

普通高等教育“十三五”规划教材

自动控制原理

(第2版)

Principles of Automatic Control
(2nd Edition)

王卫江 陈志铭 王晓华 ◎ 编著

普通高等教育“十三五”规划教材

自动控制原理

(第2版)

Principles of Automatic Control
(2nd Edition)

王卫江 陈志铭 王晓华 ◎ 编著



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书主要介绍闭环控制系统的基本理论及其工程分析和设计方法。全书共 9 章,前 6 章主要介绍控制的发展、闭环系统的基本原理、数学模型的建立、控制系统的基本分析方法、稳定性分析以及控制系统的设计和校正。后 3 章分别讲述现代控制理论、计算机控制理论和非线性控制系统。

全书内容力图构成一个完整的体系,使读者掌握控制理论的基本分析和设计方法。

本书可以作为自动化、通信、计算机、机电、光电、化工等专业本科生的教材,也可供相关专业的工程技术人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理 / 王卫江, 陈志铭, 王晓华编著. —2 版. —北京: 北京理工大学出版社, 2017.7

ISBN 978-7-5682-4263-9

I. ①自… II. ①王… ②陈… ③王… III. ①自动控制理论 IV. ①TP13

—中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 155370 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 16.25

字 数 / 382 千字

版 次 / 2017 年 7 月第 2 版 2017 年 7 月第 1 次印刷

定 价 / 48.00 元

责任编辑 / 陈莉华

文案编辑 / 陈莉华

责任校对 / 孟祥敬

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

前言(第2版)

本教材阐述了自动控制理论中的基本概念与基本原理,涵盖了经典控制理论和现代控制理论中的基本内容。

本教材是在 2009 年出版的第 1 版的基础上进行的进一步修订,保持了原书的基本结构,一共包含 9 章内容。首先对原书的错误进行了勘误与修正,然后根据需要补充了部分细节内容,如典型环节的极坐标图、波特图、极坐标图的绘制方法、滞后-超前补偿网络的设计方法等诸多部分以及部分例题,使内容结构更加清晰完整。

本教材适用于高等院校电子、通信、计算机等非自动化专业的教材,也可作为成人教育和继续教育的教材,亦可供有关科技人员参考使用。

本教材第 2 版参加编写的人员及具体分工是:第 1、2、3 章由王卫江副教授编写;第 4、5、6 章由陈志铭副教授编写;第 7、8、9 章由王晓华副教授编写。特别要感谢第 1 版的两位编者,韩绍坤教授和许向阳副教授,在他们打下的第 1 版的良好基础之上,我们的修订得以顺利完成,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,对于书中存在的缺点和错误,恳请各位读者批评指正。

编 者

前言 (第1版)

本教材全面阐述了自动控制的基本理论,系统地介绍了自动控制系统分析和设计的基本方法。全书共分9章,第1章对自动控制理论的起源、现状、发展进行了简单介绍;第2章介绍控制系统的数学描述方法,系统地介绍了控制系统的数学模型以及利用结构图等效化简和梅逊增益公式确定系统闭环传递函数的方法;第3章介绍了线性系统的时域分析方法,重点对系统的稳定性、快速性、准确性的分析方法进行了讨论;第4章介绍了线性系统根轨迹分析方法,重点讨论了根轨迹的绘制法则以及利用根轨迹分析系统性能的方法;第5章介绍了系统频域分析方法,对频域法作图、分析的原理进行了详细讨论;第6章介绍了控制系统的综合和校正方法,分别介绍了采样根轨迹方法和频率特性方法进行系统校正的方法;第7章介绍了控制系统的状态空间分析方法,对系统的状态空间描述、运动分析、可控性、可观测性、线性变换以及综合设计方法进行了讨论;第8章介绍了线性离散系统的分析与校正,讨论了 z 变换理论,介绍了线性离散系统的分析方法;第9章讨论了非线性系统的描述函数法。

本教材可作为高等学校自动化、通信、计算机、自动控制等专业的教材,也可作为成人教育和继续教育的教材,亦可供有关科技人员参考。

本教材由北京理工大学信息科学技术学院“自动控制理论基础 B 教学组”集体分工编写。参加编写的人员及具体分工是:第1、2、3章由韩绍坤教授编写;第4、5、6章由许向阳副教授编写;第7、8、9章由王晓华副教授编写。对书中存在的错误及不妥之处,恳请各位读者、同行批评指正。

编 者

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	001
1.1 自动控制及其发展概述	001
1.2 自动控制的基本方式	003
1.3 控制系统的分类及组成	006
1.4 对控制系统性能的基本要求	009
1.5 本课程的任务	009
习题	010
第 2 章 控制系统的数学模型	011
2.1 控制系统的时域模型	011
2.2 非线性微分方程的线性化	017
2.3 传递函数	020
2.4 动态结构图(方框图)及其简化	030
2.5 系统对给定作用和扰动作用的传递函数	042
2.6 信号流图和梅逊公式	044
习题	049
第 3 章 时域分析法	052
3.1 典型控制过程及性能指标	052
3.2 一阶系统的时域分析	057
3.3 二阶系统的时域分析	063
3.4 高阶系统的时间响应概述	077
3.5 稳定性和代数判据	078
3.6 稳态误差及误差系数	085
习题	095
第 4 章 根轨迹法	096
4.1 引言	096
4.2 根轨迹的概念	096
4.3 绘制根轨迹的基本规则	098
4.4 应用根轨迹进行参数设计	107

4.5 参数根轨迹法	108
习题	112
第5章 控制系统的频率特性	114
5.1 引言	114
5.2 频率特性	114
5.3 频率特性图	115
5.4 奈奎斯特稳定性判据	133
5.5 控制系统的相对稳定性	138
5.6 频率特性与控制系统性能指标	140
习题	144
第6章 控制系统的综合和校正	147
6.1 引言	147
6.2 系统校正的基本概念	147
6.3 系统设计方法	149
6.4 用根轨迹方法设计校正网络	152
6.5 用频率特性方法设计超前校正网络	160
习题	175
第7章 现代控制理论基础	178
7.1 状态空间法的基本概念	178
7.2 线性定常系统状态空间方程的建立	180
7.3 线性定常系统的运动分析	190
7.4 线性系统的能控性和能观测性	194
7.5 线性系统的状态反馈与极点配置	200
7.6 状态观测器	204
习题	211
第8章 计算机控制系统	214
8.1 离散控制系统概述	214
8.2 采样过程及采样定理	215
8.3 信号的复现与保持器	217
8.4 线性离散时间系统的数学模型	218
8.5 线性离散系统的稳定性	224
8.6 线性离散系统的时域分析	227
习题	233

第9章 非线性控制系统	235
9.1 非线性系统概述	235
9.2 非线性系统的分析方法	238
9.3 用描述函数法分析稳定性	243
习题	245
参考文献	249

第1章

绪论

1.1 自动控制及其发展概述

自动控制作为一种重要的技术手段,能在没有人参与的情况下,高速度和高精度地自动完成被控对象的运动。它已在宇宙航行、军事装备的自动化、工业过程的自动控制、自动检测等方面获得了广泛的应用。自动控制在工业、农业、国防及科学技术的现代化中起着重要作用,自动控制技术的应用不仅使生产过程实现自动化,从而提高劳动生产率,增加产品量,降低生产成本,提高经济效益,改善劳动条件,使人们从繁重的体力劳动和单调重复的脑力劳动中解放出来,这在冶金、采矿、机械、化工、电子等部门尤为明显。同时,自动控制又可使工作具有高度的准确性,大大地提高了产品的质量和数量,提高了武器的命中率和战斗力。近年来,自动控制的应用范围还扩展到交通管理、生物医学、生态环境、经济管理、社会科学和其他许多社会生活领域,并对各学科之间的相互渗透起到促进作用。在人类改造大自然、探索新能源、发展空间技术和创造人类社会文明方面都具有十分重要的意义。

自动控制理论是在人类改造自然的生产实践活动中孕育、产生,并随着社会生产和科学技术的进步而不断发展、完善起来的。早在古代,劳动人民就凭借生产实践中积累的丰富经验和对反馈概念的直观认识,发明了许多闪烁着控制理论智慧火花的杰作。第一次工业革命促进了自动控制的飞速发展,1788年,由詹姆斯·瓦特(James Watt)发明的蒸汽机离心调速器是一个最著名的例子。在他发明的蒸汽机上使用了离心调速器,解决了蒸汽机的速度控制问题,引起了人们对控制技术的重视。蒸汽机在某些条件下,转速会发生振荡,这个现象引起了一些学者的兴趣。1868年,英国物理学家麦克斯威尔(J. C. Maxwell)根据力学原理,用常系数线性微分方程描述了调速器—蒸汽机—负荷系统,并得出简单的代数判据,圆满地解决了稳速问题,开辟了用数学方法研究控制系统的途径。此后,英国数学家劳斯(E. J. Routh)和德国数学家古尔维茨(A. Hurwitz)分别在1877年和1895年独立地建立了直接根据代数方程的系数判别系统稳定性的准则,就是现在的劳斯—古尔维茨判据。用此准则设计系统,可以保证系统的稳定性,并具有满意的控制精度。这些方法奠定了经典控制理论中时域分析法的基础。1932年,美国物理学家奈奎斯特(H. Nyquist)研究了长距离电话线信号传输中出现的失真问题,运用复变函数理论建立了以频率特性为基础的稳定性的判据,奠定了频率响应法的基础。第二次世界大战前夕,自动控制理论有了进一步的发展。1934年,赫兹(H. L. Hazen)发表了具有历史意义的著作《伺服机构理论》,提出了用于位置控制系统的伺服机构的概念,讨论了可以精确跟踪变化的输入信号的继电式伺服机构。随后,波特(H. W. Bode)和尼柯尔斯(N. B. Nichols)在20世纪30年代末和40年代初进一步将频率响应法加以发展,形成

了经典控制理论的频域分析法,为工程技术人员提供了一个设计反馈控制系统的有效工具。

第二次世界大战期间,军工技术的发展,要求控制系统能够准确地跟踪迅速变化的目标,即要求系统有良好的瞬态特性。如在设计研制飞机自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达天线控制系统及其他军用系统时,这些系统的复杂性和对快速跟踪、精确控制的高性能追求,迫切要求拓展已有的控制技术,促使了许多新的见解和方法的产生。同时,还促进了对非线性系统、采样系统以及随机控制系统的研究。当时设计这类系统所需的理论已经在通信工程中发展形成,这就是以奈奎斯特(H. Nyquist)稳定判据为基础的频率响应理论。它对于分析、设计单变量系统是非常有效的工具。设计者只需要根据系统的开环频率特性,就能够判别闭环系统的稳定性和给出稳定裕量。同时又能非常直观地表示出系统的主要参数,即开环增益与闭环系统稳定性的关系。频率响应法圆满地解决了单变量系统的设计问题。在此基础上,波特(H. W. Bode)于1945年发表了用图解法来分析和综合反馈控制系统的方法,并将其应用于控制工程中,这就形成了控制理论中用于分析和设计控制系统的频率法。第二次世界大战推动了自动控制理论和实践的发展。飞机、火炮、舰船快速精确的控制,雷达跟踪和导弹制导技术发展之快令人惊奇。

战后,随着这些新理论及实践成果的公布,控制理论出现了蓬勃发展的新阶段。1948年,美国科学家伊万斯(W. R. Evans)提出了根据系统参数变化时特征方程的根变化的轨迹来研究控制系统的“根轨迹”理论,创建了用微分方程模型来分析系统性能的整套方法,为分析系统性能随系统参数变化的规律性提供了有力工具,被广泛应用于反馈控制系统的分析、设计中。以传递函数作为描述系统的数学模型,以时域分析法、根轨迹法和频域分析法为主要分析设计工具,构成了经典控制理论的基本框架。到20世纪50年代,经典控制理论发展到相当成熟的地步,形成了相对完整的理论体系。至此,控制理论发展的第一阶段——自动调节阶段基本完成。建立在频率法和根轨迹法基础上的控制理论,通常称为经典控制理论。经典控制理论研究的对象基本上是以线性定常系统为主的单输入/单输出系统,还不能解决如时变参数问题,多变量、强耦合等复杂的控制问题。

20世纪50年代中期至60年代初,空间技术的发展迫切要求解决更复杂的多变量系统、非线性系统的最优控制问题(例如火箭和宇航器的导航、跟踪和着陆过程中的高精度、低消耗控制)。实践的需求推动了控制理论的进步,同时,计算机技术的发展也从计算手段上为控制理论的发展提供了条件,既适合于描述航天器的运动规律,又便于计算机求解的状态空间描述成为主要的模型形式。例如人造地球卫星空间技术的发展,要求实时地、高精度地处理多变量和非线性控制问题。计算机技术的成熟和完善,使得有可能在研究中利用标准式或状态形式的常微分方程作为数学模型,直接在时域内进行大量复杂的解算、设计以及实现高度完备的最优控制,并逐步形成了一套完整的理论,这就是有别于“经典控制理论”的“现代控制理论”。俄国数学家李雅普诺夫(A. M. Lyapunov)1892年创立的稳定性理论被引用到控制中。1956年,苏联科学家庞特里亚金提出极大值原理。同年,美国数学家贝尔曼(R. Bellman)创立了动态规划。极大值原理和动态规划为解决最优控制问题提供了理论工具。1959年美国数学家卡尔曼(R. E. Kalman)提出了著名的卡尔曼滤波器,1960年卡尔曼又提出系统的可控性和可观测性问题。到20世纪60年代初,一套以状态方程作为描述系统的数学模型,以最优控制和卡尔曼滤波器为核心的控制系统分析、设计的新原理和新方法基本确定,现代控制理论应运而生。

现代控制理论主要利用计算机作为系统建模、分析、设计以及控制的手段,适用于多变量、非线性、时变系统。现代控制理论在航空、航天、制导与控制中创造了辉煌的成就,人类迈向宇宙的梦想变为现实。为了解决现代控制理论在工业生产过程的应用中所遇到的被控对象精确状态空间模型不易建立,合适的最优性能指标难以构造,所得最优控制器往往过于复杂等问题,科学家们不懈努力,在近几十年中不断提出一些新的控制方法和理论。

至今,现代控制理论又有了巨大发展,并形成了若干分支,例如线性系统理论、最优控制理论、动态系统辨识、自适应控制、大系统理论、模糊控制、预测控制、容错控制、鲁棒控制、非线性控制和复杂系统控制等,大大地扩展了控制理论的研究范围。控制理论目前还在向更深、更广阔的领域发展。

1.2 自动控制的基本方式

自动控制系统的种类很多,被控制量多种多样,如温度、压力、流量、电压、转速、位移等,可以按照多种方式组成,组成各种控制系统的具体元部件有很大差异,但从控制方式的角度看,系统的基本结构相似。工程上应用的控制系统,根据有无反馈,把控制系统分为两种最基本的形式,即开环控制系统和闭环控制系统。

1. 开环控制系统

控制系统中,如果输出信号不反馈到输入端产生控制作用,控制装置与被控对象之间的作用信号是单方向传递的,只有正向控制作用而没有反向控制作用,也就是说,开环控制系统的输出量不对系统的控制作用发生影响。称这种系统为开环控制系统,如图 1-1 所示。



图 1-1 开环控制系统示意图

开环控制又可称为前馈控制,因为控制作用是由输入信号直接向前输送的,而不是由输出信号回轮到输入信号来进行控制的,故称为前馈控制。

图 1-2 为一开环控制系统,它由给定电压通过执行机构控制机械轴的转角。输入电压 u_1 加到放大器上,其输出电压为

$$u_2 = k_1 u_1 \quad (1-1)$$

式中, k_1 为放大器的放大系数。电压 u_2 加到力矩传感器上。如果忽略电动机控制绕组的电感,则电动机的输出力矩为

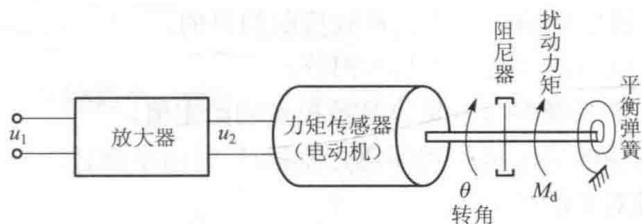


图 1-2 开环控制系统

$$M = k_2 u_2 = k_1 k_2 u_1 \quad (1-2)$$

式中, k_2 为电动机的系数。

在电动机力矩作用下, 机械部分将产生转动。由于受到黏性摩擦和弹簧恢复力矩的作用, 最后停止在平衡位置上。此时, 转角 θ 与力矩 M 的关系为

$$\theta = k_t M = k_t k_1 k_2 u_1 \quad (1-3)$$

式中, k_t 为弹簧系数。式 (1-3) 表示了输入电压与转角的关系, 即表述了该系统输入与输出的关系。

如果该系统中的放大器、电动机和弹簧等都是线性的, 即 k_1 、 k_2 、 k_t 都是常数, 那么机械转角就能准确地反映外加电压的大小, 系统就没有误差。

若该系统中存在着随机扰动, 例如机械轴受到随机干扰力矩 M_d 的作用, 那么机械轴的转角 θ 为

$$\theta = k_t k_1 k_2 u_1 - k_t M_d \quad (1-4)$$

可见, 干扰将引起误差。显然, 开环控制系统抗干扰能力差。

开环控制系统具有结构简单, 易于调整, 容易实现, 不存在稳定性问题等优点。为了提高开环控制精度通常需要采用高精密的元件, 良好的工作环境, 但会增加工作成本。因此, 开环控制系统通常用于控制精度要求不高的场合。

2. 闭环控制系统

控制系统中, 如果把系统输出信号反馈到输入端, 由输入信号和输出信号的偏差信号对系统进行控制, 这种系统称为闭环控制系统, 也称为反馈控制系统。

闭环控制系统示意图如图 1-3 所示。将检测到的被控制量送回到输入端, 与输入量一起进行比较, 得到偏差量, 偏差量作用于控制器上, 控制器对偏差量进行某种处理, 产生相应的控制量, 作用在被控对象上, 使系统的被控制量趋向于给定的数值。

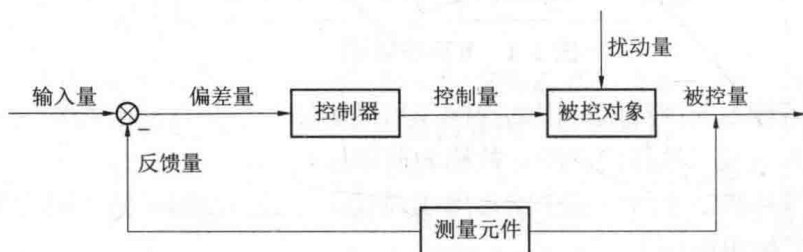


图 1-3 闭环控制系统示意图

若反馈信号与输入信号相减, 称为负反馈; 反之, 若二者相加, 则称为正反馈。

闭环控制的实质是利用负反馈来减小偏差, 具有自动修正被控变量偏离输入量的作用, 能够很好地抑制各种干扰的影响, 以达到精确控制的目的。

闭环控制系统包含以下信号组成的基本部分:

- (1) 输入量: 外加的系统参考变量, 是被控量的给定值。
- (2) 偏差量: 被控量的给定值与实际值之差。
- (3) 被控量: 被控对象的输出量。
- (4) 反馈量: 被控量经测量元件的检测及变换后返回到输入端的信号。
- (5) 扰动量: 外加在系统上的不希望的信号, 会对被控量产生不利影响。

在图 1-2 所示的开环控制系统中, 在机械轴上安装一个电位计, 用于测量输出转角的实际值。设电位计的反馈系数为 k_f , 电位计的输出电压为 u_f , 并将它反馈到输入端, 把反馈电压 u_f 和输入电压 u_1 按相反的极性串接起来, 加到放大器的输入端, 这样就构成了反馈控制系统, 如图 1-4 所示。

电位计输出电压为

$$u_f = k_f \theta \quad (1-5)$$

放大器输入端电压为

$$\Delta u = u_1 - u_f \quad (1-6)$$

放大器输出端电压为

$$u_2 = k_1(u_1 - k_f \theta) \quad (1-7)$$

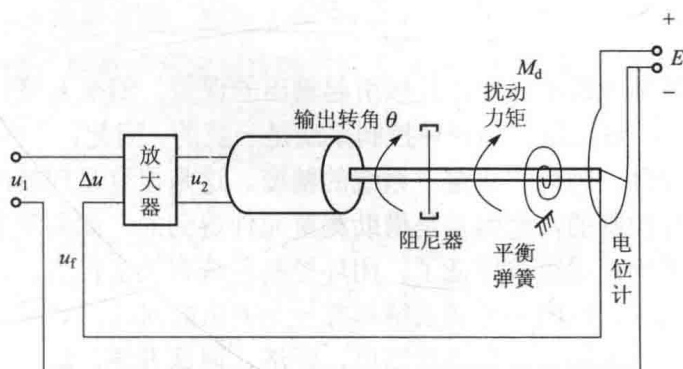


图 1-4 闭环控制系统

电动机的力矩为

$$M = k_1 k_2 (u_1 - k_f \theta) \quad (1-8)$$

式中, k_2 为电动机系数。存在干扰力矩 M_d 的情况下, 机械轴的转角为

$$\theta = k_1 k_2 k_t (u_1 - k_f \theta) - k_t M_d \quad (1-9)$$

变换式 (1-9) 得到

$$\theta = \frac{k_1 k_2 k_t}{1 + k_1 k_2 k_t k_f} u_1 - \frac{k_t}{1 + k_1 k_2 k_t k_f} M_d \quad (1-10)$$

比较式 (1-4) 和式 (1-10) 可以看出, 在闭环控制系统中干扰力矩所产生的输出量偏离仅是开环控制系统的 $\frac{1}{1 + k_1 k_2 k_t k_f}$ 。如果回路增益 $k_1 k_2 k_t k_f$ 足够大, 干扰力矩使输出角度的偏差就变得很小了。显然, 闭环控制系统比开环控制系统的抗干扰能力强。

在干扰力矩 $M_d = 0$ 时, 闭环控制系统的输入-输出关系为

$$\theta = \frac{k_1 k_2 k_t}{1 + k_1 k_2 k_t k_f} u_1 \quad (1-11)$$

当控制系统前向通道的某个元件的放大系数发生变化时, 使总的放大系数变化 $\Delta k_1 k_2 k_t$, 其相对变化为 $\frac{\Delta k_1 k_2 k_t}{k_1 k_2 k_t}$ 。通过简单的微分运算可得出输出量的相应变化量为

$$\frac{\Delta \theta}{\theta} = \frac{1}{1 + k_1 k_2 k_t k_f} \frac{\Delta k_1 k_2 k_t}{k_1 k_2 k_t} \quad (1-12)$$

可见, 前向通道元件的放大系数发生变化时, 在闭环控制系统引起的输出误差, 仅是开环控制系统的 $\frac{1}{1+k_1k_2k_tk_f}$ 。因此, 在闭环控制系统中, 对前向通道元件的精度要求不高, 这样就可以用成本较低的元件构成精确的控制系统。

如果回路增益 $k_1k_2k_tk_f \gg 1$, 则式 (1-11) 可简化成

$$\theta \approx \frac{1}{k_f} u_1 \quad (1-13)$$

显然, 闭环控制系统的输入-输出特性仅由反馈元件决定。这也表明前向通道的元件精度对控制系统的精度几乎没有影响。

由式 (1-13) 很容易推导出如下关系式

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{\Delta k_f}{k_f} \quad (1-14)$$

式 (1-14) 表明反馈元件不稳定将直接引起输出的误差, 如果 k_f 变化 10%, 那么控制系统的输出误差就是 10%, 这个结论和开环控制系统是一致的。因此, 在构成闭环控制系统时, 要特别注意挑选反馈元件, 因为它决定了系统的精度。这是很容易理解的, 我们知道闭环控制系统是根据偏差进行控制的, 而偏差是借助测量元件得到的, 如果测量元件本身性能不稳定, 那么控制系统的准确性就很难保证了。闭环控制系统有很多优点, 对于要求较高的控制系统都采用闭环控制系统, 但闭环控制系统却有一个突出的问题, 即系统的稳定性。

由上可见开环控制系统的优点是结构简单、经济、调试方便, 缺点是抗干扰能力差、控制精度不高; 闭环控制系统的优点是具有纠正偏差的能力、抗干扰性好、控制精度高, 缺点是结构复杂、价格高、参数应选择适当。

1.3 控制系统的分类及组成

1.3.1 控制系统的分类

自动控制系统的类型很多, 它们的结构和完成的任务也各不相同。为了研究方便, 可以将自动控制系统按照一定的原则分成各种类型。

按控制的方式可分为开环控制、闭环控制。

按元件的类型可分为机械系统、电气系统、机电系统、液压系统、气动系统、生物系统等。

按系统功用可分为温度控制系统、压力控制系统、位置控制系统。

按系统的性能可分为线性系统、非线性系统、连续时间系统、离散时间系统、定常系统、时变系统、确定性系统、不确定性系统。

按给定的变化规律可分为恒值控制系统、随动系统、程序控制系统。

1. 线性系统与非线性系统

线性系统是由线性元件组成的系统, 输入输出关系满足齐次性和叠加性, 线性系统在数学上比较容易实现和处理, 是研究得比较成熟的一类系统。

非线性系统的组成元件中至少有一个或多个非线性元件, 元件的输入输出关系呈非线性关系, 例如饱和特性、死区特性、继电特性等, 此类系统不满足叠加定理。非线性系统普遍

存在,对于非线性程度不严重的情形,可利用各种线性化手段进行线性近似,利用线性系统的理论与方法进行分析。对于非线性程度严重的情形,必须应用非线性理论进行分析。

2. 恒值控制系统、随动系统和程序控制系统

恒值控制系统的输入信号是某个恒定常量,当系统受到干扰时,被控量会偏离期望值出现偏差,系统的控制任务就是要根据偏差量产生控制作用,使输出量(被控量)恢复到期望值,并以一定的精度保持在期望值附近,一般对于温度、压力、流量、液位等热工参数的控制多属于恒值控制。

随动系统又称为伺服系统或跟踪系统,随动系统的输入信号是预先不知道的随时间任意变化的函数,要求系统的被控量以一定的精度跟随输入量的变化而变化,随动系统也能克服扰动,但其控制任务的侧重与恒值控制不同,恒值控制侧重于抗干扰,而随动控制系统侧重于“跟踪”,因此应用方向也不同,随动系统更多地应用于航天、军工、机械、造船等领域。

程序控制系统的输入量是按预定规律随时间变化的函数,要求被控量也按照同样的规律变化,这类系统通常用于生产过程的控制中,如化工、军事、冶金、造纸等的生产过程,恒值控制系统也可视为程序控制系统的特例。

3. 连续时间系统和离散时间系统

连续时间系统的各环节间传输的信号都是关于时间的连续信号,即模拟信号,简称连续系统。连续时间系统的输入输出关系通常用微分方程进行描述。

离散时间系统的各环节间传输的信号至少有一处存在离散时间信号,简称离散系统。离散时间系统的输入输出关系通常用差分方程进行描述。

4. 定常系统与时变系统

定常系统中各参数不随时间变化,又称时不变系统,系统的响应只与输入信号的形状和系统本身的特性有关,而与输入信号的初始时刻无关。

时变系统中存在关于时间 t 的参数,随时间变化而变化,系统的响应不仅与输入信号和系统本身的特性有关,而且还与输入信号的初始时刻有关。

5. 确定性系统与不确定性系统

确定性系统的结构和参数是确定的,预先可知的,系统的输入信号(包括给定输入和扰动)也是确定的,并且可以用解析式或图表确切地表示。

不确定性系统本身的结构和参数不确定或作用于系统的输入信号是不确定的。

1.3.2 控制系统的组成

对于一个控制系统来说,不管其结构多么复杂,用途尽管各种各样,它们都是由一些具有不同职能的基本元件组成的,图 1-5 就是一个典型的自动控制系统方框图。

这种闭环控制系统主要由比较元件、放大元件、执行元件和补偿元件等组成。

(1) 比较元件:又称测量元件或敏感元件。它的作用是将输出与输入信号进行比较,并将比较所得的系统误差转换成误差信号送到放大器。比较元件中又可分为位置比较元件、速度测量元件、温度测量元件等。常用的位置比较元件有电位计、自整角机、旋转变压器、感应同步器、差动变压器、三自由度陀螺仪等。作为速度测量元件的有测速发电机,作为温度测量元件的有热电偶、电阻温度计等。

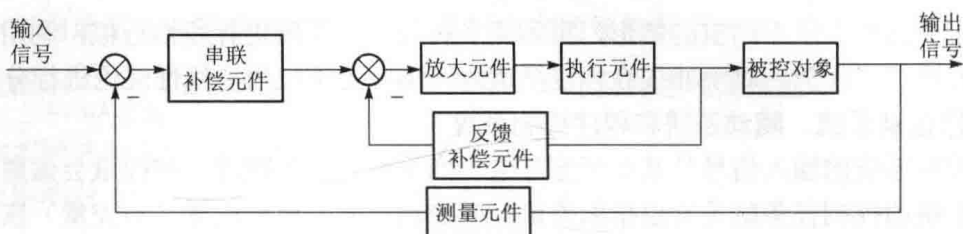


图 1-5 自动控制系统的基本组成

(2) 放大元件：即放大器，它的作用是将功率很小的误差信号放大后去推动执行元件，使执行元件带动被控对象运动。常用的放大元件有电子放大器、磁放大器、可控硅整流器、交磁放大机、液压放大器、气动放大器等。

(3) 执行元件：执行元件的作用是根据放大元件提供的信号驱动被控对象按输入信号的变化规律运动。常用的执行元件有直流伺服电动机、交流伺服电动机、直流力矩电动机、步进电动机（用于数字控制系统）、液压马达、液压缸、气动马达等。

(4) 校正元件：又称校正电路或补偿电路。它的作用是调整原有系统的参数和性能，使系统满足自动控制的技术要求，使系统输出在每一瞬时都能跟踪输入。

1.3.3 控制系统的常用术语介绍

(1) 自动控制：在无人直接参与的情况下，通过控制器使被控对象或过程自动地按照预定要求进行。

(2) 对象：通常是一个设备，是由一些机器零件有机地组合在一起的，实现自动控制的机器设备或生产过程，其作用是完成一个特定的动作。在下面的讨论中，称任何被控物体（如加热炉、化学反应器或宇宙飞船）为对象。

(3) 过程：称任何被控制的运行状态为过程，其具体例子如化学过程、经济学过程、生物学过程。

(4) 系统：完成一定任务的一些元、部件的组合。

(5) 扰动：破坏控制量与被控量之间正常函数关系的因素，称为系统的扰动。扰动是一种对系统的输出产生不利影响的信号。

(6) 反馈控制：反馈控制是这样一种控制过程，它能够在存在扰动的情况下，力图减小系统的输出量与参考输入量（或者任意变化的希望的状态）之间的偏差，而且其工作正是基于这一偏差基础之上的。

(7) 反馈控制系统：反馈控制系统是一种能对输出量与参考输入量进行比较，并力图保持两者之间既定关系的系统，它利用输出量与输入量的偏差来进行控制。

应当指出，反馈控制系统不限于工程范畴，在各种非工程范畴内，诸如经济学和生物学中，也存在着反馈控制系统。

(8) 随动系统：随动系统是一种反馈控制系统，在这种系统中，输出量是机械位移、速度或者加速度。因此，随动系统这个术语，与位置（或速度或加速度）控制系统是同义语。随动系统在现代工业中被广泛采用。

(9) 过程控制：在工业生产过程中，诸如对压力、温度、湿度、流量、频率以及原料、燃料成分比例等方面的控制，称为过程控制。

1.4 对控制系统性能的基本要求

理想情况下,自动控制系统的被控量和给定值相等,没有误差,而且不受干扰的影响。

在实际系统中,其组成系统包含电子、电磁、机电、液压、机械等元件,它们存在着储能元件,使系统的输出滞后于输入;由于机械部分的质量,存在着惯量;电路中的电感、电容,引起系统工作的滞后。如果系统中其结构和各元件参数配合不当,则系统输出与输入不能同步,控制过程不会立即完成,而是有一定的延迟,这就使被控量回复到给定值要有一个时间过程,称为过渡过程。过渡过程呈现振荡形式,如果这个振荡过程是逐渐减弱的,系统最后可以达到平衡状态,并进入稳定过程。反之,系统产生振荡发散,过程不稳定,致使其不能正常工作。所以系统稳定性是评定系统性能指标的根本前提。在稳定工作的前提下,良好的系统要求响应速度快,控制精度高。

概括起来,工程上常以稳、准、快三个方面来评价自动控制系统的基本性能指标。

(1) 稳:指的是系统的稳定性,稳定性是保证系统正常工作的前提条件和基础,是指系统动态过程的振荡倾向和系统重新恢复平衡的能力。一个稳定的控制系统,其被控量与给定值的偏差应随时间的推移逐渐减小并趋于零,以达到平衡状态。在有可能达到平衡的条件下,要求系统动态过程的振荡要小,对被控量的振幅和频率应有要求。过大的波动将使系统运动部分超载,导致运动失灵或破坏。

(2) 准:指的是准确性,是衡量系统静态性能的指标。准确性是指系统的控制精度(一般用稳态误差来衡量),即系统过渡到新的平衡状态或在干扰作用下重新恢复平衡后,最终保持的被控量与给定值之间的偏差精度,它反映了动态过程基本完成后的性能。这时,系统的被控量与给定值之间的偏差应是很小的。根据系统的工作要求,对偏差值应有所规定。

(3) 快:指的是系统的快速性,是指系统动态过程持续时间的长短,是衡量系统动态性能的指标,称为动态特性,也称为暂态特性。稳和快反映系统在控制过程中的性能。为了更好地完成控制任务,控制系统仅仅满足稳定性要求是不够的,还必须对过渡过程的形状和快慢提出要求。既快又稳,则控制过程中被控量偏离给定值小,偏离的时间短,系统的动态精度高。

1.5 本课程的任务

自动控制原理是研究自动控制基础理论规律的一门工程技术科学,本课程所要研究的两大任务为系统分析和系统设计。

(1) 对于一个具体的控制系统,如何从理论上对它的动态性能和稳态精度进行定性的分析和定量的计算,这类问题叫系统分析,即分析系统的稳定性、振荡倾向、快速性、准确性及其系统结构、参数的关系。分析的目的是了解和认识已有的系统,并为系统设计打下基础。

(2) 根据对系统性能的要求,如何合理地设计校正装置,使系统的性能能全面地满足技术上的要求。也就是在给出被控对象及其技术指标要求的情况下,构造一个满足技术指标要求的控制系统,或改造那些未能达到要求的系统,这就是系统设计问题。