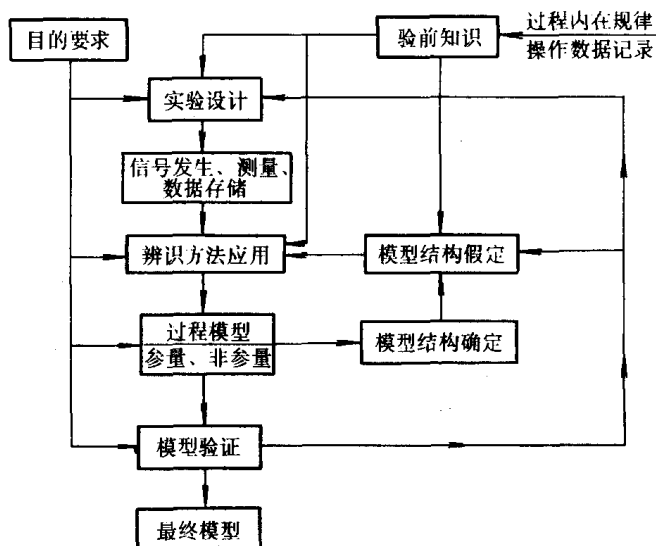


图 2-1 系统辨识一般程序的步骤

3. 用混合方法求取被控过程数学模型

混合方法是上述两种方法的结合。通常有两种方式：一是部分采用机理演绎方法推导出相应数学模型，该部分往往是人们已经非常熟知且经过实践检验是比较成熟的，对于那些尚不十分熟知或不很肯定的部分则采用实验辨识的方法得出其相应数学描述，这样可以大大减少全部采用实验辨识的工作难度，这种方式适用于多级过程。另一方式是先通过机理分析确定模型的结构形式，再通过实验数据来确定模型中各个参数的大小。因此这种方式实际上是机理建模与参数估计两者的结合。

4. 开环辨识与闭环辨识

在采用实验辨识方法获取被控过程的数学模型时，存在一个开环辨识还是闭环辨识的问题。

目前常用的辨识方法一般是在开环条件下进行的。然而，在实际应用中，被辨识过程有可能是闭环复杂过程的一部分，工作中无法除去反馈。其次，对于一些工业生产装置、尤其是大型装置施行开环辨识，有可能破坏生产的正常进行，被控变量长时间偏离设定值，往往是生产单位不希望的。另外，开环辨识往往只能反映某一个确定工作点处的特性，若过程存在非线性时，开环辨识就难以反映操作运行条件变化时的特性。在上述情况下，就可以采用闭环辨识。

有人总结出在调节器有噪声源或有外部输入信号等情况下，闭环辨识的实验条件为：①在调节器输出端施加外部信号；②在调节器输入端施加外部信号；③改变线性反馈规律（如调节器的放大系数）等。对于单输入单输出离散随机系统，可在调节器输出端施加准随机二位式信号。在上述条件下进行闭环辨识，可以得到精度与开环辨识相近的数学模型。

四、被控过程数学模型的类型

被控过程数学模型按照所描述的运动性质及数学特征可分为线性、非线性、时变、定常、连续、离散、集中参数、分布参数、确定型、随机型等等。按照表述形式可分为非参量形式，即用曲线或数据表格来表示；参量形式，即用数学方程或表达式来表示。参量形式的数学模型通常可用微分方程、传递函数、差分方程、状态和观测方程等形式来描述。

由过程机理推导法得到的几类数学模型示于表 2-2。表中所示静态模型是指输入输出矢量不随时间变化时，输出与输入之间的数学关系。而动态模型是指过程的输出与输入之间动态关系的数学描述。

表 2-2 过程数学模型的几种类型

过程类型	静态模型	动态模型
集中参数过程	代数方程	微分方程
分布参数过程	微分方程	偏微分方程
多级过程	差分方程	微分-差分方程

由实验辨识方法所得的数学模型，形式比较简单。以单输入-单输出过程为例，最常用的是下列线性时间连续和线性时间离散模型两种形式。

(1) 线性时间连续模型(可用微分方程或传递函数表示)

$$\begin{aligned}
 & a_n y^{(n)}(t) + \cdots + a_1 y'(t) + y(t) \\
 & = b_m u^{(m)}(t - \tau) + \cdots + b_1 u'(t - \tau) + b_0 u(t - \tau)
 \end{aligned}
 \tag{2-1}$$

或