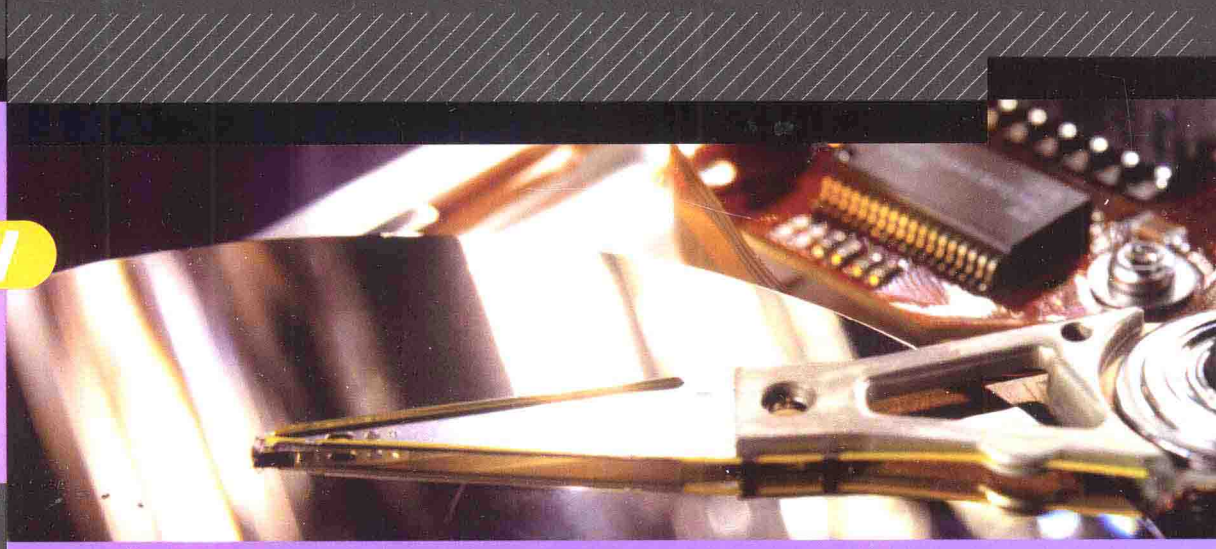


21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材
21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

Automatic Control Theory

自动控制原理

王燕平 主编
王艳芳 副主编



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划

21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automatio...

Automatic Control Theory

自动控制原理

王燕平 主编

王艳芳 副主编

人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (C I P) 数据

自动控制原理 / 王燕平主编. — 北京: 人民邮电出版社, 2015. 9
21世纪高等院校电气工程与自动化规划教材
ISBN 978-7-115-40096-3

I. ①自… II. ①王… 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(2015)第174142号

内 容 提 要

本书从高等工程教育的人才培养目标出发, 比较全面地阐述了经典控制理论的基本概念、基本原理和基本方法。全书共 8 章, 主要内容有: 自动控制概论, 控制系统的数学模型, 线性系统的时域分析法, 线性系统的根轨迹法, 线性系统的频域分析法, 线性系统的校正与设计, 线性离散控制系统, 以及自动控制原理实验。

本书以“系统建模—系统分析—综合设计”作为教材主线, 合理优化了教学内容, 突出控制系统分析与设计的共性规律和基本方法, 强化工程实践应用。此外, 为方便教师教学, 本书还配有较丰富的例题与习题。

本书可作为应用型本科学校自动化专业、电气工程及其自动化专业、测控技术与仪器等相关专业的教材, 也可供从事自动化技术工作的科技工作者自学与参考。

-
- ◆ 主 编 王燕平
 - 副 主 编 王艳芳
 - 责任编辑 邹文波
 - 执行编辑 税梦玲
 - 责任印制 沈 蓉 彭志环
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京圣夫亚美印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 12 2015 年 9 月第 1 版
字数: 281 千字 2015 年 9 月北京第 1 次印刷
-

定价: 34.00 元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316
反盗版热线: (010)81055315

本书是为适应应用型本科的自动化专业、电气工程及其自动化等相关专业的教学需求而编写的。本书以培养具有创新精神和实践能力的高素质应用型人才为目标,主要特色如下。

(1) 合理优化“自动控制原理”课程内容,突出重点

本书内容在充分满足学生后续课程学习和考研、就业等需要的前提下,酌情削减目前工程实践中较少使用的内容,适当选取理论推导与证明。

(2) 强化“自动控制原理”内容的应用性

本书在重点章节中增加实际工程综合实例,以实现该章知识的综合应用,把抽象问题具体化,便于读者对抽象概念的理解。

(3) 理顺“自动控制原理”各知识点的关系,增强可读性

“自动控制原理”课程内容的系统性很强,在章、节内容的安排上,既要体现各知识点的自然衔接,又要适时地安排知识的提炼与总结,方便教师教学和学生阅读、学习。

(4) 设置实验内容

实验是“自动控制原理”课程的重要组成部分,本书设置了 14 学时的实验项目,供读者选择。

本书是河南工业大学优培课程“自动控制理论”的配套教材,凝聚了课程组教师的心血和教学改革成果。本书的第 1 章、第 6 章和附表由王燕平编写,第 2 章和第 3 章由王艳芳编写,第 4 章由张杰编写,第 5 章由黄凤芝编写,第 7 章由吴翔编写,第 8 章由孙红鸽编写,全书由王燕平统稿并修改。

由于编者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

作者

2015 年 5 月

目 录

第 1 章 自动控制概论	1
1.1 控制理论的发展	1
1.2 自动控制方式	2
1.2.1 闭环控制方式	2
1.2.2 开环控制方式	3
1.2.3 复合控制方式	4
1.3 自动控制系统的组成	5
1.4 自动控制系统的分类	6
1.4.1 按输入量变化的规律 分类	6
1.4.2 按系统传输信号对时间 的关系分类	6
1.4.3 按系统的输出量和输入 量的关系分类	6
1.4.4 按系统中的参数对时间 是否变化分类	7
1.5 自动控制系统的的基本要求	7
1.5.1 稳定性	7
1.5.2 快速性	7
1.5.3 准确性	7
习题	8
第 2 章 控制系统的数学模型	9
2.1 控制系统的微分方程	9
2.1.1 微分方程的建立	9
2.1.2 微分方程的线性化	12
2.2 控制系统的传递函数	13
2.2.1 传递函数的定义和性质	14
2.2.2 典型环节及其传递函数	15
2.2.3 传递函数的零极点对系统 的影响	17
2.3 控制系统的结构图及等效变换	19
2.3.1 系统结构图	19
2.3.2 结构图的建立	20
2.3.3 结构图的等效变换和 简化	22
2.3.4 系统传递函数	29
2.4 信号流图与梅森公式	30
2.4.1 信号流图	31
2.4.2 梅森增益公式	31
2.5 控制系统数学模型建立实例	33
2.5.1 从原理图到结构图的 变换	33
2.5.2 结构图的简化	35
2.5.3 利用梅森公式求系统的 数学模型	36
习题	37
第 3 章 线性系统的时域分析法	40
3.1 控制系统的稳定性分析	40
3.1.1 稳定的概念	40
3.1.2 稳定的条件	40
3.1.3 稳定判据	41
3.2 控制系统的典型输入信号和 时域性能指标	44
3.2.1 典型输入信号	44
3.2.2 性能指标	46
3.3 一阶系统的时域分析	47
3.3.1 数学模型	47
3.3.2 单位阶跃响应	47
3.3.3 单位脉冲响应	48
3.3.4 单位斜坡响应	48
3.4 二阶系统的时域分析	49
3.4.1 数学模型	49

3.4.2	二阶系统的单位阶跃响应	50	习题	81
3.4.3	二阶系统欠阻尼情况下的性能指标分析	52	第5章 线性系统的频域分析法	83
3.5	高阶系统的时域分析	54	5.1 频率特性	83
3.5.1	数学模型	54	5.1.1 频率特性的基本概念	83
3.5.2	单位阶跃响应	55	5.1.2 频率特性的表示方法	84
3.6	线性系统稳态误差的计算	55	5.2 系统的开环对数频率特性	86
3.6.1	误差的定义	56	5.2.1 典型环节的对数频率特性	87
3.6.2	稳态误差的定义	56	5.2.2 开环对数频率特性	91
3.6.3	单位阶跃输入信号下的稳态误差	57	5.2.3 开环对数频率特性曲线(Bode图)的绘制	92
3.6.4	单位斜坡输入信号下的稳态误差	57	5.2.4 由频率特性曲线确定系统的传递函数	93
3.6.5	单位加速度输入信号下的稳态误差	57	5.3 控制系统开环幅相曲线与频域稳定判据	94
3.6.6	扰动信号作用下的稳态误差	59	5.3.1 开环幅相曲线的绘制方法	94
3.7	控制系统时域分析综合实例	60	5.3.2 频率稳定判据	95
3.7.1	系统稳定的条件	61	5.3.3 对数频率稳定判据	96
3.7.2	高阶系统的简化	61	5.4 控制系统相对稳定性分析	97
3.7.3	系统动态性能分析	62	5.4.1 相位裕度	98
3.7.4	稳态误差计算	63	5.4.2 幅值裕度	98
习题		63	5.5 系统的闭环频域性能指标	100
第4章 线性系统的根轨迹法		66	5.5.1 闭环控制系统频率特性	100
4.1 根轨迹的基本概念		66	5.5.2 控制系统闭环频域性能指标与时域性能指标的转换	101
4.1.1 根轨迹的定义		66	习题	103
4.1.2 根轨迹方程		67	第6章 线性系统的校正与设计	105
4.2 绘制根轨迹的规则和方法		68	6.1 系统校正的概念与一般方法	105
4.3 参数根轨迹		73	6.1.1 期望性能指标的提出	105
4.4 利用根轨迹法对控制系统的性能分析		76	6.1.2 系统带宽的确定	106
4.4.1 增加开环极点对控制系统的影响		76	6.1.3 校正方式	107
4.4.2 增加开环零点对控制系统的影响		77	6.2 常用串联校正装置及其特性	108
4.4.3 利用根轨迹确定系统参数		77	6.2.1 串联超前校正装置	108
4.4.4 用根轨迹分析系统的动态性能		80	6.2.2 串联滞后校正装置	111
			6.2.3 串联滞后-超前校正装置	113
			6.3 串联校正	115

6.3.1 串联超前校正设计	115	7.3.3 Z变换的基本方法	150
6.3.2 串联滞后校正设计	119	7.3.4 Z逆变换	152
6.3.3 串联滞后-超前校正设计	121	7.4 离散系统数学模型	154
6.4 反馈校正	124	7.4.1 离散系统的数学定义	154
6.4.1 反馈校正的原理	124	7.4.2 线性常系数差分方程及其解法	154
6.4.2 反馈校正的分类	124	7.4.3 Z传递函数	156
6.4.3 反馈校正对系统的影响	124	7.4.4 开环系统脉冲传递函数	158
6.5 复合校正	125	7.4.5 闭环系统脉冲传递函数	160
6.5.1 按扰动补偿的复合校正	126	7.4.6 Z变换法的局限性	162
6.5.2 按输入补偿的复合校正	126	7.5 离散系统稳定性分析	163
6.6 控制系统的工程设计方法	127	7.5.1 离散系统的稳定性判据	163
6.6.1 系统固有部分的简化处理	127	7.5.2 离散系统的稳态误差	164
6.6.2 典型I型系统模型	128	7.6 线性离散系统的暂态性能分析	165
6.6.3 典型II型系统模型	129	7.6.1 离散系统的暂态性能指标	165
6.7 控制系统设计综合实例	131	7.6.2 离散系统极点分布与动态响应的关系	166
6.7.1 系统数学模型建立	131	习题	167
6.7.2 电流环的数学模型与电流调节器的参数设计	132	第8章 自动控制原理实验	169
6.7.3 速度环的数学模型与速度调节器的参数设计	133	实验一 典型系统的阶跃响应分析	169
6.7.4 电流调节器和速度调节器的实现	134	实验二 高阶系统的瞬态响应和稳定性分析	171
习题	135	实验三 线性定常系统的稳态误差分析	172
第7章 线性离散控制系统	138	实验四 控制系统的根轨迹分析(Matlab)	174
7.1 线性离散控制系统简介	138	实验五 控制系统的频率特性研究(Matlab)	175
7.2 信号的采样与保持	139	实验六 线性定常系统的串联校正(综合)	177
7.2.1 信号的采样	139	附录	183
7.2.2 采样定理	141		
7.2.3 信号的保持	144		
7.3 Z变换理论	146		
7.3.1 Z变换的定义	146		
7.3.2 Z变换的基本定理	147		

目前,自动控制作为一种技术手段,已广泛地应用于国民经济的各个领域和社会生活的各个方面,本章将从控制理论的发展、控制方式以及控制系统的结构组成等方面,介绍自动控制的基本概念和自动控制系统的基本特点。

1.1 控制理论的发展

随着我国科学技术的发展,自动控制技术愈来愈广泛地应用于工业、农业、军事、科学研究、交通运输、商业、医疗、服务和家庭等方面。所谓自动控制,是为实现生产或生活中的某种需求,在没有人直接参与的情况下,利用人为加入的设备,使被控制对象(如机器设备、系统或生产过程)的某一个物理量或多个物理量,自动地按照期望的规律去运行或变化,这种人为加入的设备就称为控制器或控制装置,由被控制对象和控制装置组成一个整体称为自动控制系统。采用自动控制技术能够实现自动检测、信息处理、分析判断、操纵控制,达到预期的目标,不仅可以把人从繁重的体力劳动、部分脑力劳动以及恶劣、危险的工作环境中解放出来,而且能扩展人的器官功能,极大地提高劳动生产率,增强人类认识世界和改造世界的能力。因此,自动控制是工业、农业、国防和科学技术现代化的重要条件和显著标志。

自动控制理论是研究自动控制的基础理论和自动控制共同规律的技术学科,其形成远比控制技术的应用要晚。古代,罗马人家里的水管系统中就已经应用按反馈原理构成的简单水位控制装置。中国北宋元祐初年(1086~1089)也已有了反馈调节装置——水运仪象台。但是直到1787年瓦特离心式调速器在蒸汽机转速控制上得到普遍应用,才开始出现研究控制理论的需要。

1868年,英国科学家J. C. 麦克斯韦首先解释了瓦特速度控制系统中出现的不稳定现象,指出振荡现象的出现同由系统导出的一个代数方程根的分布形态有密切的关系,开辟了用数学方法研究控制系统中运动现象的途径。20世纪30至40年代,奈奎斯特、伯德、维纳等人的著作为自动控制理论的初步形成奠定了基础;第二次世界大战以后,又经过众多学者的努力,在总结了以往的实践和关于反馈理论、频率响应理论并加以发展的基础上,形成了较为完整的自动控制系统设计的频率法理论。1948年W. R. Evans又提出了根轨迹法。至此,自动控制理论发展的第一阶段基本完成。这种建立在频率法和根轨迹法基础上的理论,通常被称为经典控制理论(又称古典控制理论)。经典控制理论以拉氏变换为数学工具,以单输入—单输出的线性定常系统为主要的研究对象,在解决比较简单的控制系统的分析和设计问题方面是 very 有效的,但其只适用于单变量系统,且仅限于研究定常系统。

在20世纪60~70年代,随着现代应用数学新成果的推出和电子计算机的应用,尤其是

在 20 世纪 50 年代蓬勃兴起的航空航天技术的推动下,控制理论有了重大的突破和创新,逐步形成了现代控制理论。现代控制理论以线性代数和微分方程为主要的数学工具,以状态空间法为基础,分析与设计控制系统。状态空间法本质上是一种时域的方法,它不仅描述了系统的外部特性,而且描述和揭示了系统的内部状态和性能。它分析和综合的目标是在揭示系统内在规律的基础上,实现系统在一定意义下的最优化。

随着空间技术、计算机技术及人工智能技术的发展,控制界学者在研究自组织、自学习控制的基础上,为了提高控制系统的自学习能力,开始注意将人工智能技术与方法应用于控制系统,逐步形成了智能控制理论。智能控制是人工智能和自动控制的结合物,其重点并不在对数学公式的表达、计算和处理上,而在对任务和模型的描述、符号和环境的识别以及知识库和推理机的设计开发上。智能控制用于生产过程,让计算机系统模仿专家或熟练操作人员的经验,建立起以知识为基础的广义模型,采用符号信息处理、启发式程序设计、知识表示和自学习、推理与决策等智能化技术,对外界环境和系统过程进行理解、判断、预测和规划,使被控对象按一定要求达到预定的目的。智能控制理论主要有专家系统、模糊控制、神经网络控制、进化计算等的控制方法。近年来,智能控制技术在国内外已有了较大的发展,已进入工程化、实用化的阶段。但作为一门新兴的理论技术,它还处在一个发展时期。

1.2 自动控制方式

所谓自动控制就是在没有人直接参与的情况下,利用外加设备或装置(称控制装置或控制器),使机器、设备或生产过程(统称被控对象)的某个工作状态或参数(即被控量)自动地按照预定的规律运行。例如无人驾驶的飞机按预定轨迹飞行,人造地球卫星可以准确地进入预定轨道运行并回收。能自动地实现生产或生活所需的某一功能的所有物理部件的集合,称为自动控制系统,其中,被控制的机器、设备或生产过程被称为被控对象,被控制的某一个工作状态或参数称为被控制量或输出量,要实现的控制目标用一个物理量传达给系统,称为给定量或输入量,自动控制系统的结构如图 1-1 所示。

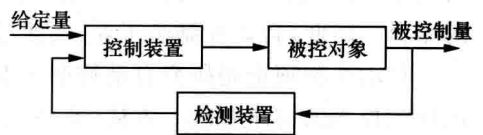


图 1-1 自动控制系统的结构

自动控制的方式有闭环控制方式、开环控制方式和复合控制方式。

1.2.1 闭环控制方式

闭环控制(又称反馈控制)是应用最广泛的一种控制方式,是自然界所遵循的基本工作方式,控制装置与被控对象之间,不但有顺向作用,而且有反向作用,其结构如图 1-2 所示。

从信号的流动方向来看,系统不仅存在从输入量向输出量的正向信号流动,还存在从输出量向输入量的反向信号流动,信号可形成一个闭合回路。系统工作时,当前的输出量由检测装置感知,形成反馈量,并传递给控制装置;控制装置将反馈量与代表控制目标的输入量进行比较,找到差距,并据此运算出控制指令;被控对象接收到控制装置的控制指令后进行响应,输出量朝着减小差距的方向发展;只要差距存在,系统就会自动地进行调节,直到差距消失或小于某一设定值为止。因此,闭环控

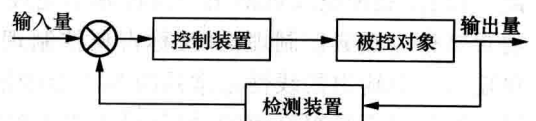


图 1-2 闭环控制系统的结构

制的控制机理是检测偏差,纠正偏差。

例如,人取桌上书的过程就是一个闭环控制的自动控制过程,如图 1-3 所示。

书的位置是整个自动控制过程要达到的目标,是系统的输入量,手是整个自动控制过程要控制的对象,是被控对象,而手的位置是被控制量(又称输出量)。取书时,眼睛作为检测装置,首先判断出书的位置与手的位置之间的差距,这个差距称为偏差,大脑是控制装置,根据偏差的大小,经过运算发出指令,控制手臂向着减小偏差的方向移动,直到手到达书的位置时,偏差消除,取书过程结束。

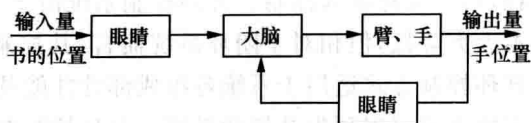


图 1-3 取书自动控制系统

又例如,直流电动机转速控制系统,如图 1-4 所示。

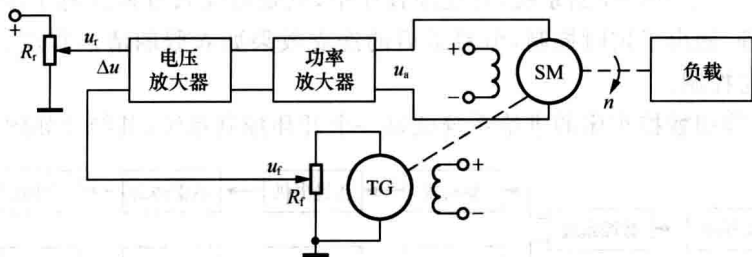


图 1-4 直流电动机转速闭环控制系统

在直流电动机转速控制系统中,想要达到的转速用电位器 R_r 的输出电压 U_r 给出,并作为系统的输入量,送到电压放大器输入端,直流电动机的转速是系统的输出量,由检测装置直流测速发电机 TG 及分压电位器 R_f 获得,生成与电机转速呈线性关系的反馈电压 U_f ,送到电压放大器的输入端,由于 U_r 和 U_f 是反极性连接的, $\Delta u = U_r - U_f$,经电压放大、功率放大之后生成 U_a ,作为直流电动机的电枢电压,直流电动机在电枢电压的作用下转动。这是一个有差系统,电枢电压 U_a 的大小与 Δu 呈线性关系,只有当 Δu 不为零时, U_a 才能不为零,电机才能转动。图 1-5 是直流电动机转速控制系统的方框图。

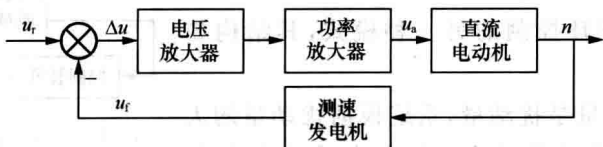


图 1-5 直流电动机转速闭环控制系统方框图

闭环控制系统由于设置了检测装置,将输出量的当前值及时地反馈给控制器,控制器可以根据输出量与输入量之间的偏差随时调整控制量,以实现减小偏差的目的,因此,闭环控制系统的控制精度较高,抗干扰的能力较强;但检测装置的使用,增加了系统结构的复杂度和经济成本,同时由于系统中信号形成了闭合回路,易造成系统的不稳定。因此,当控制系统的控制精度要求不是很高的时候,可以采用开环控制方式。

1.2.2 开环控制方式

开环控制是指系统的控制装置与被控对象之间,只有顺向作用,没有反向作用的控制过

程,所以又称顺馈控制。开环控制系统由于未使用检测装置,而使其结构简单,易于稳定,成本大大降低,但相对于闭环系统而言,其控制精度和抗干扰性能要差一些。基于以上特点,开环控制方式适用于系统各组成部件性能及相互关系稳定、控制精度要求不高、工作过程中干扰小或可以预先补偿的系统。开环控制有两种模式,一种是按给定值控制模式,另一种是按扰动控制模式。两种模式也可以结合起来在一个系统中同时使用。

图 1-6 所示是按给定值控制的开环控制系统,控制器直接根据给定量(又称输入量)的大小,向被控对象发出指令,被控对象进行响应,形成一个与输入量相对应的输出量,控制精度完全取决于所使用的各元部件的精度。在实际的生产和生活中,存在很多使用按给定值控制模式的开环控制系统,例如,常用的洗衣机就是一个开环控制系统,在洗涤程序中,只是对洗衣过程的每个步骤,如浸泡、洗涤、漂洗、甩干等,做出了定时控制,但对最后的洗衣效果如衣服的清洁程度、甩干程度等并没有进行检测与控制。

又例如,经济型数控车床的进给系统就是一个开环控制系统,其结构如图 1-7 所示。

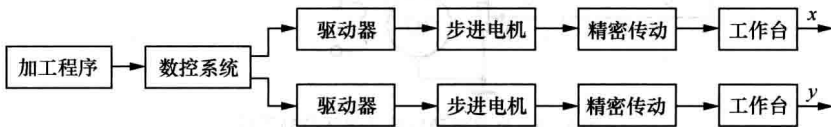


图 1-7 数控车床进给系统结构示意图

在加工过程中,加工程序作为指令送入数控系统(一般是一个专用的计算机系统,也可以用 PC 替代),数控系统对指令进行解码和运算,形成 x 轴或 y 轴的控制脉冲序列,经相应轴的步进电机驱动器进行功率放大后,控制对应轴的步进电机运转,再通过精密传动机构(将角位移转化为直线位移的机构),带动工作台进行加工。从控制信号的传递来看,只有顺向的,没有反向的,数控系统只发布控制脉冲,不检测步进电机的转速,系统采用了开环控制方式,但由于采用了精密传动机构(如滚珠丝杠),就能保证在工作过程中不丢失脉冲,同时仍能达到比较高的加工精度。

按扰动控制是开环控制的另一种模式,其结构如图 1-8 所示。

系统的外部作用量是扰动量,系统根据扰动量的大小进行补偿,以减小扰动量对输出的影响,但前提是扰动量要能够直接或间接地被测量。这种控制方式一般不单独使用,经常作为系统抗干扰能力提高的一种手段,用在闭环控制系统或按给定值控制的开环控制系统中。

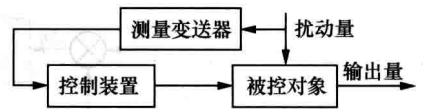


图 1-8 按扰动控制的开环系统结构

1.2.3 复合控制方式

将开环控制和闭环控制有机地结合起来的一种控制方式就是复合控制方式,因开环控制有两种模式,复合控制也有两种模式,结构如图 1-9 和图 1-10 所示。

图 1-9 所示的复合控制系统是将按给定值控制的开环控制与闭环控制相结合,图 1-10 所示的复合控制系统是将按扰动控制的开环控制与闭环控制相结合,其优点是系统各项性能都好于闭环控制系统,但因结构比闭环系统更加复杂,其设计难度以及成本都将增加。

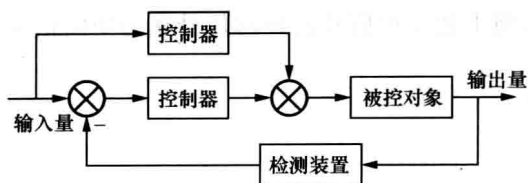


图 1-9 按给定值控制的复合控制系统结构

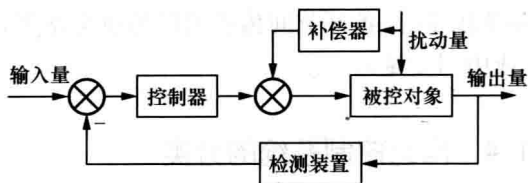


图 1-10 按扰动控制的复合控制系统结构

1.3 自动控制系统的组成

自动控制系统因系统功能不同,所使用的元部件也不同,但从完成“自动控制”这一功能的角度来看,一个闭环自动控制系统必须包含控制对象、检测装置和控制器这 3 大部分,除此之外,系统可根据系统功能的要求,增加一些环节,如电压放大、功率放大等,统称为执行元件。一般地,闭环控制系统应包括以下几个基本环节,如图 1-11 所示。

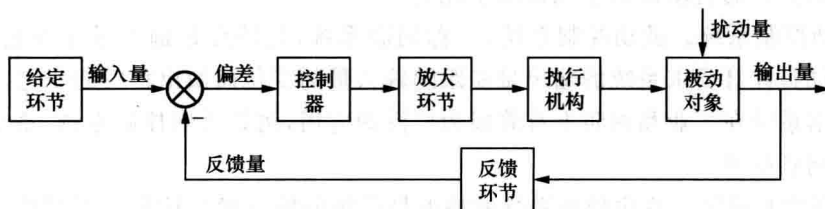


图 1-11 闭环自动控制系统基本结构

给定环节:给定环节主要用于产生输入量,在模拟控制系统中通常用一个 $0\sim 15\text{V}$ (或 $0\sim 10\text{V}$)的直流电压作为输入量,给定环节由直流电源和电位器构成,如图 1-4 中的电位器 R_r ,在计算机控制系统(又称离散控制系统)中,输入量常用键盘输入,无论是模拟控制系统还是离散控制系统,输入量有一定的精度要求,给定环节要满足其要求。

控制器:控制器是自动控制系统的核心部分,它根据偏差按照一定的规律,产生控制信号,所依照的规律要能改善或提高系统的性能。

放大环节:放大环节是将控制信号进行放大,包括幅值放大和功率放大,使其变换成能直接驱动执行机构的信号。

执行机构:执行机构直接用于对被控对象进行操作,常见的执行机构有电动机、液压马达和阀门等。

被控对象:被控对象是自动控制系统所要控制的设备或生产过程,描述被控对象的工作状态并需要控制的物理量就是被控量,即输出量。

反馈环节:又称检测环节,它对控制系统当前的输出量进行检测,并将其转化为与输入量同物理性质、量值匹配的反馈量,以便于控制器将其与输入信号进行比较,找到偏差。

从图 1-11 可以看出,在闭环控制系统中,输入量、输出量、反馈量、偏差以及扰动量是一定存在的,且具有特定的含义。输入量又称给定量或参据量,是系统的控制指令;输出量又称被控量,是被控对象的输出,是系统的控制目标;反馈量是通过检测装置,将输出量转变为与输入量物理性质相同、数量级相同的一个信号;偏差是反馈量与输入量之间的差值;扰动量又称噪声,客观存在于控制系统,来源于能够引起输出量发生变化的各种因素,如电网电压的波动、电动机负载转矩的变化以及环境温度的变化等。一般地,当控制系统的构成

环节较多时,各环节间传递的信号也会增多,可以将上述 5 种信号之外的信号视为中间信号(或中间变量)。

1.4 自动控制系统的分类

自动控制系统可以从不同的角度进行分类。

1.4.1 按输入量变化的规律分类

按输入量变化的规律可将自动控制系统分为恒值控制系统、随动控制系统和程序控制系统。

(1) 恒值控制系统。恒值控制系统的特点是系统的输入量是恒定值,并且要求系统的输出量相应地保持恒定。该系统是一类常见的自动控制系统,如生产或生活中的恒温、恒速、恒压、恒张力等的自动控制系统都属于此类。

(2) 随动控制系统。随动控制系统,又称伺服系统,其特点是输入量是变化的(有的是随机的、任意的)并且要求系统的输出量能跟随输入量的变化而做出相应的变化。

随动控制系统在工业和国防上有着极为广泛的应用,例如火炮控制系统、雷达引导系统和机器人控制系统等。

(3) 程序控制系统。程序控制系统的特点是系统的输入量是按预定规律随时间变化的函数,要求输出量也按照相应的规律变化,以复现输入函数。程序控制系统大多应用在自动化生产线或大型化工生产过程,如数控机床、石油炼制生产过程等。程序控制系统与随动控制系统的输入量都是时间的函数,所不同的是程序控制系统的输入量是已知的时间函数,而随动控制系统的输入量可以是未知的时间函数。

1.4.2 按系统传输信号对时间的关系分类

按系统传输信号对时间的关系可将自动控制系统分为连续控制系统和离散控制系统。

(1) 连续控制系统。连续控制系统(又称模拟控制系统)的特点是构成系统的各环节的输入量和输出量都是时间的连续函数,其运动规律可用微分方程描述。

(2) 离散控制系统。离散控制系统(又称数字控制系统)的特点是构成系统的某一个环节或多个环节的输入量或输出量为时间上离散的脉冲序列,其运动规律可用差分方程描述。

1.4.3 按系统的输出量和输入量的关系分类

按系统的输出量和输入量的关系可将自动控制系统分为线性系统和非线性系统。

(1) 线性系统。线性系统的特点是系统全部由线性元件组成,其输出量和输入量的关系用线性微分方程(或线性差分方程)来描述。线性系统可使用叠加定理,即若系统有多个外作用量同时作用于系统所引起的输出响应,等于每个外作用量单独作用于系统所引起的输出响应分量的叠加。实际的物理系统都不是严格的线性系统,在分析时,当系统运行在各元件的线性范围内,就可以认定系统是线性的。

(2) 非线性系统。非线性系统的特点是系统的构成元件中不全是线性的,其输出量和输入量的关系不能用线性微分方程(或线性差分方程)来描述,非线性系统不能使用叠加定理。

1.4.4 按系统中的参数对时间是否变化分类

按系统中的参数对时间是否变化可将自动控制系统分为定常系统和时变系统。

(1) 定常系统。定常系统(又称时不变系统)的特点是系统全部参数不随时间变化,可用定常微分方程(定常差分方程)来描述,大多数物理系统在所观察的时间范围内可以认定参数是定常的,一些微小变化可以忽略。

(2) 时变系统。时变系统的特点是系统的一个或几个参数是时间 t 的函数,不能用定常微分方程(定常差分方程)来描述。

除了以上的分类方法外,还可以根据其他条件进行分类,例如,按照系统的输入量、输出量的数量将系统分为单输入单输出系统和多输入多输出系统,按系统功能将系统分为温度控制系统、速度控制系统、压力控制系统等,按组成系统的元部件将系统分为机械系统、电力系统等。本书主要介绍单输入单输出线性定常连续反馈控制系统的分析和设计。

1.5 自动控制系统的基本要求

在自动控制系统的分析和设计过程中,需要有一个控制系统性能优劣的评价标准,那就是性能指标,通常是通过控制系统对特定输入信号(如单位阶跃信号)的响应来定义控制系统的性能指标的。在系统能稳定工作的前提下,当控制系统收到外作用信号(输入信号或扰动信号)时,首先进入一个调整过程,称为动态过程或暂态过程,随着时间的推移,系统进入稳态,其输出信号趋于平稳,达到一个稳定值。在整个响应过程中,系统的性能分为动态性能和稳态性能两部分,总的来说,对控制系统性能的基本要求是稳定性、快速性和准确性,即稳、快、准的要求。

1.5.1 稳定性

当对自动控制系统的性能要求归于稳定性、快速性和准确性 3 个词时,稳定性包含了两层含义,其第一层含义是保证系统正常工作的先决条件,又称绝对稳定性,是一个自动控制系统必须满足的一个性能指标。处于平衡状态的控制系统,对作用于系统的外部信号(输入信号或扰动信号)进行响应,若系统具有稳定性,则其能通过自动调整过程,建立新的平衡状态(对输入信号而言)或回到原来的平衡状态(对扰动信号而言)。稳定性的第二层含义是动态调整过程中系统的输出信号偏离稳态值的程度,又称为相对稳定性或平稳性,相对稳定性较好的系统,动态过程中的输出信号与稳态值之间的偏差较小,当输出量偏差较大,即输出量振荡比较强烈时,系统将难以正常工作,甚至导致系统元部件的松动或是损坏。

1.5.2 快速性

快速性是指系统完成动态调整过程的快慢程度,通常用动态调整过程所用的时间来表示,动态调整过程所用的时间越短,系统的快速性越好。控制系统的功能不同,快速性的要求也会有所不同,例如速度控制系统在几秒钟内就完成了动态调整过程,而温度控制系统要完成动态调整过程可能要几十分钟或是几个小时(由炉子的大小和供热环节而决定)。

1.5.3 准确性

准确性是指系统完成动态调整过程之后进入了稳态,其输出量与希望值之间的差值,称

为稳态误差,当稳态误差为零时,控制系统的准确性较好。但在实际系统中往往由于系统的结构、外作用量的形式以及摩擦、间隙等非线性因素的影响,稳态误差不能完全消除。稳态误差是衡量系统控制精度的重要指标。

总之,自动控制系统有三个方面的性能指标,它们是稳定性、动态性能指标和稳态性能指标,稳定性(即绝对稳定性)是系统正常工作的前提条件,动态性能指标有平稳性(又称相对稳定性)和快速性,稳态性能指标有稳态误差,这些指标在自动控制系统中是不能够同时做到最好的,因此在设计系统时要进行兼顾,找到一个最佳配合状态。

习 题

1-1 试阐述下列术语的含义,并举例说明。

自动控制;控制装置与被控对象;输入量与输出量;开环控制与闭环控制;稳定性、快速性与准确性。

1-2 试列举开环控制系统与闭环控制系统的例子,并说明其工作原理。

1-3 闭环控制系统由哪些基本环节组成,各环节的作用是什么?

1-4 炉温控制系统如图 1-12 所示,要求:

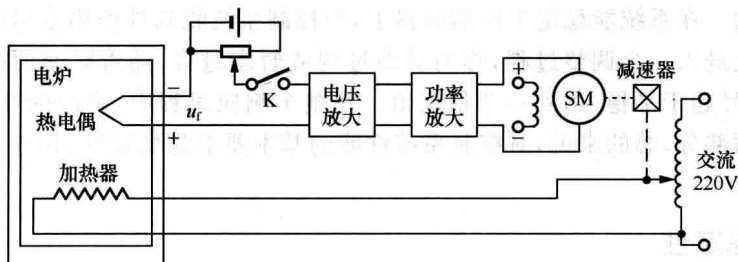


图 1-12 题 1-4 图

(1) 指出系统的输入量、输出量、扰动量,并画出其方框图。

(2) 当系统启动开关 K 闭合后,系统是如何进行调整的?

1-5 图 1-13 是水箱水位自动控制系统原理示意图,希望在任何情况下,水箱水位保持在高度 h 上,试说明系统工作原理并画出系统方框图。

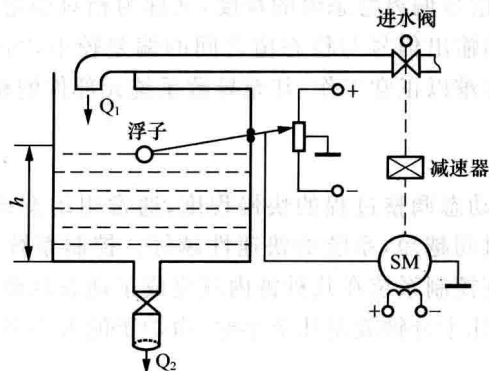


图 1-13 题 1-5 图

第2章

控制系统的数学模型

对自动控制系统的研究包括系统分析和系统设计,前提是建立系统的数学模型。系统的数学模型是指描述系统输入输出性能的数学表达式,实际应用中的各种工业控制系统,如机械、电气、热力、液压、气动等,根据系统参数之间的物理化学等基本规律,均可以将系统的输入输出之间的动态关系用数学表达式(即数学模型)来描述。数学模型代表了系统在运动过程中各变量之间的相互关系,既定性又定量地描述了整个系统的动态过程。

建立系统的数学模型有两种方法,一种是解析法,即根据系统中各环节所遵循的物理化学等规律(如力学、电磁学、运动学、热学等)来列方程组,联立求解所得;另一种方法是实验辨识法,即采用直接给系统加典型输入信号,从实验数据进行分析所得。第一种方法多用于系统参数结构清晰的确定性系统,第二种多用于不确定性系统。

在建立数学模型的过程中,需要注意以下几个问题。

(1) 数学模型分理想数学模型与实际数学模型。多数理想数学模型具有参数多、阶次高、方程复杂的特点,而实际数学模型参数少、阶次低、方程简单,因此控制准确性稍差。

(2) 分清楚系统主要因素与次要因素,忽略次要因素,保证主要因素。这样得到的数学模型既简单易解,又能保证系统的性能指标。

(3) “忽略”是合理的。实际系统大多是小偏差系统,就如电机的机械特性,电机稳定运行后只是在平衡点附近工作。那么可以将非线性、时变问题在此平衡点附近近似处理为线性、定常。然后再在此基础上考虑忽略次要因素所引起的误差问题。这样模型就变得简单许多。

数学模型有多种形式,经典控制论中,有时域的微分方程和差分方程、复数域的传递函数和脉冲传递函数、频率域的频率特性,还有数学模型的图形表示方式结构图与信号流图等,以及现代控制论中的状态方程。本章将介绍微分方程、传递函数、结构图等数学模型的建立与应用。

2.1 控制系统的微分方程

2.1.1 微分方程的建立

列写系统微分方程的步骤可归纳如下。

- (1) 分析系统工作原理与结构组成,确定系统的输入量和输出量。
- (2) 依据各元件所遵循的物理规律或化学规律,列写相应的微分方程。

(3) 消去中间变量,得到输出量与输入量之间关系的微分方程,即数学模型。

(4) 将微分方程标准化,即:将与输出量有关的项放在方程的左边,将与输入量有关的项写在方程的右边,并且降幂排列;若有些参数组合在一起有新的含义,可用一个参量替代。

【例 2-1】 一个具有弹簧—质量—阻尼器的机械位移系统如图 2-1 所示。当外力 $F(t)$ 作用于质量块 m 时, m 产生相对位移 $x(t)$ 。试列写质量块在外力 $F(t)$ 作用下,位移 $x(t)$ 的运动方程。

解: (1) 系统分析

由题意可知,系统的输入量为外力 $F(t)$,输出量为质量块 m 相对于初始状态的位移 $x(t)$,质量 m 的运动速度、加速度分别为 $dx(t)/dt$, $d^2x(t)/dt^2$ 。

根据牛顿第二定律有

$$F(t) - F_1(t) - F_2(t) = m \frac{d^2x(t)}{dt^2} \quad (2-1)$$

其中 $F_1(t)$ 是阻尼器的阻尼力, $F_2(t)$ 是弹簧弹性力。

(2) 各元件微分方程列写

式(2-1)中 $F_1(t)$ 和 $F_2(t)$ 显然为中间变量,阻尼器是一种产生粘性摩擦和阻尼的装置,阻尼力 $F_1(t)$ 的方向与运动方向相反,其大小与运动速度 $dx(t)/dt$ 成正比,即

$$F_1(t) = f \frac{dx(t)}{dt} \quad (2-2)$$

其中 f 为阻尼系数。

弹簧的弹力 $F_2(t)$ 的方向亦与运动方向相反,其大小与位移 $x(t)$ 成正比(这里设弹簧为线性弹簧,弹性系数为 K),即

$$F_2(t) = Kx(t) \quad (2-3)$$

(3) 消去中间变量,求取系统的微分方程

将式(2-2)和式(2-3)代入式(2-1)中,整理后即得该系统的微分方程式

$$m \frac{d^2x(t)}{dt^2} + f \frac{dx(t)}{dt} + Kx(t) = F(t) \quad (2-4)$$

式(2-4)是一个线性定常的二阶微分方程,也就是说弹簧质量阻尼器的数学模型是一个线性定常的二阶微分方程。

【例 2-2】 RLC 网络的电路如图 2-2 所示,试列写其微分方程。图中 R 、 L 、 C 均为常数, $u_i(t)$ 为输入量, $u_o(t)$ 为输出量。输出端开路,相当于输出阻抗无穷大,忽略负载效应。

解: (1) 题目已给出系统的输入量、输出量,因此第一步省略。

(2) 列出各元件的微分方程。解决电路问题只需熟练运用电路的两大定律:基尔霍夫定律和欧姆定律。由基尔霍夫电压定律可得回路的方程。

$$u_i(t) = u_L(t) + u_R(t) + u_o(t) \quad (2-5)$$

元件 R 、 L 、 C 遵循欧姆定律,即

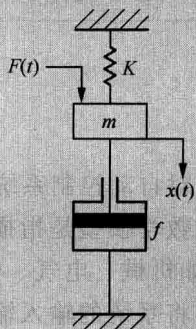


图 2-1 弹簧—质量—阻尼器机械位移系统

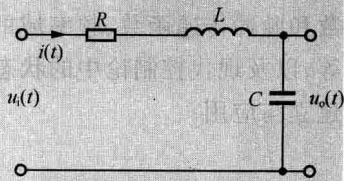


图 2-2 RLC 网络