



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
电气工程、自动化专业规划教材

自动控制原理 (第4版)

◆ 刘文定 谢克明 主编



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
电气工程、自动化专业规划教材

自动控制原理

(第4版)

刘文定 谢克明 主 编
谢 刚 刘洪锦 续欣莹 谷海青 参 编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,全面地阐述自动控制的理论及应用。全书共分8章和2个附录,主要内容包括:线性系统的数学模型、时域响应分析、根轨迹法、频域特性分析、控制系统的设计与校正、非线性系统分析、采样控制系统,以及在MATLAB/Simulink支持下对控制系统进行计算机辅助分析与设计。全书内容取材新颖,阐述深入浅出。为便于自学,各章均附有典型题详解、精选习题和考研试题。

本书可作为高等院校自动化等专业的本科生教材,也可供相关专业的研究生或从事自动化技术工作的人员参考。

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

自动控制原理 / 刘文定, 谢克明主编. — 4版. — 北京:电子工业出版社, 2018. 1

电气工程、自动化专业规划教材

ISBN 978-7-121-33248-7

I. ①自… II. ①刘… ②谢… III. ①自动控制理论—高等学校—教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第306293号

策划编辑: 凌 毅

责任编辑: 凌 毅

印 刷: 北京京科印刷有限公司

装 订: 北京京科印刷有限公司

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: 20.25 字数: 545千字

版 次: 2004年7月第1版

2018年1月第4版

印 次: 2018年1月第1次印刷

定 价: 45.00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 zlts@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)88254528,lingyi@phei.com.cn。

第 4 版前言

“自动控制原理”是自动化学科的重要理论基础课程,是专门研究有关自动控制系统中基本概念、基本原理和基本方法的一门课程,也是高等学校自动化类专业的一门核心基础理论课程。学好自动控制理论,对掌握自动化技术有着重要作用。

2004年7月,初版教材出版发行,为适应自动化学科的发展,扩宽专业面、优化整体教学体系的教学改革形势,按照“理论讲透,重在应用”的原则,总结了作者多年的教学经验和课程教学改革成果,参考了国内外控制理论及应用发展的方向,经反复讨论编写而成。2009年1月,第2版出版发行,并入选普通高等教育“十一五”国家级规划教材;2013年1月,第3版出版发行。几年来,控制理论的教学在高等院校有了较大的发展,许多选用本书的院校提出了一些宝贵的建议,为此,我们进行了第4版的修订。

第4版教材分8章及两个附录。主要内容分为4大部分:第一部分包括基本概念,线性系统的数学模型,时域响应分析,根轨迹分析,频域特性分析,控制系统设计与校正,这些内容属于线性定常连续控制系统问题,阐明了自动控制的3个基本问题,即模型、分析和控制。第二部分阐述非线性系统的基本理论和分析方法,包括相平面法和描述函数法,目的是为学生进一步学习后续课程打下基础。第三部分有意加强了作为数字控制理论基础的采样控制系统的讨论,重点介绍了采样系统的数学模型、稳定性分析与采样系统的综合校正。第四部分为MATLAB/Simulink软件实现控制系统的辅助分析和设计,以培养学生现代化的分析与设计能力,适应21世纪教学现代化的发展要求,并在每章最后附相关应用。

第4版的内容保留了第3版增补的内容并进行了优化:线性常微分方程求解,传递函数零点和极点对系统输出的影响,方框图利用梅逊公式求传递函数,实验方法建立系统的数学模型;二阶系统的过阻尼动态分析,单位斜坡响应及非零初始条件下的输出响应分析,高阶系统的动态性能分析;根轨迹与系统性能、闭环零点、极点与开环零点、极点之间的关系,多变量根轨迹、零极点对根轨迹的影响,利用根轨迹分析系统性能;频率特性的图形、利用频率特性分析系统品质、MATLAB/Simulink频域特性分析,频率法串联校正、复合校正实例;控制系统设计的MATLAB/Simulink实现;非线性系统相平面图的解析绘制、由相轨迹求取时间、非线性系统的稳定性分析及非线性系统的简化;采样过程的数学描述、采样周期的选择等。

第4版教材重点对考研试题进行了更新和优化。为避免过于数学化,第4版教材对部分公式的推导进行了简化。第4版教材是面向应用型大学人才培养需要的一本教材,适用对象为工程应用型自动化专业的本科学生,也可供电气信息类其他专业的研究生以及工程技术人员使用。在编写过程中,作者充分注意到了以下几点:

(1) 注重体系的基本结构,强调控制理论的基本概念、基本原理和基本方法,内容精炼,重点突出,不以细节为主。

(2) 以学生为本,加强能力培养,遵照认识规律,内容叙述力求深入浅出、层次分明;注意理论的完整性与工程实用性相结合,培养学生的工程意识。

(3) 引入了MATLAB/Simulink软件实现控制系统的辅助分析和设计,以培养学生现代化的分析与设计能力,适应21世纪教学现代化的发展要求。

(4) 为便于不同层次的学生和读者自学,各章都附有较丰富的有难度层次的典型例题和习题及习题详解,特别是为满足考研学生的需要,增加了考研试题。

(5) 为拓宽学生的知识面,满足学生主动学习的兴趣及激发学生的求知欲,我们在电子课件中选入了一些来源于实际控制工程的案例,便于学生理解和消化控制知识。

本书适用于 54~64 学时课内教学。本书由刘文定和谢克明主编。参加编写的有:谢克明(前言、第 1 章、附录 A、B),谢刚(第 2、3 章),续欣莹(第 4 章),刘文定(第 5、6、7 章),刘洪锦、谷海青(第 8 章)。全书由刘文定和谢克明统稿。借此衷心感谢本书的责任编辑凌毅女士,同时对在本书编写过程中给予帮助的各位人员表示诚挚的谢意。

本书提供配套的电子课件,可登录电子工业出版社的华信教育资源网: www.hxedu.com.cn,注册后免费下载。

由于笔者水平有限,书中错误和不妥之处难免,恳请广大读者批评指正。

刘文定 谢克明

2017 年 11 月

目 录

第 1 章 绪论	1	2.4.1 方框图概述	23
1.1 开环控制和闭环控制	2	2.4.2 系统方框图的构成	24
1.1.1 开环控制	2	2.4.3 环节间的连接	26
1.1.2 闭环控制(反馈控制)	2	2.4.4 方框图的变换和简化	27
1.2 自动控制系统的组成及术语	3	2.5 信号流图	30
1.3 自动控制系统的类型	4	2.5.1 信号流图的定义	30
1.3.1 按信号流向划分	4	2.5.2 系统的信号流图	30
1.3.2 按系统输入信号划分	4	2.5.3 信号流图的定义和术语	31
1.3.3 线性系统和非线性系统	5	2.5.4 信号流图的性质及简化	32
1.3.4 定常系统和时变系统	5	2.5.5 信号流图的增益公式	32
1.3.5 连续系统和离散系统	5	2.6 MATLAB/Simulink 中数学模型的	
1.3.6 单输入单输出系统与多输入		表示	35
多输出系统	5	2.6.1 传递函数	36
1.4 自动控制系统性能的基本要求	5	2.6.2 传递函数的特征根及零、	
1.5 自动控制课程的主要任务	6	极点图	36
1.5.1 阶跃函数	6	2.6.3 控制系统的方框图模型	38
1.5.2 斜坡函数(等速度函数)	7	2.6.4 控制系统的零、极点模型	39
1.5.3 抛物线函数(等加速度函数)	7	2.6.5 状态空间表达式	39
1.5.4 脉冲函数	7	本章小结	40
1.5.5 正弦函数	8	本章典型题、考研题详解及习题	41
1.6 自动控制系统实例	8	第 3 章 控制系统的时域分析	52
1.6.1 造纸机分部传动控制系统	8	3.1 线性定常系统的时域响应	52
1.6.2 谷物湿度控制系统	8	3.2 控制系统时域响应的性能指标	53
1.6.3 烘烤炉温度控制系统	9	3.2.1 稳态性能指标	53
本章小结	9	3.2.2 动态性能指标	53
本章典型题、考研题详解及习题	9	3.3 线性定常系统的稳定性	54
第 2 章 线性系统的数学模型	12	3.3.1 稳定性的概念	54
2.1 线性系统的微分方程	12	3.3.2 线性定常系统稳定的充分必要	
2.2 微分方程的线性化	15	条件	54
2.3 传递函数	17	3.3.3 劳斯判据(Routh 判据)	56
2.3.1 传递函数的概念	17	3.3.4 赫尔维茨判据(Hurwitz	
2.3.2 传递函数的特点	18	判据)	59
2.3.3 典型环节的传递函数	19	3.3.5 系统参数对稳定性的影响	60
2.4 方框图	23	3.3.6 相对稳定性和稳定裕量	61
		3.4 系统的稳态误差	62

3.4.1	误差及稳态误差的定义	62	4.4.1	参数根轨迹	110
3.4.2	稳态误差分析	63	4.4.2	多参数根轨迹簇	112
3.4.3	稳态误差的计算	64	4.4.3	正反馈系统的根轨迹 (零度根轨迹)	112
3.4.4	应用静态误差系数计算给定信号 作用下的稳态误差	65	4.5	根轨迹分析系统的性能	114
3.4.5	扰动信号作用下的稳态误差与 系统结构的关系	68	4.5.1	根轨迹确定系统的闭环 极点	114
3.4.6	改善系统稳态精度的途径	68	4.5.2	根轨迹分析系统的动态 特性	115
3.4.7	系统的动态误差系数	69	4.5.3	开环零点对根轨迹的影响	117
3.5	一阶系统的时域响应	70	4.5.4	开环极点对根轨迹的影响	118
3.5.1	数学模型	70	4.6	MATLAB 绘制系统的根轨迹	119
3.5.2	单位阶跃响应	70	本章小结		122
3.5.3	性能指标	71	本章典型题、考研题详解及习题		123
3.5.4	一阶系统的单位脉冲响应	71	第 5 章 控制系统的频域分析		133
3.6	二阶系统的时域响应	71	5.1	频率特性	133
3.6.1	二阶系统的数学模型	71	5.1.1	频率特性概述	133
3.6.2	二阶系统的单位阶跃响应	72	5.1.2	频率特性的求取	135
3.6.3	二阶系统的单位脉冲响应	76	5.1.3	频域性能指标	136
3.7	高阶系统的瞬态响应	78	5.2	典型环节的频率特性	136
3.7.1	高阶系统的瞬态响应	78	5.2.1	概述	136
3.7.2	高阶系统的降阶	79	5.2.2	典型环节的频率特性	138
3.7.3	零、极点对阶跃响应的影响	80	5.3	系统的开环频率特性	144
3.8	用 MATLAB/Simulink 进行瞬态 响应分析	82	5.3.1	系统的开环对数频率特性	144
3.8.1	单位脉冲响应	82	5.3.2	系统开环极坐标图 (奈氏图)	148
3.8.2	单位阶跃响应	82	5.3.3	最小相位和非最小相位 系统	150
3.8.3	斜坡响应	83	5.4	奈奎斯特稳定判据	152
3.8.4	任意函数作用下系统的响应	84	5.4.1	映射定理	153
3.8.5	由系统传递函数求系统的 响应	85	5.4.2	Nyquist 轨迹及其映射	154
3.8.6	系统阶跃响应的性能指标	86	5.4.3	Nyquist 稳定判据一	156
3.8.7	Simulink 建模与仿真	87	5.4.4	Nyquist 稳定判据二	157
本章小结		91	5.4.5	Nyquist 对数稳定判据	158
本章典型题、考研题详解及习题		91	5.5	控制系统的相对稳定性	159
第 4 章 根轨迹法		101	5.5.1	增益裕量	160
4.1	根轨迹的基本概念	101	5.5.2	相角裕量	161
4.1.1	根轨迹	101	5.5.3	用幅相频率特性曲线分析系统 稳定性	163
4.1.2	根轨迹的基本条件	102	5.6	闭环系统的频率特性	163
4.2	绘制根轨迹的基本规则	103	5.6.1	等 M 圆(等幅值轨迹)	164
4.3	根轨迹绘制举例	108			
4.4	广义根轨迹	110			

5.6.2	等 N 圆(等相角轨迹)	164	6.6	复合校正	209
5.6.3	利用等 M 圆和等 N 圆求单位反馈系统的闭环频率特性	165	6.6.1	反馈控制与前馈校正的复合控制	209
5.6.4	非单位反馈系统的闭环频率特性	166	6.6.2	反馈控制与扰动补偿校正的复合控制	210
5.7	用频率特性分析系统品质	166	6.7	基于 MATLAB 和 Simulink 的线性控制系统设计	211
5.7.1	闭环频域性能指标与时域性能指标的关系	166	6.7.1	相位超前校正	211
5.7.2	开环频率特性与时域响应的关系	168	6.7.2	相位滞后校正	212
5.8	MATLAB 频域特性分析	170	6.7.3	Simulink 下的系统设计和校正	213
5.8.1	Bode 图	171		本章小结	216
5.8.2	Nyquist 图	171		本章典型题、考研题详解及习题	216
5.8.3	Nichols 图	174	第 7 章 非线性系统分析		227
	本章小结	174	7.1	非线性系统概述	227
	本章典型题、考研题详解及习题	175	7.1.1	非线性系统的特点	227
第 6 章 控制系统的设计与校正		184	7.1.2	非线性系统的分析和设计方法	228
6.1	概述	184	7.2	典型非线性特性	229
6.1.1	系统的性能指标	184	7.3	相平面分析法	231
6.1.2	系统的校正	186	7.3.1	相平面的基本概念	231
6.2	线性系统的基本控制规律	187	7.3.2	线性系统的相轨迹	232
6.2.1	比例(P)控制作用	188	7.3.3	二阶非线性系统的线性化	234
6.2.2	比例-微分(PD)控制作用	188	7.3.4	相轨迹图的绘制	236
6.2.3	积分(I)控制作用	190	7.3.5	由相轨迹图求时间	238
6.2.4	比例-积分-微分(PID)控制作用	191	7.3.6	非线性系统的相平面分析	238
6.3	校正装置及其特性	193	7.4	描述函数法	243
6.3.1	无源超前校正装置	193	7.4.1	描述函数的定义	243
6.3.2	无源滞后校正装置	194	7.4.2	典型非线性环节的描述函数	244
6.3.3	无源滞后-超前校正装置	195	7.4.3	非线性系统的简化	248
6.4	频率法进行串联校正	197	7.4.4	描述函数分析法	249
6.4.1	频率法的串联超前校正	197	7.5	基于 Simulink 的非线性系统分析	252
6.4.2	频率法的串联滞后校正	199	7.5.1	非线性系统的特点	252
6.4.3	频率法的串联滞后-超前校正	201	7.5.2	非线性系统的响应	253
6.4.4	按期望特性对系统进行串联校正	204	7.5.3	非线性系统的相轨迹	253
6.5	反馈校正	206		本章小结	254
6.5.1	比例负反馈校正	206		本章典型题、考研题详解及习题	255
6.5.2	微分负反馈校正	206	第 8 章 采样控制系统		266
6.5.3	反馈校正的设计	207	8.1	概述	266
			8.2	采样过程与采样定理	268

8.3	采样信号保持器	270	8.7.3	单位加速度输入时的稳态 误差	292
8.3.1	零阶保持器	270	8.8	采样系统的暂态响应与脉冲传递 函数零、极点分布的关系	292
8.3.2	一阶保持器	271	8.9	采样系统的校正	295
8.4	Z变换	272	8.9.1	数字控制器的脉冲传递 函数	295
8.4.1	Z变换定义	272	8.9.2	最少拍系统的脉冲传递 函数	296
8.4.2	Z变换方法	273	8.9.3	求取数字控制器的脉冲 传递函数	298
8.4.3	Z变换性质	275	8.9.4	关于闭环脉冲传递函数 $\Phi(z)$ 或 $\Phi_e(z)$ 的讨论	299
8.4.4	Z反变换	276	8.10	MATLAB在采样系统中的应用	302
8.5	采样系统的数学模型	278	8.10.1	连续系统的离散化	302
8.5.1	线性定常差分方程	278	8.10.2	求采样系统的响应	302
8.5.2	差分方程求解	279	8.10.3	采样系统的最少拍设计	304
8.5.3	脉冲传递函数(Z传递函数)	280	本章小结	305	
8.6	采样系统的稳定性分析	286	本章典型题、考研题详解及习题	305	
8.6.1	采样系统的稳定条件	286	附录A	常用函数的拉普拉斯变换表	313
8.6.2	劳斯稳定判据	286	附录B	常用函数的Z变换表	315
8.6.3	朱利稳定判据	288	参考文献	316	
8.6.4	采样周期与开环增益对稳定性的 影响	289			
8.7	采样系统的稳态误差	291			
8.7.1	单位阶跃输入时的稳态 误差	291			
8.7.2	单位斜坡输入时的稳态 误差	291			

第1章 绪 论

内容提要:自动控制理论是自动化学科的重要理论基础,专门研究有关自动控制系统中的基本概念、基本原理和基本方法。本章介绍开环控制和闭环控制、控制系统的基本原理和组成、控制系统的类型,以及对控制系统的基本要求。

知识要点:开环控制,闭环控制,控制装置,被控对象,稳定性,稳态误差,动态特性。

教学建议:本章的重点是开环控制与闭环控制的区别,以及闭环控制的基本原理和组成,要求学生掌握控制系统性能的基本要求,会分析控制系统实例。建议学时数为2学时。

自动控制作为一种重要的技术手段,在工程技术和科学研究中起着极为重要的作用。什么是控制?什么是自动控制?为说明这些概念,我们首先看看下面恒温箱控制实例。

在一些生产过程中,常常需要利用加热源来维持某一箱体的温度。这时,人们需要控制加热源,不断调节箱体温度。

如图1-1所示为恒温箱控制示意图。在控制过程中,人们要用测温元件(如热电偶)不断地测量箱体温度,并与要求温度比较,反映到大脑中,然后大脑根据温差的大小和方向,产生控制指令,加大或减小热源,以减小差异。人们通过连续不断的操作,使箱体温度维持在要求值附近。在控制过程中,各种职能相互联系,可用方框图1-2表示。图中箭头方向表示各部分的联系。

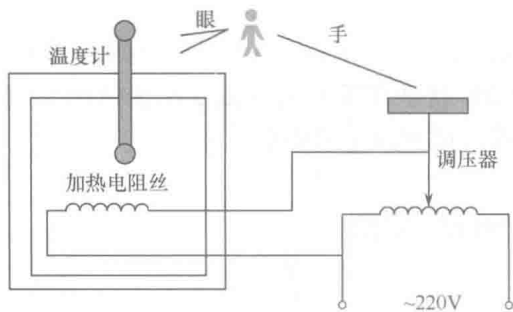


图 1-1 恒温箱控制示意图



图 1-2 人工控制职能图

通过研究上述人工控制恒温箱的过程可以看到,所谓控制就是使某个对象中物理量按照一定的目标来动作。本例中,对象指箱体,其中的物理量指箱体内温度,一定目标就是事先要求的温度期望值。

若温度控制要求精度高,那么由人来控制就很难满足要求,这时就需要用控制装置代替人,形成恒温箱自动控制系统,如图1-3所示。

该系统由测温元件(热电偶)、加热源(电阻丝)、信号放大变换装置、电机等构成。直流电机和减速器是执行机构,它的作用类似于人工控制中人的手。热电偶为测温装置,将箱体的实际温度测量出来,并将其传送给控制器,即电位器给出的给定信号与箱体的实际温度相比较的差异信号的大小及方向,经放大和变换产生电机的电枢电压去控制电机的转速和方向,再由传动装置去调节移动触头,以减小差异,直到偏差为零。根据上述分析,恒温箱自动控制的信号流动及相互关系如图1-4所示。

自动控制和人工控制的基本原理是相同的,它们都是建立在“测量偏差,修正偏差”的基础

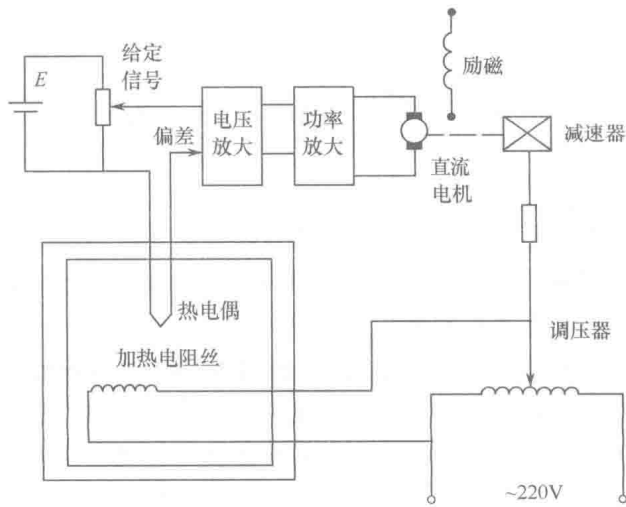


图 1-3 恒温箱自动控制系统示意图

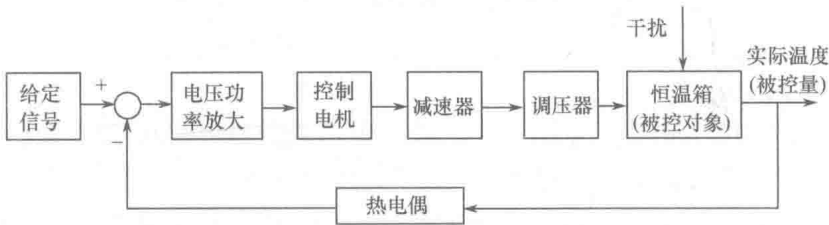


图 1-4 恒温箱自动控制信号流程方框图

上,并且为了测量偏差,必须把系统的实际输出反馈到输入端。自动控制和人工控制的区别在于自动控制用控制器代替人完成控制。总之,所谓自动控制,就是在没有人直接参与的情况下,利用控制装置使被控对象中某一物理量或数个物理量准确地按照预定的要求规律变化。

1.1 开环控制和闭环控制

1.1.1 开环控制

开环控制系统是指无被控量反馈的控制系统,即需要控制的是被控对象的某一量(被控量),而测量的只是给定信号,被控量对于控制作用没有任何影响的系统。结构图如图 1-5 所示。信号由给定值至被控量单向传递。这种控制较简单,但有较大的缺陷,即对象或控制装置受到干扰,或工作中特性参数发生变化,会直接影响被控量,而无法自动补偿。因此,系统的控制精度难以保证,系统的抗干扰能力较差。从另一种意义理解,意味着对被控对象和其他控制元件的技术要求较高。但其结构简单,成本低,在系统精度要求不高或扰动影响较小的情况下,具有一定的实用价值,如数控线切割机进给系统、包装机等多为开环控制。

1.1.2 闭环控制(反馈控制)

闭环控制系统的定义是有被控量反馈的控制系统,其原理框图如图 1-6 所示。从系统中信号流向看,系统的输出信号沿反馈通道又回到系统的输入端,构成闭合通道,故称为闭环控制系统,或反馈控制系统。

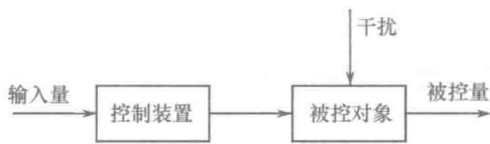


图 1-5 开环控制系统结构框图

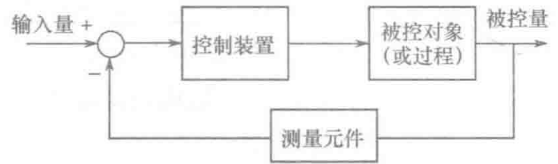


图 1-6 闭环控制系统原理框图

这种控制方式,无论是由于外部干扰,还是系统结构参数的变化引起被控量出现偏差,系统均利用偏差去纠正偏差,故这种控制方式为偏差调节。

闭环控制系统的突出优点是利用偏差来纠正偏差,使系统达到较高的控制精度。但与开环控制系统比较,闭环系统的结构比较复杂,构造比较困难。需要指出的是,由于闭环控制存在反馈信号,利用偏差进行控制,如果设计不当,将会使系统无法正常和稳定地工作。另外,控制系统的精度与系统的稳定性之间也常常存在矛盾。

开环控制和闭环控制方式各有优缺点,在实际工程中,应根据工程要求及具体情况来决定。如果事先预知输入量的变化规律,又不存在外部和内部参数的变化,则采用开环控制较好。如果对系统外部干扰无法预测,系统内部参数又经常变化,为保证控制精度,采用闭环控制则更为合适。如果对系统的性能要求比较高,为了解决闭环控制精度与稳定性之间的矛盾,可以采用开环控制与闭环控制相结合的复合控制系统。

1.2 自动控制系统的组成及术语

典型反馈控制系统的原理框图如图 1-7 所示。

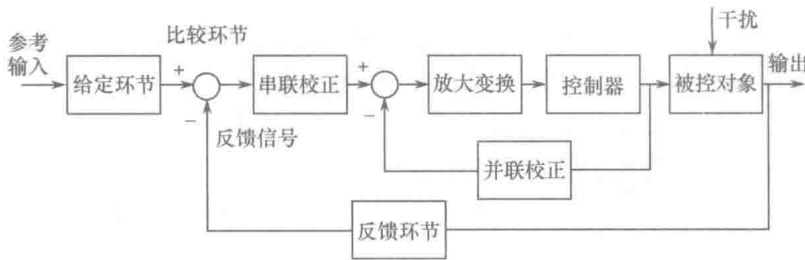


图 1-7 反馈控制系统原理框图

- (1) 被控对象:它是控制系统所控制和操纵的对象,它接收控制量并输出被控量。
- (2) 控制器:接收变换和放大后的偏差信号,转换为对被控对象进行操作的控制信号。
- (3) 放大变换环节:将偏差信号变换为适合控制器执行的信号。它根据控制的形式、幅值及功率来放大变换。
- (4) 校正装置:为改善系统动态和静态特性而附加的装置。如果校正装置串联在系统的前向通道中,称为串联校正装置;如果校正装置接成反馈形式,称为并联校正装置,又称局部反馈校正。
- (5) 反馈环节:它用来测量被控量的实际值,并经过信号处理,转换为与被控量有一定函数关系,且与输入信号为同一物理量的信号。反馈环节一般也称为测量变送环节。
- (6) 给定环节:产生输入控制信号的装置。

下面介绍控制系统中常用的名词术语。

- (1) 输入信号:泛指对系统的输出量有直接影响的外界输入信号,既包括控制信号又包括扰动信号。其中,控制信号又称控制量、参考输入或给定值。

(2) 输出信号(输出量):是指控制系统中被控制的物理量,它与输入信号之间有一定的函数关系。

(3) 反馈信号:将系统(或环节)的输出信号经变换、处理送到系统(或环节)的输入端的信号,称为反馈信号。若此信号是从系统输出端取出送入系统输入端的,这种反馈信号称为主反馈信号。而其他称为局部反馈信号。

(4) 偏差信号:控制输入信号与主反馈信号之差。

(5) 误差信号:是指系统输出量的实际值与希望值之差。系统希望值是理想化系统的输出,实际上并不存在,它只能用与控制输入信号具有一定比例关系的信号来表示。在单位反馈情况下,希望值就是系统的输入信号,误差信号等于偏差信号。

(6) 扰动信号:除控制信号以外,对系统的输出有影响的信号。

1.3 自动控制系统的类型

自动控制系统的种类很多,其结构性能和完成的任务各不相同,因此有多种分类方法,下面介绍几种常见的分类。

1.3.1 按信号流向划分

1. 开环控制系统

开环控制系统原理框图如图 1-8 所示。信号由输入端到输出端单向流动。

2. 闭环控制系统

若控制系统中信号除从输入端到输出端外,还有从输出到输入的反馈信号,则构成闭环控制系统,也称反馈控制系统,方框图如图 1-9 所示。



图 1-8 开环控制系统原理框图

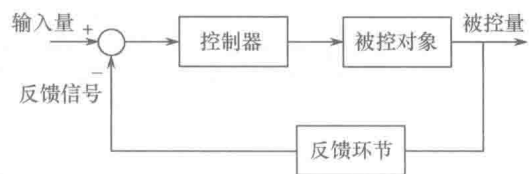


图 1-9 闭环控制系统方框图

1.3.2 按系统输入信号划分

1. 恒值调节系统(自动调节系统)

这种系统的特征是输入量为—恒值,通常称为系统的给定值。控制系统的任务是尽量排除各种干扰因素的影响,使输出量维持在给定值(期望值)上。如工业过程中恒温、恒压、恒速等控制系统。

2. 随动系统(跟踪系统)

该系统的控制输入量是一个事先无法确定的任意变化的量,要求系统的输出量能迅速平稳地复现或跟踪输入信号的变化。如雷达天线的自动跟踪系统和高炮自动瞄准系统就是典型的随动系统。

3. 程序控制系统

系统的控制输入信号不是常值,而是事先确定的运动规律,编成程序装在输入装置中,即控制输入信号是事先确定的程序信号,控制的目的是使被控对象的被控量按照要求的程序动作。如数控车床就属此类系统。

1.3.3 线性系统和非线性系统

1. 线性系统

组成系统元器件的特性均为线性的,可用一个或一组线性微分方程来描述系统输入和输出之间的关系。线性系统的主要特征是具有齐次性和叠加性。

2. 非线性系统

系统中只要有一个元器件的特性不能用线性微分方程描述其输入和输出关系,则称为非线性系统。非线性系统还没有一种完整、成熟、统一的分析法。通常对于非线性程度不很严重或做近似分析时,均可用线性系统理论和方法来处理。非线性系统分析将在第7章专门讨论。

1.3.4 定常系统和时变系统

1. 定常系统

如果描述系统特性的微分方程中各项系数都是与时间无关的常数,则称为定常系统。该系统只要输入信号的形式不变,在不同时间输入下的输出响应形式是相同的。

2. 时变系统

如果描述系统特性的微分方程中只要有一项系数是时间的函数,此系统称为时变系统。

1.3.5 连续系统和离散系统

1. 连续系统

系统中所有元器件的信号都是随时间连续变化的,信号的大小均是可任意取值的模拟量,称为连续系统。

2. 离散系统

离散系统是指系统中有一处或数处的信号是脉冲序列或数码。若系统中采用了采样开关,将连续信号转变为离散的脉冲形式的信号,此类系统称为采样控制系统或脉冲控制系统。若采用数字计算机或数字控制器,其离散信号是以数码形式传递的,此类系统称为数字控制系统。在这种控制系统中,一般被控对象的输入/输出是连续变化的信号,控制装置中的执行部件也常常是模拟式的,但控制器是用数字计算机实现的,所以系统中必须有信号变换装置,如模数转换器(A/D转换器)和数模转换器(D/A转换器)。计算机控制系统将是今后控制系统的主要发展方向。

1.3.6 单输入单输出系统与多输入多输出系统

1. 单输入单输出系统(单变量系统)

系统的输入量和输出量各为一个,称为单输入单输出系统。

2. 多输入多输出系统(多变量系统)

若系统的输入量和输出量多于一个,称为多输入多输出系统。对于线性多输入多输出系统,系统的任何一个输出等于每个输入单独作用下产生输出的叠加。

自动控制系统还可以按系统的其他特征来分类,本书将不再一一讨论,有兴趣的读者可参阅有关文献。

1.4 自动控制系统性能的基本要求

自动控制系统是否能很好地工作,是否能精确地保持被控量按照预定的要求规律变化,这取

决于被控对象和控制器及各功能元器件的结构和特性参数是否设计得当。

在理想情况下,控制系统的输出量和输入量在任何时候均相等,系统完全无误差,且不受干扰的影响。然而,在实际系统中,由于各种各样原因,系统在受到输入信号(也包括扰动信号)的激励时,被控量将偏离输入信号作用前的初始值,经历一段动态过程(过渡过程),则系统控制性能的优劣,可以从动态过程中较充分地表现出来。

控制精度是衡量系统技术性能的重要尺度。一个高品质的系统,在整个运行过程中,被控量对给定值的偏差应该是最小的。

考虑动态过程在不同阶段中的特点,工程上通常从稳、准、好 3 个方面来衡量自动控制系统。

1. 稳定性(稳)

稳定工作是对所有自动控制系统的基本要求,是一个系统能否工作的前提条件。不稳定的系统根本无法完成控制任务。考虑到实际系统工作环境或参数的变动,可能导致系统不稳定,因此,我们除要求系统稳定外,还要求其具有一定的稳定裕量。稳定性是系统的固有特性,由系统结构、参数所决定,与外部输入信号无关。

2. 稳态精度(准)

稳态精度是指系统过渡到新的平衡工作状态以后,或系统抗干扰重新恢复平衡后,最终保持的精度。稳态精度与控制系统的结构、参数及输入信号形式有关。

3. 动态过程(好)

动态过程是指控制系统的被控量在输入信号作用下随时间变化的全过程,衡量动态过程的品质好坏常采用单位阶跃信号作用下过渡过程中的超调量、过渡过程时间等性能指标。

对不同的被控对象,系统对稳、准、好的要求有所侧重。例如,随动系统对好要求较高。同一系统中,稳、准、好是相互制约的。提高过程的快速性,可能会加速系统振荡;改善了平稳性,控制过程又可能拖长,甚至使最终精度也变差。分析和解决这些矛盾,将是本课程的重要内容。

1.5 自动控制课程的主要任务

本课程的主要内容是阐述构成、分析和设计自动控制系统的基本理论。对实际系统,建立研究问题的数学模型,进而利用所建立的数学模型来讨论构成、分析、综合自动控制系统的基本理论和方法。

在已知系统数学模型下,研究系统的性能并寻找系统性能与系统结构、参数之间的关系,称为系统分析。本课程将详细介绍系统分析的一些常用方法。

如果已知对工程系统性能的要求,寻找合理的控制方案,这类问题称为系统综合。

作为研究自动控制系统的分析与综合的方法来说,对单输入单输出系统常采用的是时域法、频域法、根轨迹法,以及目前广泛应用的计算机辅助设计。

对于一个实际系统,其输入信号往往是比较复杂的,而系统的输出响应又与输入信号类型有关。因此,在研究自动控制系统的响应时,往往选择一些典型输入信号,并且以最不利的信号作为系统的输入信号,分析系统在此输入信号下所得到的输出响应是否满足要求,据此评估系统在比较复杂信号作用下的性能指标。

常采用的典型输入信号有以下几种。

1.5.1 阶跃函数

阶跃函数的数学表达式为

$$r(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ A & t \geq 0 \end{cases} \quad (1-1)$$

它表示一个在 $t=0$ 时出现的,幅值为 A 的阶跃变化函数,如图 1-10 所示。在实际系统中,如负荷突然增大或减小、流量阀突然开大或关小,均可以近似看成阶跃函数的形式。

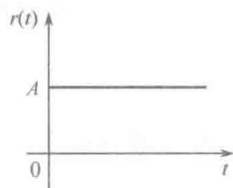


图 1-10 阶跃函数

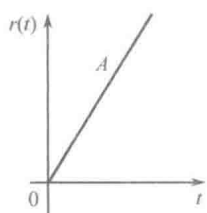
$A=1$ 的阶跃函数称为单位阶跃函数,记为 $1(t)$ 。因此,幅值为 A 的阶跃函数也可表示为

$$r(t) = A \cdot 1(t) \quad (1-2)$$

出现在 $t=t_0$ 时刻的阶跃函数,表示为

$$r(t-t_0) = \begin{cases} 0 & t < t_0 \\ A & t \geq t_0 \end{cases} \quad (1-3)$$

1.5.2 斜坡函数(等速度函数)



斜坡函数的数学表达式为

$$r(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ At & t \geq 0 \end{cases} \quad (1-4)$$

斜坡函数从 $t=0$ 时刻开始,随时间以恒定速度 A 增加,如图 1-11 所示。 $A=1$ 时,斜坡函数称为单位斜坡函数。

图 1-11 斜坡函数

斜坡函数等于阶跃函数对时间的积分,反之,阶跃函数等于斜坡函数对时间的导数。

1.5.3 抛物线函数(等加速度函数)

抛物线函数的数学表达式为

$$r(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \frac{1}{2}At^2 & t \geq 0 \end{cases} \quad (1-5)$$

曲线如图 1-12 所示。当 $A=1$ 时,称为单位抛物线函数。抛物线函数是斜坡函数对时间的积分。

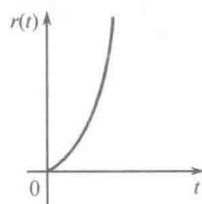


图 1-12 抛物线函数

1.5.4 脉冲函数

脉冲函数的曲线如图 1-13 所示,数学表达式为

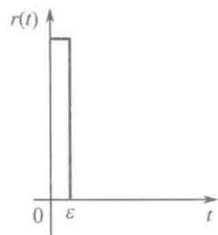


图 1-13 脉冲函数

$$r(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ A & 0 \leq t \leq \epsilon \\ 0 & t > \epsilon \end{cases} \quad (1-6)$$

其面积为 A ,即 $\int_{-\infty}^{\infty} r(t) dt = A$ 。面积 A 表示脉冲函数的强度。

$A=1, \epsilon \rightarrow 0$ 的脉冲函数称为单位脉冲函数,记为 $\delta(t)$,即

$$\delta(t) = \begin{cases} 0 & t \neq 0 \\ \infty & t = 0 \end{cases} \quad (1-7)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1$$

于是强度为 A 的脉冲函数可表示为 $A\delta(t)$ 。

$\delta(t-t_0)$ 表示在 $t=t_0$ 时刻出现的单位脉冲函数,即

$$\delta(t-t_0)=\begin{cases} 0 & t \neq t_0 \\ \infty & t = t_0 \end{cases} \quad (1-8)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t-t_0) dt = 1$$

单位脉冲函数是单位阶跃函数的导数。

1.5.5 正弦函数

正弦函数的数学表达式为

$$r(t)=\begin{cases} 0 & t < 0 \\ A \sin \omega t & t \geq 0 \end{cases} \quad (1-9)$$

式中, A 为正弦信号的幅值, ω 为角频率, 正弦函数为周期函数。

当正弦信号作用于线性系统时, 系统的稳态分量是和输入信号同频率的正弦信号, 仅仅是幅值和初相位不同。根据系统对不同频率正弦输入信号的稳态响应, 可以得到系统性能的全部信息。

1.6 自动控制系统实例

本节将介绍一些控制系统实例。

1.6.1 造纸机分部传动控制系统

造纸机分部传动控制系统原理图如图 1-14 所示。含有大量水分的纸张经过第一压榨棍后, 去掉了一部分含水量, 然后再进入第二压榨棍, 再榨去一部分水分。第一压榨棍和第二压榨棍分别由各自的电动机拖动, 显然, 两个压榨棍的转速必须协调, 否则将会拉断纸页或出现叠堆。

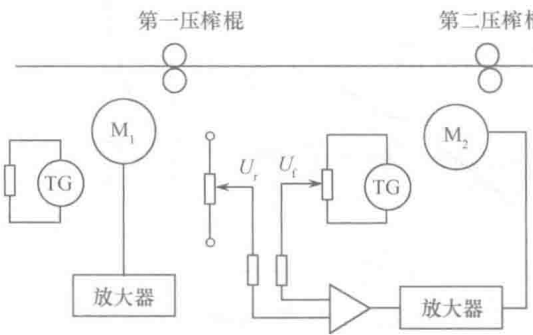


图 1-14 造纸机分部传动控制系统原理图

自动控制系统中, 压榨棍拖动电动机 M_2 的转速由测速发电机 TG 检测出来, 并转换为速度反馈电压 U_f 。参考电压 U_r 与反馈电压 U_f 相比得偏差电压 $U_r - U_f$, 经过放大去控制拖动电动机的转速, 达到两个压榨棍的转速协调。

1.6.2 谷物湿度控制系统

谷物湿度控制系统原理图如图 1-15 所示。我们知道谷物含水量直接影响面粉产量, 谷物在混合成磨料前要先湿润, 存在一个使谷物出粉最多的湿度, 谷物湿度可通过加水来调整。实际中输入谷物的水分、谷物流量和水压均是变化不定的, 为努力消除扰动的影响, 可在上部加一水箱以保证供水压力不变, 可以加一个送料漏斗以维持谷物流量基本不变。剩下就是谷物水分控制, 首先测量输入谷物水分含量, 构成顺馈控制部分, 同时测量输出谷物水分含量, 构成反馈部分, 调节器将两个传感器来的信号与要求的湿度信号结合起来, 给出正确水流量所必需的自动阀门整定值。