

机械工程、自动化专业规划教材

过程装备控制技术及应用

李 晶 主编

张 为 王 妍 刘 亮 参编

曹国华 毛先萍 主审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

电子工业出版社有限公司
盗版必究

内 容 简 介

本书结合控制基础、控制技术和控制工程的一体化知识体系，介绍了过程控制基础知识（含控制系统基础、控制建模基础、检测技术基础等）、过程控制主体知识（含检测技术和控制系统）、控制工程应用案例的内容。全书知识点递进关系清晰：控制基础-检测技术-控制建模-简单控制-复杂控制-先进控制-计算机控制-过程案例应用，各章给出思考和练习，适合教学使用。

全书逻辑清楚、内容详尽、实用性强，适合过程装备与控制工程等相关专业本科生使用。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

过程装备控制技术的应用/李晶主编. —北京：电子工业出版社，2020.4

ISBN 978-7-121-37969-7

I. ①过… II. ①李… III. ①过程控制—高等学校—教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2019）第 255773 号

责任编辑：窦 昊

印 刷：

装 订：

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编：100036

开 本：787×1092 1/16 印张：16.5 字数：422.4 千字

版 次：2020 年 4 月第 1 版

印 次：2020 年 4 月第 1 次印刷

定 价：49.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：（010）88254466，douhao@phei.com.cn。

前 言

从过程装备与控制工程专业建设以来，国内已经有近百所高校开设了这个专业，该专业得到了很大的发展。然而，由于各高校建设基础和建设定位不同，执行的专业培养方案也不尽相同。特别是在原有“化工机械与设备”专业基础上增设的“过程控制”内容，更是各取所长、各抒己见。其中，绝大多数高校都给学生进行了控制工程基础、检测原理与技术和与过程控制系统相关的过程控制技术知识的学习。但是，各高校开设的课程、选用的授课教材以及课程设置学时大多不尽相同，所以，有必要进行相关课程内容的整合建设。针对课时少、教师任课量大的教学现状，笔者课程团队根据多年一线教学工作经验，征集同行意见，整合了过程检测与过程控制相关内容，编写了这本教材。本教材把过程装备及控制工程先修课程内容复变函数和机械工程控制基础相关部分知识点整合进来，形成过程控制基础、过程参数检测、过程控制系统、过程控制工程应用为一体的内容体系。预期通过本教材的学习，培养学生了解过程控制类综合知识的能力。

本书共8章，内容丰富，涉及面广，注重理解实用性。在各章中选编了一些实例，并附有思考与练习，以便学生在学习过程中更容易对所学内容进行理解和掌握。多门课程知识整合后，将对过程装备与控制工程专业学生理论学习与专业实践更有针对性地指导，同时在不增加更多基础知识的情况下，较好地掌握过程控制相关的内容，符合专业教学指导思想，可为过程装备与控制工程专业的学生提供更为实用的过程装备控制知识。

本书由李晶主编，王妍和张为老师为主要参编者，其他参与本教材编写的教师也均是过程装备与控制工程专业的一线教师。其中，李晶老师编写第1、5、6章，张为老师编写第2章，王妍老师编写第3章，刘亮老师编写第4章，刘利强老师编写第7章，姜吉光老师编写第8章。

本书在编写过程中，得到全国过程装备与控制工程专业教学指导委员会委员、长春理工大学机电工程专业曹国华教授，新疆大学过程装备与控制工程专业毛先萍副教授，吉林化工学院过程装备与控制工程专业王海波教授的诸多指导。同时，系里朱振华老师和孟宪宇老师给予很多有价值的建议，博士生付强和周璿璐以及许多本科生参与初稿绘图、文档整理等工作，在此一并表示由衷的感谢！本书参考了多本相关材料，在此向同仁们表示衷心感谢！

由于笔者团队的水平有限，加之时间仓促，书中难免出现不妥之处，敬请读者批评指正！

编 者

2019年7月

目 录

第 1 章 过程控制基础	1	2.1.5 检测仪表的分类	20
1.1 生产过程控制	1	2.2 温度检测	21
1.1.1 过程工业的特点	1	2.2.1 概述	21
1.1.2 生产过程控制主要任务	1	2.2.2 热电偶及测温原理	22
1.1.3 生产过程控制主要内容 与控制目标	2	2.2.3 热电阻及测温原理	26
1.2 过程控制进展	3	2.2.4 应用案例	27
1.2.1 过程控制装置的进展	3	2.3 压力检测	29
1.2.2 过程控制策略与算法的 进展	4	2.3.1 概述	29
1.3 过程控制系统组成和特点	4	2.3.2 液柱式压力检测	30
1.3.1 过程控制系统组成	4	2.3.3 弹性式压力检测	31
1.3.2 过程控制系统特点	7	2.3.4 电容式压力检测	31
1.4 过程控制系统分类	8	2.3.5 应变式压力检测	32
1.4.1 按给定值的特点划分	8	2.3.6 应用案例	33
1.4.2 按系统输出信号对 操纵变量影响划分	9	2.4 流量检测	35
1.4.3 按系统的复杂程度 划分	9	2.4.1 概述	35
1.4.4 按系统克服干扰的 方法划分	10	2.4.2 节流式流量检测	36
1.5 过程控制系统过渡过程及 其性能指标	11	2.4.3 电磁式流量检测	38
1.5.1 控制系统的过渡过程	11	2.4.4 容积式流量检测	38
1.5.2 控制系统的性能指标	13	2.4.5 变面积式流量检测	39
思考与练习	14	2.4.6 应用案例	40
第 2 章 过程检测技术	16	2.5 液位检测	41
2.1 检测概述	16	2.5.1 概述	41
2.1.1 检测的基本方法	16	2.5.2 静压式液位计	42
2.1.2 测量误差与分类	17	2.5.3 浮力式液位计	43
2.1.3 检测仪表与系统	18	2.5.4 电容式液位计	44
2.1.4 检测性能指标	19	2.5.5 超声波式液位计	45
		2.5.6 应用案例	46
		2.6 成分检测	46
		2.6.1 概述	46
		2.6.2 热导式检测技术	47
		2.6.3 热磁式检测技术	49
		2.6.4 红外式成分检测	50

2.6.5	色谱分析方法	52	4.3.2	临界比例度法	114
2.6.6	应用案例	55	4.3.3	衰减曲线法	115
2.7	检测信号变换技术	55	4.4	控制系统的投运	116
2.7.1	信号变换的基本形式	55	4.5	简单控制系统设计案例	117
2.7.2	常见信号间的变换	58		思考与练习	118
	思考与练习	64	第5章	复杂控制系统	120
第3章	过程控制系统建模	66	5.1	串级控制系统	120
3.1	被控过程的数学模型与建立	66	5.1.1	基本原理和结构	120
3.1.1	过程的数学模型	66	5.1.2	串级控制系统的 特点	121
3.1.2	过程建模的目的与 要求	67	5.1.3	串级控制系统的 设计	122
3.1.3	过程建模的方法	68	5.1.4	控制器参数整定	124
3.2	机理法建模	69	5.1.5	应用案例	124
3.2.1	基本思路	69	5.2	比值控制系统	128
3.2.2	单容对象的数学模型	69	5.2.1	比值控制原理和 结构	128
3.2.3	多容对象的数学模型	71	5.2.2	比值系数的计算	130
3.3	测试法建模	74	5.3	均匀控制系统	131
3.3.1	对象特性的实验 测定方法	74	5.3.1	均匀控制的提出	131
3.3.2	测定动态特性的时 域法	75	5.3.2	均匀控制系统的 分类	132
3.3.3	测定动态特性的频 域法	81	5.3.3	控制规律的选择 及参数整定	134
	思考与练习	83	5.4	前馈控制系统	135
第4章	简单控制系统	84	5.4.1	基本原理	135
4.1	简单控制系统组成	84	5.4.2	前馈控制系统的主要 结构形式	135
4.2	简单控制系统设计	85	5.4.3	采用前馈控制系统的 条件	136
4.2.1	被控变量和操控变量 的选择	85	5.5	选择性控制系统	136
4.2.2	变送器及其选择基本 要求	86	5.6	分程控制系统	138
4.2.3	控制器及控制规律的 选择	90	5.6.1	基本概念	138
4.2.4	执行器(调节阀)的 选择	107	5.6.2	分程控制的应用	138
4.3	简单控制系统的参数整定	113		思考与练习	140
4.3.1	经验整定法	113	第6章	先进过程控制系统	142
			6.1	模糊控制	142

6.1.1	模糊集合	142	7.3.3	监督控制系统	173
6.1.2	模糊关系	146	7.3.4	分布式控制系统	173
6.1.3	模糊推理	150	7.3.5	现场总线控制系统	174
6.1.4	模糊控制器原理及 设计	154	7.4	过程计算机控制系统设计 方法	175
6.2	预测控制	157	7.4.1	连续域设计-离散化 方法	175
6.2.1	预测控制的基本 原理	157	7.4.2	直接数字域(离散域) 设计	176
6.2.2	预测控制工业应用	158	7.5	过程计算机控制系统发展 概况及趋势	176
6.3	自适应控制	158	7.5.1	发展概况	176
6.3.1	自校正控制系统	159	7.5.2	发展趋势	177
6.3.2	模型参考自适应控制 系统	159	思考与练习		179
6.4	神经网络控制	160	第 8 章 典型过程单元控制方案		180
6.4.1	神经元模型	160	8.1	流体输送设备的控制	180
6.4.2	人工神经网络	161	8.1.1	泵的控制	180
6.4.3	神经网络在控制中的 应用	161	8.1.2	压缩机的控制	183
6.5	鲁棒控制	162	8.1.3	变频调速器的应用	184
6.6	故障检测诊断和容错控制	163	8.1.4	防喘振控制系统	185
6.6.1	故障检测诊断	163	8.2	传热设备的控制	186
6.6.2	容错控制	164	8.2.1	传热设备的静态数学 模型	186
6.7	解耦控制	164	8.2.2	一般传热设备的 控制	187
6.7.1	耦合现象的影响与 分析	164	8.2.3	管式加热炉的控制	189
6.7.2	解耦控制方法	165	8.3	锅炉设备的控制	191
思考与练习		166	8.3.1	锅炉汽包水位的 控制	192
第 7 章 过程计算机控制系统		168	8.3.2	锅炉燃烧系统的 控制	195
7.1	过程计算机控制系统基本 概念	168	8.3.3	蒸汽过热系统的 控制	197
7.2	过程计算机控制系统组成	169	8.4	精馏塔的控制	198
7.2.1	硬件组成	169	8.4.1	精馏塔的控制要求	198
7.2.2	软件组成	171	8.4.2	精馏塔的扰动分析	199
7.3	过程计算机控制系统分类	171	8.4.3	精馏塔被控变量的	
7.3.1	数据采集和监视 系统	172			
7.3.2	直接数字控制系统	172			

选择	200	控制	228
8.4.4 精馏塔的控制方案	202	8.7.3 磨浆机的控制	229
8.4.5 精馏塔的先进控制	204	8.7.4 白水回收控制	230
8.5 石油化工过程的控制	209	8.8 冶金过程的控制	230
8.5.1 常减压过程的控制	209	8.8.1 高炉炼铁生产过程的 控制	231
8.5.2 催化裂化的过程 控制	212	8.8.2 转炉炼钢过程的 控制	232
8.5.3 乙烯生产过程的 控制	215	8.8.3 初轧生产过程的 控制	234
8.5.4 聚合过程的控制	217	附录 A 热电偶的分度表	236
8.6 生化过程的控制	222	附录 B 主要热电偶的参考函数 和逆函数	249
8.6.1 常用生化过程控制	223	附录 C 压力单位换算表	252
8.6.2 青霉素发酵过程 控制	225	附录 D 节流件和管道常用材质 的热膨胀系数	253
8.6.3 啤酒发酵过程控制	226	参考文献	254
8.7 造纸过程的控制	227		
8.7.1 纸浆浓度的控制	227		
8.7.2 纸料配浆的比值			

第1章 过程控制基础

过程装备控制是指在过程设备上配备自动化装置和自动控制系统，代替操作人员的部分或全部直接劳动，使设计、制造、装配等在不同程度上自动地进行。这种利用自动化装置来管理生产过程的方法就是生产过程自动化。因此，过程装备控制是生产过程自动化最重要的一个分支。本章简要说明生产过程自动化控制系统所包含的内容与要求，介绍过程控制系统的组成、特点、分类和性能指标，了解过程控制技术的发展历程。

1.1 生产过程控制

1.1.1 过程工业的特点

过程控制主要应用于连续过程工业，所以本书介绍的过程工业的特点主要是指连续过程工业的特点。从控制工程的观点看，过程工业具有以下特点：

(1) 连续工业生产往往伴随着物理反应、化学反应、生化反应和相变反应等。因此，过程机理十分复杂。

(2) 被控过程往往具有高阶次、强耦合、大惯性、大时滞、严重不确定性与非线性，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，生产的安全性至关重要。因此，对自动控制系统的可靠性要求更苛刻。

1.1.2 生产过程控制主要任务

过程装备控制是工业生产过程自动化的重要组成部分，主要针对过程装备服役中的主要参数，即温度、压力、流量、液位（或物位）、成分和物性等参数进行控制。

工业生产对过程装备控制的要求是多方面的，但主要有三项要求：即安全性、稳定性和经济性。

- 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，通常采取越限报警、事故报警和连锁保护等措施加以保证。随着控制技术和计算机技术的不断发展，在线故障预测和诊断、容错控制等技术可以进一步提高系统的安全性。
- 稳定性是指系统抑制外界干扰、保证生产过程长期、稳定运行的能力。在生产过程中，系统处于变化的运行环境，原材料成分变化、动力系统的波动等都可能对生产过程稳定性有所影响。在外部干扰下，过程控制系统应该使生产过程参数与状态产生的变化尽可能小，并在状态发生变化后能够快速恢复到稳定状态，以减少或消除外部干扰可能造成的不良影响。

- 经济性是指生产成本低但利润高。即在相同的投入下，生产企业追求利益最大化的商业特点，使当今生产过程中对过程控制有更高的要求。为了达到这个目的，不仅需要过程控制系统进行优化设计，还需要管控一体化，即以经济效益为目标的整体优化。

为了满足以上三项要求，在理论上和实践上都还有许多问题可以深入研究。

过程装备控制的任务就是在了解、掌握工艺流程和生产过程的静态和动态特性的基础上，根据工业生产对过程装备控制的三项要求，应用理论对控制系统进行分析和综合，采用合适的技术手段，实现生产过程的控制目标。因此，过程装备控制是将控制理论、工艺知识、计算机技术和仪器仪表等相融合而成的一门综合性应用科学。

1.1.3 生产过程控制主要内容与控制目标

生产过程自动化系统包含以下 4 个部分内容。

(1) 自动检测系统

自动检测系统在实际生产中是一个动态变化的过程。对过程中各工艺参数的变化情况的实时了解是过程控制的基础。所以，采用必要的测量仪表（如热电偶、热电阻、压力传感器等）自动连续地对各种工艺变量（如温度、压力、流量、液位等）进行测量，并将测量结果用仪表（如动圈仪表、电子电位差计等）指示记录下来供操作人员观察、分析，或将测量到的数据传送给控制系统，作为自动控制的依据。

(2) 信号联锁系统

信号联锁系统是一种安全装置。在生产过程中，外界干扰因素往往会导致某些工艺变量超出允许的变化范围，使生产不能正常运行，严重时甚至会引发燃烧、爆炸等事故。为确保安全生产，常对这些关键性变量设置信号报警或联锁保护装置。其作用是在事故发生前，自动地发出声光报警信号，引起操作员的注意以便及早采取措施。若工况已接近危险状态，信号联锁系统将启动：打开安全阀，切断某些通路或紧急停车，从而防止事故的发生或扩大。

(3) 自动操纵系统

自动操纵系统是一种根据预先规定的程序，自动地对生产设备进行某种周期性操作，极大地减轻工作人员的繁重体力劳动或重复性体力劳动的装置。例如，合成氨造气车间煤气发生炉的操作就是按照程序自动进行工作，如自动吹风、上吹、下吹制气、吹净等步骤，周期性地接通空气与水蒸气，实现自动操纵。

(4) 自动控制系统

自动控制系统利用一些自动控制仪表及装置，对生产过程中某些重要的工艺变量进行自动调节，使它们在受到外界干扰影响偏离正常状态后，能够自动地重新恢复到规定的范围之内，从而保证生产的正常进行。

生产过程的总目标是在可能获得的原料和能源的条件下，以最经济的途径将原物料加工成预期的合格产品。为了达到生产目标，必须对生产过程进行监管与控制。

1.2 过程控制进展

1.2.1 过程控制装置的进展

(1) 基于仪表的局部自动化阶段

20 世纪 50 年代, 一些企业凭借生产实践的经验, 实现了基于基地式仪表和部分组合仪表的仪表控制和局部自动化。这种控制的特点是局限于一般的控制元件及机电式控制仪器, 所采用的基地式仪表(如自力式温度控制器、就地式液位控制器等)比较笨重; 设备与设备之间或同一设备中的不同控制系统之间, 很少或没有联系, 其功能往往局限在单回路控制。但对于不复杂的过程控制, 这类系统至今仍有使用, 并得到了新的发展, 只是所占的比重大为减少。

(2) 基于计算机的综合自动化阶段

20 世纪 60 年代, 随着电子技术的迅速发展, 单元组合仪表(包括气动与电动)以及组装仪表被大量使用, 以适应比较复杂的模拟和逻辑规律相结合控制系统的需要。此时, 出现以 4~20mA 和 0~10mA 电动模拟信号为统一标准信号的电动模拟控制系统。随着 1946 年世界上第一台计算机的诞生, 计算机开始用于过程控制领域。1959 年工业控制计算机(Process Control Computer, 如 TR300 等)在化肥厂和炼油厂被试用于控制生产过程。60 年代中期, 出现了用计算机实现的直接数字控制(Direct Digital Control, DDC)系统和计算机监控(Supervisory Computer Control, SCC)系统。

(3) 基于网络的全盘自动化阶段

20 世纪 70 年代中期, 可编程序控制器(PLC)和基于先进控制理论的分布式计算机控制系统(Distributed Control System, DCS, 又称集散控制系统)的出现和应用, 克服了单台计算机的直接数字控制(DDC)系统进行集中控制时的固有缺陷, 将工业自动化向前推进了一大步。

20 世纪 80 年代以后, 一方面分布式计算机控制系统(DCS)成为流行的过程控制系统; 另一方面, 兼顾连续控制和逻辑控制/顺序控制功能的复合控制系统(Hybrid Control System, HCS)得到发展。它可以是基于 DCS 而增添逻辑顺序功能的系统, 也可以是基于 PLC 增添连续控制功能的系统。同时以现场总线(Fieldbus)为标准, 实现以微处理器为基础的现场总线控制系统(Fieldbus Control System, FCS)。现场总线控制系统(FCS)进一步将控制功能分散, 增强了系统的灵活性和可靠性。

当前, 过程控制已经进入了全新的、基于网络的计算机集成过程系统(Computer Intergrated Process System, CIPS)时代。CIPS 是在传统的 DCS 基础上采用国际统一标准的开放式系统。CIPS 是以企业整体优化为目标(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), 以计算机及网络为主要技术工具, 以生产过程管理与控制为主要内容, 将过去传统自动化的“孤岛”模式集成为一个有机整体, 而网络技术、数据库技术、分布式控制、先进过程控制策略、智能控制等成为实现 CIPS 的重要基础。可以预见, 过程控制将在我国现代化建设过程中得到更快的发展, 并发挥越来越重要的作用。

1.2.2 过程控制策略与算法的进展

过程控制在几十年的发展过程中，控制的策略与算法出现了三种类型：简单控制、复杂控制与先进控制。

通常将单回路 PID 控制称为简单控制，它一直是过程控制的主要手段。PID 控制以经典控制理论为基础，主要用频域方法对控制系统进行分析设计与综合。目前，PID 控制仍然得到广泛应用。在许多 DCS 和 PLC 系统中，均设有 PID 控制算法软件或 PID 控制模块。

从 20 世纪 50 年代开始，过程控制界逐渐发展了串级控制、比值控制、前馈控制、均匀控制和 Smith 预估控制等控制策略与算法，称为复杂控制。它们在很大程度上满足了复杂过程工业的一些特殊控制要求。它们仍然以经典控制理论为基础，但是结构与应用上各有特色，而且目前仍在继续改进与发展。

20 世纪 80 年代中后期，出现了以 DCS 和 PLC 为代表的新型计算机控制装置，为过程控制提供了强有力的硬件与软件平台。同期，在现代控制理论和人工智能发展的理论基础上，针对工业过程本身的非线性、时变性、耦合性和不确定性等特性，提出了许多行之有效的解决方法，如解耦控制、推断控制、预测控制、模糊控制、自适应控制、人工神经网络控制等，常统称为先进控制。近十年来，以专家系统、模糊逻辑、神经网络、遗传算法为主要方法的基于知识的智能处理方法已经成为过程控制的一种重要技术。先进控制方法可以有效解决那些采用常规控制效果差，甚至无法控制的复杂工业过程的控制问题。实践证明，先进控制方法能取得更高的控制品质和更大的经济效益，具有广阔的发展前景。

1.3 过程控制系统组成和特点

1.3.1 过程控制系统组成

工业生产过程都是在一定的工艺条件下（如温度、压力、浓度、物位等）进行的。为此，必须对这些工艺变量进行控制，使其稳定在保证生产正常运行的范围之内。下面以锅炉汽包水位控制为例，介绍人工控制和自动控制的执行过程。

图 1-1 所示为锅炉汽包水位控制的示意图。锅炉中产生的高压蒸汽，既可作为动力源，又可作为热源。要保证锅炉的正常运行，将锅炉的汽包水位维持在一定的高度是非常重要的；如果汽包水位过低，需要的蒸汽量较大，水的汽化速度很快，如不及时控制，就会使汽包内的水全部汽化，导致锅炉烧坏或爆炸；水位过高，则会影响汽包内的汽水分离，使蒸汽夹带水分，对后续生产设备造成影响和破坏。因此，要维持汽包水位稳定在规定的数值上，根据物料平衡的原理，就必须保证锅炉的给水量和蒸汽的排出量（或称蒸汽负荷）相等。当蒸汽负荷发生变化而给水量不变时，锅炉水位将会发生变化；或者，当给水压力发生变化而负荷不变时，锅炉水位也将会偏离规定的数值。

在图 1-1(a)的人工控制系统中，首先用眼睛观察安装在锅炉汽包上的玻璃管液位计中的水位数值，在大脑中将观察到的数值与规定的数值进行比较，得到偏差，并根据此差值的大小及变化趋势，控制人的双手开大或关小给水阀门。不断地重复上述过程，直到汽包水位维持在规定的数值上。从这一过程可以看出，人工控制的劳动强度很大，而且要求操作人员必

须具有一定的操作经验。当过程参数变化较快或操作条件要求较严格时，这种控制方法就很难满足控制要求。

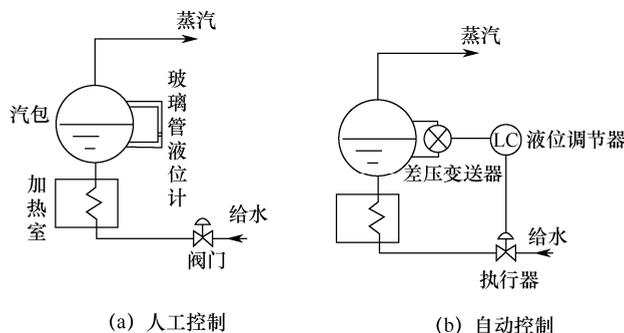


图 1-1 锅炉汽包水位控制示意图

与人工控制不同，图 1-1(b)的锅炉汽包水位自动控制系统中，采用过程测量仪表代替人眼的观察，得到水位数据，通过信号转换及传输装置将该数据送到过程控制仪表中（本图为液位控制器）。控制仪表（也称调节仪表）相当于人工控制中人的大脑，将变送器送来的信号与预先设定的水位信号进行比较得到两者的偏差，然后根据一定的控制算法（即调节器的调节规律）对该偏差加以计算得到相应的控制信号，将该信号传送给执行器（一般为自动调节阀），执行器根据控制信号的大小调节给水阀，改变给水量的大小。如此反复调节，直至水位恢复到规定的高度上，完成水位的自动控制。

在自动控制系统中，测量仪表、控制仪表、自动调节阀分别代替了人工控制中人的观察、思考和手动操作，因而大大降低了人的劳动强度；同时，仪表的信号测量、运算、传输、动作速度远远高于人的观察、思考和操作过程，因此自动控制可以满足信号变化速度快、控制要求高的场合。

从上面锅炉汽包水位的自动控制系统中可以看出，自动控制系统主要由两大部分组成：一部分是起控制作用的全套自动控制装置，包括测量仪表、变送器、控制仪表以及执行器等；另一部分是自动控制装置控制下的生产设备，即被控对象如锅炉、反应器、换热器等。在图 1-1(b)中，锅炉、差压变送器、调节器、执行器等构成一个完整的自动控制系统，而这几个部分在系统里是必不可少的。

过程控制系统一般由以下几部分组成。

(1) 被控过程（或对象）

在自动控制系统中，工艺变量需要控制的生产设备或机器称为被控对象，简称对象。在化工生产中，各种塔器、反应器、泵、压缩机以及各种容器、贮罐、贮槽，甚至一段输送流体的管道或者复杂塔器（如精馏塔）的某一部分都可以是被控对象。图 1-1 中的锅炉即为锅炉汽包水位控制系统中的被控对象。

(2) 测量元件和变送器

（用于生产过程参数的检测与变送仪表）测量需控制的工艺参数并将其转化为一种特定信号（电流信号或气压信号）的仪器，在自动控制系统中起着“眼睛”的作用，因此要求准确、及时、灵敏。

(3) 调节器又称控制器

它将检测元件或变送器送来的信号与其内部的工艺参数给定值信号进行比较，得到偏差信号；根据这个偏差的大小按一定的运算规律计算出控制信号，并将控制信号传送给执行器。

(4) 执行器

接收调节器送来的信号，自动改变阀门的开度，从而改变输送给被控对象的能量或物料量。最常用的执行器是气动薄膜调节阀。当采用电动调节器时，调节阀上还需增加一个电气转化器。

(5) 报警、保护和连锁等其他部件

在一个自动控制系统中，上述四个部分是必不可少的。但除此之外，还有一些辅助装置，如给定装置、转换装置、显示仪表等。其中，显示仪表可以是单独的仪表，有时也可能是测量仪表、变送器和调节器里附有的显示部分。控制系统中一般不单独说明辅助装置。

在研究控制系统时，为更清楚地表示控制系统中各组成部分之间的相互影响和信息联系，一般用框图来表示控制系统的组成和作用。图 1-2 所示为一个简单控制系统的框图。

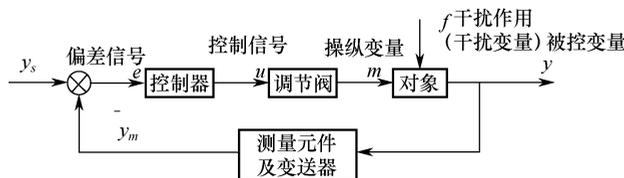


图 1-2 简单控制系统框图

图中的每个方框代表控制系统的—个组成部分，称为“环节”。环节具有单向性，即任何环节只能由输入得到输出，不能逆行。连接两个环节的带箭头的线条表示控制系统中传递的信息，也就是系统中各环节的输入输出的变量。箭头指出了信息的作用方向，箭头送入的信息为该环节的输入信号，箭头送出的信息为该环节的输出信号。每一个环节输出信号与输入信号之间的关系仅取决于该环节自身的特性。从整个系统来看，给定值信号和干扰信号是输入信号，被控变量或其测量值是系统的输出信号。框图中的圆圈为“加法器”，用于信号相加或相减，当两个信号相减，即 $e = y_s - y_m$ 时，又称为比较元件。

下面对框图中出现的一些控制系统常见术语加以解释说明。

被控变量 y ：指需要控制的工艺参数，如锅炉汽包的水位、反应器的温度、燃料流量等，它是被控对象的输出信号。在控制系统框图中，它也是自动控制系统的输出信号。但它是理论上的真实值，而由测量变送器输出的信号是被控变量的测量值 y_m 。

给定值（或设定值） y_s ：对应于生产过程中被控变量的期望值。当其值由工业调节器内部给出时称为内给定值。最常见的内给定值是一个常数，它对应于被控变量所需保持的工艺参数值；当其值产生于外界某一装置并输入至调节器时称为外给定值。

测量值 y_m ：由检测元件得到的被控变量的实际值。

操纵变量（或控制变量） m ：受控于调节阀，用以克服干扰影响，具体实现控制作用的变量称为操纵变量，它是调节阀的输出信号。在图 1-1 所示的例子中，就是锅炉的给水流量。化工、炼油等工厂中流过调节阀的各种物料或能量，或者由触发器控制的电压或电流都可以作为操纵变量。

干扰（或外界扰动） f ：除操纵变量以外能够引起被控变量偏离给定值的各种因素。最常

见的干扰因素是负荷改变，电压、电流的波动，气候变化等。在锅炉水位控制中，蒸汽用量的变化就是一种干扰。

偏差信号 e ：在理论上应该是被控变量的实际值与给定值之差，而能够直接获取的信息是被控变量的测量值。因此，通常把给定值与测量值的差作为偏差，即 $e = y_s - y_m$ 。在反馈控制系统中，调节器根据偏差信号的大小去控制操纵变量。

控制信号 u ：控制器将偏差按照一定规律计算得到的量。

图 1-2 表示了一个过程控制系统的基本结构和控制过程。控制器（或称调节器）根据系统输出量检测值 y_m 与设定值 e 的偏差，按照一定的控制算法输出控制量 u ，对被控过程进行控制。执行机构（如调节阀）接受控制器送来的控制信息调节被控量，从而达到预期的控制目标。过程的输出信号通过过程检测与变送仪表，反馈到控制器（或称调节器）的输入端，构成闭环控制系统。

图 1-3 是转炉供氧量控制系统示意图。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，通过氧枪供给转炉一定的氧气，称之为吹氧。其目的是使铁水中的碳氧化燃烧，以不断降低铁水中的含碳量。控制吹氧量和吹氧时间，可以获得不同品种的钢产品。由图可见，从节流装置 1 采集到的氧气流量，送入流量变送器 FT2，再经过开方器 3，其结果送到流量控制器（调节器）FC4 作为流量反馈值，与供氧量的设定值比较，得到偏差值，经过流量控制器（调节器）FC4 进行 PID 运算，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，以满足生产工艺要求。

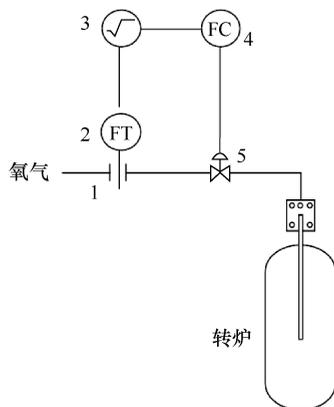


图 1-3 转炉供氧量控制系统示意图

1.3.2 过程控制系统特点

(1) 被控过程的多样性

过程工业涉及各种工业部门，其物料加工成的产品是多样的。同时，生产工艺各不相同，如石油化工过程、冶金工业中的冶炼过程、核工业中的动力核反应过程等，这些过程的机理不同，甚至执行机构也不同，因此，过程控制系统中的被控对象（包括被控量）是多样的，明显地区别于运动控制系统。

(2) 控制方案的多样性

过程工业的特点以及被控过程的多样性决定了过程控制系统的控制方案必然是多样的,这种多样性包含系统硬件组成和控制算法以及软件设计。观察图 1-2 所示过程控制系统的基本结构和图 1-3 所示过程控制系统的举例,早期的控制器是模拟调节仪表,如果将控制器、执行机构(如调节阀)和检测与变送仪表统称为过程检测控制仪表,则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两部分组成的,也称为仪表过程控制系统。随着现代工业生产的发展,工业过程越来越复杂,对过程控制的要求也越来越高,传统的模拟式过程检测控制仪表已经不能满足控制要求,因而采用计算机作为控制器组成计算机过程控制系统。从控制方法的角度看,有单变量过程控制系统,也有多变量过程控制系统。同时,控制算法多种多样,有 PID 控制、复杂控制,也有包括智能控制的先进控制方法,等等。

(3) 被控过程属于慢过程且多属于参数控制

连续工业过程大惯性和大滞后的特点决定被控过程为慢过程。被控过程是物流变化的过程,伴随物流变化的信息(物性、成分、温度、压力、流量、液位或物位)表征为被控过程状态的参数,也是过程控制系统的被控量。

(4) 定值控制是过程控制的主要形式

在多数生产过程中,被控参数的设定值为一个定值,定值控制的主要任务在于如何减小或消除外界干扰,使被控量尽量保持接近或等于设定值,使生产稳定。

(5) 过程控制有多种分类方法

① 按被控变量分类,可分为温度控制系统、压力控制系统、流量控制系统、液位或物位控制系统、物性控制系统、成分控制系统;

② 按被控变量数量分类,可分为单变量过程控制系统和多变量过程控制系统;

③ 按设定值分类,可分为定值控制系统和随动(伺服)控制系统;

④ 按参数性质分类,可分为集中参数控制系统和分布参数控制系统;

⑤ 按控制算法分类,可分为简单控制系统、复杂控制系统、先进或高级控制系统;

⑥ 按控制器形式分类,可分为常规仪表过程控制系统和计算机过程控制系统。

1.4 过程控制系统分类

过程控制系统的分类方法有很多。但是,在分析过程控制系统的特性时,常常采用下面几种分类方法。

1.4.1 按给定值的特点划分

(1) 定值控制系统

定值控制系统的给定值是恒定不变的,因此称为“定值”。控制系统的输出(即被控变量)应稳定在和给定值相对应的工艺指标上,或在规定工艺指标上下一定范围内变化。在生产过程中,大多数场合要求被控变量保持恒定或给定值附近。因此,定值控制系统是生产过程控制中最常见的。

(2) 随动控制系统

随动控制系统的给定值是一个不断变化的信号，而且这种变化不是预先规定好的，也就是说，给定值的变化是随机的。这类系统的主要任务是使被控变量能够迅速地、准确无误地跟踪给定值的变化，因此这类系统又称为自动跟踪系统。在生产过程中多用于复杂控制系统。

(3) 程序控制系统

程序控制系统的给定值也是一个不断变化的信号，但这种变化是一个已知的函数，即给定值按一定的时间程序变化。这类系统在间歇生产过程中的应用比较广泛，如食品工业中的罐头杀菌温度控制、造纸工业中制浆蒸煮温度控制等，它们要求的温度指标不是一个恒定的数值，而是一个按工艺规程规定好的时间函数，具有一定的升温时间、保温时间、降温时间等。

1.4.2 按系统输出信号对操纵变量影响划分

(1) 闭环控制系统

在闭环控制系统中，系统输出信号的改变会返回并影响操纵变量，所以操纵变量不是独立的变量，它依赖于输出变量。闭环控制系统最常见的形式是负反馈控制系统。当操纵变量使系统的输出信号增大时，反馈影响操纵变量的结果使输出信号减小。负反馈是使系统稳定的基本条件。一个工业控制系统，当调节器进入“自动”运行时，就是一个闭环控制系统。如前所述，图 1-2 所示的自动控制系统无须操作者干预其运行，即可自动克服干扰作用的影响，使被控变量保持在给定值的附近。其控制作用依赖于对被控变量的测量。自动控制通过调节器输出的控制信号实现：调节器根据被控变量偏差信号的大小产生相应的控制作用，改变操纵变量，克服干扰作用的影响。

(2) 开环控制系统

开环控制系统的操纵变量不受系统输出信号的影响。为了使系统的输出满足事先规定的要求，必须周密而精确地计算操纵本来的变化规律。一个工业控制系统，当反馈回路断开或调节器置于“手操”位置时，就成为开环控制系统。图 1-1(a)中所示的人工控制即为开环控制系统。

1.4.3 按系统的复杂程度划分

(1) 简单控制系统

一般称图 1-2 所示的控制系统为简单控制系统。这类控制系统只有一个简单的反馈回路，所以也称为单回路控制系统。

(2) 复杂控制系统

工程上的控制系统常常比较复杂，表现为在系统中包含多个调节器、检测变送器或执行器，从而形成系统中存在多个回路，或者在系统中存在多个输入信号和多个输出信号。为了和简单控制系统相区别，称其为复杂控制系统。图 1-4 所示的夹套式反应器温度控制系统就是具有两个回路的控制系统，该反应器的温度 T_1 通过进入夹套的蒸汽量加以控制。图中 TC 为温度调节器，TT 为温度控制变送器。

图 1-5 为该控制系统的框图，从图中可以看出，这是具有两个反馈回路的控制系统，工程上又称为串级控制系统。此外，还有更多的回路或更复杂的形式。

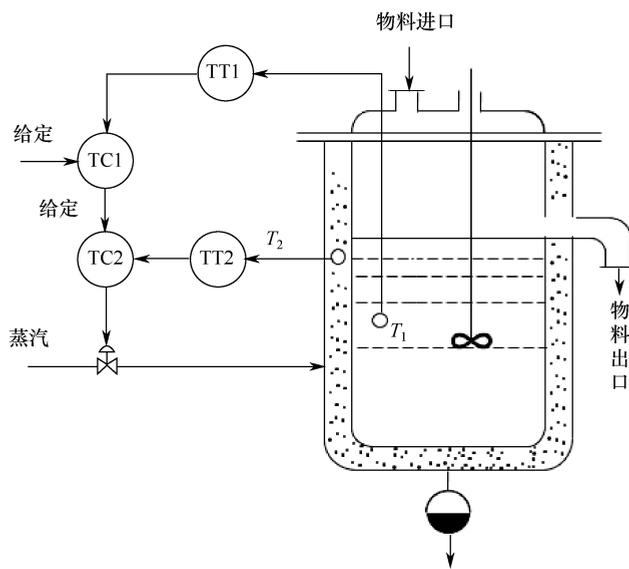


图 1-4 夹套式反应器温度控制系统示意图

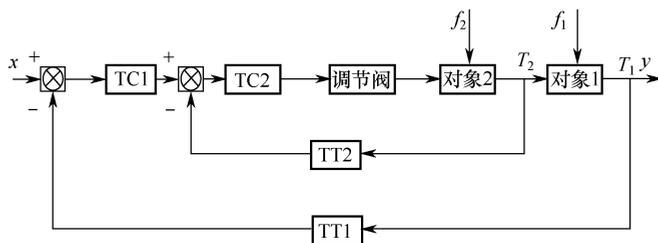


图 1-5 夹套式反应器温度控制系统框图

1.4.4 按系统克服干扰的方法划分

(1) 反馈控制系统

如图 1-6 所示, 当干扰 f 使系统的被控变量发生改变时, 被控变量反馈至系统输入端, 与给定值相比较并得到偏差信号, 经调节器及调节阀影响操纵变量以减弱或消除被控变量的变化。

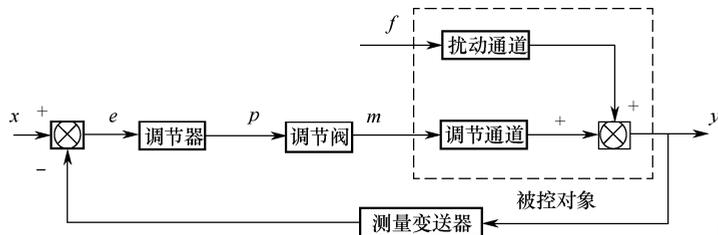


图 1-6 反馈控制系统框图

(2) 前馈控制系统

如图 1-7 所示, 当干扰 f 引起被控对象的输出 y_2 改变时, 控制系统测得干扰信号的大小, 并输入前馈补偿器 (或称前馈控制器), 由前馈补偿器的输出去控制操纵变量 m , 引起被控对象输出 y_1 的改变, 且 y_1 与 y_2 的方向相反, 由此减弱或消除被控变量 y 受干扰影响而产生

的变化。当前馈完全补偿时, 有 $y = y_1 + y_2 = 0$ 。

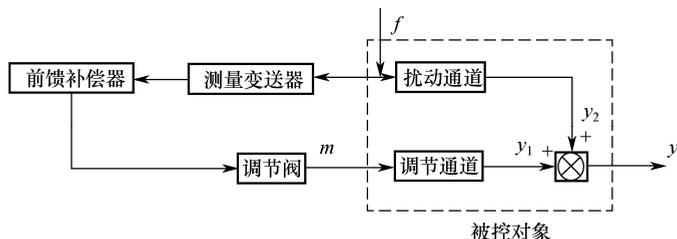


图 1-7 前馈控制系统框图

(3) 前馈—反馈控制系统

当以上两种控制系统复合在一起时, 就构成了前馈—反馈控制系统, 如图 1-8 所示。这种系统在受到干扰 f 的影响时, 可以通过前馈补偿器使被控变量不变, 若前馈补偿不完全, 还可以通过反馈控制系统加以修正。控制系统受其他因素影响, 或系统的给定值发生改变时, 则由反馈控制系统加以控制。

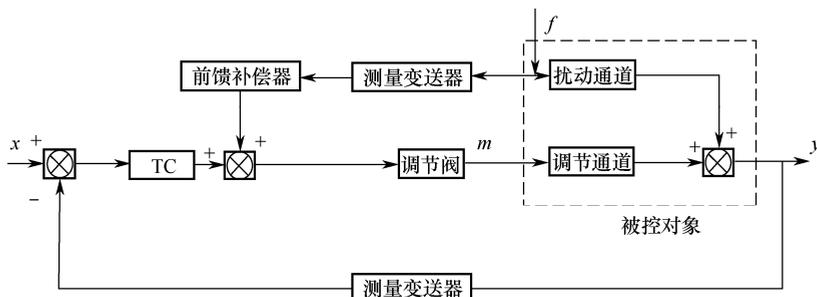


图 1-8 前馈—反馈控制系统框图

在工程上控制系统的形式多种多样, 各具特点。例如, 在计算机控制系统中, 由于信号以断续的脉冲形式出现, 它和一般连续信号是有区别的, 因而成为离散控制系统或采样控制系统。随着自动控制技术的不断进步和完善, 以及智能化仪表和计算机控制的应用, 自动控制系统的形式越来越多, 有些控制系统可以是不同类型系统的组合, 这里不再一一说明。

1.5 过程控制系统过渡过程及其性能指标

处于平衡状态下的自动控制系统受到干扰作用后, 被控变量会发生变化而偏离给定值, 系统进入过渡过程。自动控制系统的作用就是检测变化、计算偏差并消除偏差。在这一过程中, 被控变量的变化情况、偏离给定值的最大程度以及系统消除偏离的速度、精度等都是衡量自动控制系统质量的依据。

1.5.1 控制系统的过渡过程

从被控对象受到干扰作用使被控变量偏离给定值时起, 调节器开始发挥作用, 使被控变量回复到给定值附近范围内。然而, 这一回复并不是瞬间完成的, 而是要经历一个过程, 这个过程就是控制系统的过渡过程。它是控制系统在闭环情况下, 在干扰和自动控制的共同

作用下形成的。在生产过程中，干扰的形式是多种多样的，而且大部分都属于随机性质，其中阶跃干扰（见图 1-9）对控制系统的影响最大、最为多见。例如，负荷的变化、直流电路的突然断开或接通、阀门的突然变化等。因此，本书只讨论在阶跃干扰影响下控制系统的过渡过程。

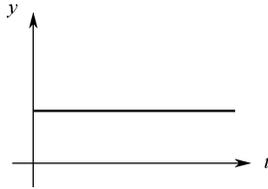


图 1-9 阶跃干扰

在阶跃干扰的作用下，控制系统的过渡过程有如图 1-10 所示的几种基本形式。

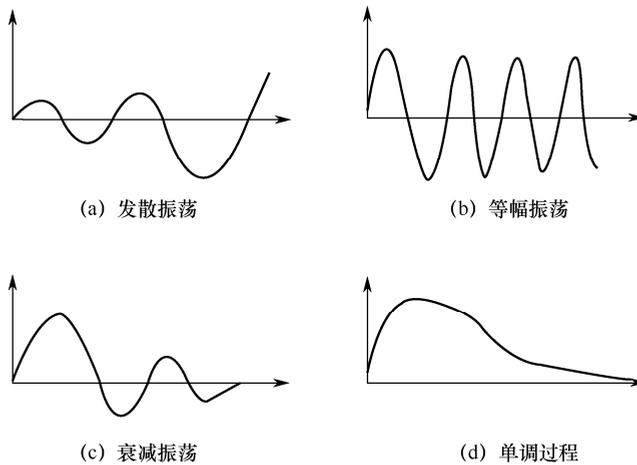


图 1-10 过渡过程的几种基本形式

发散振荡过程如图 1-10(a)所示，它表明系统在受到阶跃干扰的作用后，不但不能使被控变量回到给定值，反而越来越偏离给定值，以致超出生产的给定限度。严重时引起事故。这是一种不稳定的过渡过程，因此要尽量避免。

等幅振荡过程如图 1-10(b)所示，被控变量在某稳定值附近振荡，而振荡幅度恒定不变。这意味着系统在受到阶跃干扰作用后，就不能再稳定下来，一般不采用。对于某些工艺上允许被控变量在一定范围内波动的、控制质量要求不高的场合，这些形式的过渡过程还是可以采用的。

衰减振荡过程如图 1-10(c)所示，被控变量在稳定值附近上下波动，经过两三个周期后稳定下来。这是一个稳定的过渡过程，在过程控制中，多数情况下都希望得到这样的过渡过程。

非振荡的单调过程如图 1-10(d)所示，它表明被控变量最终稳定下来，是一个稳定的过渡过程。但与衰减振荡相比，其恢复到平衡状态的速度慢、时间长，因此一般不采用。

综上所述，自动控制系统的过渡过程，首先应是一个渐趋稳定的过程，这是满足生产要求的基本保证；其次，在大多数场合下，应是一个衰减振荡的过程。

1.5.2 控制系统的性能指标

工业过程对控制的要求，可以概括为准确性、稳定性和快速性。另外，定值控制系统和随动（伺服）控制系统对控制的要求既有共同点，也有不同点。定值控制系统的关键在于恒定，即要求克服干扰，使系统的被控参数稳、准、快地保持接近或等于设定值。而随动（伺服）控制系统的主要目标是跟踪，即稳、准、快地跟踪设定值。根据过程控制的特点，我们主要讨论定值检测的性能指标。图 1-11 为一个过程控制系统的阶跃响应曲线。

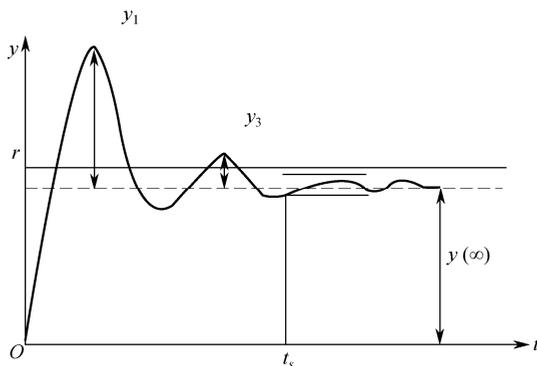


图 1-11 过程控制系统阶跃响应曲线

(1) 衰减比 η 和衰减率 ψ

衰减比是衡量振荡过程衰减程度的指标，等于两个相邻同向波峰值之比，即

$$\eta = \frac{y_1}{y_3}$$

衡量振荡过程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

$$\psi = \frac{y_1 - y_3}{y_1}$$

衰减比习惯上用 $\eta : 1$ 表示。在实际生产中，一般希望过程控制系统的衰减比为 4 : 1 到 10 : 1，它相当于衰减率 $\psi = 0.75$ 到 $\psi = 0.9$ 。若衰减率 $\psi = 0.75$ ，则振荡两个完整波就认为系统进入稳态。

(2) 最大动态偏差和超调量

最大动态偏差是指在阶跃响应中，被控参数偏离其最终稳态值的最大偏差量，一般表现在过渡过程开始的第一个波峰，如图 1-11 中的 y_1 。最大动态偏差占被控量稳态值的百分比称为超调量。最大动态偏差能直接反映到生产记录曲线上，特别是在越来越先进的计算机过程控制系统中，能够更为方便直观地在监视器屏幕上观察到被控参数的实时响应波形。最大动态偏差是过程控制系统动态准确性的衡量指标。

(3) 余差

余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 的差值。它是过程控制系统稳态准确性的衡量指标。

(4) 调节时间 t_s 和振荡频率 β

调节时间 t_s 是从过渡过程开始到结束的时间。理论上，它应该为无限长。但一般认为，当被控量进入其稳态值的 $\pm 5\%$ 范围内，就算过渡过程已经结束，这时所需的时间就是调节时间 t_s ，如图 1-11 所示。调节时间 t_s 是过程控制系统快速性的指标。

过渡过程的振荡频率 β 是振荡周期 p 的倒数，即

$$\beta = \frac{2\pi}{p}$$

在同样的振荡频率下，衰减比 η 越大则调节时间越短；当衰减比 η 相同时，振荡频率越高调节时间越短。因此，振荡频率在一定程度上也可作为衡量过程控制系统快速性的指标。

思考与练习

1. 闭环控制系统与开环控制系统有什么不同？
2. 图 1-12 为乙炔发生器温度控制系统，试画出该系统的框图。简述其工作原理；指出被控过程、被控参数和控制参数。

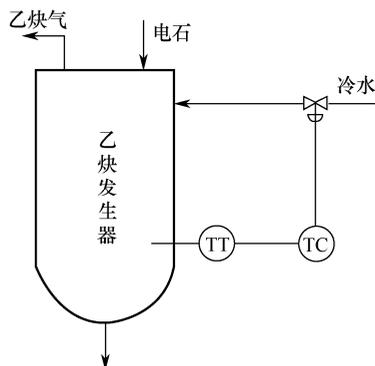


图 1-12 乙炔发生器温度控制系统示意图

3. 在图 1-13 所示的换热器出口温度控制系统中，工艺要求热物料出口温度保持为某一设定值。

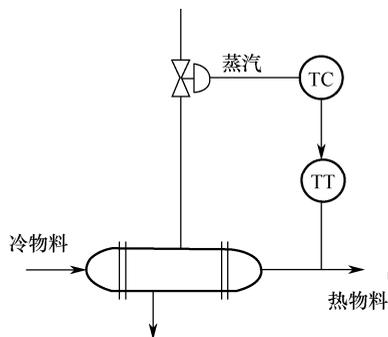


图 1-13 换热器出口温度控制系统示意图

- ① 试画出该控制系统的框图。

- ② 框图中各环节的输入信号和输出信号是什么？整个系统的输入信号和输出信号又是什么？
 ③ 系统在遇到干扰作用（例如冷物料流量突然增大 Δq_v ）时，该系统是如何实现自动控制的？

4. 图 1-14 为贮槽液位控制系统，工艺要求液位保持为某一数值。

- ① 试画出该系统的框图。
 ② 指出该系统中的被控对象、控制变量、操纵变量、干扰作用各是什么？

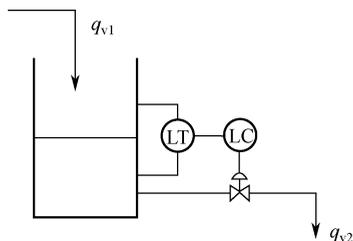


图 1-14 贮槽液位控制系统示意图

5. 衰减比 η 和衰减率 ψ 可以表征过程控制系统的什么性能？
 6. 最大动态偏差与超调量有何异同？
 7. 试分析衰减比对过渡过程的影响，并画出衰减比分别为 $n < 1$, $n = 1$, $n > 1$, $n \rightarrow \infty$ 时的过渡过程曲线。
 8. 图 1-15 所示是某温度记录仪上面画出的曲线图，试写出最大偏差、衰减比、余差、振荡周期，如果工艺上要求控制温度为 $(40 \pm 20^\circ\text{C})$ ，那么该控制系统能否满足要求？

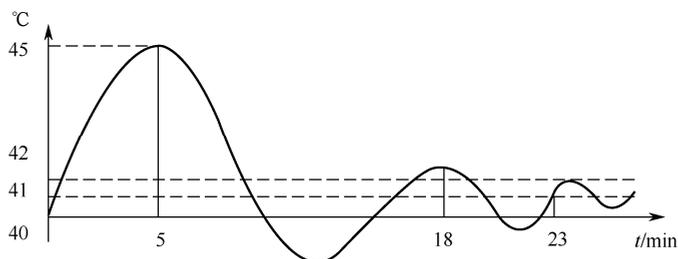


图 1-15 扰动下的温度响应曲线示意图