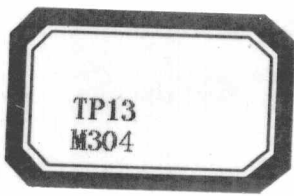


自动控制原理

主 编 满红

副主编 梁迎春 冀勇钢 孙淑娟 贾世杰

清华大学出版社



郑州大学 *04010744870Z*

自动控制原理

主编

满红

副主编

梁迎春 冀勇钢 孙淑娟 贾世杰



清华大学出版社

北京

TP13
M304

内 容 简 介

本书从实际应用的角度出发,介绍了经典控制理论和现代控制理论的基本概念、分析方法及应用。书中包括了控制系统的数学模型、时域分析法、根轨迹分析法、频率特性法、离散系统分析、非线性系统分析和自动控制理论综合等内容,强调的是物理概念和实际应用。

全书力求突出物理概念,尽量减少烦琐的数学推导,叙述深入浅出,通俗易懂,以大量例题形式介绍各种方法的实现过程,并结合当前报考研究生的需求,总结各类题型,从而达到抛砖引玉的效果。

本书力图以简明、实用为特色,以满足工程需要为宗旨。

本书可作为应用型本科自动化、机电一体化及相关专业的教学用书,也可作为报考研究生的参考教材,还可作为各类职业技术学院、专科学校、成人高校等相关专业的教材。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/满红主编.--北京:清华大学出版社,2011.11

ISBN 978-7-302-27048-5

I. ①自… II. ①满… III. ①自动控制理论 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 204171 号

责任编辑:张占奎 李 嫒

责任校对:赵丽敏

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:15.25 字 数:363千字

版 次:2011年11月第1版 印 次:2011年11月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:29.80元

前言



foreword

随着科学技术的进步,自动控制技术在各个领域中的应用已日趋广泛,不但使生产设备和生产过程实现了自动化,大大提高了劳动生产率和产品质量,改善了劳动条件,还在人类征服大自然,改善居住、生活条件等方面发挥了非常重要的作用。

自动控制原理是研究自动控制基本规律的学科,是分析和设计自动控制系统的理论基础。本书是为满足应用型本科电气、自动化及机电类各专业教学的需要而编写的。一般将自动控制理论分为经典控制理论和现代控制理论。考虑到实际工程中仍大量应用经典控制理论及目前报考研究生专业课考试的需要等情况,本书以经典控制理论和现代控制理论及其应用为主要内容,全书分为上、下两篇,共9章。其中,包括自动控制的一般概念,控制系统的数学模型、时域分析法、根轨迹分析法、频率特性法、离散控制系统分析、非线性系统分析和自动控制理论的综合等内容。

编者根据多年讲授本课程的经验,力求突出重点,精简篇幅,强调物理概念,较少使用烦琐的数学推导,加强理论与实际的结合,在应用方面下工夫,以突出应用型本科的特色为主。提出了适合应用型院校分层次学习的理念:上篇主要针对普通学生的基础理论学习;下篇主要用于提高学生理论与实际结合的能力,是总结多所学校多年考研题型精炼而成的。本书的主要特点是:以简明的语言介绍概念,高度概括各类题型的解题方法,简化数学推导,增加实例说明,方便自学。

本书由大连科技学院满红任主编,编写了第1,5,9章,并负责全书的统稿工作;梁迎春任副主编,编写了第2,3章;大连科技学院冀勇钢任副主编,编写了第4章,并负责全书的图形绘制工作;贾世杰任副主编,编写第6,7章,并参加全书的统稿工作;孙淑娟编写了第8章。本书由大连理工大学邵诚教授担任主审,邵教授仔细审阅了全书并提出了宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢。同时向元泽怀、王琳、陈伦强、肖汉敏、杨旭、李艳斌等人为本书的出版给予的支持和帮助致以诚挚的谢意。

由于编者的水平有限,书中不妥与错误之处在所难免,恳请广大读者和专家批评指正。

编者

2011年6月



上 篇

第 1 章 自动控制的一般概念	3
1.1 自动控制的基本概念与方式	3
1.1.1 自动控制的基本概念.....	3
1.1.2 自动控制系统的基本控制方式.....	4
1.2 自动控制系统的分类	6
1.3 对控制系统性能的基本要求及评价	8
1.3.1 对控制系统的基本要求.....	8
1.3.2 对控制系统性能的评价.....	9
本章小结	12
习题	12
第 2 章 控制系统的数学模型	14
2.1 线性定常系统微分方程的建立及求解.....	14
2.1.1 线性定常系统微分方程的建立	14
2.1.2 线性定常系统微分方程的求解	16
2.2 线性定常系统的传递函数.....	17
2.2.1 传递函数的基本概念	17
2.2.2 传递函数的求解方法	17
2.2.3 传递函数的性质	19
2.3 控制系统的结构图及其等效变换.....	19
2.3.1 结构图的组成和绘制	19
2.3.2 结构图的等效变换及化简	20
2.3.3 控制系统各类传递函数的确定方法	24
2.4 控制系统的信号流图.....	26
2.4.1 信号流图的基本概念	26
2.4.2 信号流图的绘制	27
2.4.3 梅森增益公式及其应用	29

本章小结	31
习题	32
第 3 章 线性系统的时域分析法	34
3.1 一阶系统的时域分析	34
3.1.1 一阶系统描述	34
3.1.2 其他典型输入信号的一阶系统输出响应	35
3.2 二阶系统的时域分析	36
3.2.1 二阶系统描述	36
3.2.2 二阶欠阻尼系统的性能指标计算	40
3.3 控制系统的稳定性分析	43
3.3.1 稳定的基本概念	43
3.3.2 劳斯稳定判据	44
3.4 控制系统的稳态误差分析	47
3.4.1 误差与稳态误差的关系	47
3.4.2 控制系统类型	48
3.4.3 给定信号作用下的稳态误差	48
本章小结	51
习题	52
第 4 章 线性系统的根轨迹法	53
4.1 根轨迹的基本概念	53
4.1.1 根轨迹的概念	53
4.1.2 根轨迹方程	54
4.2 根轨迹绘制的基本法则	55
4.2.1 绘制根轨迹的基本法则	55
4.2.2 闭环系统零点、极点与时间响应性能的关系	62
本章小结	62
习题	62
第 5 章 线性系统的频率特性法	64
5.1 频率特性的概述	64
5.1.1 频率特性的基本概念	64
5.1.2 开环传递函数典型环节的分解	66
5.1.3 系统典型环节与开环频率特性的对应关系	66
5.2 典型环节及系统开环频率特性的绘制	67
5.2.1 典型环节的极坐标图	67

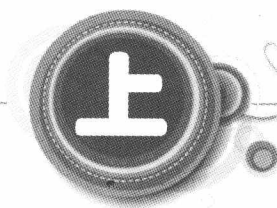
5.2.2	系统开环极坐标图的绘制	70
5.2.3	典型环节的对数坐标图	73
5.2.4	系统开环对数坐标图的绘制	78
5.3	频率域线性系统的稳定性分析	80
5.3.1	奈氏判据中的相关概念	80
5.3.2	奈奎斯特稳定判据的简化描述	81
5.3.3	奈奎斯特稳定判据在频率特性曲线上的应用	82
5.4	频率域线性系统的相对稳定性分析	85
5.4.1	幅值穿越频率和相位裕量	85
5.4.2	相位穿越频率和幅值裕量	86
5.4.3	开环对数幅频特性曲线与系统性能之间的关系	87
	本章小结	88
	习题	88
第 6 章	线性离散系统的分析	90
6.1	线性离散系统的概述	90
6.1.1	线性离散系统的基本结构	90
6.1.2	线性离散系统的相关概念	91
6.2	z 变换理论	93
6.2.1	z 变换的描述	93
6.2.2	z 变换的求解方法	93
6.2.3	z 反变换	95
6.2.4	z 变换在求解差分方程中的应用	96
6.3	离散系统的数学模型	97
6.3.1	脉冲传递函数的定义	97
6.3.2	脉冲传递函数的求解	97
6.3.3	开环系统的脉冲传递函数	98
6.3.4	闭环系统的脉冲传递函数	100
6.3.5	脉冲传递函数与差分方程的相互转换	101
6.4	离散系统的动态性能分析	101
6.5	离散系统的稳定性分析	102
6.5.1	z 域内离散系统稳定的充分必要条件	103
6.5.2	离散系统的劳斯稳定判据	104
6.6	离散系统的稳态误差分析	105
6.6.1	单位阶跃信号输入时系统的稳态误差	106
6.6.2	单位斜坡信号输入时系统的稳态误差	106
6.6.3	单位加速度信号输入时系统的稳态误差	107

本章小结·····	108
习题·····	108
第7章 非线性系统分析·····	110
7.1 非线性系统的基本概念·····	110
7.1.1 非线性系统的数学描述·····	110
7.1.2 非线性特性的分类·····	110
7.1.3 非线性系统的特点·····	112
7.2 非线性系统的描述函数分析法·····	112
7.2.1 描述函数的基本概念·····	112
7.2.2 求解非线性特性的描述函数·····	114
7.2.3 用描述函数法分析非线性系统的稳定性·····	116
7.3 非线性系统的相平面分析法·····	119
7.3.1 相平面的基本概念·····	119
7.3.2 绘制相轨迹·····	120
7.3.3 用相平面法分析非线性系统·····	122
本章小结·····	128
习题·····	129
第8章 线性系统的状态空间分析与综合·····	131
8.1 线性系统的状态空间描述·····	131
8.1.1 线性系统状态空间描述的基本概念·····	131
8.1.2 线性定常系统状态空间表达式的建立方法·····	133
8.1.3 线性定常系统状态方程的解·····	139
8.1.4 状态空间表达式与系统传递函数矩阵的关系·····	141
8.2 线性系统的可控性与可观性·····	142
8.2.1 可控性与可观测性的基本概念·····	142
8.2.2 线性定常系统可控性和可观性的判断方法·····	143
8.3 线性定常系统的线性变换·····	145
8.3.1 线性定常系统状态空间表达式的线性变换·····	146
8.3.2 线性定常系统结构分解·····	151
8.4 线性定常系统的反馈结构及状态观测器·····	157
8.4.1 线性定常系统的反馈结构及其对系统特性的影响·····	157
8.4.2 线性定常系统的极点配置·····	158
8.4.3 全维状态观测器及其设计·····	160
8.5 李雅普诺夫稳定性分析·····	163
8.5.1 基本概念·····	163

8.5.2 线性定常系统的李雅普诺夫稳定性分析·····	165
本章小结·····	166
习题·····	167

下 篇

第 9 章 自动控制理论的综合 ·····	173
9.1 线性系统数学模型的建立方法 ·····	173
9.1.1 原理描述·····	173
9.1.2 举例说明数学模型的建立及求解方法·····	173
9.2 线性系统时域分析法的应用 ·····	177
9.2.1 由系统结构图或响应曲线确定传递函数或系统中的参数 ·····	177
9.2.2 确定系统的传递函数并分析稳定性和稳态误差等情况·····	179
9.2.3 由开环传递函数确定主导极点与闭环系统动态特性的关系·····	180
9.2.4 由状态反馈矩阵求解与时间 $t=0$ 有关的系数矩阵 A ·····	180
9.3 线性系统根轨迹法的应用 ·····	181
9.4 线性系统频率特性法的应用 ·····	185
9.4.1 线性系统频率特性法描述·····	185
9.4.2 线性系统频率特性与传递函数的关系·····	189
9.5 线性离散控制系统的设计及应用 ·····	192
9.6 非线性系统的设计及应用 ·····	196
9.6.1 用描述函数法分析非线性系统·····	196
9.6.2 用相平面法分析非线性系统·····	199
9.6.3 非线性系统性能分析·····	202
9.7 状态空间法设计及应用 ·····	204
9.7.1 确定状态空间表达式的相关问题·····	205
9.7.2 给定状态空间表达式或传递函数确定相关问题·····	207
9.7.3 设计状态反馈及状态反馈矩阵 K ·····	212
9.7.4 已知状态空间表达式设计全维状态观测器·····	213
9.7.5 线性离散系统的状态空间表达式求解及稳定性分析·····	215
9.8 控制系统的综合校正与设计 ·····	217
9.8.1 基础知识介绍·····	217
9.8.2 由已知条件对系统进行校正实现·····	219
附录 A ·····	226
参考文献 ·····	231



上 篇

- 第 1 章 自动控制的一般概念
- 第 2 章 控制系统的数学模型
- 第 3 章 线性系统的时域分析法
- 第 4 章 线性系统的根轨迹法
- 第 5 章 线性系统的频率特性法
- 第 6 章 线性离散系统的分析
- 第 7 章 非线性系统分析
- 第 8 章 线性系统的状态空间分析与综合

自动控制的一般概念

本章将简要介绍有关自动控制的一般概念、自动控制系统的组成和分类、控制系统的性能指标等内容。

1.1 自动控制的基本概念与方式

1.1.1 自动控制的基本概念

在现代科学技术的许多领域,自动控制技术起着越来越重要的作用。所谓自动控制就是指在没有人直接参与的情况下,控制装置或者控制器能够按照预先设定的规律使机器、设备或者生产过程(统称为被控对象)的某个工作状态或者参数(即控制量)自动地运行。

例如,家用的全自动洗衣机、电冰箱、电暖气等都是常见的小型自动控制系统;电阻炉温度控制系统可以按照给定的温度值自动地保持炉内温度恒定;人造卫星可以准确地进入预定轨道运行并能被收回等,这些都体现出自动控制的优越性及特点。

自动控制技术具有节省人力,提高系统控制精度,完成人工控制系统无法完成的工作等特点,广泛应用于工业、农业、交通、国防、宇航、社会等领域,自动控制已经成为现代社会生活中不可缺少的重要组成部分。

下面举例说明自动控制的基本概念。

例 1-1 恒压人工控制系统如图 1-1 所示。

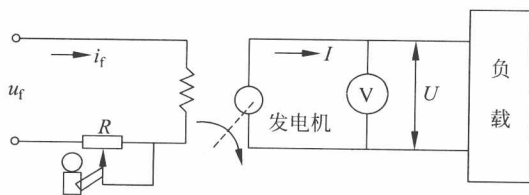


图 1-1 恒压人工控制系统

此系统的控制任务是保持发电机输出电压 U 不变。在发电机转速 n 不变的情况下,发电机输出电压的大小受负载大小变化的影响;调节电位器 R 的触点位置,可以改变发电机

输出电压的大小。

采用人工操纵,靠人眼观察电压表显示的数据变化,用手不断调节电位器触点位置,以保持发电机输出电压大小不变,显然,这种人工控制方式的控制实时性和精度都难以满足要求。

例 1-2 恒压自动控制系统如图 1-2 所示。

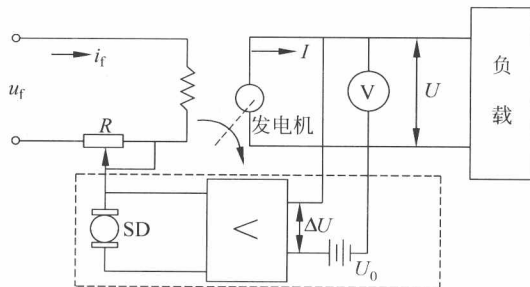


图 1-2 恒压自动控制系统

给定参考电压为 U_0 ,将电压表测量出来的电压 U 和 U_0 作比较,则放大器输入端电压为 $\Delta U=U-U_0$,经过放大器调整执行电机 SD 两端电压大小,带动了电位器 R 触点的位置发生相应变化,继而调节发电机输出电压的大小。只要 $\Delta U \neq 0$,系统就开始自动调节直到发电机输出电压 U 和给定电压 U_0 相等为止,这就实现了保持输出电压恒定的自动控制目的。采用自动控制方式来控制电压大小能使系统具有较高精度和达到实时性等要求。

由上述可知,一个自动控制系统包括以下几个部分:①被控对象;②被控量;③控制器;④执行机构;⑤给定量;⑥检测装置。

恒压自动控制系统中的被控对象是发电机,发电机的输出电压 U 是被控量,给定量是 U_0 。为方便分析自动控制系统,一般采用结构框图来表示各个部件之间的结构关系。恒压自动控制系统的结构框图如图 1-3 所示。

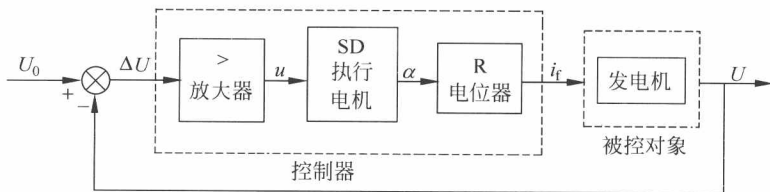


图 1-3 恒压自动控制系统结构框图

从图 1-3 可以看出,恒压自动控制系统是典型的负反馈控制系统。在自动控制系统中负反馈系统是将被控量以负反馈的形式与给定量进行比较,并利用偏差来不断地消除其系统运行的偏差。

因此,为了使所设计的自动控制系统满足工程实际的需要,必须研究系统的结构和参数与系统性能之间的关系,这也是自动控制原理的主要任务。

1.1.2 自动控制系统的基本控制方式

控制系统的类型很多,它们的结构类型和所完成的任务各不相同。控制系统中最常见

的两种控制方式是开环控制和闭环控制,这两种控制方式的组合就是复合控制方式。

1. 开环控制

如图 1-4 所示,控制器与被控对象之间只有顺向作用而无反向联系时,称为开环控制,其显著的特点是给定一个输入量,就有一个输出量与之对应,输出量的改变不会对输入量产生影响。

例 1-3 图 1-5 是直流电动机转速开环控制系统,对应的系统结构框图如图 1-6 所示。在此系统中,给定电压 u_g 经放大后得到电枢电压 u_a ,电枢电压 u_a 对应电机转速 n ;若改变 u_g 可以得到不同的转速 n ,该系统只有输入量 u_g 对输出量 n 的单向控制,输出量和输入量之间不存在反馈回路。



图 1-4 开环控制系统

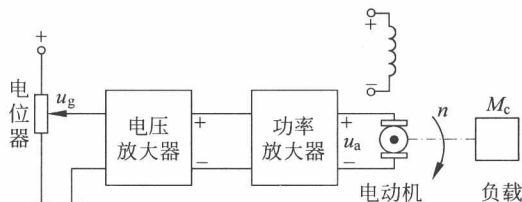


图 1-5 直流电动机转速开环控制系统

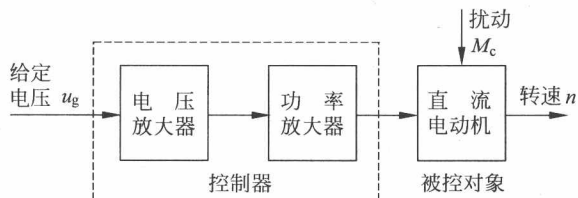


图 1-6 直流电动机转速开环控制系统结构框图

开环控制方式的特点是结构简单、系统稳定性好、调试方便。但如果在控制过程中受到来自系统外部的各种扰动因素时,不能自动进行补偿,抗干扰性能差、控制精度较低,这就大大限制了它的应用范围。开环控制一般只能用于对控制性能要求不高的场合。

2. 闭环控制

控制器与被控对象之间不但具有顺向作用,还有反向联系,即系统中存在着被控量对控制过程的影响,这种控制方式称为闭环控制。闭环控制常被称为反馈控制,相应的控制系统称为闭环(或反馈)控制系统,如图 1-7 所示。

例 1-4 图 1-8 是直流电动机转速闭环控制系统,对应的系统结构框图如图 1-9 所示。其中测速发电机是速度检测元件,其作用是将直流电动机实际转速转换成与转速成比例的电压信号。

假设系统现正在某一转速 n 状态下运行,若一旦受到某些干扰(如负载转矩突然增大)

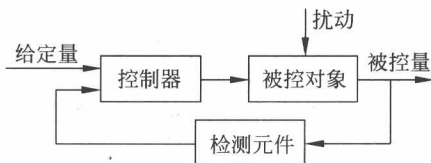


图 1-7 闭环控制系统

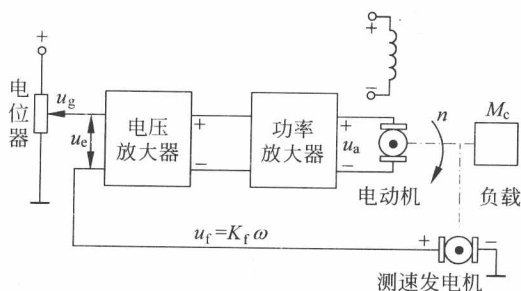


图 1-8 直流电动机转速闭环控制系统

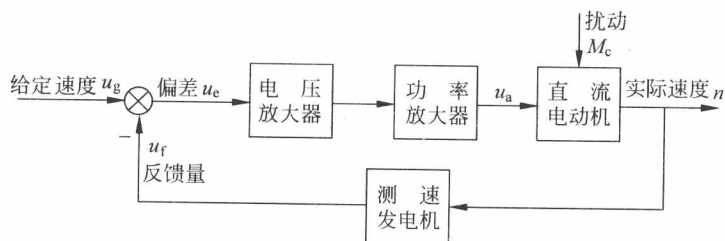
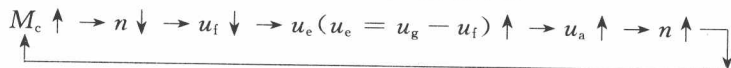


图 1-9 直流电动机转速闭环控制系统结构框图

而引起转速下降时,系统就会自动地产生如下的调整过程:



从上述例子可以看出,闭环控制系统的反馈原理就是将系统的被控量以负反馈的形式与给定量进行比较,并利用偏差来不断地消除其系统运行的偏差。

因此,闭环控制系统具有如下的特点。

(1) 抑制扰动能力强。

能抑制内部或者外部扰动对系统的影响,可采用低成本元件构成高精度系统,与开环控制相比,对参数变化不敏感,并能获得满意的动态特性和控制精度,使得闭环控制系统在控制工程中得到了广泛的应用。

(2) 系统结构复杂,增加了调试难度。

引入反馈会增加系统的复杂性,如果闭环系统参数的选取不适当,系统可能会产生振荡,甚至失去稳定性而导致无法正常工作。这也是自动控制理论和系统设计必须解决的重要问题。

1.2 自动控制系统的分类

自动控制系统的分类方法较多,常见的有以下几种。

1. 按照描述系统性能的动力方程分

按照描述系统性能的动力方程的不同,可分为线性系统和非线性系统。

若一个元件的输入与输出特性是线性的,则称该元件为线性元件,否则称为非线性元

件。若构成一个系统中的所有元件都是线性元件,则该系统称为线性系统;若构成系统的元件中有一个或一个以上是非线性元件,则该系统称为非线性系统。

1) 线性系统

线性系统可用线性微分方程(或差分方程)描述,即其各项系数均与变量无关。

(1) 线性定常连续系统微分方程式的一般形式为

$$\begin{aligned} a_0 \frac{d^n c(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} c(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_{n-1} \frac{d c(t)}{dt} + a_n c(t) \\ = b_0 \frac{d^m r(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} r(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_{m-1} \frac{d r(t)}{dt} + b_m r(t) \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中, $c(t)$ 表示系统的被控量, $r(t)$ 表示系统的给定量。

① 当系数 $a_0, a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m$ 是常数时,该系统称为线性定常系统,这类系统是本书主要讨论的对象。

② 当系数 $a_0, a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m$ 随时间变化时,该系统称为线性时变系统。

(2) 线性定常离散系统差分方程式的一般形式为

$$\begin{aligned} a_0 c(k+n) + a_1 c(k+n-1) + \cdots + a_{n-1} c(k+1) + a_n c(k) \\ = b_0 r(k+m) + b_1 r(k+m-1) + \cdots + b_{m-1} r(k+1) + b_m r(k) \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中, $c(k)$ 表示输出序列, $r(k)$ 表示输入序列, $a_0, a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m$ 为常数。

2) 非线性系统

非线性系统可用非线性微分方程(或差分方程)描述。

非线性微分方程(或差分方程)的特点是系数与变量有关,或者方程中含有变量及其导数的高次幂或乘积项。例如

$$\begin{aligned} \ddot{y}(t) + y(t)\dot{y}(t) + y^2(t) &= r(t) \\ y(t) &= r(t)\cos \omega t \end{aligned} \quad (1-3)$$

2. 按照系统中信号在传递过程中的特点分

按照系统中信号在传递过程中的不同特点,可分为连续系统和离散系统。

从系统中的信号来看,若系统各部分的信号都是时间 t 的连续函数,即整个过程中都是模拟信号,则称此系统为连续系统。

若系统中有一处或者多处信号为时间 t 的离散函数,即此处信号变成脉冲信号或者数字信号,则称此系统为离散系统。计算机控制系统、采样系统均是离散系统,其表现形式如图1-10所示。

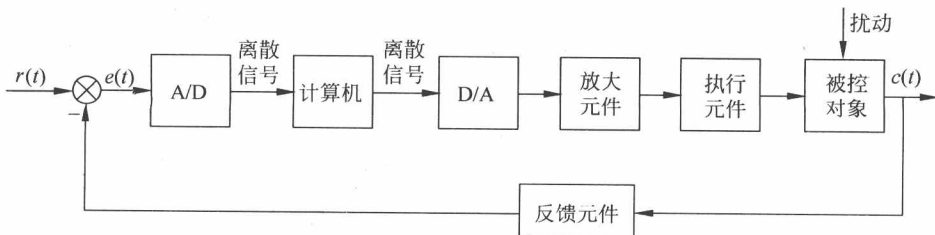


图 1-10 计算机控制系统

3. 按照系统输入信号的变化规律分

按照系统输入信号的不同变化规律,可分为恒值系统、随动系统和程序控制系统。

(1) 恒值系统 该类系统的输入信号是一个常数。系统受到扰动后,被控量偏离理想值而出现偏差,利用偏差消除偏差可使被控量调整到给定值或接近给定值。上述的恒压控制系统、恒转速闭环控制系统均属于恒值系统。

(2) 随动系统 这类系统的输入信号是未知的函数,系统能使被控量准确、快速地跟踪输入信号的变化。随动系统又称伺服系统。火炮自动瞄准系统、船舶自动舵均属此类系统。

(3) 程序控制系统 这类系统的输入信号是已知的函数,并要求被控量随之变化。例如机械加工中的数控伺服系统及一些自动化生产线等都属于该类系统范畴。

此外,根据系统控制元件的类型,还可分为机电控制系统、液压控制系统、气动系统以及生物系统等;根据系统的功能作用,可分为温度控制系统、压力控制系统、位置控制系统等。

1.3 对控制系统性能的基本要求及评价

1.3.1 对控制系统的基本要求

自动控制理论是研究自动控制共同规律的一门学科。尽管自动控制系统有不同的类型,对每种系统也有不同的特殊要求。但总的说来,当各类系统在已知系统结构和参数的情况下,都是希望所设计的控制过程尽量接近理想的控制过程。因此,在工程上,对每一类系统的被控量随时间变化的全过程提出的基本要求都是一样的,可以归结为稳定性、快速性和准确性这三个方面,即稳、快、准,并用这三个方面来评价自动控制系统的总体精度和设计水平。

1. 稳定性

稳定性是保证控制系统正常工作的先决条件,线性控制系统的稳定性是由系统的结构和参数决定的,与外界因素和初始条件无关。

一个稳定的控制系统是指系统在受到外作用后,经过一段时间,其被控量可以达到某一个稳定状态,如图 1-11 所示;如果被控量最终是发散的,则系统是不稳定的,如图 1-12 所示;若被控量最终是等幅振荡的,即系统处于临界稳定状态,则系统也属于不稳定系统;不稳定系统是无法正常工作的。

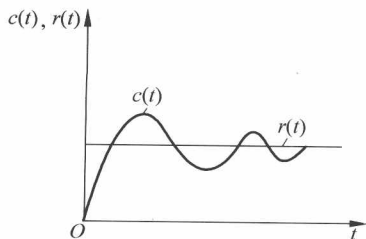


图 1-11 稳定系统

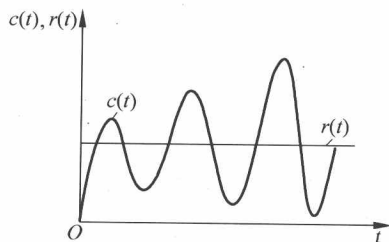


图 1-12 不稳定系统