



高等院校应用型特色规划教材

自动控制系统 及应用

肖安崑 刘玲腾 主 编



清华大学出版社

高等院校应用型特色规划教材

自动控制系统及应用

肖安崑 刘玲腾 主编

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

为适应现代制造业发展的需要,根据教育部提出的“高等职业教育为制造业和现代服务业培养高技能型紧缺人才”的任务,组织编写了《高等院校应用型特色规划教材》。本书被列入该系列教材。

本书内容包括自动控制系统的一般概念、自动控制系统的基本部件、典型自动控制系统的定性分析、拉普拉斯变换、系统的数学模型、频率特性、自动控制系统的稳定性分析、自动控制系统的稳态性能分析、瞬态响应分析、自动控制系统的校正等。

本书突出针对性和实用性,理论分析以适度够用为限。在讲清基本概念的前提下,注重介绍分析的思路和方法,以帮助读者学会应用控制理论来解决工程的实际问题。

本书可供普通本科学校、高等职业技术学院、高等专科学校、成人和民办高校机电、模具、数控等专业的学生作为教材,亦可供有关工程技术人员参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制系统及应用/肖安崑,刘玲腾主编.—北京:清华大学出版社,2006.1
(高等院校应用型特色规划教材)
ISBN 7-302-11948-1

I. 自… II. ①肖… ②刘… III. 自动控制系统—高等学校:技术学校—教材 IV.TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第114757号

出 版 者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦
http://www.tup.com.cn 邮 编:100084
社 总 机:010-62770175 客户服务:010-62776969

组稿编辑:刘建龙

文稿编辑:张彦青

排版人员:房利萍

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印张:15.25 字数:362千字

版 次:2006年1月第1版 2006年1月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-11948-1/TP·7745

印 数:1~4000

定 价:22.00元

前 言

本书是根据教育部提出的“高等职业教育为制造业和现代服务业培养高技能型紧缺人才”的任务而编写。

本书的架构是以自动控制系统为主、自动控制理论作为分析的方法和工具，着眼于系统性能分析和系统性能改进。本书围绕自动控制系统的一般概念、系统组成、工作原理、分析思路、分析方法、改善系统性能的途径以及分析所得的主要结论在实际中的应用而展开。

考虑到高等职业教育侧重技术应用的特点，教材力求突出针对性和实用性，理论分析以适度够用为限。

应该指出，控制理论不仅是一门重要的学科，而且是一门卓越的方法论。它提出、思考、分析与解决问题的思想方法是符合唯物辩证法的。在学习中，既要十分重视抽象思维，了解一般规律，又要充分注意结合实际；既要善于从个性中概括出共性，又要善于从共性出发深刻了解个性。学会运用控制理论的方法去抽象与解决实际问题，去开拓提出、分析与解决问题的思路。限于学时等原因，本课程还只能为此打下一个初步的基础。只有学会提出问题、思考问题，并掌握正确的分析问题、解决问题的思路和方法，才会有所创新。

本书由南昌大学肖安崑教授(负责第 1、9、10 章)、刘玲腾(负责第 3、5、6、7、8 章)、顾丽谨(负责第 2、4 章及全书的图表制作)共同讨论编写，肖安崑教授负责全书的统稿和定稿。南昌大学余桂英副教授和京玉海副教授提出了许多有益建议并提供许多帮助。

限于编者水平有限，加上时间仓促，本书的谬误与不足之处在所难免。编者切望广大师生和读者不吝指教，提出批评建议，我们由衷地欢迎与感激。

编 者

目 录

第1章 自动控制系统的一般概念	1	2.4.2 大功率晶体管	44
1.1 自动控制的含义	1	2.4.3 大功率晶体管脉	
1.2 自动控制系统的基本原理	1	宽调制型直流调压电路	47
1.2.1 自动控制系统概述	1	2.5 正弦脉宽调制的交—直—	
1.2.2 开环控制系统和		交变压变频电路	50
闭环控制系统	3	2.5.1 电路的组成	50
1.3 自动控制系统的基本组成	5	2.5.2 正弦脉宽调制(SPWM)交流	
1.4 自动控制系统的基本类型	6	变压变频电路的基本原理	51
1.4.1 按照输入量的变化规律来分	6	2.6 常用的调节器	54
1.4.2 按照系统传递信号		2.6.1 比例(P)调节器	54
对时间的关系来分	6	2.6.2 积分(I)调节器	55
1.4.3 按照系统输出量和		2.6.3 比例积分(PI)调节器	56
输入量的关系来分	7	2.6.4 比例积分微分(PID)调节器	57
1.5 对自动控制系统的基本要求	7	2.7 习题	58
1.6 习题	9	第3章 典型自动控制	
第2章 自动控制系统的基本部件	10	系统的工作原理	60
2.1 常用的检测元件	10	3.1 水位控制系统	60
2.1.1 温度检测元件	10	3.1.1 系统的组成	60
2.1.2 线位移检测元件	13	3.1.2 系统的工作原理	61
2.1.3 角位移检测元件	16	3.2 具有转速负反馈的晶	
2.1.4 转速检测元件	20	闸管直流调速系统	61
2.2 伺服电动机	22	3.2.1 系统的组成	62
2.2.1 直流伺服电动机	22	3.2.2 系统的工作原理	63
2.2.2 交流伺服电动机	24	3.3 具有电压负反馈和电流正	
2.3 晶闸管直流交流调压电路	26	反馈的晶闸管直流调速系统	64
2.3.1 晶闸管	26	3.3.1 电压负反馈调速系统	64
2.3.2 单相桥式全控整流电路	28	3.3.2 电压负反馈和电流正	
2.3.3 三相可控整流电路	31	反馈的直流调速系统	65
2.3.4 晶闸管的触发电路		3.4 转速与电流双闭环直流调速系统	66
与保护电路	34	3.4.1 系统的组成	66
2.3.5 交流调压电路	40	3.4.2 系统的工作原理	68
2.4 大功率晶体管脉宽调制(PWM)		3.5 晶闸管交流调压位置随动系统	70
型直流调压电路	43	3.5.1 系统的组成	70
2.4.1 DC—DC 变换器	43	3.5.2 系统的工作原理	72

3.5.3 位置随动系统与 调速系统的比较.....	73	5.1.3 传递函数的性质.....	98
3.6 全控型电力电子器件组成的 SPWM 变压变频调速系统.....	73	5.2 典型环节的传递函数.....	99
3.6.1 变频调速的基本控制方式.....	73	5.2.1 比例环节.....	99
3.6.2 模拟式 SPWM 变压变频 调速系统.....	75	5.2.2 惯性环节.....	100
3.6.3 微机控制的 SPWM 变压 变频调速系统简介.....	76	5.2.3 微分环节.....	101
3.7 习题.....	77	5.2.4 积分环节.....	102
第 4 章 拉普拉斯变换	79	5.2.5 振荡环节.....	104
4.1 拉氏变换.....	79	5.2.6 延时环节.....	106
4.1.1 拉氏变换的定义.....	79	5.3 系统的传递函数方框图及其简化.....	107
4.1.2 典型时间函数的拉氏变换.....	79	5.3.1 传递函数方框图.....	107
4.2 拉氏变换的性质.....	83	5.3.2 传递函数方框图的 等效变换.....	110
4.2.1 线性性质.....	83	5.3.3 直流电动机与伺服 电动机的传递函数.....	114
4.2.2 实数域的位移 定理(延时定理).....	83	5.4 反馈控制系统的传递函数.....	115
4.2.3 复数域的位移 性质(平移定理).....	84	5.4.1 输入量作用下系统 传递函数和系统的输出.....	115
4.2.4 相似性质.....	85	5.4.2 扰动量作用下的闭环 传递函数和系统的输出.....	116
4.2.5 原函数导数的象 函数(微分定理).....	85	5.4.3 输入量和扰动量同时 作用时系统总的输出.....	116
4.2.6 原函数积分的象 函数(积分定理).....	86	5.5 典型自动控制系统的数学模型.....	117
4.2.7 终值定理.....	87	5.5.1 水位控制系统.....	117
4.2.8 初值定理.....	87	5.5.2 具有转速负反馈的 直流调速系统.....	117
4.2.9 卷积定理.....	88	5.5.3 转速、电流双闭环 直流调速系统.....	118
4.3 拉氏反变换.....	88	5.5.4 位置随动系统.....	118
4.3.1 拉氏反变换的概念.....	88	5.6 习题.....	119
4.3.2 部分分式展开法.....	89	第 6 章 频率特性	121
4.4 用拉氏变换解线性定常微分方程.....	92	6.1 频率特性的基本概念.....	121
4.5 习题.....	93	6.1.1 频率响应与频率特性.....	121
第 5 章 系统的数学模型	95	6.1.2 频率特性与传递函数 的关系.....	122
5.1 传递函数.....	95	6.1.3 频率特性的求法.....	124
5.1.1 传递函数的定义.....	95	6.2 频率特性的图示方法.....	125
5.1.2 传递函数的求法.....	96	6.2.1 频率特性的极坐标图.....	125
		6.2.2 频率特性的对数坐标图.....	126

6.3 最小相位系统和非最小相位系统.....138	8.2 与输入信号有关的稳态误差..... 169
6.3.1 最小相位传递函数与 最小相位系统.....138	8.2.1 跟踪稳态误差 e_{ssr} 169
6.3.2 产生非最小相位的环节.....140	8.2.2 e_{ssr} 与系统结构参数的关系... 170
6.4 系统的闭环频率特性.....140	8.2.3 e_{ssr} 与 $r(t)$ 之间的系统..... 171
6.4.1 闭环频率特性.....141	8.2.4 由系统开环对数频率 特性分析系统的稳态性能..... 173
6.4.2 频率特性的特征量.....142	8.3 扰动作用下的稳态误差..... 173
6.5 习题.....143	8.3.1 扰动稳态误差 e_{ssd} 的求取..... 173
第 7 章 自动控制系统的 稳定性分析.....145	8.3.2 扰动稳态误差与 系统结构参数间的关系..... 174
7.1 系统稳定性的初步概念.....145	8.4 系统稳态性能分析举例..... 175
7.1.1 稳定的概念和定义.....145	8.5 习题..... 178
7.1.2 造成系统不稳定的原因.....146	第 9 章 瞬态响应分析..... 180
7.1.3 系统稳定的充要条件.....146	9.1 时间响应的概念..... 180
7.2 劳斯稳定判据.....147	9.1.1 控制系统典型的输入信号..... 180
7.3 奈奎斯特稳定判据.....150	9.1.2 瞬态响应和稳态响应..... 180
7.3.1 奈奎斯特稳定判据.....151	9.2 一阶系统的时间响应..... 181
7.3.2 奈氏判据应用举例.....152	9.2.1 一阶系统的数学模型..... 181
7.3.3 穿越的概念.....155	9.2.2 一阶系统的单位阶跃响应..... 182
7.3.4 对数频率判据.....155	9.2.3 一阶系统的单位脉冲响应..... 183
7.4 系统的相对稳定性.....156	9.2.4 响应之间的关系..... 184
7.4.1 相位裕量.....158	9.3 二阶系统的时间响应..... 184
7.4.2 幅值裕量.....158	9.3.1 典型二阶系统的数学模型..... 184
7.5 典型自动控制系统稳定性分析.....158	9.3.2 二阶系统的单位阶跃响应..... 186
7.5.1 二阶系统的稳定性分析.....159	9.4 瞬态响应的性能指标..... 188
7.5.2 典型三阶系统的稳 定性分析.....160	9.4.1 性能指标及其计算..... 188
7.5.3 延迟环节对系统 稳定性的影响.....163	9.4.2 二阶系统计算举例..... 192
7.6 习题.....165	9.5 频域性能指标与时域性能 指标间的关系..... 195
第 8 章 自动控制系统的 稳态性能分析.....167	9.5.1 相对谐振峰值与控制系统 振荡性能指标间的关系..... 195
8.1 系统稳态误差的概念.....167	9.5.2 谐振频率及带宽与时域 性能指标间的关系..... 197
8.1.1 系统的误差与偏差.....167	9.5.3 相位裕量及穿越频率与 时域性能指标之间的关系..... 199
8.1.2 误差的一般计算.....168	9.6 习题..... 201
8.1.3 系统的稳态误差和 稳态偏差.....169	第 10 章 自动控制系统的校正..... 203
	10.1 系统的校正..... 203

10.1.1 校正的含义	203	10.3.2 PID 调节器的设计	220
10.1.2 校正的实质	203	10.4 反馈校正	223
10.1.3 校正方式	204	10.4.1 反馈校正的作用	224
10.2 串联校正	205	10.4.2 反馈校正应用举例	225
10.2.1 相位超前校正	206	10.5 顺馈补偿	227
10.2.2 相位滞后校正	209	10.5.1 输入顺馈补偿	227
10.2.3 相位滞后—超前校正	212	10.5.2 扰动顺馈补偿	228
10.3 PID 校正	215	10.6 习题	229
10.3.1 PID 控制规律分析	217	参考文献	233

第 1 章 自动控制系统的一般概念

随着工业生产和科学技术的不断发展,自动控制技术越来越显示出它的重要性,并为人们所瞩目。掌握有关自动控制的知识就显得尤为重要。本章主要介绍自动控制的含义、基本工作原理、系统的组成以及对系统的基本要求。

1.1 自动控制的含义

所谓自动控制,就是在没有人直接参与的情况下,通过控制装置(或称控制器)使被控制对象或过程自动地按照预定的规律运行。

例如程序控制机床能够按预先排定的工艺程序自动地进刀切削,加工出预期几何形状的零件。焊接机器人能自动地跟踪预期轨线移动,焊出高质量的产品。火炮根据雷达指挥仪传来的信息,能够自动地改变方位角和俯仰角,随时跟踪目标,瞄准弹着点。又诸如对压力、温度、湿度、流量、转速以及原料、燃料成分比例方面的控制等。所有这些自动控制系统的例子,尽管它们的结构和功能各不相同,但可以发现它们有共同的规律,即它们都是一个或一些被控制的物理量按照另一个物理量,即控制量的变化而变化,或保持恒值。一般地说,如何使被控制量按照给定的控制量的变化规律而变化,这就是一个控制系统所要解决的最基本的问题。

自动控制技术在各个领域中的广泛应用,不仅提高了劳动生产率和产品质量,改善了劳动条件,而且在人类征服自然、探索新能源、发展空间技术和改善人民物质生活等方面都起着越来越重要的作用。可以说,自动控制已成为推动经济发展,促进社会进步所必不可少的一门技术。

1.2 自动控制系统的基本原理

1.2.1 自动控制系统概述

首先我们定义,用以完成一定任务的一些部件(或称元件)的组合为系统。系统是一个有机集合的整体,具有其目的性。不同的系统所要完成的任务也不同。有的要求某物理量(如温度、压力、转速等)保持恒定;有的则要求按一定规律变化。我们将这些需要控制的物理量定义为系统的被控量或输出量。用来使系统具有预期性能或预期输出的激励信号定义为系统的控制量或输入量。而将使被控量偏离预期值的各种因素称为扰动量。设法消除扰动因素影响从而保持被控制量按预期要求变化的过程称为控制过程。

下面让我们研究一下图 1.1 所示电炉箱恒温自动控制系统是如何实现恒温控制的。

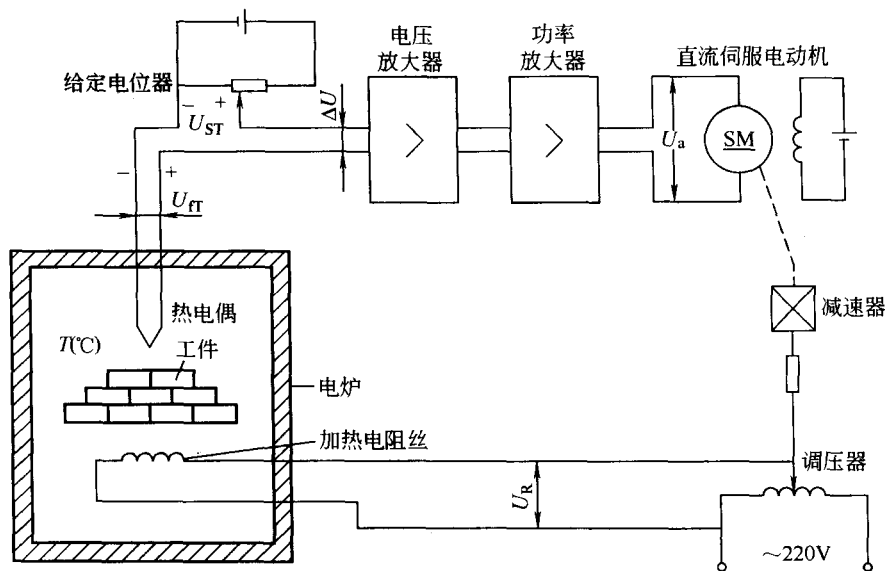


图 1.1 电炉箱恒温自动控制系统

在这个控制系统中，被控制量为炉温 T ，炉温的预期值是由给定电位器设定的电压 U_{ST} 所确定，也就是说 U_{ST} 是该系统的输入量。当扰动(工件的增减、炉壁散热、电网电压波动等)引起炉温变化后，作为检测元件的热电偶，将炉内实际温度转换成相对应的电压信号 U_{FT} (称为反馈信号电压)，反馈到输入端与给定电压 U_{ST} 进行比较，所得的结果即为偏差信号 $\Delta U = U_{ST} - U_{FT}$ 。 ΔU 经电压放大器、功率放大器放大后，去控制执行电机(电枢控制式直流电动机)的旋转速度与方向，再经减速器带动调压器动触点移动，以改变加热电流的大小来调节炉温。

当炉温偏低时， $U_{FT} < U_{ST}$ ，则 $\Delta U > 0$ ，此时偏差电压极性为正，电动机正转，调压器动触点右移，加热电流加大，炉温上升，直到炉温升至预期值， $U_{FT} = U_{ST}$ ， $\Delta U = 0$ ，电动机停转。反之，当炉温偏高时，则 $\Delta U < 0$ ，电动机反转，调压器动触点左右移，加热电流减小，炉温下降至预期值。

现将图 1.1 画成图 1.2 所示职能方框图形式。图中方框代表各个组成部分， $\otimes$ 代表比较元件，方框两边直线及其标注代表该组成部分在控制过程中相互作用的物理量，箭头代表作用信号传递的方向。采用职能方框图可清晰地表明系统各组成部分及其相互作用的情况。还可知，被控制量(炉温)就是系统的输出量，给定电压信号就是系统的输入量。信号是沿着箭头所指方向传递，从职能方框图中不难发现两条信号传递的路径。一条是从输入端向输出端方向传递，这种传递称为顺馈；另一条是从输出端向输入端方向传递，称为反馈。也就是说，反馈就是从系统输出端取出信号，经过某种装置(通常称为反馈环节)变换后返回到输入端，与输入信号进行比较。这种返回到输入端的信号称为反馈信号。输入信号与反馈信号比较的结果则为偏差。

通过上面的分析可知，为了对炉温进行自动控制，控制系统必须具有以下两项基本的职能，一是必须对被控制量进行检测并将它反馈到系统的输入端与控制量相减(即负反馈)，得到偏差信号；二是必须对偏差信号进行适当的变换和放大，从而产生对被控制量

的再控制作用，这种再控制作用应使偏差减小或消除，以使被控制量重新保持在预期值上。

这种基于反馈基础上的“检测偏差用以纠正偏差”的控制原理称为反馈控制原理。

我们还可举出许多的例子。尽管不同的系统实现自动控制的装置各不相同，但反馈控制的原理却是相同的。反馈控制是实现自动控制的最基本的方法，并得到了广泛应用。它不仅可以实现对物理量的恒值控制，而且还可以实现被控制量复现控制量的变化规律的自动控制。

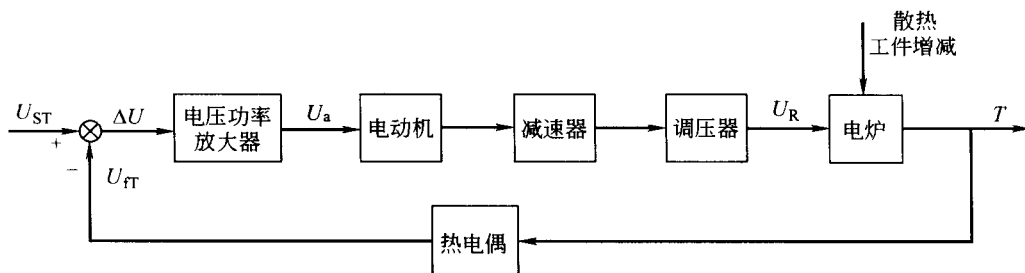


图 1.2 电炉箱恒温控制系统职能方框图

1.2.2 开环控制系统和闭环控制系统

控制系统按照是否设有反馈环节，可以分为两类：一类是开环控制系统，另一类是闭环控制系统。

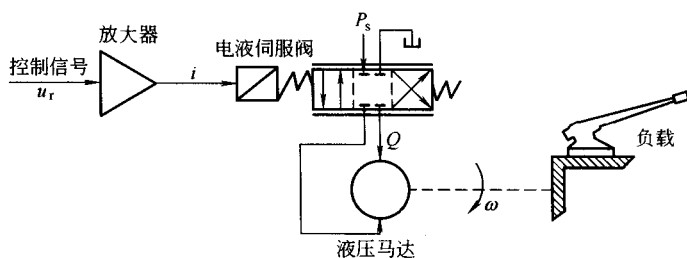
1. 开环控制系统

如果系统的输出端和输入端之间不存在反馈回路，输出量对系统的控制作用没有影响时，这样的系统称为开环控制系统。图 1.3 为一开环速度控制系统。它根据控制信号的大小和方向来控制负载转速的大小和方向。原理很简单，控制信号通过放大器放大，输出一电流给伺服阀，伺服阀则供给一定流量的压力油给液压马达，带动负载以一定的转速运动。这个系统对被控量(转速)不进行任何检测，因为没有反馈也就谈不上跟控制量进行比较，以产生偏差来对系统进行再控制。它仅是根据控制信号对转速加以控制的。因此，开环控制系统的精度主要取决于系统的校正精度，取决于在工作过程中保持校正值以及组成系统的元件特性和参数值的稳定程度。

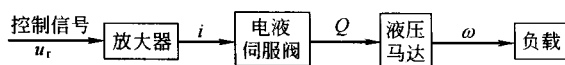
一旦系统受到扰动作用，如图 1.3 所示的系统，当负载力矩增加时，由于阀的流量随负载压力的增加而减小，以及液压系统内漏损增加等原因，就会造成液压马达转速的降低。因为没有反馈比较，系统不具备纠偏的能力，因此，使开环系统的精度降低。对扰动造成的误差无法自动补偿。但是开环系统一般结构简单，系统稳定性好。一般说来，当系统控制量的变化规律能预先确知，并且对系统中可能出现的扰动可以做到有效抑制时，采用开环控制系统有其优越性。当无法预计的扰动因素使被控制量产生的偏离超过允许限度时，开环控制系统便无法胜任了，这时就应考虑采用闭环控制系统。

2. 闭环控制系统

凡是系统的输出端与输入端之间存在反馈回路，即输出量对控制作用能有影响的系统，叫做闭环控制系统。如果对图 1.3 所示开环控制系统引入反馈回路，即用测速发电机检测被控制量(转速)，然后反馈到输入端则构成闭环控制系统，如图 1.4 所示。

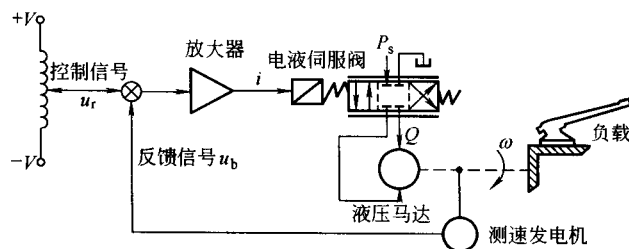


(a) 系统原理图

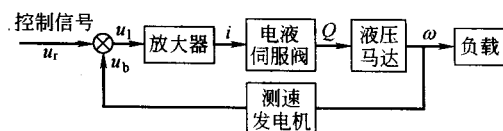


(b) 系统方框图

图 1.3 开环速度控制系统



(a) 系统原理图



(b) 系统方框图

图 1.4 闭环速度控制系统

闭环控制系统突出的优点是采用了负反馈，因而被控制量对于外部或内部扰动所引起的误差能够自动纠正。这样就有可能采用精度不太高而成本比较低的元件构成控制质量较高的控制系统。当然，闭环控制系统要增加检测、反馈比较等环节，会使系统复杂、成本增加。同时会带来副作用，当系统参数选得不适当时，将会造成系统振荡，甚至使系统完全失去控制(即系统不稳定)而无法正常工作。这是采用闭环控制时必须加以重视并需认真解决的问题。

1.3 自动控制系统的基本组成

为了组成一个自动控制系统，必须包含以下各类基本元件。

(1) 任何控制系统必定有其控制对象，即系统所要操纵的对象。控制对象的输出就是系统的被控量。

(2) 系统工作时都要加上一定的激励信号，用来产生并可调节系统控制量的元件为给定元件。

(3) 为了检测被控制量，系统需要有检测元件。由于检测元件的精度直接影响控制系统的精度，所以应尽可能采用精度高的检测元件和合理的检测线路。有的系统检测元件的输出就是反馈信号，而有的系统将检测元件的输出再经分压和滤波等才形成反馈信号，此时将检测、分压和滤波等合并称为反馈环节。

(4) 为了对反馈信号和控制量进行比较，以便产生偏差信号，因此系统必须有比较元件。比较元件在多数控制系统中常常是和检测元件(或反馈环节)或线路结合在一起的。在比较元件处，控制量和反馈信号进行叠加或者说求和运算，一定要注意两者的极性关系。

(5) 由于偏差信号一般都比较微弱，需要进行变换放大，使它具有足够的幅值和功率，因此系统还必须具有放大元件。

(6) 系统需要根据偏差信号产生的再控制作用，去驱动控制对象使被控量按控制要求的变化规律动作，这就要求系统还应具有执行元件。

(7) 实践证明，按反馈原理由上述基本元件简单组合起来的控制系统往往是不能完成任务的。为了改善系统的控制性能还需要在系统中加进校正元件。校正元件可以加在偏差信号至被控信号间的前向通道中；也可以加在反馈通道中。前者称为串联校正，后者称为反馈校正。

由上述各基本元件组成的自动控制系统的职能方框图如图 1.5 所示。

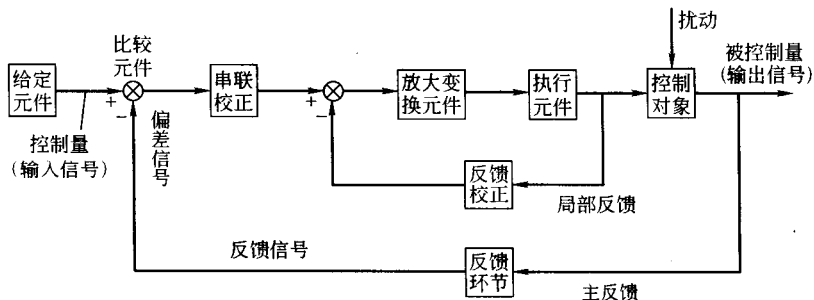


图 1.5 自动控制系统的职能方框图

一般说来，尽管自动控制系统的控制任务各不相同，以及所使用元件结构和能源形式均有所不同，但就其信号的传递、变换的职能来说，都可抽象成图 1.5 所示的职能方框图。

1.4 自动控制系统的基本类型

自动控制系统的种类很多, 应用的范围也很广, 它们的结构和完成的任务也各不相同。因此, 控制系统的分类方法也很多, 其中有以下几种主要分类法。

1.4.1 按照输入量的变化规律来分

1. 恒值控制系统

恒值控制系统的特点是: 系统的控制量为恒定的常量, 而要求系统的被控制量也保持在相对应的常量上。确切地说, 控制量可根据要求预选某常量。

恒值控制系统是最常见的一类自动控制系统, 如自动调速系统、恒温控制系统、恒张力控制系统、恒压力控制系统等。

对恒值控制系统, 着重研究各种扰动对被控制量的影响, 以及如何克服扰动影响将实际输出量保持在预期值上。

2. 随动系统

随动系统的特点是: 系统的控制量是变化着的(常常还是随机的), 要求被控量能够准确、迅速复现控制量的变化。

随动系统在工业和国防上有着极为广泛的应用。如火炮控制系统、雷达自动跟踪系统、刀架跟踪系统、各种电信号记录仪等。

对随动系统, 常常着重于跟随的准确性和跟随的快速性。

3. 程序控制系统

输入量按预定程序变化的系统。例如, 数控机床工作台移动系统就是程序控制系统。程序控制系统可以是开环的, 也可以是闭环的。

1.4.2 按照系统传递信号对时间的关系来分

1. 连续控制系统

当系统各元件的输入信号是时间 t 的连续函数, 各元件相应的输出信号也是时间 t 的连续函数时, 这种系统称为连续控制系统。连续系统的性能一般是用微分方程来描述的。信号的时间函数允许有间断点, 或者在某一时间范围内为连续函数。

2. 离散控制系统

离散控制系统又称采样数据系统。它的特点是系统中有的信号是断续量, 即信号在特定的采样时刻才取值, 而在相邻采样时刻的间隔中信号是不确定的。通常, 采用数字计算机控制的系统都是离散控制系统。

1.4.3 按照系统输出量和输入量的关系来分

1. 线性控制系统

线性控制系统是由线性元件(即元件的静特性呈线性关系)构成的系统。系统的性能可以用线性微分方程来描述。线性系统的一个重要性质就是可以应用叠加原理,即几个扰动或控制量同时作用于系统时,其总的输出等于每个单独作用时的输出之和。

2. 非线性控制系统

非线性控制系统就是由具有非线性性质(例如饱和、死区、摩擦、间隙等)元件所构成的系统。事实上,只要系统中有一个非线性性质的元件,系统就是非线性系统。系统的性能往往要采用非线性方程来描述。叠加原理对非线性系统无效。

当然,除了以上的分类方法外,还有其他一些方法,例如按系统主要组成元件的物理性质来分,又可分为电气控制系统、机械控制系统、液压控制系统、电气-液压控制系统等。又如按输入、输出信号的数量来分,又可分为单输入-单输出系统、多输入-多输出系统。本书只讨论连续控制的线性系统。

1.5 对自动控制系统的基本要求

任何一个自动控制系统的工作必须是稳定的,这是对自动控制系统提出的最基本的要求。除此之外,它还需要在阻尼程度、响应输入信号的速度及控制精度等方面满足一定的要求。

对自动控制系统的基本要求,通常是通过系统响应特定输入信号(或称试验信号)的过渡过程及稳态的一些特征值来表征。

在本书中,控制量用 $r(t)$ 来表示;被控制量用 $c(t)$ 来表示;偏差量用 $\varepsilon(t)$ 来表示;扰动量用 $d(t)$ 来表示。

过渡过程是指系统的被控制量 $c(t)$,在受到控制量或扰动量作用下,由原来的平衡状态(或称稳态)变化到新的平衡状态的过程。

自动控制系统响应单位阶跃输入信号(见图 1.6)时的过渡过程的一般形式如图 1.7 所示。

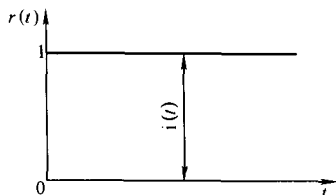


图 1.6 单位阶跃信号

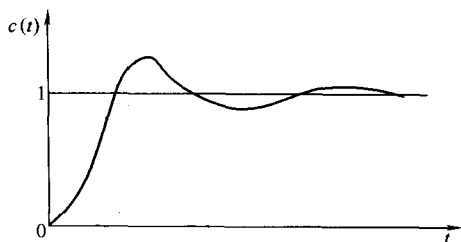


图 1.7 单位阶跃信号作用下系统的过渡过程

当 $t \geq t_s$ 时, 若有 $|c(t) - c(\infty)| \leq \Delta c(\infty)$, 则定义 t_s 为系统的过渡过程时间(或称调整时间)。其中 Δ 为允许误差, 一般取为 0.02 或 0.05。

如果在过渡过程中, 出现 $c(t) > c(\infty)$ 的情况, 则表示系统产生了超调现象。超调信号的严重程度用超调量 σ 来描述。超调量 σ 的定义是

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

式中, $c(t_p)$ 为 $c(t)$ 的峰值。

系统的过渡过程时间 t_s 和超调量 σ 是描述系统过渡过程的两个重要性能指标。 t_s 越小, 说明系统从一个稳态过渡到另一个稳态所需要的时间越短, 反之则越长。因此, t_s 是表征系统响应输入信号速度的一项性能指标。 σ 越小, 则说明系统的过渡过程进行得越平稳。值得注意的是, 超调严重的系统, 不仅使组成系统的各个元件处于恶劣的工作条件下, 而且过渡过程在长时间内不能结束, 致使系统的误差不能很快减小到允许范围内。

按照过渡过程评价系统性能, 除了 t_s 和 σ 两项指标外, 有时还需计算 $c(t)$ 穿越 $c(\infty)$ 的次数。定义 $c(t)$ 穿越 $c(\infty)$ 水平线次数的一半为系统过渡过程的振荡次数 N 。 N 越小, 说明系统的阻尼性能越好。有时还通过过渡过程第一次到达 $c(\infty)$ 的时间 t_r (称为上升时间) 和第一次到达峰值的时间 t_p 来表征系统响应输入信号的快速性能。

系统被控制信号 $c(t)$ 稳态时的预期值与实际值之差, 称为稳态误差 e_{ss} , 它是表征系统控制精度的一项性能指标。 e_{ss} 越小, 系统精度越高。 $e_{ss} = 0$, 称为无静差系统。 $e_{ss} \neq 0$, 称为有静差系统。

通常, 将调整时间 t_s 、上升时间 t_r 、峰值时间 t_p 、超调量 σ 和振荡次数 N 称为动态性能指标。其中 t_s 、 t_r 和 t_p 表征系统的快速性能, σ 和 N 表征系统的阻尼性能, 即平稳性。而稳态误差 e_{ss} 是用以表征稳态性能的一项指标。

如果某些系统要求过渡过程单调上升, 并逐渐逼近被控制信号的稳态值 $c(\infty)$, 也就是要求 $\sigma = 0$, $N = 0$ 时, 则对系统的结构形式和元件参数均有严格要求。这时的过渡过程曲线如图 1.8 中的曲线①所示。

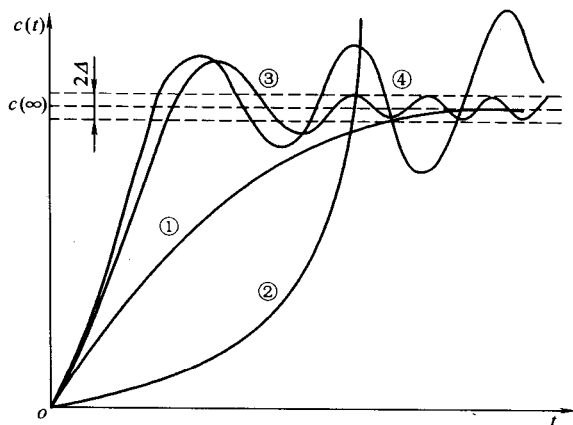


图 1.8 控制系统的过渡过程曲线

如果系统的过渡过程 $c(t)$ 随时间的推移而发散, 如图 1.8 中的曲线②或曲线④所示, 此时系统便不可能达到平衡状态, 我们把这类系统称为不稳定系统。显然不稳定的系统在实际中是不能应用的, 因为它不满足对控制系统提出的最基本的要求。

如将图 1.7 所示的多数系统通常具有的过渡过程曲线一并绘制在图 1.8 中, 如图中曲线③所示。

1.6 习 题

1. 试比较开环控制系统和闭环控制系统的优缺点。
2. 日常生活中有许多闭环和开环控制系统。试举几个具体例子, 并说明它们的工作原理。
3. 组成自动控制系统的主要元件有哪些? 它们各起什么作用?
4. 恒值控制系统和随动系统各自的主要特点是什么?
5. 图 1.9 所示为仓库大门自动控制系统。试说明自动控制大门开启和关闭的工作原理。如果大门不能全开或全关, 则怎样进行调整? 画出系统的职能方框图。

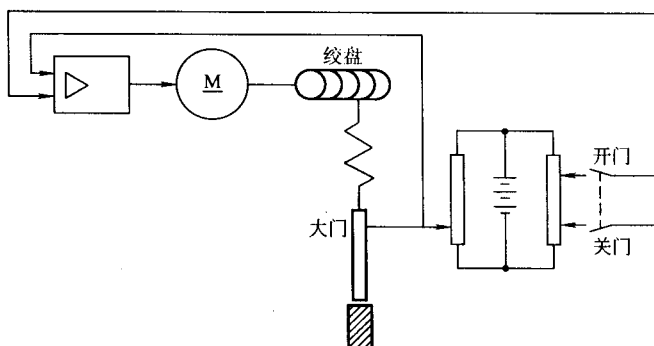


图 1.9 题 5 图