



教育部高职高专规划教材



建材工业自动化及仪表



董武 戴毅 主编



化学工业出版社
教材出版中心

教育部高职高专规划教材

建材工业自动化及仪表

董武 戴毅 主编



化学工业出版社
教材出版中心

· 北京 ·

全书共分6章：第1章、第5章讲解了自动控制系统的有关知识，包括自动控制系统基本知识、设计初步及典型控制系统介绍；第2章介绍生产过程参数检测技术，包括温度、压力、流量、物位及成分等参数检测；第3章介绍了与参数检测配套使用的显示仪表，包括动圈式、自动平衡式和数字式显示仪表；第4章介绍了自动控制仪表与装置；第6章对集散控制系统进行了系统讲解，并就集散控制系统在建材工业方面的应用进行了举例介绍。为了帮助广大师生与读者学习，每章都附有习题。

本书适合于高职高专建材专业相关师生阅读与参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

建材工业自动化及仪表/董武，戴毅主编. —北京：化学工业出版社，2006.6

教育部高职高专规划教材

ISBN 7-5025-8730-6

I. 建… II. ①董…②戴… III. 建筑材料工业-自动化仪表-高等学校：技术学院-教材 IV. TU5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 067599 号

教育部高职高专规划教材

建材工业自动化及仪表

董武 戴毅 主编

责任编辑：程树珍 王文峡

文字编辑：朱磊

责任校对：郑捷

封面设计：潘峰

*

化学工业出版社
教材出版中心 出版发行

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

购书咨询：(010)64982530

(010)64918013

购书传真：(010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
化学工业出版社印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 11 字数 274 千字

2006年7月第1版 2006年7月北京第1次印刷

ISBN 7-5025-8730-6

定 价：20.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者，本社发行部负责退换

序

全国建材职业教育教学指导委员会为建材行业的高职、高专教育发展做了一件大好事，他们组织行业内职业技术学院数百位骨干教师，在对有关企业的生产经营、技术水平、管理模式及人才结构等情况进行深入调研的基础上，经过几年的努力，规划开发了材料工程技术和建筑装饰技术两个专业的系列教材。这些教材的编写含有课程开发和教材改革的双重任务，在规划之初，该委员会就明确提出课程综合化和教材内容必须贴近岗位工作需要的目标要求，使这两个专业的课程结构和教材内容结构都具有较多的改进和新意。

在当前和今后的一段时期，我国高职教育的课程和教材建设要为我国走新型工业化道路、调整经济结构和转变增长方式服务，更好地适应于生产、管理、服务第一线高素质的技术、管理、操作人才的培养。然而我国高职教育的课程和教材建设当前面临着新的产业情况、就业情况和生源情况等多因素的挑战，从产业方面分析，要十分关注如下三大变革对高职课程和教材所提出的新要求：

1. 产业结构和产业链的变革。它涉及专业和课程结构的拓展和调整。
2. 产业技术升级和生产方式的变革。它涉及课程种类和课程内容的更新，涉及学生知识能力结构和学习方式的变化。
3. 劳动组织方式和职业活动方式的变革——“扁平化劳动组织方式的出现”；“学习型组织和终身学习体系逐步形成”；“多学科知识和能力的复合运用”；“操作人员对生产全过程和企业全局的责任观念”；“职业活动过程中合作方式的普遍开展”。它们同样涉及课程内容的更新与调整，还涉及非专业能力的培养途径、培养方法、学业的考核与认定等许多新领域的改革和创新。

建筑材料行业的变化层出不穷，传统的硅酸盐材料工业生产广泛采用了新工艺，普遍引入计算机集散控制技术，装备水平发生根本性变化；行业之间的相互渗透急剧增加，技术创新过程中学科之间的融通加快，又催生出多种多样的新型材料，使材料功能获得不断扩展，被广泛应用于建筑业、汽车制造业、航天航空业、石油化工业和信息产业，尤其是建筑装饰业，是融合工学、美学、材料科学及环境科学于一体的新兴服务业，有着十分广阔的市场前景，它带动材料工业的加速发展，而每当一种新的装饰材料问世，又会带来装饰施工工艺的更新；随着材料市场化程度的提高，在产品的检测、物流等领域形成新的职业岗位，使材料行业的产业链相应延长，并对从业人员的知识能力结构提出了新的要求。

然而传统的材料类专业课程模式和教材内容，显然滞后于上述各种变化。以学科为本位的教学模式应用于高职教育教学过程时，明显地出现了如下两个“脱节”，一是以学科为本的知识结构与职业活动过程所应用的知识结构脱节；二是以学科为本的理论体系与职业活动的的能力体系脱节。为了改变这种脱节和滞后的被动局面，全国建材职业教育教学指导委员会组织开展了这一次的课和教材开发工作，编写出版了这一系列教材。其间，曾得到西门子分析仪器技术服务中心的技术指导，使这批教材更适应于职业教育与培训的需要，更具有现

代技术特色。

随着它们被相关院校日益广泛地使用，可望我国高职高专系统的材料工程技术和建筑装饰技术两个专业的教学工作将出现新的局面，其教学水平和教学质量将上一个新的台阶。

中国职业技术教育学会副会长、学术委员会主任

高职高专教育教学指导委员会主任

杨金土

2006年1月

前 言

随着现代科技的进步,出现了大量先进的自动化生产成套设备及装置,使建材工业生产自动化水平迅猛提高。为了适应这一发展要求,必须使各类工艺专业技术人员具有生产过程自动化的基本知识,对生产过程自动化及仪表的现状和发展有所认识。

本书的编写结合一些典型建材工业生产过程的特点和要求,深入浅出地叙述了生产过程参数检测技术、自动化系统的基本组成和控制仪表应用特点,以及自动控制系统在设计过程中的基本知识。在编写过程中,删除了以前版本较陈旧、工艺类人员较少接触的内容,增添了大量反映当前自动化水平的新内容,特别对一些新型传感器、仪表、集散控制系统的内容做了简明的、深入浅出的介绍,使工艺类人员对工业自动化的新发展、新技术有比较全面的了解,以满足能够培养面向 21 世纪工艺技术人才的需要。

本书是高职材料工程类专业系列教材,为了充分体现高等职业教育的特点,提高学生分析问题及解决问题的能力,编写过程中特别注意以下两个方面。

(1) 对教学内容进行了精选,基本上从我国当前建材工业生产的实际出发,注重新技术应用。

(2) 立足基本知识,面向应用技术,以必须、够用的尺度,以掌握概念、强化应用为重点。

全书共分 6 章:第 2 章介绍生产过程参数检测技术,包括温度、压力、流量、物位及成分等参数检测;第 3 章介绍了与参数检测配套使用的显示仪表,包括动圈式、自动平衡式和数字式显示仪表;第 4 章介绍了自动控制仪表与装置;第 1 章、第 5 章讲解了自动控制系统的有关知识,包括自动控制系统基本知识、设计初步及典型控制系统介绍;第 6 章对集散控制系统进行了系统讲解,并就集散控制系统在建材工业方面的应用进行了举例介绍。为了帮助广大师生与读者学习,每章都附有习题。

本书由董武、戴毅主编,董武对全书进行了统稿。其中内蒙古化工职业技术学院韩剑霞编写第 1 章,戴毅编写了第 4 章和第 5 章的部分内容,安徽职业技术学院董武编写了第 2 章,温晓玲编写第 3 章和第 4 章的 4.1.3 节和 4.1.4 节,北京市建材工业学校金平编写了第 6 章。

由于编者的水平有限,书中不妥之处望读者批评指正。

编 者
2006 年 5 月

目 录

1 自动控制系统概述	1
1.1 建材工业自动化及发展	1
1.2 自动控制系统基本知识	2
1.2.1 自动控制系统的组成	2
1.2.2 自动控制系统分类	2
1.2.3 自动控制系统方框图	3
1.3 自动控制系统的过渡过程和控制指标	4
1.3.1 静态与动态	4
1.3.2 自动控制系统的过渡过程	5
1.3.3 自动控制系统的控制指标	6
本章小结	8
思考题与习题	9
2 过程参数检测	10
2.1 参数检测概述	10
2.1.1 测量过程及误差	10
2.1.2 检测仪表的分类及基本性能指标	11
2.2 温度检测	13
2.2.1 温标及温度检测方法	13
2.2.2 接触式温度检测	14
2.2.3 非接触式温度检测	21
2.2.4 温度变送器	23
2.2.5 测温技术的应用	24
2.3 流量检测	26
2.3.1 流量概念及流量检测方法	26
2.3.2 差压式流量计	26
2.3.3 转子式流量计	29
2.3.4 椭圆齿轮流量计	30
2.4 压力检测	31
2.4.1 压力概念及压力检测方法	31
2.4.2 常用压力检测技术	32
2.4.3 差压(压力)变送器	35
2.4.4 测压检测仪器的使用	36
2.5 物位检测	38
2.5.1 物位的概念及物位检测方法	38
2.5.2 常用物位检测	38

2.5.3	影响物位测量的因素	41
2.6	成分分析仪表	42
2.6.1	成分分析仪表的分类及分析系统的构成	42
2.6.2	常用气体成分分析仪表	43
2.6.3	常用气体湿度和物料水分测量仪表	46
	本章小结	48
	思考题与习题	51
3	显示仪表	53
3.1	显示仪表概述	53
3.2	动圈式显示仪表	53
3.2.1	动圈式显示仪表概述	53
3.2.2	动圈式显示仪表测量机构及工作原理	54
3.2.3	动圈式显示仪表测量线路	55
3.3	自动平衡式显示记录仪表	56
3.3.1	自动平衡显示记录仪表概述	56
3.3.2	电子电位差计	57
3.3.3	电子自动平衡电桥	59
3.3.4	ER180 系列记录仪	60
3.4	数字式显示仪表	61
3.4.1	数字式显示仪表概述	61
3.4.2	数字式显示仪表组成及工作原理	63
3.4.3	数字模拟混合记录仪简介	65
	本章小结	66
	思考题与习题	67
4	自动控制仪表与装置	69
4.1	控制器	69
4.1.1	常用控制器的控制规律	69
4.1.2	DDZ-III型电动调节器	73
4.1.3	KMM 可编程调节器	76
4.1.4	可编程序控制器	82
4.2	执行设备	90
4.2.1	概述	90
4.2.2	电动执行器	91
4.2.3	气动执行器	92
4.2.4	调节阀	93
4.2.5	阀门定位器	94
4.2.6	电-气阀门定位器	95
	本章小结	95
	思考题与习题	97
5	自动控制系统设计初步及典型控制系统	98
5.1	自动控制系统设计初步	98

5.1.1	自动控制系统设计初步概述	98
5.1.2	有关设计规定的说明	99
5.1.3	自动控制系统的设计过程	104
5.1.4	控制盘(台)及控制室的设计	106
5.1.5	自动控制仪表及自动控制系统设计举例	111
5.2	典型控制系统介绍	119
5.2.1	定值控制系统	119
5.2.2	串级控制系统	120
5.2.3	随动控制系统	122
	本章小结	123
	思考题与习题	124
6	集散控制系统(DCS)	125
6.1	集散控制系统概述	125
6.1.1	计算机应用于生产过程控制的历程	125
6.1.2	集散控制系统概述	128
6.1.3	集散控制系统的发展阶段	129
6.1.4	集散控制系统在我国的应用情况	130
6.1.5	工控机、PLC与DCS的关系	131
6.1.6	现场总线控制系统(FCS)简介	132
6.2	集散控制系统的分层结构及硬件功能	133
6.2.1	集散控制系统的分层结构	133
6.2.2	集散控制系统典型装置介绍	136
6.2.3	典型DCS产品的系统结构及功能介绍	138
6.3	集散控制系统的软件配置及组态方法	141
6.3.1	集散控制系统的软件配置	141
6.3.2	集散控制系统的组态方法	143
6.4	集散控制系统的网络通信	144
6.4.1	集散控制系统的网络结构	144
6.4.2	集散控制系统网络分级体系	145
6.4.3	DCS通信网络的三要素	146
6.5	集散控制系统的设计及实施程序	148
6.5.1	集散控制系统的设计思路及特点	148
6.5.2	集散控制系统设计	149
6.5.3	集散控制系统工程设计步骤与实施方法	153
6.6	集散控制系统应用举例	154
6.6.1	集散控制系统在水泥生产中的应用	154
6.6.2	集散控制系统在玻璃生产中的应用	159
	本章小结	161
	思考题与习题	162
	参考文献	163

1 自动控制系统概述

本章提要 本章介绍了建材工业自动化意义及发展过程和自动控制系统的基本知识，主要包括自控系统的组成、分类、过渡过程及技术指标。

1.1 建材工业自动化及发展

建材工业自动化，就是在建筑材料生产设备和装置上配置一些自动控制仪表及设备，替代操作工人的部分劳动，使生产在一定程度上自动地进行。这种部分或全部地用自动化装置来管理建筑材料生产过程的办法，就是建材工业自动化。

在建材工业生产自动化发展的初级阶段，仅仅利用一些自动检测仪表来监视生产，即在生产过程中装上检测元件和执行器，由操作工人观察检测元件的检测结果，经大脑的分析、判断后做出决策，再去指挥执行器。该阶段控制不仅工人劳动强度大，而且由于在观察能力、经验、判断能力以及反应能力等方面存在的问题，很难做到及时、准确的控制。

中国在 20 世纪 50~60 年代，检测仪表和控制系统开始被应用于水泥和玻璃生产。这种控制系统，通常是一个被控参数要配备一套检测仪表、模拟调节器和自动执行器。此外，根据需要还要配置各种二次仪表，如报警器、累计计算器、记录仪、指示仪等。由于一个调节器只能控制一个参数，两个调节器之间只能进行简单的信息交换，而且当被控参数很多时，需要的二次仪表也很多，安装分散，不便于集中管理。

20 世纪 70 年代以来，自动化技术新产品相继问世，为实现各种特殊控制规律提供了条件。新型智能仪表和控制仪表的出现使仪表与计算机之间的直接联系极为方便。在自动控制方面，由于控制理论和控制技术的发展和进步，给自动控制系统的发展创造了各种有利的条件，相继出现了很多新型的控制系统。近年来，由于计算机在自动化中发挥的巨大作用，对常规仪表产生了深远的影响，促进常规仪表不断变革，以满足越来越高的生产需求。

在国内，计算机用于工业过程控制始于 20 世纪 60 年代中期。最初是用计算机代替常规控制仪表，实现集中控制，即直接数字控制系统（DDC）。为提高经济效益，集散控制系统（DCS）很快就取代了直接数字控制系统。集散控制系统一方面将控制回路分散化，另一方面又将数据显示、实时监督等功能集中化，同时还可以实现许多先进控制和优化控制，实现多层次计算机网络构成的管控一体化系统（CIPS）。

20 世纪 80 年代末至 90 年代，现场总线和现场总线控制系统得到了飞速发展。现场总线是顺应智能仪表而发展起来的一种开放型的数据通信技术。它是综合应用微处理器技术、网络技术、通信技术和自动控制的产物。采用现场总线作为系统的底层控制网络构造的网络集成式全分布计算机控制系统就是现场总线控制系统（FCS）。现场总线控制系统更好地体

现了“信息集中，控制分散”的思想，因此有着更加广泛的应用基础。

1.2 自动控制系统基本知识

1.2.1 自动控制系统的组成

下面以一些硅酸盐生产中已经得到应用的自动控制系统为例，对自动控制系统的组成进行简要的介绍。

在早期的立窑生产中，料球的质量取决于成球过程的水料比是否合适。当料流量稳定控制后，给定水流量必须等于实际料流量和单位生料所需水量的乘积，通过搅拌机搅拌，成球盘上得到质量合格的料球。由于干扰，经常会使实际水流量在给定水流量基础上发生波动，造成料球含水过多或过少。

解决问题的方法是以给定水流量为操作指标来改变水流阀门开度大小，当水流量大时，关小阀门；当水流量小时，将阀门开大。通过分析可知，对水流的操作可概括如下。

- i. 检测实际水流量。
- ii. 与给定水流量比较，产生偏差，做出决策。
- iii. 执行决策命令，改变阀门开度大小，以改变实际水流量，从而把水流量保持在给定值上，保证水流与料流的比例满足要求。

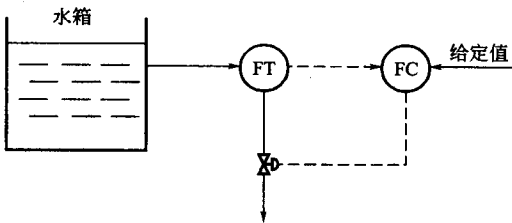


图 1-1 预加水成球水流自动控制系统

如果上述工作用自动化装置来代替，则搅拌机、水流管道和自动化装置一起构成了一个水流随动控制系统，如图 1-1 所示。该控制系统主要包括三个部分。

(1) 检测元件与变送器

图 1-1 中 FT 表示水流量检测与变送器，它的作用是测量水流量，并将水流量的大小转换成标准电流信号（4~20mA）或电压信号（1~5V）。

(2) 自动控制器

图 1-1 中 FC 表示水流量控制器。它接受变送器送来的信号，与工艺要求的水流量值（给定值）相比较，得出偏差，并按某种运算规律算出结果，然后将此结果用特定信号（如电流或电压）发送出去。

(3) 执行器

图 1-1 中电动调节阀是执行器，它自动地根据控制器送来的信号改变阀门的开度大小。执行器通常指阀门、闸板或电机等。

1.2.2 自动控制系统分类

自动控制系统有多种分类方法，按照被控变量可分为温度、压力、流量等控制系统；按照控制系统的控制规律可分为比例（P）、比例积分（PI）、比例微分（PD）、比例积分微分（PID）等控制系统；按控制方式可分为开环、反馈、复合控制系统；按元件类型可分为机械、电气、机电、液压、气动等控制系统。在分析自动控制系统特性时，最常遇到的是将控制系统按照工艺过程需要控制的被控变量的数值是否变化和如何变化来分类，这样可以将自动控制系统分为三类，即定值控制系统、随动控制系统和程序控制系统。

(1) 定值控制系统

该控制系统的被控参数的数值是恒定的。在生产中，如果要求工艺参数的给定值不变，

就需要采用定值控制系统。这类控制系统的基本任务是克服扰动对被控变量的影响。即在扰动作用下，仍能使被控变量保持在给定值或其附近。硅酸盐生产中要求的大都是这种类型的控制系统。

(2) 随动控制系统

这类控制系统的特点是给定值不能为人们所预知且是随机变化的。随动控制系统的目的就是使所控制的工艺参数准确而快速地跟随给定值的变化而变化。

(3) 程序控制系统

这类控制系统的被控参数给定值按照一定的规律变化，其变化规律可以用已知的、确定的函数关系来描述。这类系统在间歇生产过程中应用比较普遍，例如冶金工业金属热处理的温度控制就属于程序控制系统。近年来，程序控制系统应用日益广泛，一些定型或非定型的程控装置越来越多地被应用到生产中，微型计算机的广泛应用也为程序控制提供了良好的技术工具与有利条件。

1.2.3 自动控制系统方框图

控制与信息密不可分，控制系统的作用是通过信息的获取、变化与处理来实现的。载有变量信息的物理变量就是信号。对控制系统或其组成环节来说，输入变量、输出变量和状态变量都是变量，也都是信号。

一个系统是由若干个环节组成的。为了说明各个环节在系统中的作用以及信息的流向，采用方框图代表一个环节，甚至一个系统。图 1-2 所示的方框可以用来表示系统或某一个环节。

箭头代表输入及输出，箭头指向方框的信号 u 表示施加到系统或环节上的独立变量，称为输入变量。箭头离开方框的信号 y 表示系统或环节输出的变量，称为输出变量。如果一个系统同时有几个输入变量和几个输出变量，则称为多输入多输出系统。

对于线性系统来说，几个输入变量同时作用的结果符合叠加原理，即等于它们分别作用的结果之和。

在研究自动控制系统时，为了能更清楚地表示出一个自动控制系统各个组成环节之间的相互影响和信号联系，便于对系统进行分析研究，往往将表示各环节的方框根据信号流的关系排列与连接起来，组成自动控制系统的方框图。

图 1-3 是一个简单的自动控制系统的方框图，它一般由以下几部分组成。

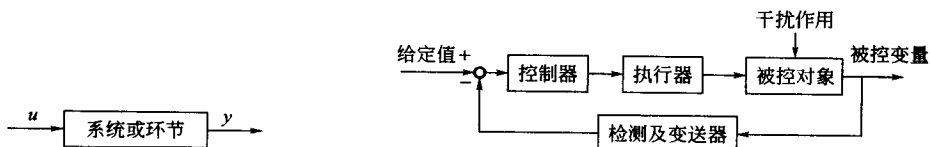


图 1-2 输入、输出变量

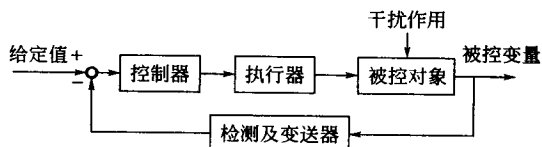


图 1-3 自动控制系统方框图

(1) 被控对象或被控过程

通常指需要控制的工艺参数的生产设备或设备的一部分、机器、一段管道等。同一被控对象对于不同被控变量可以表现出不同的特性，如同一窑炉在控制炉温和窑压两种变量时，所表现出的被控过程特性是不同的。

(2) 检测元件及变送器

检测元件的功能是感受并测出被控变量的大小，如热电偶、孔板等。变送器的作用是将检测元件测得的信号变成调节器所需要的信号形式，如温度变送器可以将热电偶输出的热电势信号变成调节器所需要的 $0\sim 10\text{mV}$ 直流电流信号。当某些调节器可以直接与检测元件沟

通信息时，变送器就可省去。

(3) 控制器

控制器的比较环节首先将给定值与测量值进行比较，并对两者的偏差进行运算，做出判断，然后发出使执行机构动作的控制信号或控制命令。

(4) 执行器

执行控制器发出的控制命令，对被控过程施加校正作用，它包括执行机构和调节机构。

执行机构的作用是接受控制器发来的控制信号并放大，再推动调节机构动作，如阀门、闸板等。执行机构的工作能源供给有电动、气动和液动三种形式。

调节机构的动作直接受执行机构操纵，按照控制器的控制规律动作，对被控过程施加校正作用，使被控变量回复至设定值。

(5) 比较环节

在图 1-3 中所示，给定值与变送器输出信号进行比较，用“○”表示。

(6) 反馈极性

对于任何一个简单的自动控制系统，不论它们在表面上有多大差别，其方框图都有类似的形式。组成系统的各个环节在信号传递关系上都形成一个闭合的回路，其中任何一个信号，只要沿着箭头方向前进，通过若干个环节后，最终又会回到原来的起点。所以，自动控制系统是一个闭环系统，具有反馈作用。

如图 1-3 所示，系统的输出变量是被控变量，经过测量元件和变送器后，又返回到系统的输入端，与给定值进行比较。这种把系统或环节的输出信号直接或经过一些环节重新返回到输入端的做法叫做反馈。反馈有正负之分，在反馈信号旁有一个负号“-”表示负反馈，正号“+”表示正反馈。通常，自动控制系统均采用负反馈。

反馈在控制系统中起着十分重要的作用，没有反馈，按偏差控制的系统就不复存在。正是有了负反馈，系统才能随时了解被控对象的情况，有针对性地根据被控变量的变化情况而改变控制作用的大小和方向，从而使系统的工作状况始终满足生产要求。

1.3 自动控制系统的过渡过程和控制指标

1.3.1 静态与动态

在定值控制系统中，被控变量不随时间而变化的平衡状态称为系统的静态，也称为稳态。被控变量随时间而变化的不平衡状态称为系统的动态或暂态。

当一个自动控制系统的输入（给定值和干扰信号）和输出均恒定不变时，整个系统就处于一种相对稳定的平衡状态，系统的各个组成环节如变送器、控制器、执行器都不改变其原先的状态，它们的输出信号也都处于相对稳定状态，这种状态就是上述的静态。但静态不意味静止，自动控制领域中的静态是指生产还在进行，物料和能量仍然有进有出，各参数（或信号）的变化率为零，即参数保持在某一常数不变化。

自动控制系统的目的就是希望将被控变量保持在给定值上，这只有当进入被控对象的物料量和流出对象的物料量相等时才有可能。例如图 1-1 所示的水流跟踪控制系统，在料流恒定的前提下，只有当流入水流管道的水流量和流出水流管道的水流量相等时，参与成球的水流量才能恒定，即才能保证水料比合适，系统处于静态。

假如一个系统原先处于平衡状态即静态，由于干扰的作用而破坏了这种平衡时，被控变量就会发生变化，从而使控制器、执行器等自动控制装置改变原来平衡时所处的状态，产生一定的控制作用以克服干扰的影响，并力图使系统恢复平衡。从干扰发生开始，经过控制，

直到系统重新建立平衡，在这一段时间内，整个系统的各个环节和参数都处于变动状态之中，所以这种状态叫做动态。

当自动控制系统在动态过程中，被控变量是不断变化的，它随时间变化的过程称为自动控制系统的过渡过程，也就是自动控制系统从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态的过程。

自动控制系统的过渡过程是控制作用不断克服干扰作用影响的过程，当干扰作用被抑制时，过渡过程也就结束，系统也达到了新的平衡。

平衡状态是暂时的、相对的、有条件的，不平衡才是普遍的、绝对的、无条件的。在从事自动控制系统的有关工作中，了解系统的静态是必要的，但是了解系统的动态更为重要。这是因为在生产过程中，干扰是客观存在的，是不可避免的，例如生产过程中前后工序的相互影响、负荷的改变、电压的波动、气候的影响等。这些干扰是破坏系统平衡状态，引起被控变量发生变化的外界因素。

在一个自动控制系统投入运行时，时时刻刻都有干扰作用于控制系统，从而破坏了正常的工艺生产状态。因此就需要通过自动控制装置不断地施加控制作用去对抗或抵消干扰作用的影响，使被控变量保持在工艺生产所要求的控制技术指标上。所以一个自动控制系统在正常工作时，总是处于一波未平、一波又起、波动不止、往复不息的动态过程中，动态分析是自动控制系统的研究重点。

1.3.2 自动控制系统的过渡过程

假定系统原先处于平衡状态，系统中的参数不随时间而变化。在某一个时刻 t_0 ，有一干扰作用于被控对象上，于是系统的输出信号（被控变量）就要变化，系统进入动态过程。由于自动控制系统的负反馈作用，经过一定时间以后，系统应该重新恢复平衡。显然，系统由一个平衡状态到达另一个平衡状态时，被控变量随时间变化的规律首先取决于干扰作用的形式。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，其中最常用的是阶跃干扰，如图 1-4 所示。

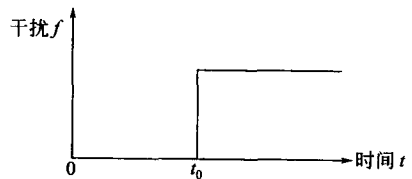


图 1-4 阶跃干扰作用

所谓阶跃干扰，就是在某一瞬时 t_0 干扰突然阶跃式地加到系统上，并继续保持在这个幅度上。采取阶跃干扰是因为考虑到这种形式的干扰比较突然、比较危险，它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，对于其他比较缓和的干扰也一定能很好地克服。同时，这种干扰的形式简单，容易实现，便于分析、实验和计算。

一般来说，自动控制系统在干扰作用下的过渡过程有图 1-5 所示的几种基本形式。

(1) 非周期衰减过渡过程

被控变量在给定值的某一侧作缓慢变化，没有来回波动，最后稳定在某一数值上。这种过渡过程形式为非周期衰减过渡过程，如图 1-5(a) 所示。

(2) 衰减振荡过程

被控变量上下波动，但幅度逐渐减小，最后稳定在某一数值上。这种过渡过程的形式为衰减振荡过程，如图 1-5(b) 所示。

(3) 等幅振荡过程

被控变量在给定值附近来回波动，且波动幅度保持不变。这种形式的过渡过程为等幅振荡过程，如图 1-5(c) 所示。

(4) 发散振荡过程

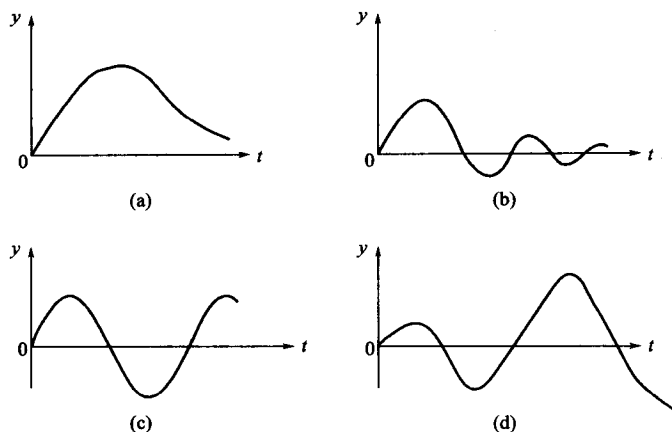


图 1-5 过渡过程的几种基本形式

被控变量来回波动，且波动幅值逐渐增大，即偏离给定值越来越远。这种形式的过渡过程为发散振荡过程，如图 1-5(d) 所示。

以上过渡过程的四种基本形式可以归纳为以下三类。

i. 过渡过程图 1-5(a) 和过渡过程图 1-5(b) 都是衰减的，称为稳定的过渡过程。被控变量经过一段时间后，逐渐趋向原来的或新的平衡状态。这是所希望的。

对于非周期的衰减过程，由于这种过渡过程变化较慢，被控变量在控制过程中长时间地偏离给定值，而不能很快地恢复平衡状态，所以一般不采用。

对于衰减振荡过程，由于能够较快地使系统稳定下来，所以在多数情况下，希望自动控制系统在干扰作用下，能得到图 1-5(b) 所示的衰减振荡过程。

ii. 过渡过程图 1-5(d) 形式是发散的，是不稳定的过渡过程。其被控变量在控制过程中不但不能达到平衡状态，而且逐渐远离给定值。将导致被控变量超越工艺允许范围，严重时会引起事故。这是生产所不允许的，应避免出现。

iii. 过渡过程图 1-5(c) 介于稳定与不稳定之间，一般也认为是不稳定的过渡过程，生产上不能采用。对某些控制质量要求不高的场合，如果被控变量允许在工艺许可的范围内波动，那么这种过渡过程形式是可以采用的。

1.3.3 自动控制系统的控制指标

定值控制系统的作用是克服扰动的影响，使被控变量保持预定数值。因此对定值控制系统最突出的控制要求是平稳。在扰动发生以后，希望被控变量稳得住、稳得快、稳得好。

控制系统的过渡过程是衡量控制系统品质指标的依据。由于在多数情况下，都希望得到衰减振荡过程，所以取衰减振荡的过渡过程形式来讨论控制系统的品质指标。

自控系统的控制指标主要有两类：一类是时间域的单项指标；另一类是时间域的综合指标。

(1) 时间域的各项单项指标

假定一个自动控制系统在阶跃干扰作用下，被控变量的变化曲线如图 1-6 所示，则其过渡过程是衰减振荡的过渡过程。

图 1-6 上横坐标 t 为时间，纵坐标 y' 为被控变量离开给定值的变化量。若在前时间 $t=0$ 之前，系统稳定，且被控变量等于给定值，即 $y'=0$ 。在 $t=0$ 瞬间，外加阶跃干扰作用，系统的被控变量开始按衰减振荡规律变化，经过一段时间后，变化量逐渐稳定在 C 值上，

即 $y'(\infty) = C$ 。

对图 1-6 所示的衰减振荡形式的过渡过程，通常采用下列几个品质指标来评价控制系统的质量。

① 最大偏差或超调量 最大偏差是指在过渡过程中，被控变量偏离给定值的最大数值。在衰减振荡过程中，最大偏差就是第一个波的峰值，图 1-6 中以 A 表示。最大偏差表示系统瞬时偏离给定值的最大程度。若偏离得越大，偏离的时间越长，即表明系统离开规定的工艺参数指标就越远，这对稳定生产是不利的。因此最大偏差可以作为衡量系统质量的一个品质指标。一般来说，最大偏差小一些为好。

超调量是指第一个波峰值 A 与新稳定值 C 之差，即 $B = A - C$ 。超调量也可以表示被控变量偏离给定值的程度。如果系统的新稳定值等于给定值，那么最大偏差 A 就与超调量 B 相等。

② 衰减比 衰减比是表示衰减程度的指标，即衰减振荡的过渡过程衰减快慢的程度，它是前后两个相邻峰值的比。在图 1-6 中所示的衰减比是 $B : B'$ ，习惯上表示为 $n : 1$ 。假如 n 只比 1 稍大一点，显然过渡过程的衰减程度很小，接近于等幅振荡过程。由于这种过程振荡过于频繁，不易稳定，不够安全，因此一般不采用。如果 n 很大，则又太接近于非振荡过程。过渡过程过于缓慢，通常也不采用。一般 n 取 4~10 为宜。因为衰减比在 $(4 : 1) \sim (10 : 1)$ 之间时，过渡过程开始阶段的变化速度比较快，被控变量在同时受到干扰作用和控制作用的影响后，能比较快地达到一个峰值，然后马上下降，又较快地达到一个低峰值，而且第二个峰值远远低于第一个峰值。这表明被控变量能很快地稳定下来，并且最终的稳定值必然在两峰值之间，绝不会出现太高或太低的现象，更不会远离给定值，造成事故。

③ 余差 当过渡过程结束时，被控变量所达到的新的稳态值与给定值之间的偏差，叫做余差。或者说，余差就是过渡过程结束时的残余偏差。在图 1-6 中以 C 表示。余差的符号可能是正，也可能是负的。在生产中，给定值是生产的技术指标，所以，被测变量越接近给定值越好，也就是余差越小越好。在控制要求不高的系统中，余差可以在较大的范围变化，而在控制要求较高的系统中，应尽量消除余差。所以对余差大小的要求，必须结合具体系统作具体分析，不能一概而论。

有余差的控制过程称为有差控制，相应的系统称为有差控制系统；没有余差的控制过程称为无差控制，相应的系统称为无差控制系统。

④ 过渡时间 从干扰作用发生的时刻起，到系统重新建立新的平衡时止，过渡过程所经历的时间，叫做过渡时间或控制时间。严格地讲，对于具有一定衰减比的衰减振荡过渡过程来讲，要完全到达新的平衡状态需要无限长的时间。实际上，由于仪表灵敏度的限制，当被控变量接近稳态值时，指示值就不再改变了。因此，一般是在稳态值的上下规定一个小的范围，当被控变量进入这一小范围，并不再跃出时，就认为被控变量已经达到新的稳态值，或者说过渡过程已经结束。这个范围一般定为稳态值的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 。按照这个规定，过渡时间就是从干扰开始作用时起，直到被控变量进入新稳态值的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 的范围内且不再跃出时所经历的时间。过渡时间短，表示过渡过程进行得比较迅速，这时即使干扰频繁出现，系统也能适应，系统控制质量就高；反之，过渡时间太长，第一个干扰引起的过渡过程尚未结束，第二个干扰就已经出现。这样，几个干扰的影响叠加起来，就可能使系统满足不了工艺的要求。

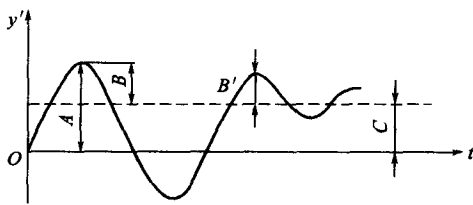


图 1-6 过渡过程品质指标示意

⑤ 振荡周期或频率 过渡过程的同向两个波峰（或波谷）之间的间隔时间，叫做振荡周期或工作周期，其倒数称为振荡频率。在衰减比相同的情况下，周期与过渡时间成正比。一般希望振荡周期短一些为好。

还有一些次要的品质指标，如振荡次数和上升时间。振荡次数是指过渡过程内被控变量振荡的次数。所谓“理想过渡过程两个波”，就是指过渡过程振荡两次就能稳下来。它在一般情况下，可认为是比较理想的过渡过程。此时的衰减比大约为4:1，图1-6所示的过渡过程曲线就是接近于4:1的过渡过程曲线。上升时间是指从干扰开始作用时起到第一个波峰所需要的时间。显然上升时间短一些好。

综上所述，过渡过程的品质指标主要有：最大偏差、衰减比、余差、过渡时间等。这些指标在不同的系统中各有其重要性，相互之间既有矛盾，又有联系。因此，应根据具体情况分清主次，区别轻重，对那些对生产过程有决定意义的主要品质指标应优先给以保证。另外，对一个系统提出的品质要求和评价一个控制系统的质量，都应该从实际需要出发，不应过分偏高偏严，否则，就会造成人力物力的巨大浪费，甚至根本无法实现。

(2) 时间域的综合指标

时间域的综合指标可以全面反映控制过程的品质。综合指标往往通过偏差的某些函数对时间的积分值来表示，以兼顾最大偏差、超调量、衰减比、过渡时间等各方面的因素。 $e(t)$ 表示过渡过程中被控变量与新稳态值的差值，一般要求过渡过程中的这些综合指标越小越好。

较为常用的有以下三种综合指标。

i. 偏差绝对值对时间的积分，简记为IAE。

$$\text{IAE} = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$

采用绝对值，可避免正负积分面积相消的现象。

ii. 偏差绝对值与时间乘积对时间的积分，简记为ITAE。

$$\text{ITAE} = \int_0^{\infty} |e(t)| t dt$$

ITAE对后期的偏差值加大权值，因此对消除偏差所需要的时间比较敏感。

iii. 偏差平方值对时间的积分，简记为ISE。

$$\text{ISE} = \int_0^{\infty} e^2(t) dt$$

采用平方值，同样可以避免正负偏差积分时的相消现象。与IAE相比，它对最大偏差的数值更加敏感。

除了上述列举的时间域的单项指标和综合指标外，衡量控制系统品质指标往往还可以采用一些其他形式的间接指标。例如频率特性、特征根分布等间接指标，在此不再进行叙述。

本章小结

① 建材工业生产自动化的发展经历了利用自动检测仪表来监视生产的初级阶段、利用自动化仪表为主的仪表控制系统、应用计算机技术的集散控制系统（DCS）以及采用现场总线作为系统的底层控制网络构造的网络集成式全分布计算机控制系统（FCS）。

② 自动控制系统通常包括检测元件与变送器、自动控制器和执行器三个部分。按照被控变量数值变化规律可以将自动控制系统分为定值控制系统、随动控制系统和程序控制系统。