



21世纪高等院校电气信息类系列教材

Electrical Information
Science and Technology

过程控制系统

鲁照权 方敏 主编



附赠电子教案

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



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

014035769

TP273-43
189

21 世纪高等院校电气信息类系列教材

过程控制系统

鲁照权 方敏 主编



TP 273-43

189



机械工业出版社



北航

C1723082

014032789

高等教育出版社

过程控制是指以温度、压力、流量、液位和成分等作为被控参数的自动控制，广泛应用于石油、电力、化工、冶金、食品、节能、环保等国民经济领域。

本书取材适当、深广度适中，能适应大多数高等院校自动化专业的教学需求。每章开始给出内容要点，便于学生学习时注意并把握关键知识点；每章结束给出思考题和习题便于学生课后练习。全书强调理论联系实际，采用了很多工业过程案例，便于学生学习与理解，直至应用。

全书分十一章。第1~8章介绍了生产过程的动态特性与建模方法、单回路控制系统、串级控制、前馈控制、时滞过程控制、几种特定要求的控制及多变量系统解耦控制；第9~10章分别介绍预测控制及模型参数自适应时滞补偿控制；第11章从工程的角度介绍了步进式钢坯加热炉控制系统。

本书可以作为高等院校自动化专业过程控制类课程的教材，亦可作为相关专业师生、研究生的教学参考用书，同时可为过程自动化工程技术人员提供参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

过程控制系统/鲁照权，方敏主编. —北京：机械工业出版社，2014.1
21世纪高等院校电气信息类系列教材
ISBN 978-7-111-45455-7

I. ①过… II. ①鲁…②方… III. ①过程控制—自动控制系统—高等学校—教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 006901 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：时 静 责任编辑：时 静 张利萍

版式设计：常天培 责任校对：张晓蓉 肖 琳

责任印制：李 洋

北京市四季青双青印刷厂印刷

2014 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·13.5 印张·331 千字

0 001—3 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-45455-7

定价：32.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010)88361066 教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售一部：(010)68326294 机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：(010)88379649 机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

出版说明

随着科学技术的不断进步，整个国家自动化水平和信息化水平的长足发展，社会对电气信息类人才的需求日益迫切、要求也更加严格。在教育部颁布的“普通高等学校本科专业目录”中，电气信息类（Electrical and Information Science and Technology）包括电气工程及其自动化、自动化、电子信息工程、通信工程、计算机科学与技术、电子科学与技术、生物医学工程等子专业。这些子专业的人才培养对社会需求、经济发展都有着非常重要的意义。

在电气信息类专业及学科迅速发展的同时，也给高等教育工作带来了许多新课题和新任务。在此情况下，只有将新知识、新技术、新领域逐渐融合到教学、实践环节中去，才能培养出优秀的科技人才。为了配合高等院校教学的需要，机械工业出版社组织了这套“21世纪高等院校电气信息类系列教材”。

本套教材是在对电气信息类专业教育情况和教材情况调研与分析的基础上组织编写的，期间，与高等院校相关课程的主讲教师进行了广泛的交流和探讨，旨在构建体系完善、内容全面新颖、适合教学的专业教材。

本套教材涵盖多层面专业课程，定位准确，注重理论与实践、教学与教辅的结合，在语言描述上力求准确、清晰，适合各高等院校电气信息类专业学生使用。

机械工业出版社

卷 终

前 言

随着高等教育改革的不断深入，人才的培养模式正在发生重大的变化，如专业认证、CDIO 工程教育模式、卓越工程师培养计划等，这些变化使得高等院校更要注重专业知识的工程性。

本书是根据对自动化专业多年开设本课程的经验与企业对自动化专业毕业生应具备能力的要求，同时在综合了参考文献中多本现有过程控制类教材内容和长处的基础上，结合作者的一些研究成果和工程经验编写而成的。

本书可以作为高等院校自动化专业过程控制类课程的教材，也可作为相关专业师生、工程技术人员和管理人员的参考资料。本书具备以下特点：

1. 考虑到自动化专业培养模式的多样性趋势，本书内容分 11 章，前 8 章和第 11 章可作为本科层次的教学内容、第 9 章和 10 章可作为学生深入学习或研究生阶段的参考资料。

2. 精心编写、重点特出，具备系统性、完整性和实用性。

3. 所有的控制方法均从实际问题中引出。注重从实际案例中提出问题、分析问题，并给出解决问题的方法，加深学生对各种方法的感性认识。

本书由鲁照权、方敏主编，殷礼胜参编。全书内容由清华大学萧德云教授和合肥工业大学徐科军教授审阅。本书编写过程中，陈荣保、张晓江、董学平等老师给出了很多宝贵意见。合肥工业大学优化控制技术研究所 2009 和 2010 级研究生完成了书稿的文字录入工作，2011 级研究生完成了书稿中的插图绘制工作。

由于编者水平有限，本书缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

出版说明	
前言	
第1章 绪论	1
1.1 过程控制技术的发展、现状与趋势	1
1.2 过程工业与控制的特点	5
1.3 过程控制系统的组成及其分类	6
1.4 DCS、FCS与PLC	10
思考题与习题	15
第2章 生产过程的动态特性	16
2.1 被控过程的动态特性	16
2.2 过程数学模型及其建立方法	26
思考题与习题	33
第3章 单回路控制系统	37
3.1 过程控制系统的性能指标	38
3.2 过程控制系统工程设计概述	39
3.3 控制方案设计	42
3.4 检测、变送器选择	48
3.5 执行器的选择	50
3.6 调节器的选择	52
3.7 数字调节器的模拟化设计	54
3.8 过程控制系统投运和调节器参数 整定	60
3.9 单回路控制系统工程设计实例	66
思考题与习题	69
第4章 串级控制系统	73
4.1 串级控制基本概念	73
4.2 串级控制系统特点与分析	75
4.3 串级控制系统的设计	79
4.4 串级控制系统调节器参数的整定	81
4.5 串级控制系统的工业应用	82
思考题与习题	84

第5章 前馈控制系统	86
5.1 前馈控制的基本概念	86
5.2 前馈控制系统的结构形式	89
5.3 前馈控制的选用与稳定性	92
5.4 前馈控制系统的工程整定	92
5.5 前馈控制的工业应用	95
思考题与习题	96
第6章 大时滞过程控制系统	98
6.1 大时滞过程概述	98
6.2 常规控制方案	100
6.3 预估补偿控制方案	101
6.4 采样控制方案	103
6.5 大时滞控制系统工业应用举例	104
思考题与习题	106
第7章 特定要求的过程控制系统	107
7.1 比值控制系统	107
7.2 分程控制系统	111
7.3 选择性控制系统	116
思考题与习题	119
第8章 多变量解耦控制系统	121
8.1 多变量解耦控制系统概述	121
8.2 相对增益及其性质	123
8.3 复杂过程控制通道的选择	129
8.4 耦合过程调节器参数整定	132
8.5 解耦设计	132
8.6 解耦控制系统实现中的问题	135
思考题与习题	138
第9章 预测控制系统	140
9.1 预测控制系统概述	140
9.2 预测控制的基本原理	141
9.3 预测控制方法的机理分析	147

9.4	预测控制的几个重要问题	153
	思考题与习题	161
第10章	模型参数自适应时滞补偿控制	162
10.1	概述	162
10.2	模型参数自适应时滞补偿器	163
10.3	基于 Lyapunov 稳定理论的模型参数自适应律	166
10.4	基于 Lyapunov 稳定理论的增益自适应律	168
10.5	典型参数自适应时滞补偿器设计	

	与仿真	169
10.6	二阶参数自适应时滞补偿器设计	
	与仿真	176
	思考题与习题	183
第11章	步进式钢坯加热炉控制系统	184
11.1	钢坯加热炉概述	184
11.2	汽化冷却系统控制	186
11.3	燃烧过程控制	193
11.4	加热炉自动化系统	203
	思考题与习题	207
	参考文献	208

第 1 章 绪 论

【本章内容要点】

1. 过程控制的发展经历了基于经典控制理论、现代控制理论和多学科交叉的三个阶段。第一阶段从基地式仪表发展到单元组合式仪表；第二阶段从单元组合式仪表发展到分布式控制系统（Distributed Control System, DCS），又称集散控制系统；第三阶段出现了基于现场总线和计算机网络的现场总线控制系统（Fieldbus Control System, FCS）。

2. 从过程建模、控制策略与方法、软测量技术、过程优化和计算机集成过程系统等方面介绍了过程控制技术的发展趋势。

3. 工业过程往往具有高阶次、多变量、分布参数、强耦合、大惯性、大时滞、严重不确定性与非线性等特点，因此，过程控制方案也十分丰富。过程控制系统的设计以被控过程的特性和工艺要求为依据，通常有单变量控制系统，多变量控制系统；有仪表过程控制系统，DCS，也有 FCS；有复杂控制系统，也有满足特定要求的控制系统。

4. 过程控制系统通常指工业生产过程中自动控制系统的被控量是温度、压力、流量、液位和成分等过程变量的系统。

5. 过程控制系统均由检测元件、变送器、调节器、调节阀和被控过程等环节构成。通常，将它们称为过程检测控制仪表（或自动化仪表），则过程控制系统由被控过程和过程检测控制仪表两部分组成。

6. 从过程控制系统的结构来看，可以将过程控制系统分为反馈控制系统、前馈控制系统和前馈-反馈复合控制系统；从给定信号的特点来看，可以将过程控制系统分为定值控制系统、程序控制系统和随动控制系统。

7. 简单介绍了 DCS 和 FCS 的结构和特点。随着 PLC 的快速发展，其结构越来越灵活，功能越来越强大。采用 PLC 构成 DCS 或 FCS 将越来越方便。

1.1 过程控制技术的发展、现状与趋势

1.1.1 过程控制的发展及现状

过程工业是指石化、电力、冶金、造纸、化工、医药和食品等工业，其特点是连续性。据有关统计，1991 年以来我国公布的产品销售额排名的前 10 名中，有 80%~90% 属于连续工业；按利润排名的前 20 名中，连续工业约占 70%，可见连续工业的发展对我国国民经济有着十分重要的意义。随着科学技术的迅猛发展，连续工业逐步向大型化、连续化、自动化和集成化方向发展。为了提高竞争力，连续工业正在不断地通过提高自动化水平来提高产品质量、节省能耗、降低成本以获得更显著的经济效益。许多国内外的专家、学者认为，过程控制在控制理论、控制工程、控制要求、控制水平等方面大约经历了以下三个发展阶段，见表 1-1。

表 1-1 过程控制发展的三个阶段

阶 段	第一阶段 (20 世纪 70 年代以前)	第二阶段 (20 世纪 70 ~ 80 年代)	第三阶段 (20 世纪 90 年代)
控制理论	经典控制理论	现代控制理论	多学科交叉
控制工具	常规仪表	DCS	FCS、计算机网络
控制要求	安全、平稳	优质、高产、低耗	市场预测、柔性生产、综合管理
控制水平	简单	先进控制系统	CIPS

在控制系统方面，绝大多数是单变量的简单控制系统，对于比较重要的工艺变量则设计串级调节系统或前馈调节系统。20 世纪 70 年代以前，过程工业的自动化水平相对较低。当时的控制理论主要是经典控制理论，所能采用的控制工具主要是常规仪表。

20 世纪 70 ~ 80 年代，基于现代控制理论的先进过程控制（Advanced Process Control, APC）应运而生。先进过程控制的出现主要是基于以下两点：一是市场上先进的控制工具，如分布式控制系统（DCS）的出现与完善；二是现代控制理论的不断发展与提高，如预测控制、自适应控制、非线性控制、鲁棒控制，以及智能控制等控制策略与方法都已成为目前国内外学术界和工程界的热门研究课题。国内外已有许多先进过程控制成功的工业应用报道。

近年来，在控制工具方面，出现了一种新的控制系统，称为现场总线系统（FCS）。现场总线技术是计算机技术、通信技术、控制技术的综合与集成，它的特点是全数字化、全分布、全开放、可互操作和开放式互连网络。它克服了 DCS 的一些缺点，在体系结构、设计方法、安装调试方法和产品结构方面，对自动控制系统产生了深远的影响。

尽管先进过程控制能提高控制质量并产生较明显的经济效益（如采用卡边控制），但是它们仍然只是相对孤立的控制系统。许多专家进一步研究发现，将控制、优化、调度、管理等集于一体，并将信号处理技术、数据库技术、通信技术以及计算机网络技术进行有机结合而发展起来的高级自动化具有更重要的意义。因此，出现了所谓综合自动化系统。这种全新的综合自动化系统称为计算机集成过程系统（Computer Integrated Process System, CIPS），可以认为是过程控制发展中的第三个阶段。

1.1.2 过程控制技术的发展趋势

1. 过程建模

目前国内外采用的建模方法大致有三类。

(1) 机理建模

此种建模方法就是根据过程本身的内在机理，利用能量平衡、物质平衡、反应动力学等规律建立系统的模型。此方法目前仍有不少应用场合，但在方法上没有太大的发展。这是由于过程工业种类繁多，其物化反应、生化反应等过程非常复杂，要想根据机理来建立准确的数学模型是非常困难的。

(2) “黑箱子”系统辨识

此种建模方法就是根据被控过程的输入、输出数据建立数学模型。属于这类方法的有最小二乘系统辨识、人工神经网络模型、模糊模型和专家系统模型等。各种智能模型的交叉亦是此类模型的一种趋势。

(3) 集成模型建模

此种建模方法将弥补机理建模和“黑箱子”系统辨识建模的短处而利用它们的长处。其基本思想是将机理建模方法与各种系统辨识方法有机地结合,产生出能够较准确地描述复杂过程的模型。此方法目前尚无明确的定义,但国内外已有不少学者进行了研究和探讨,是过程建模的一个新研究方向。

尽管国内、外许多学者在过程建模方面做出了卓有成效的努力,但就目前过程控制的水平而言,工业过程模型仍然是控制系统设计与开发的瓶颈,在这一方面,今后仍有大量的工作要完成。

2. 控制策略与方法

目前,学术界所研究、开发出来的控制策略(算法)很多,但其中许多算法仍只停留在计算机仿真或实验装置的验证上,真正能有效地应用在工业过程中的仍为数不多。以下是一些公认(特别是能得到工程界认可)的先进控制策略(算法)。

(1) 改进的或复合 PID 控制算法

大量的事实证明,传统的 PID 控制算法对于绝大多数工业过程的被控过程(高达 90%)可取得较好的控制效果。采用改进的 PID 算法或者将 PID 算法与其他算法相结合往往可以进一步提高控制质量。

(2) 预测控制

预测控制是直接从工业过程控制中产生的一类基于模型的新型控制算法。它高度结合了工业实际的要求,综合控制质量比较高,因而很快引起工业控制界以及学术界的广泛兴趣与重视,现已有许多商品化的预测控制软件包以及许多成功应用的报道。预测控制有三个要素,即预测模型、滚动优化和反馈校正。其机理表明它是一种开放式的控制策略,体现了人们在处理带有不确定性问题时的一种通用的思想方法。

根据预测模型的不同形式,预测控制分别称为 MPC (Model Predictive Control)、GPC (Generalized Predictive Control) 和 RHPC (Receding Horizon Predictive Control)。此外,预测控制还可以采取其他形式的模型,如非线性模型、模糊模型和神经网络模型等。目前,预测控制仍在不断发展中。其中,将预测控制思想和方法推广到广义控制问题是重要的研究方向之一。

(3) 自适应控制

在过程工业中,不少的过程是时变的,如采用参数与结构固定不变的控制器,则控制系统的性能会不断恶化,这时就需要采用自适应控制系统来适应时变的过程。它是辨识与控制的结合。目前,比较成熟的自适应控制分三类:自整定调节器及其他简单自适应控制器、模型参考自适应控制和自校正调节与控制。

自适应控制已在工程实践中得到了不少的应用,但它至今仍然有许多待进一步解决的问题(特别在参数估计方面),这些问题不解决,自适应控制的广泛应用仍将遇到许多困难。因此,仍有大量工作要做。此外,更高一级的自组织与自学习控制也在不断研究中。

(4) 智能控制

随着科学技术的发展,对工业过程不仅要求控制的精确性,还要注重控制的鲁棒性、实时性、容错性以及控制参数的自适应和自学习能力。另外,被控工业过程日趋复杂,过程严重的非线性和不确定性,使许多系统无法用数学模型精确描述。没有精确的数学模型作前

提,传统控制系统的性能将大打折扣。而智能控制器的设计却不依赖过程的数学模型,因而对于复杂的工业过程往往可以取得很好的控制效果。

常见的智能控制方法有以下几种:模糊控制、分级递阶智能控制、专家控制、人工神经网络控制和拟人智能控制等。这些智能控制方法各有千秋,但又存在不足。同时,研究表明将它们相互交叉结合或与传统的控制方法结合将会产生更佳的效果。智能控制已在家电行业及工业过程中取得了许多成功的应用,特别是模糊控制方法已在家电行业中广泛应用。

3. 软测量技术

在许多工业过程中,存在着很多这样的变量:它们是与产品质量密切相关的重要过程工艺变量,由于技术和经济的原因,目前尚难以或暂时无法通过传感器进行检测,但同时又需要加以严格的控制。如精馏塔的产品组分浓度,化学反应器的反应物浓度和产品分布,发酵罐中的生物量参数和制浆工业中的卡伯值(Kappa number)等。

解决这些变量检测问题的途径有:开发新的传感器;基于一些容易测量的二次工艺变量,通过一定的方法推算出要检测的工艺变量数值。第二种方法称为软测量技术(或称为软测量仪表)。建立软测量的方法通常有以下几种:

- ①基于工艺机理分析。
- ②基于回归分析。
- ③基于人工神经网络。
- ④基于模式识别。
- ⑤基于模糊模型。

有许多因素影响软测量性能,如辅助变量及数目的选择,检测点位置的选择,数据的处理与变换,软测量的在线校正等。要想真正地、可靠地将软测量用于工业过程,上述因素均需仔细地加以考虑并采取相应的有效措施,特别是对于工业现场存在许多干扰的情况下更需付出巨大的努力。

4. 过程优化

过程优化包含两层意思:一是稳态优化,二是最优控制。目前稳态优化技术(或称为离线操作优化或调优)主要有三种方法,即统计调优法(Evolutionary Operation, EVOP)、模式识别法(Pattern Recognition, PR)与操作模拟分析法(Operation Simulation Analysis, OSA)。这些方法的共同点是利用生产数据以及建模、优化方法在约束条件下求解最优的工艺参数,提供操作指导。当然,操作条件优化也可以用计算机在线自动完成。动态最优控制则是保证稳态操作点的“最优性”。

经验证明,在经济效益方面,过程优化获益比先进控制要高出5~10倍。因此,过程优化技术在连续工业中大有作为。

5. 计算机集成过程系统(CIPS)

当前,在机械加工行业中,计算机集成制造系统(CIMS)已是国内外热门的研究课题。考虑到过程工业与机械加工行业的特点,在过程工业中CIMS被称为计算机集成过程系统(Computer Integrated Process System, CIPS)。计算机集成过程系统的出现与计算机技术、通信技术、网络技术以及控制技术的迅速发展是分不开的。

企业内存在许多自动化孤岛,即企业内的计算机系统是相互独立的,不同计算机间不能互通信息,工程师不能用生产过程计算机接收实验室计算机、管理系统计算机传来的信息,

硬件、软件不能兼容,造成过程控制与管理决策、经营贸易的失衡,限制了公司迅速适应营销、市场和生产变化的能力。CIPS 覆盖操作层、管理层、决策层,涉及企业生产全过程的计算机优化。它的最大特点是多种技术的“综合”与全企业信息的“集成”,它是信息时代企业自动化发展的总方向。

根据专家分析,CIPS 的关键技术有如下几个方面:

- ①计算机网络技术。
- ②数据库管理系统。
- ③各种接口技术。
- ④过程操作优化技术。
- ⑤先进控制技术。
- ⑥软测量技术。
- ⑦生产过程的安全保护技术等。

其中④~⑦是自动化技术的热门研究课题,它们的发展与进步将是实施 CIPS 的保证。

CIPS 利用计算机技术对整个企业的运作和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、优化和管理的全过程。分布式控制系统、先进过程控制以及网络技术、数据库技术是实现 CIPS 的重要基础。

1.2 过程工业与控制的特点

从控制工程的观点看,过程工业有以下一些特点:

- 1) 连续工业生产往往伴随着物化反应、生化反应和相变反应等。因此,过程机理十分复杂。
- 2) 被控过程往往是高阶次、强耦合、大惯性、大时滞、严重不确定性与非线性的,控制起来非常困难。
- 3) 连续工业经常在高温、高压、易燃、易爆等环境下运行,生产的安全性是至关重要的。因此,对自动控制系统的可靠性提出了非常苛刻的要求。

与其他自动控制系统相比,过程控制大致可归纳为:

- 1) 连续生产过程的自动控制。过程控制一般是指连续生产过程的自动控制,其被控量需定量地控制,而且满足连续可调。若控制动作在时间上是离散的(如采样控制系统等),但是,其被控量需定量控制,也归入过程控制。
- 2) 被控过程是多种多样的、非电量的。在现代工业生产过程中,工业过程很复杂。由于生产规模大小不同,工艺要求各异,产品品种多样,因此过程控制中的被控过程是多种多样的。诸如石油化工过程中的精馏塔、化学反应器、流体传输设备;热工过程中的锅炉、热交换器;冶金过程中的转炉、平炉、加热炉;机械工业中的热处理炉等。它们的动态特性多数具有大惯性、大时滞和非线性特性。有些机理复杂(如发酵过程、生化过程等)的过程至今尚未被人们所认识,很难建立其精确的数学模型。因此,设计能适应各种过程的控制系統并非易事。
- 3) 过程工业的控制过程多属慢过程,而且多半为参量控制。由于被控过程具有大惯性、大时滞等特性,控制过程多属慢过程。另外,在石油、化工、电力、冶金、轻工、建材、制

药等过程工业中，往往采用一些物理量和化学量（如温度、压力、流量、液位、成分和 pH 值等）来表征其生产过程是否正常。因此，需要对上述过程参数进行自动检测和自动控制，故过程控制多半为参量控制。

4) 过程控制方案十分丰富。随着现代工业的迅速发展，工艺条件越来越复杂，对过程控制的要求越来越高。过程控制系统的设计以被控过程的特性为依据。由于工业过程大多具有多变量、分布参数、大惯性、大时滞和非线性等的复杂、多变特性，为了满足上述特点与工艺要求，过程控制中的控制方案是十分丰富的。通常有单变量控制系统，也有多变量控制系统；有仪表过程控制系统，也有集散控制系统；有复杂控制系统，也有满足特定要求的控制系统。

5) 定值控制是过程控制的一种常用形式。在石油、化工、电力、冶金、轻工、环保和原子能等现代过程工业中，过程控制的主要目的在于消除或减小外界干扰对被控量的影响，使被控量能稳定控制在给定值上，使工业生产能实现优质、高能和低消耗的目标。定值控制仍是目前过程控制的一种常用形式。

1.3 过程控制系统的组成及其分类

1.3.1 过程控制系统的组成

过程控制系统通常是指工业生产过程中的自动控制系统，其被控量是温度、压力、流量、液位、成分、粘度、湿度和 pH 值（酸碱度或氢离子浓度）等这样一些过程变量的系统。

下面以几个典型的控制系统为例，来介绍过程控制系统的组成。

1. 发电厂锅炉过热蒸汽温度控制系统

锅炉是电力、冶金、石油化工等工业部门不可缺少的动力设备，其产品是蒸汽。发电厂从锅炉汽鼓（汽包）中出来的饱和蒸汽经过过热器继续加热成为过热蒸汽。过热蒸汽的温度是火力发电厂重要的生产工艺参数。过热蒸汽温度控制是保证汽轮机组（发电设备）正常运行的一个重要条件。通常过热蒸汽的温度应达到 460°C 左右再去推动汽轮机做功。每种锅炉与汽轮机组都有一个规定的运行温度，在这个温度下运行，机组的效率最高。如果过热蒸汽的温度过高，会使汽轮机的寿命大大缩短；如果温度过低，当过热蒸汽带动汽轮机做功时，会使部分过热蒸汽变成水滴。小水滴冲击汽轮机叶片，会造成事故。所以必须对过热蒸汽的温度进行控制。通常在图 1-1a 所示的过热器之前或中间部分串接一个减温器，通过控制减温水流量的大小来控制过热蒸汽的温度，所以设计图 1-1a 所示的温度控制系统。系统中过热蒸汽温度采用热电阻温度计 1 来测量，并经温度变送器 2（TT）将测量信号送至调节器 3（TC）的输入端，与过热蒸汽温度的给定值进行比较得到其偏差，调节器按此输入偏差以某种控制规律进行运算后输出控制信号，以控制调节阀 4 的开度，从而改变减温水流量的大小，达到控制过热蒸汽温度的目的。图 1-1b 为该系统的框图。

2. 转炉供氧量控制系统

转炉是炼钢工业生产过程中的一种重要设备。熔融的铁水装入转炉后，可以通过氧枪供给转炉一定的氧气量。在氧气的作用下，铁水中的碳逐渐氧化燃烧，从而使铁水中的含碳量不断地降低。控制吹氧量和吹氧时间就可以控制冶炼钢水的含碳量，于是可以获得不同品种

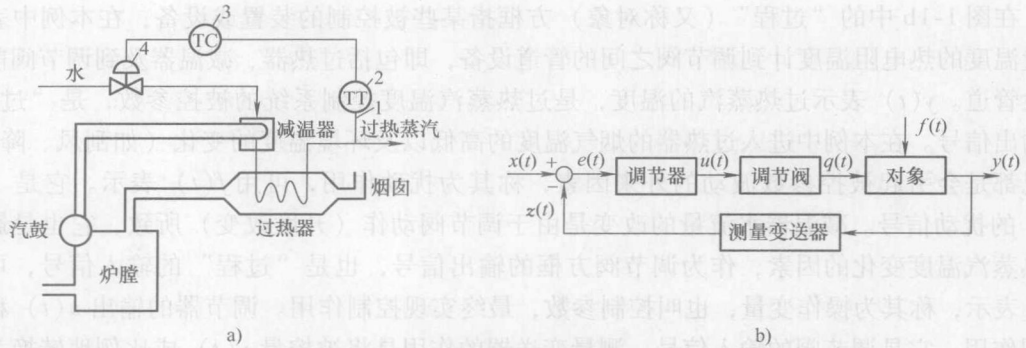


图 1-1 过热蒸汽温度控制系统

a) 控制系统流程图 b) 系统框图

1—热电阻 2—温度变送器 3—调节器 4—调节阀

的钢。为了冶炼各种不同品种的钢材，设计了图 1-2a 所示的转炉供氧量控制系统。本系统采用节流装置 1 来测量氧气流量，并送至流量变送器 2 (FT)，经开方器 3 后作为流量调节器 4 (FC) 的测量值，其测量值与供氧量的给定值进行比较得到偏差，调节器按此偏差信号以某种控制规律进行运算并输出控制信号去控制调节阀 5 的开度，从而改变供氧量的大小，以满足生产工艺的要求。图 1-2b 为供氧系统框图。

为了便于应用控制理论分析过程控制系统，根据系统的工作过程，由控制流程图 1-1a 和图 1-2a 可以分别画出其框图 1-1b 和图 1-2b。现以图 1-1b 为例介绍图中的各方框、连线等的含义。

在图 1-1b 中每个框表示组成该系统的一个（设备或装置）环节，两个框之间的一条带有箭头的连线表示其相互关系和信号传递方向，但不表示方框之间的物料联系。在该图中的温度测量元件、变送器、调节器和调节阀等各环节是单向作用的，即环节的输入信号会影响输出信号，但是输出信号不会反过来去影响输入信号。应该指出，在过程控制中，调节阀控制的介质流量可以流入过程，也可以是从过程中流出来。如果被控的物料是流入过程的，则正好与框图中箭头方向一致。如果被控物料是从过程流出来的，则图中信号的传递方向与物料的流动方向就不一致了。

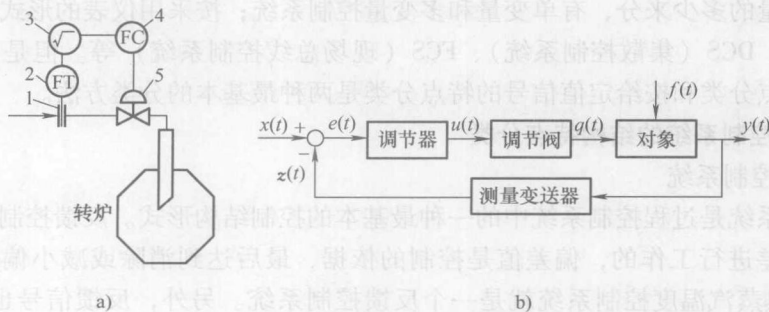


图 1-2 转炉供氧量控制系统

a) 控制系统流程图 b) 系统框图

1—节流装置 2—流量变送器 3—开方器 4—流量调节器 5—调节阀

在图 1-1b 中的“过程”（又称对象）方框指某些被控制的装置或设备，在本例中表示测量温度的热电阻温度计到调节阀之间的管道设备，即包括过热器、减温器及到调节阀前的一段管道。 $y(t)$ 表示过热蒸汽的温度，是过热蒸汽温度控制系统的被控参数，是“过程”的输出信号。在本例中进入过热器的烟气温度的高低以及环境温度的变化（如刮风、降温）情况都是会引起被控参数波动的外来因素，称其为扰动作用，可用 $f(t)$ 表示。它是“过程”的扰动信号。减温器水流量的改变是由于调节阀动作（开度改变）所致，它也是影响过热蒸汽温度变化的因素，作为调节阀方框的输出信号，也是“过程”的输入信号，可用 $q(t)$ 表示，称其为操作变量，也叫控制参数，最终实现控制作用。调节器的输出 $u(t)$ 称为控制作用，它是调节阀的输入信号。测量变送器的作用是将被控量 $y(t)$ 成比例地转换为测量信号 $z(t)$ ，它是调节器的输入信号，亦称反馈信号。

应当指出，调节器是根据 $y(t)$ 测量值的变化与给定值 $x(t)$ 进行比较得出的偏差值对被控过程进行控制的。过程的输出信号，即温度控制系统的输出通过温度测量元件与变送器的作用，将输出信号反馈到输入端，构成一个闭环控制回路，称为闭环控制系统。

在生产过程中，由于扰动不断产生，控制作用也在不断地进行。若因扰动（如冬天刮风降温）使过热蒸汽的温度下降，测量元件（热电阻温度计）将温度的变化值测量出来，经变送器送至调节器的输入端，并与其给定值进行比较得到偏差，调节器按此偏差并以某种控制规律发出信号，去关小调节阀的开度，使减温水减小，从而使过热蒸汽的温度逐渐升高，并趋向于给定值。反之亦然。

从以上两个工业过程控制的实例可见，控制系统由检测元件、变送器、调节器、调节阀和被控过程等环节构成。如果把测量元件、变送器、调节器、调节阀统称为过程检测控制仪表，则一个过程控制系统是由被控过程和过程检测控制仪表两部分组成的。过程控制系统的设计是根据工业过程的特性和工艺要求，通过选用过程检测控制仪表构成系统，再通过调节器参数的整定，实现对整个生产过程进行自动检测、自动监督和自动控制。

1.3.2 过程控制系统的分类

过程控制系统的分类方法有很多，若按被控参数的名称来分，有温度、压力、流量、液位、成分和 pH 值等控制系统；按控制系统完成的功能来分，有比值、分程和选择等控制系统；按调节器的控制规律来分，有比例、比例积分、比例微分、比例积分微分和智能控制系统等；按被控量的多少来分，有单变量和多变量控制系统；按采用仪表的形式来分，有常规仪表控制系统、DCS（集散控制系统）、FCS（现场总线控制系统）等。但是，按过程控制系统的结构特点分类和按给定值信号的特点分类是两种最基本的分类方法。

1. 按过程控制系统的结构特点分类

(1) 反馈控制系统

反馈控制系统是过程控制系统中的一种最基本的控制结构形式。反馈控制系统是根据系统被控量的偏差进行工作的，偏差值是控制的依据，最后达到消除或减小偏差的目的。图 1-1 所示的过热蒸汽温度控制系统就是一个反馈控制系统。另外，反馈信号也可能有多个，从而可以构成多个闭合回路，称其为多回路控制系统。

(2) 前馈控制系统

前馈控制系统在原理上完全不同于反馈控制系统。前馈控制是以不变性原理为理论基础

的。前馈控制系统直接根据扰动量的大小进行工作，扰动是控制的依据。由于没有被控量的反馈，所以也称为开环控制系统。

图 1-3 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，是根据扰动 $f(t)$ 进行工作的，能及时克服扰动对被控量 $y(t)$ 的影响。但是，由于前馈控制是一种开环控制，最终不能检查控制的精度，因此，在实际工业生产过程自动化中是不能单独应用的。



图 1-3 前馈控制系统框图

(3) 前馈-反馈控制系统（复合控制系统）

在工业生产过程中，引起被控参数变化的扰动是多种多样的。开环前馈控制的最主要优点是能针对主要扰动及时迅速地克服其对被控参数的影响；对其余次要扰动，则利用反馈控制予以克服，使控制系统在稳态时能准确地使被控量控制在给定值上。在实际生产过程中，将两者结合起来使用，充分利用前馈与反馈控制两者的优点、在反馈控制系统中引入前馈，从而构成图 1-4 所示的前馈-反馈控制系统，它可以大大提高控制质量。



图 1-4 前馈-反馈控制系统

2. 按给定值信号的特点来分类

(1) 定值控制系统

所谓定值控制系统，就是系统被控量的给定值保持在某一定值不变，或在小范围的附近。定值控制系统是过程控制中应用最多的一种控制系统，这是因为在工业生产过程中大多要求系统被控量的给定值保持在某一定值，或保持在很小的偏差范围内。例如，过热蒸汽温度控制系统、转炉供氧量控制系统均为一个定值控制系统。对于定值控制系统来说，由于 $\Delta x = 0$ ，引起被控量变化的是扰动信号，所以定值控制系统的输入信号是扰动信号。

(2) 程序控制系统

它是被控量的给定值按预定的时间程序变化工作的。控制的目的是使系统的被控量按工艺要求规定的程序自动变化。例如周期作业的加热设备（机械、冶金工业中的热处理炉），一般工艺要求加热升温、保温和逐次降温等程序，给定值就按此程序自动地变化，控制系统按此给定程序自动工作，达到程序控制的目的。

(3) 随动控制系统

与运动控制系统中的位置等随动控制不同，它是一种被控量的给定值随时间任意变化的控制系统，其主要作用是克服一切扰动，使被控量快速跟随给定值而变化。例如，在加热炉燃烧过程的自动控制中，生产工艺要求空气量跟随燃料量的变化而成比例地变化，而燃料量是随生产负荷而变化的，其变化规律是任意的。随动控制系统使空气量跟随燃料量的变化自

动控制空气量的大小，达到加热炉的最佳燃烧。

1.4 DCS、FCS 与 PLC

1.4.1 DCS (Distributed Control System, 集散控制系统)

DCS (Distributed Control System) 直译为分布式控制系统，国内称为集散控制系统。它是由过程控制级和过程监控级组成的以通信网络为纽带的多级计算机系统，综合了计算机 (Computer)、通信 (Communication)、显示 (CRT) 和控制 (Control) 4C 技术。DCS 的基本思想是分散控制、集中操作、分级管理、配置灵活、组态方便。DCS 具有可靠性、开放性、灵活性、易于维护性、协调性等特点。

①可靠性。由于 DCS 将系统控制功能分散在各台计算机上实现，系统结构采用容错设计。因此，某一计算机出现的故障不会导致系统其他功能的丧失。此外，由于系统中各台计算机所承担的任务比较单一，可以针对需要实现的功能采用具有特定结构和软件的专用计算机，从而使系统中每台计算机的可靠性也得到提高。

②开放性。DCS 采用开放式、标准化、模块化和系列化设计。系统中各台计算机采用局域网方式通信，实现信息传输。当需要改变或扩充系统功能时，可将新增计算机方便地连入系统通信网络或从网络中卸下，几乎不影响系统其他计算机的工作。

③灵活性。通过组态软件根据不同的流程应用对象进行软硬件组态，即确定测量与控制信号及相互间的连接关系、从控制算法库选择适用的控制规律以及从图形库调用基本图形组成所需的各种监控和报警画面，从而方便地构成所需的控制系统。

④易于维护性。功能单一的小型或微型专用计算机，具有维护简单、方便的特点。当某一局部或某个计算机出现故障时，可以在不影响整个系统运行的情况下在线更换，迅速排除故障。

⑤协调性。各工作站之间通过通信网络传送各种数据，整个系统信息共享，协调工作，以完成控制系统的总体功能和优化处理。

⑥控制功能齐全、算法丰富，集连续控制、顺序控制和批处理控制于一体，可实现串级、前馈、解耦、自适应和预测等先进控制，并可方便地加入所需的特殊控制算法。DCS 的构成方式十分灵活，可由专用的管理计算机站、操作员站、工程师站、记录站、现场控制站和数据采集站等组成，也可由通用的服务器、工业控制计算机和可编程序控制器构成。处于底层的过程控制级一般由分散的现场控制站、数据采集站等就地实现数据采集和控制，并通过数据通信网络传送到生产监控级计算机。生产监控级对来自过程控制级的数据进行集中操作管理，如各种优化计算、统计报表、故障诊断和显示报警等。随着计算机技术的发展，DCS 可以按照需要与更高性能的计算机设备通过网络连接来实现更高级的集中管理功能，如计划调度、仓储管理和能源管理等。

为了适应现代生产控制与管理的需要，DCS 采用多层次分级结构形式 (现场级、控制级、监控级和管理级)。各级分别采用现场网络 Fnet (Field Network)、控制网络 Cnet (Control Network)、监控网络 Snet (Supervision Network) 和管理网络 Mnet (Management Network)