



教育部高等职业教育示范专业规划教材

过程控制与自动化仪表

倪志莲 龚素文 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

赠电子课件、
考试题与习题解答
和模拟试卷等

教育部高等职业教育示范专业规划教材

过程控制与自动化仪表

主编 倪志莲 龚素文
参编 严春平 李新 谢韦
主审 程蓓



机械工业出版社

本书从当前生产过程自动化工程的实际需要和过程控制的实际操作技能出发,在介绍过程控制的基本概念、自动控制原理的基础上,重点介绍了过程控制仪表的类型及特点、过程对象的建模方法、简单过程控制系统的设计分析与安装调试、集散控制系统及现场总线控制系统的应用等问题。

本书根据高职高专学生培养目标的特点,在理论知识“适度、够用”的原则下,突出应用,尽量避免繁琐的公式推导;对仪表的调校、使用、故障分析处理和维修等实践性很强的知识进行了详细阐述,以增强学生分析问题和解决问题的能力;在每章的开始扼要提出了本章主要知识点及学习要求,除第1章外,在其他各章的后面增加了相关实训内容,便于培养学生的实践操作技能。

本书可作为高职高专院校自动化类相关专业的专业课教材,也可供相关专业的师生和工程技术人员参考。

为方便教学,本书配有免费电子课件、模拟试卷及解答等,凡选用本书作为授课教材的学校,均可来电索取。电话:010-88379375;电子邮箱:wangzongf@163.com。

图书在版编目(CIP)数据

过程控制与自动化仪表/倪志莲,龚素文主编.—北京:机械工业出版社,2014.2

教育部高等职业教育示范专业规划教材

ISBN 978-7-111-45347-5

I. ①过… II. ①倪…②龚… III. ①过程控制—高等职业教育—教材
②自动化仪表—高等职业教育—教材 IV. ①TP273②TH86

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第320184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:王宗锋 责任编辑:王宗锋 苑文环

版式设计:霍永明 责任校对:张晓蓉

封面设计:陈沛 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2014年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·16.75印张·410千字

0 001—2 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-45347-5

定价:36.00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

前 言

“过程控制与自动化仪表”是一门涉及控制理论、计算机技术、信息获取与处理技术及自动化仪表等多领域理论及方法的课程，是高职高专自动化类专业的一门专业核心课。对自动化类专业毕业生从事过程控制及仪器仪表的安装、维护、使用有着非常重要的作用。

本书遵循高职高专自动化类专业人才培养目标，立足于培养高端技能型专门人才，本着理论“适度、够用”的原则，对教材内容进行了整合。将自动控制原理的相关内容融入过程控制教学内容中，并进行了简化。全书共分七章：第1章是绪论，主要介绍了过程控制系统的组成及分类、控制系统品质指标等；第2章是自动控制基本原理，主要介绍了对象建模的方法、使用计算机辅助分析软件 MATLAB 对控制系统进行时域及频域分析的方法；第3章是控制规律，主要介绍了典型的控制规律及特点；第4章是过程参数检测与变送，主要介绍了温度、压力、流量及物位测量仪表的类型、选用及安装调校方法；第5章是过程控制装置，主要介绍了过程控制调节器的种类及使用方法、执行器的类型及使用方法；第6章是过程控制系统，主要介绍了简单控制系统设计及参数整定方法、复杂控制系统的简介及典型控制单元的控制方案；第7章是过程计算机控制系统，主要介绍了计算机控制系统中的集散控制系统及现场总线控制系统的体系结构及组建方法。书中内容既介绍了典型的传统控制方法和装置，使学生建立基本的概念，使知识能渐进衔接；同时又介绍了新技术、新方法，使知识结构适应现代科学技术发展和生产的需要。

本书紧紧围绕高等职业教育技能培养的要求，突出实践性、实用性和先进性。除第1章外，其他各章后均配以相应的实训环节，力求理论和实践密切结合，为实现控制理论与生产实践结合的教学过程提供了相应的教学资源。

本书每章附有与内容相关的思考题与习题，以帮助学生消化和巩固课内学习的内容。

本书由九江职业技术学院倪志莲、龚素文任主编，并对全书进行统稿，参加本书编写的还有九江职业技术学院严春平老师、浙江天煌科技实业有限公司李新工程师和西门子自动化驱动集团工程师谢韦。其中，第1~3章由严春平老师编写，第4、5章及附录由龚素文老师编写，第6章由倪志莲老师编写，第7章由李新工程师编写；谢韦工程师提供了大量相关资料并参与资料整理。安徽电气工程职业技术学院程蓓担任主审，并提出了许多宝贵意见和建议，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中疏漏之处在所难免，在此恳请广大专家和读者给予批评和指正。

编者

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 开环与闭环的概念	2
1.2.1 开环控制系统	2
1.2.2 闭环控制系统	3
1.3 过程控制系统的组成	4
1.4 过程控制系统的分类和品质指标	6
1.4.1 过程控制系统的分类	6
1.4.2 过程控制系统的过渡过程	7
1.4.3 过程控制系统的品质指标	8
1.5 过程控制系统的特点与要求	9
1.5.1 过程控制系统的特点	9
1.5.2 过程控制系统的要求	10
1.6 MATLAB 软件	11
1.6.1 MATLAB 界面简介	11
1.6.2 MATLAB 软件的基本概念及操作	12
1.6.3 MATLAB 软件在控制系统中的应用实例	14
1.7 课程定位与学习方法	15
思考题与习题	15
第 2 章 自动控制基本原理	17
2.1 自动控制系统的数学模型	17
2.1.1 微分方程	17
2.1.2 传递函数	18
2.1.3 系统框图	23
2.1.4 典型环节的传递函数和功能框	24
2.1.5 框图的变换与化简	27
2.1.6 用 MATLAB 实现系统模型的连接	29
2.2 典型被控对象的特性及建模	30
2.2.1 单容对象的特性及建模	30
2.2.2 双容对象的特性及建模	32
2.2.3 时滞对象的特性及建模	33
2.2.4 实验法建立被控对象的数学模型	34
2.3 自动控制系统的的基本分析方法	35
2.3.1 时域分析法	35
2.3.2 频率特性法	45
2.4 MATLAB 的仿真软件 Simulink 及其应用	57
2.4.1 Simulink 仿真软件简介	57
2.4.2 用 Simulink 建立系统模型及仿真	59
2.5 实训	62
2.5.1 MATLAB 仿真简单操作	62
2.5.2 单容自衡水箱液位特性的测试	63
思考题与习题	64
第 3 章 控制规律	68
3.1 控制系统的校正	68
3.1.1 校正的概念	68
3.1.2 校正的方式	68
3.1.3 常用校正装置	69
3.1.4 校正应用举例	69
3.2 位式控制	72
3.3 比例控制	73
3.3.1 比例控制规律及其特点	73
3.3.2 比例度	74
3.3.3 比例度对过渡过程的影响	74
3.4 积分控制	75
3.4.1 积分控制规律及其特点	75
3.4.2 比例积分控制规律与积分时间	76
3.4.3 积分时间对系统过渡过程的影响	78
3.5 微分控制	78
3.5.1 微分控制规律及其特点	78
3.5.2 比例微分控制规律及微分时间	79
3.5.3 比例微分控制系统的过渡过程	80
3.6 比例积分微分控制	80
3.7 控制系统 Simulink 辅助设计分析	81
3.8 实训 Simulink 仿真实验	85
思考题与习题	85
第 4 章 过程参数检测与变送	87
4.1 过程参数检测仪表概述	87

4.1.1 传感器与变送器	87	5.3.3 安全火花防爆系统及安全栅	160
4.1.2 检测仪表的信号制与传输方式	88	5.4 实训	166
4.1.3 误差的概念及表述	90	5.4.1 DDZ-III型基型调节器的认识及 调校	166
4.1.4 变送器的量程调整、零点调整和 零点迁移	92	5.4.2 AI系列人工智能调节仪的认识及 参数设置	168
4.1.5 检测仪表的分类	93	5.4.3 电动调节阀特性测试	171
4.2 温度检测仪表	94	思考题与习题	172
4.2.1 概述	95	第6章 过程控制系统	173
4.2.2 热电偶	96	6.1 过程控制系统工艺流程图的绘制	173
4.2.3 热电阻	101	6.1.1 识图基础	174
4.2.4 温度变送器	103	6.1.2 识图练习	178
4.2.5 温度测量仪表的选择和安装	103	6.2 简单控制系统	179
4.3 压力检测仪表	105	6.2.1 简单控制系统的组成	179
4.3.1 概述	106	6.2.2 过程控制系统的设计概念	180
4.3.2 压力计	108	6.2.3 简单控制系统控制方案的设计	181
4.3.3 压力传感器	109	6.2.4 简单控制系统的投运和控制器 参数的工程整定	184
4.3.4 压力变送器	111	6.3 复杂控制系统	188
4.3.5 压力计的选择与安装	113	6.3.1 串级控制系统	188
4.4 流量检测仪表	114	6.3.2 均匀控制系统	192
4.4.1 概述	115	6.3.3 比值控制系统	194
4.4.2 差压式流量计	116	6.3.4 前馈控制系统	195
4.4.3 转子流量计	118	6.3.5 其他控制系统	197
4.4.4 其他流量计	120	6.4 典型单元控制方案的分析与设计	200
4.4.5 流量检测仪表的选择	123	6.4.1 流体输送设备的控制方案	200
4.5 物位检测仪表	124	6.4.2 传热设备的控制方案	203
4.5.1 概述	124	6.4.3 精馏塔的控制方案	207
4.5.2 差压式液位计	125	6.4.4 反应器的控制方案	209
4.5.3 其他物位检测仪表	126	6.5 实训	211
4.6 实训	129	6.5.1 单容水箱液位定值控制系统	211
4.6.1 压力变送器的认识与调校	129	6.5.2 水箱液位串级控制系统	213
4.6.2 认识涡轮流量计	130	思考题与习题	215
思考题与习题	131	第7章 过程计算机控制系统	217
第5章 过程控制装置	132	7.1 计算机控制系统概述	217
5.1 控制器	132	7.1.1 计算机控制简述	217
5.1.1 基地式调节器和自力式调节器	132	7.1.2 计算机控制系统的分类	218
5.1.2 电动单元式调节器	134	7.2 集散控制系统	220
5.1.3 数字式控制器	138	7.2.1 集散控制系统的基本概念	220
5.2 执行器	144	7.2.2 集散控制系统的结构	221
5.2.1 气动执行器	145	7.2.3 HOLLiAS-MACS集散控制 系统	223
5.2.2 电动执行器	152	7.3 现场总线控制系统	238
5.3 其他辅助仪表	158		
5.3.1 电-气转换器	158		
5.3.2 阀门定位器	159		

7.3.1 现场总线控制系统概述	238	思考题与习题	256
7.3.2 几种主要现场总线简介	241	附录	258
7.3.3 现场总线系统	246	附录 A S型热电偶分度表	258
7.4 实训	252	附录 B K型热电偶分度表	258
7.4.1 单闭环流量定值 DCS 控制	252	参考文献	260
7.4.2 水箱液位 PROFIBUS 开环控制 ...	254		

第 1 章 绪 论

【主要知识点及学习要求】

- 1) 了解过程控制技术的开环、闭环概念。
- 2) 了解过程控制系统的组成、分类和品质指标。
- 3) 能简单使用 MATLAB 软件。
- 4) 了解本课程定位及学习方法。

1.1 引言

自动控制是社会生产力发展到一定阶段的产物，是人类社会进步的象征。所谓自动控制，是指在没有人直接参与的情况下，利用外加设备或控制装置使生产过程或被控对象中的某一物理量或多个物理量自动地按照期望的规律运行或变化。这种外加的设备或控制装置就称为自动控制装置。

自动控制技术不仅广泛应用于工业控制中，而且在军事、农业、航空、航海、核能利用等领域也发挥着重要作用。例如，在工业控制中，对压力、温度、流量、湿度、配料比等的控制，都广泛采用了自动控制技术。对于高温、高压、剧毒等对人体健康危害很大的场合，自动控制更是必不可少的。在军事和空间技术方面，如宇宙飞船准确地飞行和返回地面、人造卫星按预定轨道飞行、导弹准确击中目标等，自动控制更具有十分重要的意义。

过程控制是在自动控制理论的基础上发展起来的，内容涵盖了基本控制理论、工业过程对象特性及其建模、基本控制规律、过程参数检测与变送、过程控制仪表、过程控制系统分析与设计、计算机控制系统等方面，既包括过程控制理论，又包括工程实际应用。

所谓过程控制，是指根据工业生产过程的特点，采用测量仪表、执行机构和计算机等自动化工具，应用控制理论，设计工业生产过程控制系统，实现工业生产过程的自动化。

20 世纪早期的工业生产技术水平比较落后，生产过程很大程度上依赖于手动操作，生产效率低下。20 世纪 40 年代以来，特别是二次世界大战以后，自动化技术在工业生产过程中的应用发展很快，大致经历了以下几个阶段：

1) 20 世纪 50 年代，工业生产多为钢铁、纺织、化工、造纸等规模较小的生产过程，经典控制理论的成熟为过程控制技术的发展提供了有力支持。在此期间，过程控制系统的结构一般为单输入/单输出的单回路定值控制系统，多采用基地式仪表、气动组合仪表和气动仪表控制器来完成简单控制。

2) 20 世纪 60 年代，工业生产规模不断扩大，工业生产过程的复杂性使各个单元之间的耦合程度更加紧密，在控制理论上体现为对象的非线性、时变和多输入/多输出。传统的经典控制理论已经不能满足控制系统设计的需求。

现代控制理论在航空航天领域的成功应用以及计算机技术的发展,使得过程控制技术的各种复杂控制系统方案的实现成为可能。电动仪表开始使用,并逐步取代气动仪表、单元组合式仪表和组装式仪表,在过程控制中应用越来越广泛。同时,计算机开始应用于自动控制,过程控制系统中出现了集中控制及直接数字控制。

3) 20世纪70年代,现代企业的生产过程一般是大型的分散系统,先进控制技术、数字化仪表、计算机,特别是网络通信技术的进一步发展,使基于“分散控制,集中管理”理念设计的集散控制系统(DCS)成功应用于大型生产过程中。过程控制系统的可靠性、安全性都达到了新的水平,为企业带来了巨大的经济效益。可以说,集散控制系统(DCS)是现代过程控制的主流,现今已经广泛应用于发电、化工、炼油等生产过程。

近30多年来,过程控制技术得到了迅速发展,计算机控制技术、各种集散控制系统(DCS)和现场总线控制系统(FCS)不断涌现,人工智能技术(如专家系统、人工神经网络、模糊控制、遗传算法等)也有了长足进步,在许多科学与工程领域得到了广泛应用。先进过程控制技术的广泛应用和良好的发展前景,正在成为企业取得更好经济效益的关键手段。

1.2 开环与闭环的概念

开环控制和闭环控制是控制系统的两种最基本的形式,如图1-1所示。不设反馈环节的,称为开环控制系统;设有反馈环节的,则称为闭环控制系统。

1.2.1 开环控制系统

开环控制是最简单的一种控制方式。它的特点是,仅有从输入端到输出端的前向通路,而没有从输出端到输入端的反馈通路。也就是说,输出量不能对系统的控制部分产生影响。由于开环控制系统结构简单、维护容易、成本低、不存在稳定性问题,因此广泛应用于各种控制设备中。

开环控制系统的缺点是:控制精度取决于组成系统的元器件的精度,因此对元器件的要求比较高。由于输出量不能反馈回来影响控制部分,所以输出量受扰动信号的影响比较大,系统抗干扰能力差。根据上述特点,开环控制方式仅适用于输入量已知、控制精度要求不高、扰动作用不大的情况。

开环控制系统一般是根据经验来设计的。如普通的洗衣机,对输出信号(如衣服的洁净度)不作监测;普通的电烤箱,不考虑开门时的扰动对于烤箱温度的影响等,所以系统只有一条从输入到输出的前向通路。

图1-2是直流电动机转速开环控制示意图。图中,电动机带动负载以一定的转速转动。当调节电位器的滑臂位置时,可以改变功率放大器的输入电压,从而改变电动机的电枢电压,最终改变电动机的转速。

在这个系统中,电位器滑臂的分压值是系统的输入量,功率放大器作为控制器,电动机

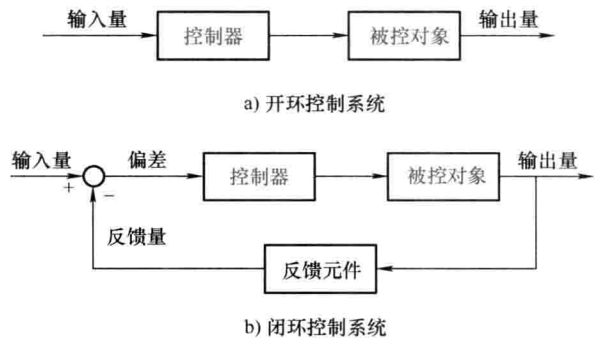


图 1-1 开环控制系统与闭环控制系统

是被控对象，电动机的转速是系统的输出量。当调节电位器位置不动时，即输入量不变时，电动机的转速不变，即输出量不变；但是当外界有扰动时，即使输入量没有变化，输出量也会改变。这种开环控制系统的输出量在负载扰动影响下不可能稳定在希望的数值上，所以开环控制系统不能做到自动调节，控制的精度比较低。为了实现系统的自动控制，提高控制精度，可以改变控制方法，增加反馈回路来构成闭环控制系统。

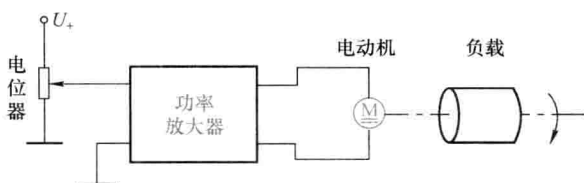


图 1-2 直流电动机转速开环控制示意图

1.2.2 闭环控制系统

闭环控制系统不仅有一条从输入端到输出端的前向通路，还有一条从输出端到输入端的反馈通路。输出量通过一个测量变送元件反馈到输入端，与输入量比较后得到偏差信号来作为控制器的输入，反馈的作用是减小偏差，以达到满意的控制效果。闭环控制又称为反馈控制。

上述系统的输出量通过测量变送元件返回到系统的输入端，并和系统的输入量作比较的过程就称为反馈。如果输入量和反馈量相减则称为负反馈；反之，若二者相加，则称为正反馈。控制系统中一般采用负反馈方式。输入量与反馈量之差称为偏差信号。

闭环控制系统在控制上具有以下特点：由于输出信号的反馈量与输入量作比较产生偏差信号，利用偏差信号实现对输出量的控制或者调节，所以系统的输出量能够自动地跟踪输入量，减小跟踪误差，提高控制精度，抑制扰动信号的影响。除此之外，负反馈构成的闭环控制系统还有其他的优点：引入反馈通路后，使得系统对前向通路中元器件参数的变化不灵敏，从而使系统对于前向通路中元器件的精度要求不高；反馈作用还可以使得整个系统对于某些非线性影响不灵敏。

图 1-3 是在原来开环控制（见图 1-2）的基础上，增加了一个由测速发电机构成的反馈回路，该回路检测输出转速的变化并作反馈。由于测速发电机的反馈电压大小与发电机的转速成正比，反馈电压与输入量（电位器滑臂的分压值）作差值运算后，再经过控制器（功率放大器）来控制电动机的转速，从而实现电动机转速的自动调节。系统自动调节电动机转速的过程如下：

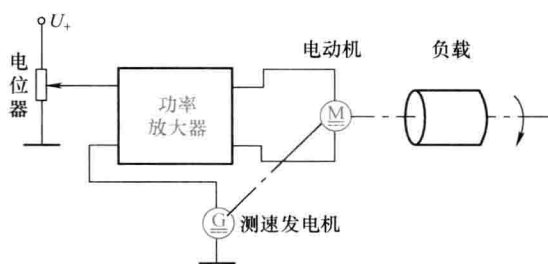


图 1-3 直流电动机转速闭环控制示意图

当系统受到负载扰动作用时，如果负载增大，则电动机的转速降低，测速发电机的端电压减小，功率放大器的输入电压增加，电动机的电枢电压上升，使得电动机的转速增加。如果负载减小，则电动机转速调节的过程与上述过程相反。这样就消除或者抑制了负载扰动对于电动机转速的影响，提高了系统的控制精度。

闭环控制系统的自动控制或者自动调节作用是基于输出信号的负反馈作用而产生的，所以经典控制理论的主要研究对象是负反馈的闭环控制系统，研究目的是得到它的一般规律，从而可以设计出符合设计要求的、满足实际需要的、性能指标优良的控制系统的。

1.3 过程控制系统的组成

首先来看一个贮槽液位控制的实例。

在生产中，液体贮槽常用做进料罐、成品罐或中间缓冲容器。从上一道工序来的物料连续不断地流入槽中，而槽中的液体又被连续不断地送至下一道工序进行处理。为了保证生产过程的物料平衡，工艺上要求将贮槽内的液位控制在一个合理的范围内。由于液体的流出量受到负载大小制约，是不可控的，因此，流出量的变化是影响贮槽内液位波动的主要因素，严重时会使贮槽内液体溢出或抽空。解决这一问题的最简单方法，就是根据贮槽内液位的变化，相应地改变液体的流入量，保持贮槽内的液位基本不变。

图 1-4a 为液位人工控制示意图，为了使贮槽里的液位保持在设定的高度或在一定的范围内变化，在贮槽旁设置一个玻璃管液位计，操作人员可根据玻璃管液位计中液位的指示，不断地改变阀门的开度，控制流入量 q_i ，从而使贮槽内的液位维持在某个要求的范围内。例如，当操作人员从玻璃管液位计上观察到液位低于设定值时，则增大阀门，增加液体流入量，使贮槽内液位上升到设定的数值；当发现液位高于设定值时，则减小阀门，使液位下降到设定数值。归纳起来，操作人员所进行的工作如下：

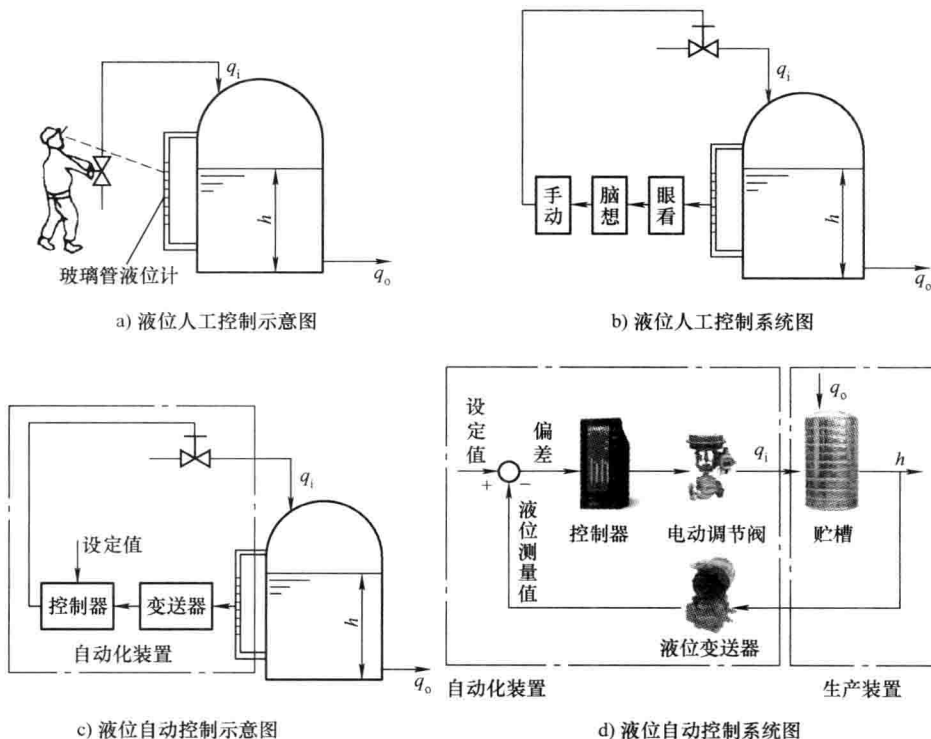


图 1-4 液位控制系统

- 1) 眼看：观察玻璃管液位计中液位指示值。
- 2) 脑想：将液位指示值与液位设定值加以比较，算出两者的差值，将设定值减去指示值得到的差值称为偏差。

3) 手动: 当偏差为正时, 用手开大阀门, 使偏差减小; 当偏差为负时, 则关小阀门, 使偏差减小。阀门开大、关小的程度与偏差大小有关。

将上述三步工作不断重复下去, 直至液位计指示值回到设定的数值上。这种由人工来直接进行的控制称为人工控制, 如图 1-4b 所示。

由以上分析可知, 要进行人工控制, 必须有测量仪表和一个由人工操作的器件 (如阀门), 由人来判断偏差的大小与方向, 然后根据这个偏差进行控制, 使偏差得以纠正。人在控制过程中起到了观测、比较、判断和控制的作用, 而这个调整过程就是“检测偏差、纠正偏差”的过程。

众所周知, 人工控制往往是比较紧张和繁琐的工作, 而且容易出现差错; 另外, 由于人眼的观察和手的操作动作, 受到人的生理机能限制, 所以无法达到高精度和节能控制的要求。如果能由一些自动控制装置来完成上述人工操作, 就可以实现液位的自动控制。

图 1-4c 所示为液位自动控制示意图。控制器将变送器反映的液位测量值与设定值进行比较运算, 用以控制调节阀, 使贮槽的流入量 q_i 与流出量 q_o 相平衡, 以实现液位 h 的自动控制。

从上述人工控制与自动控制过程分析来看, 相当于用液位变送器代替人工控制的玻璃管液位计和人眼; 控制器代替人脑, 对液位实际测量值与设定值进行比较和运算; 调节阀代替人手的作用, 从而可以使被控量 (液位值) 自动稳定在预先设定的数值上。在人工控制中, 人是凭经验支配双手操作的, 其效果在很大程度上取决于经验的正确与否。而在自动控制中, 控制器是根据偏差信号, 按一定规律去控制调节阀的, 其效果在很大程度上决定于控制器的控制规律选用是否恰当。

图 1-4d 是液位自动控制系统图, 该图表现了液位控制系统中各种装置 (如控制器、电动调节阀、贮槽、变送器等) 与物理量 (如设定量、偏差、流出量 q_o 、流入量 q_i 、贮槽液位 h) 之间的关系。

上述液位自动控制系统就是一个典型的过程控制系统。由图 1-5 所示可知, 过程控制系统一般由自动化装置及生产装置两部分组成, 具体包括以下内容:

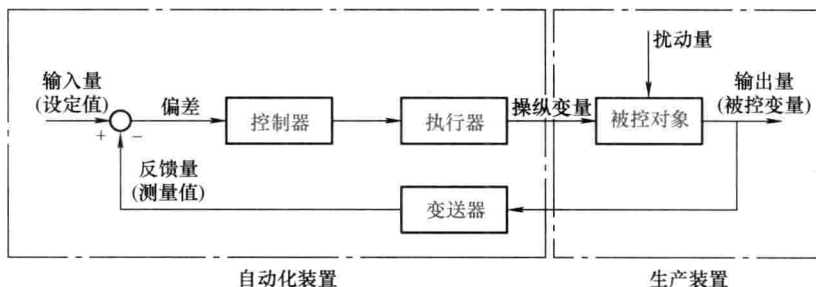


图 1-5 过程控制系统框图

1) 被控对象: 又称为被控过程。它是控制系统的主体, 在过程控制系统中, 是指需要控制其工艺变量的生产设备或机器, 如液位控制系统中的贮槽。

2) 变送器: 其作用是将被控制的物理量检测出来并转换成工业仪表间的标准统一信号, 如液位控制系统中液位变送器, 是将液位信号转换成电信号。

3) 控制器: 又称为调节器。其作用是根据反馈量与输入量比较得出的偏差, 按一定的规律运算后对执行器发出相应的控制信号或指令的装置。

4) 执行器: 其作用是依据控制器发出的控制信号或指令, 改变操纵变量, 从而对被控对象产生直接的控制作用, 如液位控制系统中的调节阀。

由图 1-5 可见, 系统的各种作用量有以下几个:

1) 被控变量: 是表征生产设备或过程运行状况, 需要加以控制的变量, 也是过程控制系统的输出量, 如液位控制系统中的液位高度 h 就是被控变量。在过程控制系统中被控变量通常有温度、压力、液位、流量及成分等。

2) 设定值: 又称给定值, 是工艺要求被控变量需要达到的目标值, 也是过程控制系统的输入量。如液位控制系统要求液位保持在 50%, 其所对应的标准信号值就是设定值。

3) 测量值: 是检测元件与变送器的输出信号值, 也称反馈量, 如液位控制系统的变送器的输出信号值就是测量值。

4) 操纵变量: 受执行器操纵, 具体实现控制作用的变量称为操纵变量。如液位控制系统中流入到贮槽的流量 q_i 的变化就是操纵变量。

5) 扰动量: 又称干扰或“噪声”, 通常是指引起被控变量发生变化的各种因素。如液位控制系统流出贮槽的流量 q_o 就是扰动量。

6) 偏差: 通常把设定值与测量值之差称为偏差。

图 1-5 所示的控制系统框图清楚地表明了各环节之间的关系和信号的传递方向。由输入端到输出端从左向右的信号传递通道称为前向通道; 由输出端到输入端从右向左的信号传递通道称为反馈通道。闭环控制系统就是由前向通道和反馈通道组成的。

1.4 过程控制系统的分类和品质指标

1.4.1 过程控制系统的分类

过程控制系统有多种分类方法, 可以按被控变量分类, 如温度、压力、流量、液位及成分等控制系统; 也可以按控制器具有的控制规律分类, 如比例、比例积分、比例微分及比例积分微分控制系统。在分析过程控制系统时, 按照设定值是否变化和如何变化来分类, 可以将过程控制系统分为三类: 定值控制系统、随动控制系统和程序控制系统。

1. 定值控制系统

在生产过程中, 如果要求控制系统使被控变量保持在一个生产指标上不变, 或者说要求工艺参数的设定值不变, 则将这类控制系统称为定值控制系统。图 1-4 所示的贮槽液位控制系统就是定值控制系统。这个控制系统的目的是使贮槽液位保持在设定值不变。在过程控制生产中, 绝大部分是定值控制系统, 因此, 后面讨论的过程控制系统, 如果没有特殊说明, 都是定值控制系统。

2. 随动控制系统

设定值是一个未知变化量的控制系统称为随动控制系统。随动控制系统的目的是使被控变量准确快速地跟随着设定值的变化而变化。这类控制系统又称为自动跟踪系统, 在化工生产中, 有些比值控制系统就属于此类控制系统。

3. 程序控制系统

也称顺序控制系统。这类控制系统的设定值也是变化的，但它是时间的已知函数，即设定值按一定的时间顺序变化，如间歇反应器的升温控制系统就是程序控制系统。

1.4.2 过程控制系统的过渡过程

过程控制系统在运行中一般可以概括为两种状态：一种是在生产过程中，各个信号保持不变，被控变量不随时间变化而变化的平衡状态，称为系统的稳态；另一种是生产过程受到扰动时，被控变量随时间变化而变化的不平衡状态，称为系统的动态。

在设定值发生变化或系统受到干扰作用后，系统将从原来的平衡状态经历一个过程进入另一个新的平衡状态。过程控制系统从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态的过程称为过程控制系统的过渡过程。

系统在过渡过程中，被控变量是随时间变化的。被控变量随时间的变化规律首先取决于作用于系统的干扰形式。在生产中，出现的干扰是没有固定形式的，且多半属于随机性质。在分析和设计控制系统时，为了安全和方便，常选择一些定型的干扰形式，其中常用的是阶跃干扰。这种形式的干扰比较突然、危险，且对被控变量的影响也最大。如果一个控制系统能够有效地克服这种类型的干扰，那么一定能很好地克服比较缓和的干扰。另外，阶跃干扰的形式简单，容易实现，因而便于分析、实验和计算。

在阶跃干扰作用下，控制系统过渡过程的几种基本形式如图 1-6 所示。图 1-6a 是发散振荡，此时被控变量一直处于振荡状态，且振幅逐渐增加；图 1-6b 是单调发散，此时被控变量虽不振荡，但偏离原来的静态点越来越远。这两种形式都属于不稳定状态，而系统稳定是正常工作的前提，因此应避免系统处于这两种状态中。图 1-6c 是等幅振荡，亦称中性，处于稳定与不稳定的边界状态，这种系统在一般情况下不采用。图 1-6d 是衰减振荡，图 1-6e 是单调衰减，这两种形式都是稳定的，即受到干扰作用后，经过一段时间，最终能趋于一个新的平衡状态，故这两种形式是可以采用的。

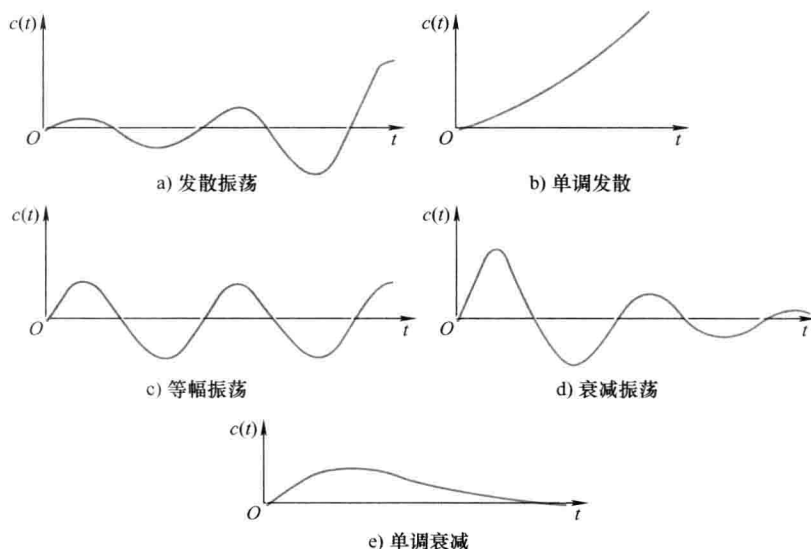


图 1-6 过渡过程的几种基本形式

1.4.3 过程控制系统的品质指标

过程控制系统性能好坏的评价指标可概括为“稳”、“准”、“快”。

1) 稳定：“稳”即系统必须是稳定的，这也是最重要、最基本的需求。一个系统要能正常工作，首先必须是稳定的，从阶跃响应上来看，响应曲线应该是收敛的。

2) 准确：“准”是指控制系统的准确性、控制的精确程度，通常用稳态误差来描述，它表示系统输出稳态值与期望值之差。系统应提供尽可能优良的稳态调节性能，这一指标属于系统的静态指标。

3) 迅速：“快”是指控制系统响应的快速性，通常用调整时间 t_s 来定量描述。系统应提供尽可能优良的过渡过程，这一指标属于系统的动态指标。

评价过程控制系统的品质指标通常采用系统阶跃响应的几个特征参数来反映。阶跃响应性能指标清晰明了，便于工程整定和分析，在工程应用中使用广泛。

控制系统最理想的过渡过程应具有什么形状，没有绝对的标准，主要依据工艺要求而定，除少数情况不希望过渡过程有振荡外，大多数情况则希望过渡过程是略带振荡的衰减过程，它容易看出被控变量的变化趋势，便于及时操作调整。图 1-7 所示是系统在阶跃信号作用下的过渡过程曲线，常用下面几个特征参数作为品质指标。

(1) 余差 C 余差是指控制系统过渡过程終了时，被控变量的稳态值与设定值之差。或者说余差就是过渡过程終了时存在的残余偏差。一般用 C 表示，有

$$C = c(\infty) - r$$

余差是衡量控制系统准确性的一个质量指标，余差越小越好。但在实际生产中，也并非要求任何系统的余差都要很小。例如，贮槽的液位控制，一般要求不高，这种系统往往允许液位在一定范围内波动，余差就可以大一些。又如，精馏塔的温度控制，一般要求比较高，应当尽量消除余差。因此，对余差大小的要求，必须结合具体系统做具体分析，不能一概而论。

(2) 衰减比 n 衰减比是衡量系统过渡过程稳定性的一个动态指标，通常定义为图 1-7 曲线上第一个波峰与稳态值的差 B_1 和同方向第二个波峰与稳态值的差 B_2 之比，即

$$n = \frac{B_1}{B_2}$$

若衰减比 $n < 1$ ，过渡过程是发散振荡， n 越小发散越快； $n = 1$ ，过渡过程为等幅振荡； $n > 1$ ，过渡过程是衰减振荡， n 越大，衰减越快，系统越稳定；当 $n \rightarrow \infty$ 时，系统过渡过程为非周期衰减过程。

根据实际经验，为保持系统具有足够的稳定裕度，一般取衰减比 n 在 4:1 ~ 10:1 范围内。其中 4:1 的衰减比通常作为评价过渡过程动态性能的一个理想指标。

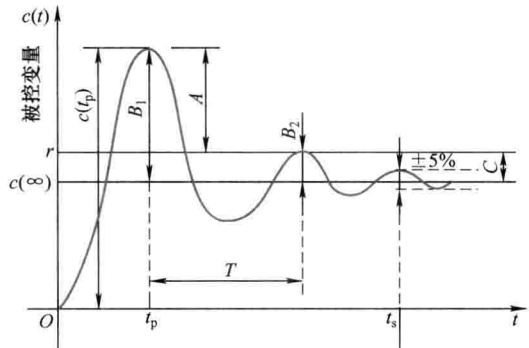


图 1-7 阶跃信号作用下的过渡过程
 r —设定值 C —余差 $c(\infty)$ —稳态值 $c(t_p)$ —第一个波峰值 T —振荡周期 A —最大偏差 B_1 —第一个波峰与稳态值的差 B_2 —第二个波峰与稳态值的差
 t_s —调整时间 t_p —峰值时间

(3) 最大偏差 A 或超调量 σ 最大偏差表示被控变量偏离设定值的最大程度。对于一个衰减的过渡过程, 最大偏差就是第一个波峰的峰值与设定值的差, 即图 1-7 中的 A 值。

被控变量偏离设定值的程度有时也可用超调量 σ 来表示。超调量 σ 是指过渡过程曲线超出新稳态值的最大值, 反映了系统过调程度, 也是衡量控制系统稳定性的一个指标。如图 1-7 所示, 超调量 σ 定义为被控变量第一个波峰值 $c(t_p)$ 与稳态值 $c(\infty)$ 的差与稳态值之比, 即

$$\sigma = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\% = \frac{B_1}{c(\infty)} \times 100\%$$

(4) 过渡过程时间 (调整时间) t_s 如图 1-7 所示, 过渡过程时间 t_s 是指系统从受扰动作用时起, 直到被控变量进入新稳态值的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 范围内所经历的最短时间。过渡过程时间是反映系统快速性的一个指标, 通常过渡过程时间 t_s 越小越好。

(5) 峰值时间 t_p 峰值时间是指过渡过程曲线达到第一个峰值所需要的时间, 常用 t_p 表示。 t_p 越小, 表明控制系统反应越灵敏。峰值时间也是反映系统快速性的一个指标。

(6) 振荡周期 T 过渡过程同向相邻两个波峰 (或波谷) 之间的间隔时间称为振荡周期或工作周期, 在图 1-7 中用 T 表示。其倒数称为振荡频率, 一般用 f 表示。它们也是衡量系统快速性的质量指标。在衰减比相同的情况下, 振荡周期与过渡时间成正比, 因此希望振荡周期短一些为好。

1.5 过程控制系统的特点与要求

1.5.1 过程控制系统的特点

与其他控制系统相比, 过程控制系统有以下特点。

1) 系统由被控对象与系列化生产的自动化仪表组成。

过程控制的任务和要求由过程控制系统加以实现, 而自动化仪表则是过程控制系统的重要组成部分。在过程控制系统中, 先由检测仪表将生产过程中的工艺参数转换为电信号或气压信号, 并由显示仪表显示或记录, 以便反映生产过程的情况。与此同时, 还将检测的信号通过某种变换或运算传送给控制仪表, 以便实现对生产过程的自动控制, 使工艺参数符合预期要求。

随着生产过程自动化要求的不断提高、过程控制规模的不断扩大和复杂程度的不断增加, 自动化仪表的品种与规格、功能与质量也在不断完善。但不管自动化仪表及其技术如何发展, 其共同特点是: 为实现过程控制系统的不同构成和相应的功能, 它们都是工业上生产的系列化仪表。

2) 被控对象复杂多样, 通用控制系统难以设计。

被控对象通常是指通过一定物质流或能量流的工艺设备。在工业生产中, 由于生产规模、工艺要求和产品种类各不相同, 因而导致被控对象的结构形式、动态特性也复杂多样。当生产过程在较大工艺设备中进行时, 它们的动态特性通常具有惯性大、时延长、变量多等特点, 而且还常常伴有非线性与时变特性。例如, 热力传递过程中的锅炉、热交换器、核反应堆, 金属冶炼过程中的电弧炉, 机械加工过程中的热处理炉, 石油化工过程中的精馏塔、化学反应器以及流体输送设备等, 它们的内部结构与工作机理都比较复杂, 其动态特性也各

不相同,有时很难用机理解析的方法求得其精确的数学模型,所以要想设计出能适应各种过程的通用控制系统是比较困难的。

3) 控制方案多,控制要求高。

由于被控对象的复杂多样,控制方案越来越丰富多彩,对控制功能的要求也越来越高。在控制方案上,既有常规的PID控制,也有先进的过程控制(APC),如自适应控制、预测控制、推理控制、补偿控制、非线性控制、智能控制及分布参数控制等。

4) 控制过程大多属于慢变过程与参量控制。

由于被控对象大多具有大惯性、大时延(滞后)等特点,因而决定了控制过程是一个慢变过程。此外,在诸如石油、化工、冶金、电力、轻工、建材及制药等生产过程中,常常用一些物理量(如温度、压力、流量、物位及成分等)来表征生产过程是否正常、产品质量是否合格,对它们的控制多半属于参量控制。

5) 定值控制系统是过程控制系统的主要形式。

在目前大多数过程控制中,其设定值是恒定不变或在很小范围内变化,控制的主要目的是尽可能减小或消除外界干扰对被控变量的影响,使生产过程稳定,以确保产品的产量和质量。因此,定值控制系统是过程控制系统的主要形式。

1.5.2 过程控制系统的要求

生产过程是与化学反应、生化反应、物理反应、相变过程、能量的转换过程及传热传质过程等复杂的反应或过程相伴随的。这些过程或反应的进行,必须满足一定的内部和外部条件。满足这些条件,并且使这些条件保持稳定,生产过程就能正常、稳定地进行,产品的产量和质量就能得到保证。所以,过程控制系统主要是对决定生产过程是否正常的条件进行控制,以保证整个生产过程的正常进行。工业生产对过程控制的要求是多方面的,如生产过程中原料和能源消耗最小,即成本低而效率高,以及工业生产过程中的某一量以最短时间到达设定值等。总的来说,可从以下三个方面对过程控制系统提出要求:

1) 安全性:整个生产过程中,人身安全和设备安全是控制系统中最重要和最基本的要求。在整个生产过程中,通常采用越限报警、事故报警和联锁保护等措施来保证系统的安全性。随着工业生产过程的高度集成化和大型化,目前将在线故障预测与诊断、容错控制等应用于过程控制中,进一步提高了系统运行的安全性。

2) 稳定性:工业生产环境中存在各种各样的干扰以及生产原料的变化和波动,如何有效地抑制或减小系统外部干扰,保持生产过程长期稳定运行是设计过程控制系统的又一要求。

3) 经济性:随着市场竞争加剧和世界能源及原材料的匮乏,在满足安全性和稳定性的前提下,要求控制系统低成本、高效益。

过程控制的任务就是在了解、掌握生产工艺和系统综合指标要求的基础上,根据安全性、稳定性、经济性的要求,应用控制理论、最优控制、系统论等理论知识,对系统进行分析和设计,提出合理的控制方案,设计报警和联锁保护系统,选择最优的控制器参数及生产过程现场调试方案等。