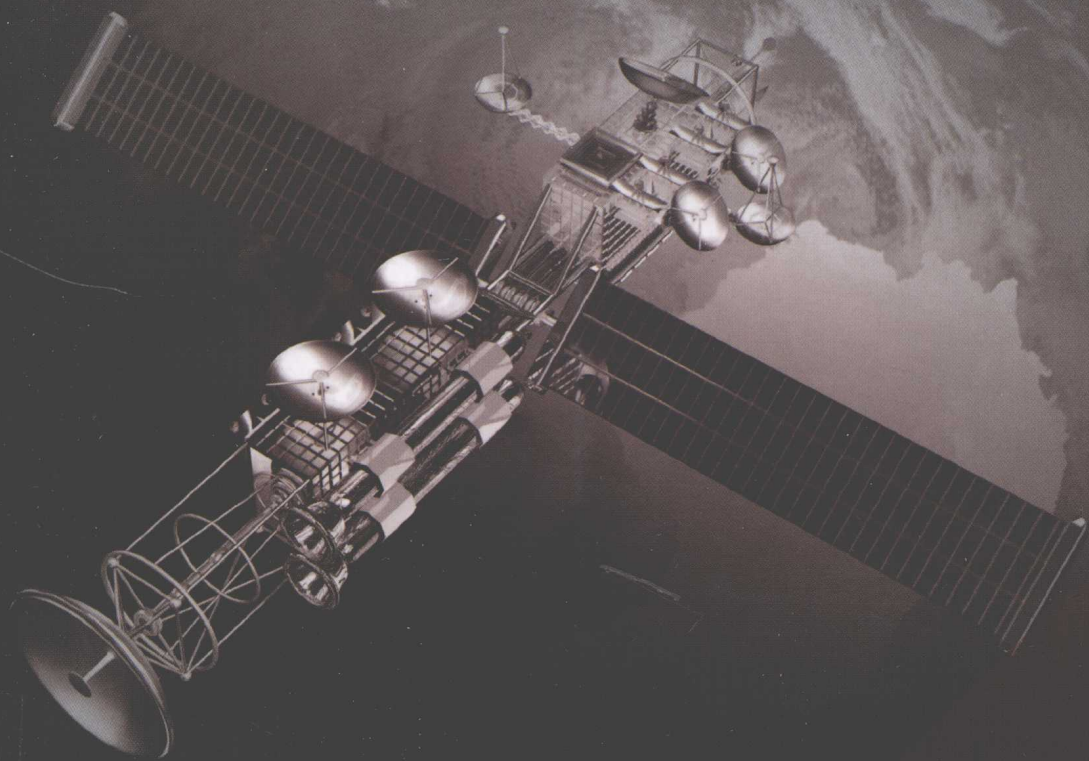


测控系统 原理与设计

○ 杨世兴 郭秀才 杨洁 编著



 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

测控系统原理与设计

杨世兴 郭秀才 杨 洁 编著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (CIP) 数据

测控系统原理与设计 / 杨世兴, 郭秀才, 杨洁编著.
北京: 人民邮电出版社, 2008.8
ISBN 978-7-115-18245-6

I. 测… II. ①杨…②郭…③杨… III. 自动检测系统
IV. TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 081140 号

内 容 提 要

本书从系统的角度全面阐述了信息的采集、传输和处理技术以及对被控对象的参数控制。全书共分 10 章, 以测控系统的构成为主线, 详细介绍了测控系统的基础知识、传感器、数据采集技术、数据通信技术、测控网络技术、数据处理技术、干扰抑制技术、智能测控技术, 最后落实于工程设计实践, 介绍了测控系统的设计技术与工程应用实例。

本书内容新颖, 实践性强, 特别适合从事测控系统研究、设计、制造、施工及运行的工程技术人员阅读, 也可供大专院校电子信息类相关专业作为教材使用。

测控系统原理与设计

-
- ◆ 编 著 杨世兴 郭秀才 杨 洁
责任编辑 陈万寿
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京通州大中印刷厂印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 19.25
字数: 482 千字
印数: 1-3 500 册
- 2008 年 8 月第 1 版
2008 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-18245-6/TN

定价: 38.00 元

读者服务热线: (010)67129258 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

前 言

“检测”与“控制”是人类认识世界和改造世界的重要任务，而测控系统则是实现这些任务的工具和手段。测控系统在国民经济各领域的应用越来越广泛，如电力调度的“四遥”系统、输油输气测控系统、矿山安全生产测控系统、城市公共事业测控系统、气象监测系统、楼宇测控系统等。测控系统在军事和国防科技方面的应用更是屡见不鲜。同时，测控系统还涉及人类生活的方方面面，因此，测控系统是人类生活、生产、科学研究等必不可少的工具和手段。

本书以工业测控系统为主要研究对象，全面阐述了如何进行信息的采集、传输和处理，以及如何对被控对象的参数进行控制，涉及传感器技术、计算机技术、控制技术、通信技术等。本书立足点高，内容新，环节全，重实践，力图给读者一个测控系统的完整概念，最终能达到让读者学会分析测控系统和设计测控系统的目的。

本书分为 10 章：第 1 章概述，介绍了测控系统、智能测控系统、嵌入式系统的概念；第 2 章传感器，重点介绍了新型、集成、智能常用类型传感器；第 3 章检测信号采集技术，介绍了模拟、脉冲、开关信号的采集原理、方法和虚拟仪器信号采集；第 4 章数据通信技术，介绍了数据通信的概念、原理、方法及无线数据通信技术；第 5 章测控网络技术，介绍了测控网络的概念，重点介绍了现场总线技术及以太网技术；第 6 章数据处理技术，介绍了多传感器数据融合技术、量程自动转换和标度变换、数字 PID、模糊与人工神经网络控制算法；第 7 章干扰及干扰抑制技术，介绍了干扰产生的原因、干扰种类、干扰抑制技术；第 8 章智能结构检测与控制技术，介绍了智能结构及智能结构测控技术；第 9 章测控系统的设计，介绍了测控系统设计的步骤与原则、测控分站设计、软件设计、测控系统的集成、组态软件；第 10 章介绍了 5 个工业测控系统的应用实例，包括 V-M 直流调速系统、提升机变频控制系统、典型矿山安全监测监控系统、丁二烯生产的 FF 总线测控系统、供水工程工业以太网测控系统。

本书由杨世兴担任主编并编写第 4 章、第 8 章及多媒体课件，审定全稿；郭秀才编写第 5 章、第 6 章、第 9 章、第 10 章及多媒体课件；杨洁编写第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 7 章及多媒体课件。

在编写过程中得到了罗谨谨、许红、余妮等研究生的帮助，在此表示衷心的感谢。

由于本书涉及内容广泛，而作者的学识水平有限，因此，书中难免出现错误和不妥之处，敬请读者批评指正。读者可将宝贵意见和建议发至编辑电子邮箱 chenwanshou@ptpress.com.cn。

作 者

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 测控系统的分类与组成	1
1.1.1 测控系统的分类	1
1.1.2 测控系统的组成	2
1.1.3 测控系统的基本概念	3
1.1.4 测控系统的性能指标	3
1.1.5 测控系统的建模	5
1.1.6 测控技术的发展	6
1.1.7 控制策略与算法的发展	7
1.2 智能测控系统	8
1.2.1 智能测控系统的概念	8
1.2.2 智能测控系统的组成	9
1.2.3 智能测控系统的主要功能特征	9
1.2.4 智能测控系统的发展趋势	10
1.3 嵌入式系统	11
1.3.1 嵌入式系统的特点	11
1.3.2 嵌入式系统处理器的类型	11
1.3.3 可编程序控制器	15
习题与思考题	16
第 2 章 传感器	17
2.1 传感器概述	17
2.1.1 传感器的组成与分类	17
2.1.2 传感器的主要技术指标	18
2.2 压力(差压)传感器	20
2.2.1 压力传感器的类别与性能	20
2.2.2 电感式压力(差压)传感器	21
2.2.3 霍尔压力传感器	22
2.2.4 集成压力(差压)传感器	23
2.3 流量传感器	24
2.3.1 流量测量方法	25
2.3.2 超声波流量传感器	25
2.3.3 卡曼涡街流量传感器	26
2.3.4 激光流量传感器	27
2.3.5 光纤流量传感器	29
2.4 温度传感器	30
2.4.1 测量温度的主要方法	30
2.4.2 PN 结温度传感器	31
2.4.3 集成温度传感器	31
2.4.4 光电温度计	34
2.4.5 红外测温仪	34
2.4.6 光纤温度传感器	36
2.5 气体传感器	37
2.5.1 半导体气体传感器	37
2.5.2 电化学式气体传感器	39
2.5.3 固体电解质气体传感器	41
2.5.4 接触燃烧式气体传感器	41
2.5.5 光学式气体传感器	42
2.5.6 高分子气体传感器	42
2.6 固态图像传感器	43
2.6.1 CCD 图像传感器	43
2.6.2 CMOS 图像传感器	48
2.7 智能传感器概述	51
2.7.1 智能传感器的概念	51
2.7.2 智能传感器的组成与特点	51
2.7.3 智能传感器的体系结构	53
2.7.4 智能传感器的基本功能	55
2.7.5 智能传感器的发展趋势	56
习题与思考题	57
第 3 章 检测信号采集技术	59
3.1 检测信号概述	59
3.1.1 消息、信号与信息	59
3.1.2 信息的度量	59
3.1.3 检测信号	61
3.1.4 模拟信号的采样与量化	61
3.2 模拟信号的采集	63
3.2.1 模拟量输入通道的一般结构	63
3.2.2 信号调理电路	63

3.2.3 多路转换模拟开关 (MUX)	69	4.4 数字信号的无线传输	122
3.2.4 数据放大器	71	4.4.1 发射电路	122
3.2.5 采样保持器	73	4.4.2 接收电路	123
3.3 A/D 转换器	74	4.4.3 采用 CC2400 的收发器电路	123
3.3.1 A/D 转换器的分类	74	4.4.4 采用 nRF24E2 的发射电路	128
3.3.2 A/D 转换器的主要技术指标	74	4.4.5 蓝牙技术	131
3.3.3 并行接口 ADC	75	4.4.6 实现远程数据无线通信的一种方案	134
3.3.4 串并行输出 ADC 接口	79	习题与思考题	135
3.3.5 串行接口 ADC	83	第 5 章 测控网络技术	136
3.3.6 片内集成 A/D 转换模块	84	5.1 测控网络概述	136
3.4 脉冲信号的采集	86	5.1.1 测控网络在企业网络系统中的地位 与作用	136
3.4.1 脉冲信号检测原理	87	5.1.2 测控网络与现场总线	138
3.4.2 51 单片机用于频率测量	87	5.1.3 测控网络的特点	138
3.4.3 8098 单片机用于频率测量	88	5.1.4 测控网络的发展与标准化	139
3.4.4 V/F 转换	89	5.2 测控网络技术基础	140
3.5 开关量信号的采集	91	5.2.1 测控网络的节点	141
3.5.1 开关量输入信号的调理	91	5.2.2 测控网络的拓扑	141
3.5.2 光电耦合器	92	5.2.3 网络信道的访问控制方式	142
3.5.3 开关量输入信号与光耦的连接	92	5.2.4 网络互联	146
3.5.4 开关量输入信号与 CPU 的连接	93	5.3 具有代表性的现场总线	149
3.5.5 数字量输入信号的采集	93	5.3.1 CAN 总线	149
3.6 虚拟仪器信号采集技术	93	5.3.2 FF 总线	154
3.6.1 VI 的结构	95	5.3.3 LonWorks 总线	157
3.6.2 VI 的软件开发平台 LabVIEW	96	5.3.4 PROFIBUS 总线	158
习题与思考题	101	5.3.5 HART 总线	159
第 4 章 数据通信技术	102	5.4 以太网技术	160
4.1 数据通信基础	102	5.4.1 以太测控网络的组成及其特点	161
4.1.1 数据通信系统的基本组成	102	5.4.2 以太网用于工业现场的关键技术	162
4.1.2 信道的分类	102	习题与思考题	165
4.1.3 数据传输的形式	104	第 6 章 数据处理技术	166
4.1.4 串行通信	105	6.1 多传感器数据融合技术	166
4.1.5 差错控制	107	6.1.1 数据融合系统的建模	167
4.2 数字信号的基带传输	109	6.1.2 层次化融合结构	174
4.2.1 基带信号	109	6.1.3 融合算法与分布式多传感器数据 融合	175
4.2.2 基带信号传输接口	110	6.1.4 基于模糊理论的分布式一致性数据 融合	179
4.3 数字信号的频带传输	117		
4.3.1 数字信号的频带传输	117		
4.3.2 频移键控法 FSK	118		
4.3.3 调制解调器集成电路	119		

6.2 量程自动转换与标度变换	183	7.5.2 共模干扰的抑制	220
6.2.1 量程自动转换	183	7.6 减小测控系统干扰灵敏度的措施	224
6.2.2 标度变换	183	7.6.1 改善数字系统固有干扰的措施	224
6.3 数字 PID 控制算法	184	7.6.2 对数字线路的各种外源性干扰采取的措施	225
6.3.1 PID 控制原理	184	7.6.3 各级别的抗干扰设计	225
6.3.2 数字 PID 控制算法	185	7.7 软件抗干扰	225
6.3.3 数字 PID 控制器的参数整定	187	7.7.1 数据采集误差的软件对策	226
6.4 模糊控制算法	189	7.7.2 控制状态错误的软件对策	226
6.4.1 模糊控制原理	189	7.7.3 程序跑飞的软件对策	227
6.4.2 模糊控制器设计	193	习题与思考题	227
6.5 人工神经网络及其应用	195	第 8 章 智能结构检测与控制技术	229
6.5.1 概述	195	8.1 概述	229
6.5.2 人工神经网络基础	197	8.2 智能结构材料	230
6.5.3 神经网络在测控系统中的应用	201	8.2.1 电流变体和磁流变体	230
习题与思考题	204	8.2.2 压电材料	231
第 7 章 干扰及干扰的抑制技术	205	8.2.3 形状记忆合金	232
7.1 噪声与噪声耦合方式	205	8.2.4 形状记忆聚合物	234
7.1.1 噪声与信噪比	205	8.2.5 磁致伸缩材料	234
7.1.2 噪声源	205	8.2.6 智能光纤	234
7.1.3 噪声的叠加	208	8.2.7 光纤复合材料	235
7.1.4 噪声耦合方式	208	8.2.8 功能凝胶	236
7.2 干扰的种类	209	8.2.9 高分子生物材料	236
7.2.1 模拟通道的常模干扰 NMN	209	8.3 智能结构检测与控制组成要素	236
7.2.2 模拟通道的共模干扰 CMN	210	8.3.1 感知器	236
7.2.3 数字通道的内源干扰	211	8.3.2 驱动器	237
7.2.4 数字通道的外源干扰	211	8.3.3 控制器	238
7.3 常用干扰抑制技术	211	8.3.4 智能结构集成	238
7.3.1 屏蔽技术	211	8.4 智能结构检测与控制作用方式	239
7.3.2 隔离技术	213	8.4.1 局部控制	239
7.3.3 浮置技术	214	8.4.2 全局算法控制	240
7.3.4 平衡电路	214	8.4.3 智能控制	240
7.3.5 滤波器	215	8.5 智能结构检测与控制技术的工程应用	241
7.3.6 接地技术	215	8.5.1 在机器人中的应用	241
7.4 干扰源的抗干扰措施	218	8.5.2 在航空工业中的应用	243
7.4.1 抑制电源引入的干扰	218	8.5.3 在土木工程中的应用	245
7.4.2 抑制机械触点产生的干扰	219	8.6 纳米检测与控制技术	246
7.4.3 屏蔽干扰源	219		
7.5 传输通道的抗干扰措施	219		
7.5.1 常模干扰的抑制	219		

习题与思考题	247	9.7.4 MCGS 组态软件简介	278
第 9 章 测控系统的设计	248	习题与思考题	281
9.1 测控系统设计步骤及原则	248	第 10 章 工程应用实例	282
9.1.1 监测监控系统设计步骤	248	10.1 V-M 直流调速系统	282
9.1.2 测控对象对测控系统的要求	249	10.1.1 调速原理和方法	282
9.1.3 测控系统的设计原则	250	10.1.2 构成 V-M 调速系统的环节	282
9.2 测控系统总体方案的确定	250	10.1.3 系统软件	283
9.2.1 确定系统的结构	250	10.2 提升机变频控制系统	285
9.2.2 选择传感器	251	10.2.1 提升机的速度图和力图	285
9.2.3 选择分站通道	251	10.2.2 调速原理和方法	285
9.2.4 选择外围设备	251	10.2.3 构成提升机变频控制系统的环节	286
9.3 测控分站的设计	252	10.2.4 PLC 的程序流程	287
9.3.1 测控分站设计方案的确	252	10.3 典型矿山安全监测监控系统	287
9.3.2 测控分站设计举例	252	10.3.1 KJ95 型煤矿综合监控系统主要	
9.4 测控系统的防爆措施	263	技术指标	287
9.4.1 设计本安电路应注意的问题	264	10.3.2 KJ95 型煤矿综合监控系统的	
9.4.2 安全栅	264	组成	287
9.4.3 隔爆兼本安型电源	265	10.3.3 KJ95 应用举例	291
9.5 测控系统软件设计	265	10.4 丁二烯生产的 FF 总线测控	
9.5.1 测控系统软件设计原则	265	系统	292
9.5.2 测控系统软件设计步骤	266	10.4.1 系统设备和现场智能仪表的	
9.5.3 程序设计方法	267	选择	292
9.6 测控系统的集成	268	10.4.2 系统开发组态软件的选择	293
9.6.1 测控系统的集成	268	10.4.3 基金会现场总线的网络组态	293
9.6.2 测控系统集成原则	269	10.4.4 PlantWeb 工厂管控网的建立	294
9.6.3 测控系统集成方法	270	10.5 供水工程工业以太网测控系统	295
9.7 组态软件	273	10.5.1 系统网络结构	295
9.7.1 组态软件的特点及设计思想	273	10.5.2 控制系统的组成	295
9.7.2 组态软件的数据流	276	参考文献	299
9.7.3 使用组态软件的一般步骤	277		

第 1 章 概 述

1.1 测控系统的分类与组成

人类在认识世界和改造世界的过程中，一是采用各种方法和手段去观察、认识世界，二是按照人类的愿望去改造世界。

在科学试验和工业生产过程中，需要对描述被控对象特征的某些参数进行“检测”，获得表征它们的有关信息，以便对被测对象进行定性了解和定量掌握。另一方面根据检测的结果采用一定的策略去“控制”描述被控对象特征的某些参数，稳定、快速、准确地达到人们预想的目标。

“检测”与“控制”是人类认识世界和改造世界的两项工作任务，而测控系统则是人类实现这两项任务的工具和手段。

1.1.1 测控系统的分类

测控系统有多种分类方法，按功能分类，可以分为检测系统、控制系统和测控系统。

1. 检测系统

单纯以“检测”为目的的系统，一般用来对被测对象中的一些物理量进行测量并获得相应的测量数据。图 1-1 为检测系统原理的结构图，它由下列功能环节组成。

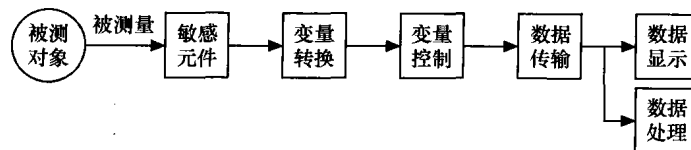


图 1-1 检测系统原理结构图

(1) 敏感元件：从被测对象感受信号，同时产生一个与被测物理量成某种函数关系的输出量。

(2) 变量转换环节：将敏感元件的输出变量做进一步变换，即变换成更适于处理的变量，并且要求它应当保存原始信号中所包含的全部信息。

(3) 变量控制环节：为了完成对检测系统提出的任务，要求用某种方式去控制以某种物理量表示的信号。这里所说的控制意思是在保持变量物理性质不变的条件下，根据某种固定的规律，仅仅改变变量的数值。

(4) 数据传输环节：当检测系统的几个功能环节被分隔开时，必须从一个地方向另一个地方传输数据。

(5) 数据显示环节：有关被测量的信息要想传给人以完成监视、控制或分析的目的，则必须将信息变成人的感官能接受的形式。完成这种转换机能的环节称为数据显示环节。例如数字显示和打印记录。

(6) 数据处理环节：检测系统要对测量所得数据进行数据处理。数据处理工作由机器自动完成，不需要人工进行烦琐的运算。

若系统仅用于生产过程的监测，当安全参数达到极限值时产生显示及声、光报警等输出，此种系统一般称为监测系统；除监测外还参与一些简单的开关量控制，如断电、闭锁等，此种系统一般称为监测监控系统，或监控系统。

2. 控制系统

单纯以程序控制为目的的系统，其组成框图如图 1-2 所示。

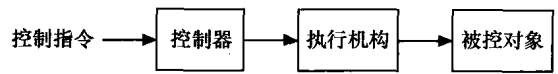


图 1-2 控制系统原理结构图

这是一种开环控制系统，程序控制的基本思想是将被控对象的动作次序和各类参数输入控制器，去指挥执行机构按照固定的程序，一步一步地控制被控对象的动作。动作的结果如何，却无从知道，因而控制精度不高。

3. 测控系统

既“测”又“控”的系统，依据被控对象被控参数的检测结果，按照人们预期的目标对被控对象实施控制。测控系统是本书研究的主要内容，下面将予以详细说明。

1.1.2 测控系统的组成

现以锅炉水位测控系统为例，来介绍测控系统的组成。

锅炉汽包水位控制如图 1-3 所示。锅炉是工业生产过程中常见的动力设备，要保证锅炉的正常运行，必须将锅炉的汽包水位维持在一定的高度，如果汽包水位过低，由于汽包内的水量较少而蒸汽的需求量却很大，加上水的汽化速度又快，使得汽包内的水量迅速减少，如果控制不及时，就会使汽包内的水全部汽化，导致锅炉被烧坏甚至爆炸；水位过高，则会影响汽包内的汽水分离，使蒸汽中夹带水分，对后续生产设备造成影响和破坏。因此，要维持汽包水位在规定的数值上，就必须保证锅炉的给水量与蒸汽的排出量平衡。

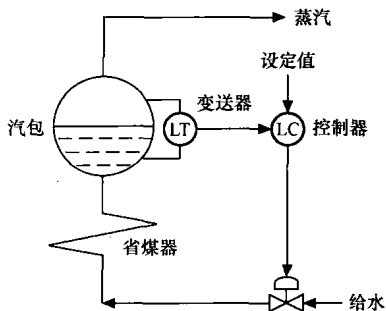


图 1-3 锅炉水位测控系统

由于某种原因，如给水压力的变化，蒸汽流量的变化等，一般称为扰动，引起锅炉汽包水位的变化时，由水位变送器（传感器）LT 测得，LT 的输出信号与设定值信号进行比较并经水位调节器（控制器）LC 运算输出控制信号，控制执行机构（阀门）动作，改变给水流量。从而使锅炉汽包水位保持在规定的数值上。

为了清楚地表示系统各环节的组成和相互间的信号联系，同时方便对系统特性进行分析，一般都采用方框图。锅炉汽包水位测控系统的方框图如图 1-4 所示。

为了清楚地表示系统各环节的组成和相互间的信号联系，同时方便对系统特性进行分析，一般都采用方框图。锅炉汽包水位测控系统的方框图如图 1-4 所示。

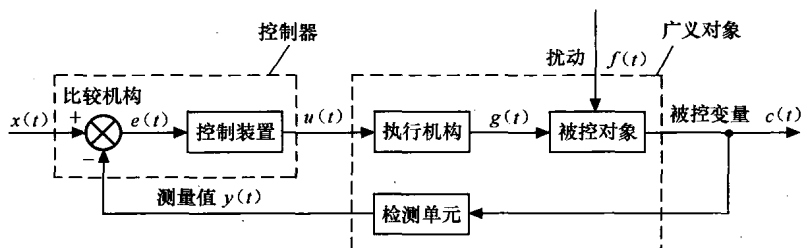


图 1-4 系统方框图

由图 1-4 可以看出,简单的测控系统由下列基本单元组成。

1. 被控对象

是指被控制的装置或设备,这里是锅炉汽包。被控变量(被控参数) $c(t)$ 则是影响系统安全性、经济性、稳定性的变量(参数),这里是锅炉汽包的水位。

2. 检测单元

其功能是感受并测出被控变量的大小,变换成控制器所需要的信号形式 $y(t)$ 。一般检测单元为敏感元件、转换元件及信号处理电路组成的传感器,若检测单元输出的是标准信号,则称检测单元为变送器。这里是水位变送器 LT。

3. 控制器

将检测单元的输出信号 $y(t)$ 与被控变量的设定值信号 $x(t)$ 进行比较得出偏差信号 $e(t)$,根据这个偏差信号的大小按一定的运算规律计算出控制信号 $u(t)$,然后将控制信号传送给执行机构。

4. 执行机构

接受控制器发出的控制信号 $u(t)$,直接改变控制变量 $g(t)$,调整被控对象的能量或物料的平衡,使被控变量 $c(t)$ 回复至设定数值。这里的执行机构是阀门。

在一个测控系统中,上述四部分是最基本的。除此之外,还有一些辅助装置,例如,给定装置、转换装置、显示仪表等。

1.1.3 测控系统的基本概念

由上面的例子可以看出测控系统的基本概念。

就其功能而言,测控系统的功能一是“测”,即检测被控变量;二是“控”,即根据检测参数去控制执行机构。

就其技术而言,测控系统是传感器技术、通信技术、计算机技术、控制技术、计算机网络技术等信息的综合。

就其应用而言,测控系统是现代化生产和管理的有力工具,广泛应用于国民经济的各个领域,如化工、冶金、纺织、能源、交通、电力,城市公共事业的自来水、供热、排水、医疗,在科学研究、国防建设和空间技术中的应用更是屡见不鲜。

就其组成而言,测控系统是分布式的计算机管理系统。

就其地位而言,测控系统是企业综合自动化 CIMS (Computer Integrated Manufacturing Systems, 计算机集成制造系统) 中的子系统,是计算机网络中的节点。

就其理论基础而言,测控系统是维纳(Wiener)提出的控制论,香农(Shannon)提出的信息论,贝塔朗菲(Bertalanffy)提出的系统论的综合与实践。

1.1.4 测控系统的性能指标

在实际生产过程中,对被控参数都有一定要求。有些工艺参数直接表征生产过程,对产品的产量和质量起着决定性的作用;有些被控参数虽不直接影响产品的数量和质量,而保持其平稳却是使生产过程顺利进行的前提;有些工艺参数则是决定安全生产的重要因素。因此在生产过程中,对于以上各种类型的被控参数都必须进行严格的控制。

在设定值突变或阶跃扰动作用下,人们提出了被控参数稳定性、快速性、准确性的要求。下面以图 1-5 闭环控制系统对设定值突变的阶跃响应曲线为例说明控制系统的性能指标。

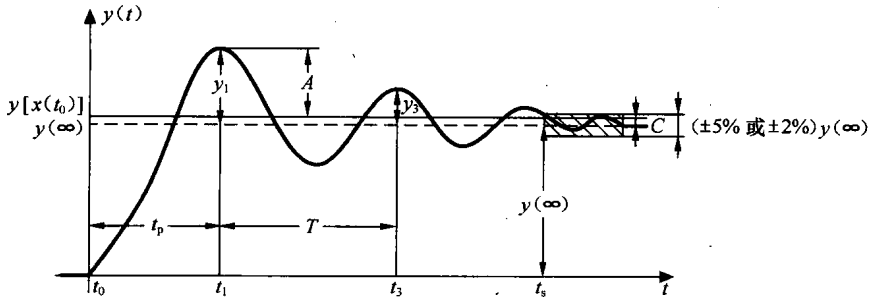


图 1-5 闭环控制系统对设定值突变的阶跃响应曲线

1. 稳定性指标

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

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

若 $n > 1$ ($0 < \psi < 1$) 曲线为衰减振荡过程或 $n \rightarrow \infty$ ($\psi = 1$) 曲线为单调衰减过程, 系统是稳定的; 若 $n = 1$ ($\psi = 0$) 曲线为等幅振荡过程 (要求等幅振荡除外) 或 $n < 1$ ($\psi < 0$) 曲线为发散振荡过程系统是不稳定的。一般希望 $n = 4 \sim 10$ ($\psi = 0.75 \sim 0.90$)。

稳定性指标, 是首先考虑的指标, 系统不稳定就无法正常工作, 只有在系统稳定的条件下才考虑系统的快速性和准确性。

此外, 在系统稳定的条件下, 最大动态偏差 A 、振荡次数也是衡量系统稳定性的指标。

2. 快速性指标

调节时间 $t_s - t_0 \sim (\pm 5\% \text{ 或 } \pm 2\%) y(\infty)$ 所需时间, t_s 越小, 快速性越好。

振荡周期 T —曲线中相邻两同相波峰 (或波谷) 之间的时间间隔。

振荡频率
$$f = \frac{1}{T} \quad (1-3)$$

振荡角频率
$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (1-4)$$

T 越小 (f 、 ω 越大), 快速性越好。

上升时间 $t_p - t_0 \sim t_1$ 所需时间, 在 ψ 一定的情况下, t_p 越小, 快速性越好。

此外, 在系统稳定的条件下, n 和 ψ 也可作为系统快速性的指标。

3. 准确性指标

最大动态偏差
$$A = y(t_1) - y[x(t_0)] \quad (1-5)$$

超调量
$$\sigma = \frac{y_1}{y(\infty)} \times 100\% \quad (1-6)$$

A 、 σ 越大, 说明被控参数瞬时偏离设定值 $y[x(t_0)]$ 越远。

以上参数为系统的动态参数, 与系统的动态过程有关。

残余偏差 (稳态误差, 静差)
$$C = y(\infty) - y[x(t_0)] \quad (1-7)$$

C 为系统的静态参数, C 越小, 系统的准确性越好。

4. 综合性能指标

单项指标虽然清晰明了, 但如何统筹考虑比较困难, 有时希望用一个综合性的指标全面

反映控制系统的品质, 因此, 常采用偏差积分的形式。偏差幅度和偏差存在的时间都与偏差积分指标有关, 无论是控制系统过渡过程的动态偏差增大, 或是调节时间拖长, 都表明控制品质变差, 使偏差积分值增大。因此, 偏差积分指标可以兼顾衰减比、超调量、调节时间等方面的因素。设偏差 $e(t) = y(t) - y(\infty)$, 偏差积分指标通常采用以下几种形式。

(1) 偏差积分 IE (Integral of Error)

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

(2) 绝对偏差积分 IAE (Integral Absolute value of Error)

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

(3) 平方偏差积分 ISE (Integral of Squared Error)

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (1-10)$$

(4) 时间与绝对偏差乘积积分 ITAE (Integral of Time multiplied by the Absolute value of Error)

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (1-11)$$

采用不同的偏差积分指标意味着评价过渡过程优良程度时的侧重有所不同, 可以根据控制系统的实际需要选用。但偏差积分的综合性能指标不能很好地反映控制系统的静差指标。

1.1.5 测控系统的建模

测控系统的数学模型是描述测控系统在输入(控制输入与扰动输入)作用下, 其状态和输出(被控参数)变化的数学表达式。数学模型对研究测控系统的静、动态特性, 测控系统的结构设计、优化, 控制算法设计、控制参数的最佳整定都具有重要意义。

1. 机理法建模

机理建模是一种常用的建模方法, 也称为白箱建模。是通过分析测控系统的机理, 根据系统的结构, 分析系统运动的规律。利用已知的相应的定律、定理或原理, 推导出描述系统的数学模型。系统的数学模型, 一般用微分方程表示。但是, 复杂对象的微分方程式很难建立, 也不容易求解。

2. 系统辨识建模

所谓辨识 (Identification) 就是通过测取测控系统在人为输入作用下的输出响应, 或正常运行时的输入输出数据记录, 加以必要的数据处理和数学计算, 估计出测控系统的数学模型, 包括模型结构辨识和参数估计。是对实际系统的一个合适的近似, 是黑箱建模问题。

(1) 经典辨识法 (非参数模型辨识法)

获得的模型是非参数模型, 是在假定测控系统是线性的前提下, 不必事先确定模型的具体结构, 因而这类方法可适用于任意复杂的系统, 工程上至今仍经常采用它。

获取非参数模型的主要方法有:

- 阶跃响应法
- 脉冲响应法
- 频率响应法

- 相关分析法
- 谱分析法

非参数模型的表现形式是以时间或频率为自变量的实验曲线。对过程施加特定的实验信号，同时测定过程的输出，可以求得这些非参数模型。

- 频率响应 $G(j\omega)$
- 脉冲响应 $g(t)$
- 阶跃响应 $h(t)$

经过适当的数学处理，它们又可以转变成参数模型——传递函数 $G(S)$ 的形式。

(2) 现代的辨识法（参数模型辨识法）

必须假定一种模型结构，通过极小化模型与测控系统之间的误差准则函数来确定模型的参数。如果模型的结构无法事先确定，则必须利用结构辨识方法先确定模型的结构参数（比如，阶次、纯迟延等），再进一步确定模型参数。这类辨识方法就其不同的基本原理来说又可分为三种不同的类型。

① 最小二乘法

利用最小二乘原理，通过极小化广义误差的平方和函数来确定模型的参数。

② 梯度校正法

利用快速下降法原理，沿着误差准则函数关于模型参数的负梯度方向，逐步修改模型的参数估计值，直至误差准则函数达到最小值。

③ 极大似然法

它根据极大似然原理，通过极大化似然函数来确定模型的参数。

(3) 混合法

机理建模和辨识建模结合的方法，适用于系统的运动机理不是完全未知的情况，称之为灰色建模。利用已知的运动机理和经验确定系统的结构和参数，来确定测控系统的模型。

1.1.6 测控技术的发展

1. 手动控制

20 世纪 40 年代初，生产规模较小，采用安装在生产设备现场、只具备简单测控功能的“基地式气动仪表”，操作人员只能通过生产现场的巡视，了解生产过程的状况，进行手动控制。

2. 局部自动化

20 世纪五六十年代初，随着生产规模的扩大，操作人员需要综合掌握多点的运行参数与信息，需要同时按多点的信息实行操作控制，于是出现了气动、电动系列的“单元组合式仪表”，出现了集中控制室，生产现场各处的参数通过统一的模拟信号，如 0.02~0.1MPa 的气压信号，0~10mA、4~20mA 的直流电流信号，1~5V 直流电压信号等，送往集中控制室。操作人员可以坐在控制室纵观生产流程各处的状况，可以把各单元仪表的信号按需要组合成复杂控制系统，实现了工厂仪表化和局部自动化。

3. 集中数字控制

20 世纪 60~70 年代初，由于模拟信号的传递需要一对一的物理连接，信号变化缓慢，提高计算速度与精度的开销、难度都较大，信号传输的抗干扰能力也较差，人们开始寻求用数字信号取代模拟信号，出现了“直接数字控制”。由于当时的数字计算机技术尚不发达，

价格昂贵，人们企图用一台计算机取代控制室的几乎所有的测控仪表，出现了集中式数字控制系统。由于当时数字计算机的可靠性还较差，一旦计算机出现某种故障，就会造成所有控制回路瘫痪、生产停产的严重局面，这种危险的集中系统结构很难为生产过程所接受。

4. 集散控制

20世纪80年代初，随着计算机可靠性的提高和价格的大幅度下降，出现了数字调节器、可编程控制器（PLC）以及由多个计算机递阶构成的集中、分散相结合的集散控制系统。这就是今天正在被许多企业采用的DCS（Distributed Control System）系统。DCS系统中，检测仪表一般为模拟仪表，因而它是一种模拟数字混合系统。这种系统在功能、性能上较模拟仪表、集中式数字控制系统有了很大进步，可在此基础上实现装置级、车间级的优化控制。但是，在DCS系统形成的过程中，由于受计算机系统早期存在的系统封闭这一缺陷的影响，各厂家的产品自成系统，不同厂家的设备不能互连在一起，难以实现互换与互操作，组成更大范围信息共享的网络系统存在很多困难。

5. 分布式网络控制

20世纪90年代后，新型的现场总线控制技术则突破了DCS系统中通信由专用网络的封闭系统来实现所造成的缺陷，把基于封闭、专用的解决方案变成了基于公开化、标准化的解决方案，即可以把来自不同厂商而遵守同一协议规范的自动化“智能仪表”，通过现场总线网络连接成系统，实现综合自动化的各种功能，同时把DCS集中与分散相结合的集散系统结构，变成了新型全分布式结构，把控制功能彻底下放到现场，依靠现场智能仪表本身便可实现基本检测、控制功能。工厂自动化（FA, Factory Automation）、计算机集成过程控制（CIPS, Computer Integrated Process Systems）、计算机集成制造系统（CIMS, Computer Integrated Manufacturing System）和企业资源综合规划（ERP, Enterprise Resource Planning）等方案的规划和实施，正在成为提高工业生产过程经济效益的关键手段。

1.1.7 控制策略与算法的发展

在控制技术的发展中，控制策略与算法也经历了由简单控制到复杂控制、先进控制的发展历程。

1. 简单控制算法

通常将出现于1942年的单回路PID（Proportional, Integral and Derivative）控制称为简单控制。以经典控制理论为基础的PID控制过程，现在仍然在各种控制系统中广泛应用。在DCS以及以逻辑控制为主的大型PLC（Programmable Logic Control）系统中，均设有PID控制模块。

2. 复杂控制算法

从20世纪50年代开始，为了满足生产过程大型化，工艺更为复杂、控制精度要求更高的实际需求，过程控制界发展了串级控制、比值控制、前馈控制、均匀控制、Smith预估控制和选择性控制等控制策略与算法，统称为复杂控制算法。这些控制策略和算法满足了复杂生产过程控制的实际需要，其理论基础仍然是经典控制理论，但在结构与应用方面各有特色。这些控制策略和算法现在仍在广泛应用，并在不断地改进、完善与发展中。

3. 先进控制算法

从20世纪70~80年代开始，在现代控制理论和人工智能发展的基础上，针对生产过程本身存在非线性、时变性、不确定性、控制变量间的耦合性等特性，提出了许多可行的控制

策略与方法，如解耦控制、推断控制、预测控制、模糊控制、自适应控制、仿人控制等，一般将这些控制方法统称为先进控制。近年来，以专家系统、模糊逻辑、神经网络、遗传算法等为主要途径的基于知识的智能处理方法已经成为过程控制的重要技术。先进过程控制方法可以有效地解决那些采用传统控制效果差，甚至无法控制的复杂过程的自动控制问题。应用实践表明，先进控制方法能取得更高的控制品质和更好的经济效益，具有很好的应用与发展前景。

1.2 智能测控系统

1.2.1 智能测控系统的概念

为了介绍“智能”的概念，首先介绍人的智能行为，可用以下几点形象地说明。

(1) 选择功能（宴会效应）

当我们出席一个嘈杂的宴会时，对于周围人的高谈阔论可能充耳不闻，可是如果大会主席讲到你的名字，你会异常敏锐地捕捉到这个声音。这就是说人在背景噪声很高的情况下能选择性地提高对于特定信号的接收灵敏度。

(2) 学习功能（咖啡桌效应）

当你已知桌子上摆了一杯咖啡，并且发现在它的旁边放有一个装有白色粉状的盘子时，你会立即判断出它是白糖。这是因为人能够根据经验判断出咖啡旁边的白色粉状物质应当是白糖而不可能是食盐，更不可能是其他化学药品。

(3) 联想功能（高桥效应）

如果在地面上放一块 20cm 宽、十几米长的木板，不用说，谁都可以毫不胆怯地从上面走过去。但是如果把同样的木板架在几百米的深渊之上，构成一个高桥，恐怕绝大多数人都不敢走过去。同样的木板因放置高度不同导致如此不同的结果，是因为人在观察木板的几何形状、质地等外在特性的同时，还注意到木板桥架设的高度，进而预测到万一从木板上掉下去的后果，最后决定是否过桥。这说明人既有瞬时多元观测的能力，又有联想和预见能力。这种联想功能是人的感官智能化的又一标志。

因而，可以认为，智能是指能随内、外部条件的变化，具有运用已有知识解决问题和确定正确行为的能力。智能往往通过观察、记忆、想像、思考、判断等表现出来。这种能力实际是人的能力，因此推理、学习和联想是智能的三个基本要素。

- 推理就是从一或几个已知的判断（前提），逻辑地推断出一个新判断（结论）的思维形式。推理过程包括从个别到一般（归纳推理）和从一般到个别（演绎推理）两种方式。

- 学习就是根据环境变化，动态地改变知识结构。学习方式有机械学习、指导学习、实例学习、类推学习等。

- 联想就是通过与其他知识的联系，能主动地认识客观事物并解决实际问题。

智能测控系统是指仿效人的智能，能自动获取信息，并利用有关知识和策略，采用实时动态建模、在线识别、人工智能、专家系统等技术，对被控对象实现检测、控制、自诊断和自修复。

智能测控系统能有效地提高被控对象的安全性和获得最佳性能，并使系统具有高可靠性和可维护性，高抗干扰能力和对环境的适应能力，以及优良的通用性和可扩展性。是传感技

术、微电子技术、自动控制技术、计算机技术、信号分析与处理技术、数据通信技术、模式识别技术、可靠性技术、抗干扰技术、人工智能等的综合和应用。

综上所述，智能测控系统是以计算机为核心，将信号检测、数据处理与计算机控制融为一体的一种新兴综合性测控系统。它既能完成较高层次信号的自动化检测，又具有多种智能控制作用。

1.2.2 智能测控系统的组成

智能测控系统的基本结构如图 1-6 所示，主要包括以下基本环节。

1. 广义对象

表示通常意义下的控制对象和所处的外部环境。

2. 传感器

3. 执行机构

4. 计算机及外部设备

计算机是智能测控系统的核心，一般需要 CRT、键盘、通信接口和打印机等必要外设。

5. 软件系统

- 感知信息处理部分：将传感器递送的分级的和不完全的信息加以处理，并要在学习过程中不断加以辨识、整理和更新，以获得有用的信息。

- 认知部分：主要接受和储存知识、经验和数据，并对它们进行分析推理，做出行动的决策并送至规划和控制部分。

- 规划和控制部分：是整个软件系统的核心，它根据给定任务的要求、反馈信息及经验知识，进行自动搜索、推理决策、动作规划，最终产生具体的控制作用，经常规控制器和执行机构作用于控制对象。

对于不同用途的智能控制系统，以上各部分的形式和功能可能存在较大的差异。

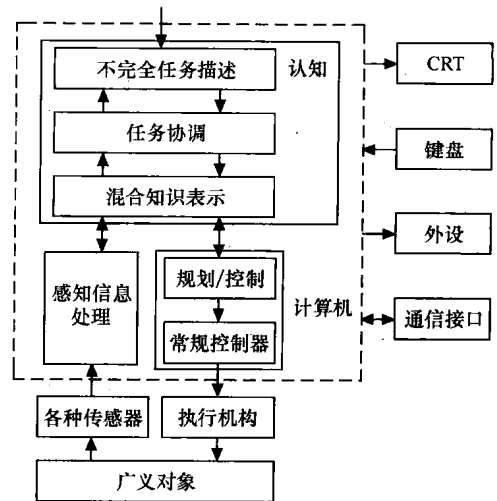


图 1-6 智能测控系统的基本结构图

1.2.3 智能测控系统的主要功能特征

智能测控的概念主要是针对被控系统的高度复杂性、高度不确定性及人们要求越来越高的控制性能提出来的。面对这样的要求，一个理想的智能测控系统应具备如下性能。

1. 学习能力

系统对一个未知环境提供的信息进行识别、记忆、学习，并利用积累的经验进一步改善自身性能的能力，即在经历某种变化后，变化后的系统性能应优于变化前的系统性能，这种功能类似于人的学习过程。

2. 适应性

系统应具有适应被控对象动力学特性变化、环境变化和运行条件变化的能力。这种智能行为实质上是一种从输入到输出之间的映射关系，可看成是不依赖模型的自适应估计，较传统的自适应控制中的适应功能具有更广泛的意义。

3. 容错性

系统对各类故障应具有自诊断、屏蔽和自恢复的功能。