

自动控制理论

Automatic Control Theory

廖道争 主编



科学出版社

自动控制理论

Automatic Control Theory

廖道争 主编

科学出版社

北京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

本书较全面地介绍了自动控制理论的基本内容和分析、设计方法,包括自动控制系统的数学模型;自动控制系统的时域分析法、根轨迹分析法和频率域分析法;自动控制系统的校正;离散控制系统的分析与校正;非线性控制系统(相平面法和描述函数法);状态空间分析法等内容。教材注重基本概念和基本分析方法的阐述,内容力求通俗易懂、简明实用、易于自学,能满足理工科相关专业的教学需要。

本书可作为高等院校自动化类、电气类、电子信息类、机械类等专业的“自动控制理论”的课程教材,还可以作为成人教育和继续教育的教材,也可供从事控制工程的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制理论/廖道争主编. —北京:科学出版社,2018.6

ISBN 978-7-03-057652-1

I. ①自… II. ①廖… III. ①自动控制理论—教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 121707 号

责任编辑:吉正霞 李亚佩/责任校对:董艳辉

责任印制:彭超/封面设计:耕者设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉市首壹印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2018年6月第一版 印张:19 3/4

2018年6月第一次印刷 字数:501 000

定价:59.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

自动控制技术的应用领域非常广泛,不但在国防、航空航天等高精尖应用中是必不可少的组成部分,而且在现代工业、农业、交通运输、医疗技术等各行各业中发挥着越来越重要的作用,为科学技术的发展和人类文明的进步做出了重要贡献。自动控制理论的概念和分析方法已广泛渗透到许多相关学科领域。

考虑到我国本科教学的发展现状,为了在较少的学时内,能使学生较系统地掌握自动控制理论中最基本的概念和理论,本书在内容组织上力求突出重点,在内容叙述上尽量通俗易懂;侧重于基本概念、基本理论和常用分析方法的阐述,略去了经典控制理论中一些不常用的内容。在经典控制理论和现代控制理论的内容组织上,考虑到这两部分的数学基础不同、处理思路不同,因此,编写中采用了国内大多数同类教材所使用的分开编写方式。

全书内容共9章,其中第1章至第6章介绍了经典控制理论的分析与设计方法,具体内容包括:控制系统的数学模型、时域分析法、根轨迹分析法、频率域分析法和控制系统的校正;第7章介绍了离散控制系统理论,包括采样定理、 z 变换、脉冲传递函数、离散系统分析和最少拍设计等内容;第8章为非线性控制系统,包括相平面法和描述函数法;第9章介绍了现代控制理论的基础内容,包括状态方程、能控性和能观性、李雅普诺夫稳定性理论、极点配置和状态观测器等内容。为便于教学,每章均配有适当的习题。MATLAB已成为控制系统分析和设计的基本工具软件,因此,第2章至第9章,每章的最后一节都介绍了应用MATLAB进行控制系统仿真或设计的内容。教材前6章与第7章、第8章和第9章的内容具有相对独立性,其他非控制类专业或成人教育教学中可以根据需要删除某些章节后使用。

培养社会需求的工程应用型创新人才已成为众多地方性高校的人才培养目标,由此引起的教学改革模式是理论教学学时减少、实践教学学时增加。本书在内容安排上,参照了三峡大学自动化专业和电气工程及其自动化专业近年来在工程教育专业认证建设工作中,所制定的新教学大纲要求和学时安排,在照顾理论体系完整性的基础上,对内容的选取尽量采用“少而精”的原则,避免一些内容的过度引申和扩展。

本书第1章、第3章、第4章由刘平编写;第2章由郭贵莲编写;第5章由游文霞和廖道争共同编写;廖道争编写其余各章节,并负责全书的统稿工作。在编写过程中三峡大学吴正平教授提出了许多宝贵意见。

本书在编写过程中参考了许多专家编写的教材,在此向原教材的各位作者表示由衷的感谢!由于编者能力和水平有限,书中难免存在疏漏或不妥之处,敬请读者和同行专家批评指正。

编 者

2018年3月

目 录

第 1 章 自动控制系统的概念	1
1.1 自动控制理论的发展及应用	1
1.2 自动控制与自动控制系统	2
1.3 自动控制系统的分类	5
1.4 开环控制与闭环控制	6
1.5 对自动控制系统的基本要求	9
习题 1	10
第 2 章 自动控制系统的数学模型	12
2.1 自动控制系统微分方程模型的建立	12
2.2 非线性微分方程的线性化	15
2.3 传递函数	16
2.4 自动控制系统结构图及其等效变换	23
2.5 典型闭环系统的传递函数	31
2.6 信号流图和梅森增益公式	33
2.7 基于 MATLAB 的控制系统数学模型	36
习题 2	39
第 3 章 自动控制系统的时域分析法	43
3.1 自动控制系统的时域性能指标	43
3.2 线性系统的稳定性与稳定判据	47
3.3 线性系统的稳态误差	52
3.4 一阶系统的时域分析	59
3.5 二阶系统的时域分析	61
3.6 高阶系统的时域分析	73
3.7 基于 MATLAB 的自动控制系统时域分析	75
习题 3	78
第 4 章 自动控制系统的根轨迹分析法	83
4.1 根轨迹的基本概念	83

4.2	绘制根轨迹的规则	87
4.3	广义根轨迹	97
4.4	用根轨迹分析系统性能	100
4.5	基于 MATLAB 的根轨迹分析	106
	习题 4	108
第 5 章	自动控制系统的频域分析法	113
5.1	频率特性	113
5.2	典型环节的频率特性	116
5.3	开环系统频率特性的绘制	125
5.4	频率域稳定判据	130
5.5	自动控制系统相对稳定性分析	137
5.6	频域性能指标与时域性能指标的关系	139
5.7	利用 MATLAB 绘制系统的频率特性	143
	习题 5	146
第 6 章	自动控制系统的校正	150
6.1	自动控制系统校正的性能指标	150
6.2	基于频域分析法的串联校正	151
6.3	基于根轨迹分析法的串联校正	161
6.4	PID 控制	167
6.5	反馈校正	171
6.6	复合校正	172
6.7	应用 MATLAB 进行校正设计	175
	习题 6	178
第 7 章	离散控制系统的分析与校正	181
7.1	离散控制系统的结构	181
7.2	信号的采样和保持	182
7.3	z 变换与 z 反变换	187
7.4	脉冲传递函数	192
7.5	离散系统的性能分析	198
7.6	离散系统的数字校正	205
7.7	离散系统的 MATLAB 分析与仿真	208
	习题 7	209

第 8 章 非线性控制系统	212
8.1 非线性问题概述	212
8.2 典型非线性环节特性	214
8.3 描述函数法	216
8.4 用描述函数法分析非线性控制系统	222
8.5 相平面法	226
8.6 非线性系统的相平面分析	233
8.7 基于 MATLAB 的非线性控制系统分析	239
习题 8	241
第 9 章 自动状态空间分析方法	244
9.1 自动控制系统的状态空间描述	244
9.2 传递函数与状态空间模型	248
9.3 线性定常系统状态方程的解	257
9.4 线性定常离散系统的状态空间描述	264
9.5 线性定常系统的能控性和能观性	267
9.6 李雅普诺夫稳定性分析	279
9.7 线性定常系统的状态反馈和极点配置	284
9.8 状态观测器及其应用	289
9.9 MATLAB 在状态空间分析中的应用	295
习题 9	299
附录 拉普拉斯变换	303
参考文献	308

第 1 章 自动控制系统的一般概念

1.1 自动控制理论的发展及应用

随着科学技术的飞速发展,自动控制^①理论和技术日益广泛地应用于现代工业、农业、国防、科学技术所涉及的各学科领域及人们的日常生活中。例如,数控机床零件的加工;汽车生产的流水线;热电厂锅炉汽包水位、蒸汽压力和温度的控制;水果按质量自动分拣;蔬菜大棚的温度控制;航天器的发射与回收;智能家居的控制等。自动控制理论和技术的广泛应用不仅大大提高了生产效率,降低了劳动强度,而且使人们的生活更加舒适方便。近年来,自动控制理论和技术进一步渗透到生物医药、交通管理、环境保护、经济学、金融学、社会学及其他社会生活的各领域,促进了各学科的交叉与渗透。自动控制理论和技术必将在宇宙探索、人类与大自然和谐共存及创造人类社会文明等方面发挥更大的作用。

自动控制理论是研究关于自动控制系统建模、分析和设计的一般性理论,是研究自动控制共同规律的技术科学,其产生和发展源于自动装置的应用。中国古代的指南车、地动仪、木牛流马等是自动装置早期的应用实例,但是落后的生产力无法提供控制理论和技术产生的实践基础和理论基础。1788年,瓦特(J. Watt)为了调节蒸汽机的转速而发明了飞球离心调速器,该装置能自动地调节蒸汽机进汽阀门开度,从而保持蒸汽机转速的相对恒定。1868年,麦克斯韦(J. C. Maxwell)发表了《论调节器》,研究调节器的微分方程、线性化处理等,得出了系统稳定性取决于微分方程的特征根是否都具有负实部的结论,并针对二阶和三阶系统讨论了使特征根具有负实部时,特征多项式系列应满足的条件,这是最早的稳定性研究。劳斯(E. J. Routh)在1877年,赫尔维茨在1895年(A. Hurwitz)分别独立给出了高阶线性系统的稳定性判据,后来被称为劳斯-赫尔维茨稳定判据。1892年,李雅普诺夫(A. M. Lyapunov)在其博士论文中提出了李雅普诺夫稳定性理论。20世纪初期,PID控制器开始在工业上得到广泛的应用。1932年,奈奎斯特(Nyquist)提出了负反馈系统的频率域稳定性判据——奈奎斯特判据,这种方法只需利用频率响应的实验数据通过作图就可以判定闭环系统的稳定性。1940年,伯德(H. Bode)提出了对数频率特性方法。1948年,伊文斯(W. Evans)根据反馈控制系统的开环传递函数与其闭环特征方程式之间的内在联系,提出了根轨迹分析法。

19世纪到20世纪上叶,控制理论随着生产的机械化及电气技术的发展得到不断丰富与完善。第二次世界大战期间,军事科学的需要大大促进了反馈控制理论的发展。1948年,维纳(N. Wiener)发表了著名的“控制论”,至此,以传递函数为基础的经典控制理论形成了比较完整的理论体系。

20世纪50~60年代,空间技术竞赛催生了现代控制理论。对现代控制理论做出突出贡

^① 本书自动控制又称为控制。

献的有贝尔曼(R. Bellman)的动态规划理论(1957年)、庞特里亚金(L. S. Pontryagin)的极大值原理(20世纪50年代)和卡尔曼(R. E. Kalman)的多变量最优控制和最优滤波理论(1960年)。现代控制理论以状态空间法为基础,利用计算机作为系统建模分析、设计及控制的手段,可适用于多变量、非线性、时变系统。

20世纪70年代开始,随着科技进步特别是计算机科学技术的发展,出现了一些新的控制理论和方法,如自适应控制、鲁棒控制、预测控制、智能控制等。这些新的控制理论和方法的出现,对于人类解决大规模、复杂结构系统的控制问题具有非常重要的意义。

21世纪以来,随着计算机网络技术和云技术的发展,控制理论在网络控制、云控制等方向也得到了广泛的研究和应用。

随着人类社会由机械化时代进入电气化时代,进而迈向信息化、智能化时代,控制理论也必将得到进一步发展。

1.2 自动控制与自动控制系统

所谓自动控制,是指在无人直接参与的情况下,利用控制装置使被控对象(如机器、设备或生产过程等)的某些物理量或工作状态(如温度、压力、位置、速度等)准确地按照预期规律变化或运行。

在说明自动控制之前,先看一个人工控制的例子。

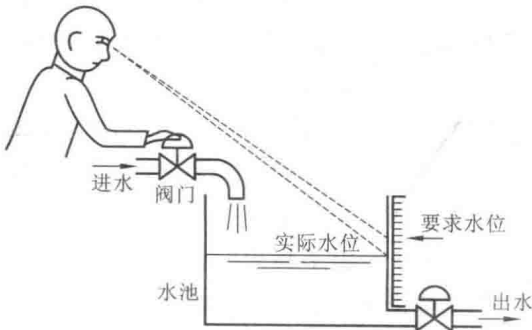


图 1-1 水池水位的人工控制示意图

图 1-1 是通过人工控制保持水池水位恒定的供水系统。该水池有一个进水管和一个出水管,出水管的出水量是不可预知的,控制的目的是使水池水位保持在要求水位。当水位位于要求水位且进水量、出水量相等时,它处于平衡状态。当出水量发生变化或要求水位值发生变化时,就需要对进水量进行必要的控制。当出水量变大时,实际水位将下降,工人通过观察发现实际水位低于要求水位,做出需要增大进水阀门开度的判断,并执行这一动作。而且,聪明的工人还会

根据实际水位和要求水位差值的大小决定阀门开度的大小。当实际水位上涨到要求水位且进水量和出水量相等时,它又达到平衡状态。当出水量变小而导致实际水位高于要求水位时,工人将减小进水阀门开度使得实际水位下降到要求水位,从而保持水池水位恒定。只要实际水位偏离了要求水位,工人便要重复上述调节过程。

为了将水池水位的人工控制改造为自动控制,需要分析工人在此系统中的作用或者功能。不难发现,工人主要完成以下几项工作:①观察实际水位(眼睛);②将实际水位与要求水位进行比较,获得两者的偏差(大脑);③根据偏差决定进水阀门调节的方向和幅度(大脑);④操作进水阀门进行调节(手臂)。如果能用装置或设备实现工人所完成的这四项功能,就可以实现水池水位的自动控制。

图 1-2 是用装置或设备来代替工人的水池水位自动控制系统。

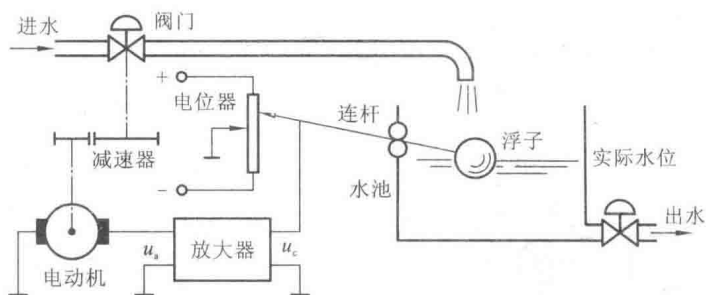


图 1-2 水池水位自动控制示意图

图 1-2 中浮子代替了人的眼睛,用来测量实际水位的高低;浮子固定在连杆的一端,连杆的另一端连接电位器的滑臂。浮子、连杆、电位器起到了测量实际水位,并与要求水位作比较获得偏差的作用。当实际水位位于要求水位时,电位器滑臂指向零电位,偏差电压 $u_c = 0$ 。当实际水位低于要求水位时,浮子随着水位下降,由于连杆的作用,电位器滑臂上移指向正电位,获得正的偏差电压,即 $u_c > 0$,而且 u_c 的大小是与要求水位与实际水位的偏差大小成正比。 u_c 经放大后成为 u_a , u_a 作用于直流伺服电动机,控制电动机正向旋转,电动机通过减速器控制进水阀门开度增加,使水位上升。当实际水位回复到要求水位时, $u_c = 0$, 系统恢复到平衡状态。反之,若出水量变小,实际水位上升,超过了要求水位,电位器滑臂将会下移,获得负的偏差电压,即 $u_c < 0$ 。电动机将反向旋转,控制进水阀门开度减小,使水位下降。可见,该系统在运行时,一旦干扰引起水位出现偏差,系统就要进行调节,最终总是使实际水位等于要求水位,从而达到控制的目标。在整个水位调节的过程中无需人工直接参与,控制过程是自动进行的。

自动控制系统是由被控对象和自动控制装置按照一定方式连接起来,能完成一定自动控制任务的总体。自动控制装置是由具有一定功能的基本元件组成的。其形式多样,种类繁多。结构形式完全不同的元件却可以在不同的控制系统中发挥着相同的功能。因此,自动控制系统也可以按照功能分为以下几个组成部分。

(1) 被控对象:指被控制的设备或过程,如图 1-2 中的水池。被控对象的某个或多个需要被控制的物理量成为被控制量或输出量,如水池的水位。

(2) 给定环节:主要用于产生与期望的被控制量相对应的给定信号或输入量。例如,水池水位控制系统中的电位器,其零电位处便是给定信号或输入量。

(3) 测量环节:用于测量被控制量或输出量。为了能和给定信号相比较,有时候需要进行物理量纲的转换。测量环节一般为各种传感器,将非电量转换成合适的电量,如电压或电流。测量环节获得的信号称为反馈量。

(4) 比较环节:其功能是将测量环节检测到的被控制量实际值与给定环节给出的输入量进行比较,得到两者之间的偏差。

(5) 调节环节:通常包括放大器和校正装置。它能将偏差信号放大,并使输出控制信号与偏差信号之间具有一定的数值运算关系(也称为调节规律或控制算法)。例如,水池水位控制系统中的放大器、电动机、减速器等。

(6) 执行环节:直接对被控对象进行操作,并使被控制量发生变化的元件。例如,水池水

位控制系统中的进水阀门。

在理解自动控制系统各功能环节的基础上,为了清晰简洁地表示控制系统,通常要从实际控制系统中分析出完成以上各项功能的具体设备或装置,然后以结构图的形式表达出来,如图 1-3 所示。

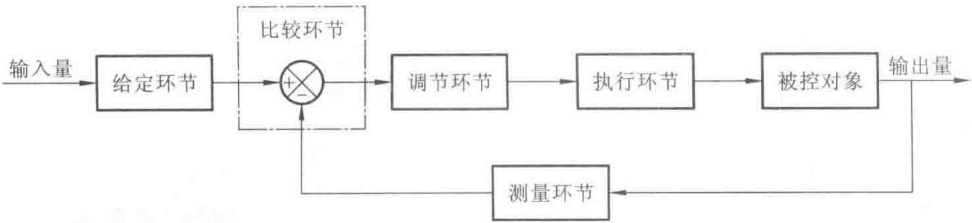


图 1-3 自动控制系统的组成

在结构图中,用矩形方框代表元件或装置,而不必画出它们的具体结构。信号连接线段的箭头表示信号(物理量)的传递方向,并将信号(物理量)的名称标在信号线上方。进入方框的信号表示该元件的输入量,离开方框的信号表示其输出量。被控对象的输出量及被控制量,一般置于结构图的最右端;系统的输入量一般置于结构图的最左端。

用结构图来表示控制系统,不仅比示意图绘图容易,而且表达更加清晰,信号的传递一目了然。因此在以后的讨论中,控制系统一般均以结构图来表示。

对于水池水位人工控制系统和自动控制系统,通过分析其工作原理,理解系统中各元件或装置的作用,便可绘出系统的结构图分别如图 1-4 和图 1-5 所示。

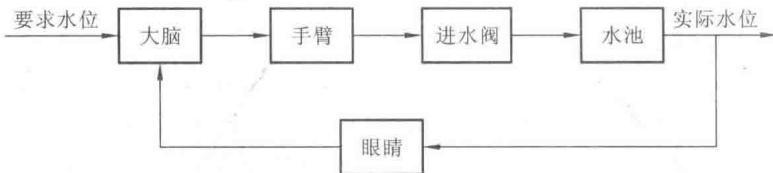


图 1-4 水池水位人工控制系统结构图

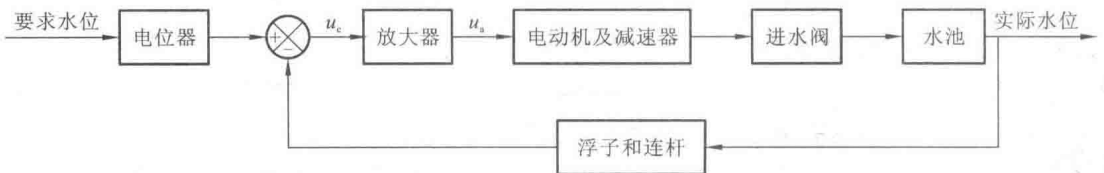


图 1-5 水池水位自动控制系统结构图

比较水池水位的人工控制系统和自动控制系统,不难发现两者非常相似。它们都是通过检测偏差并根据偏差去纠正偏差从而实现自动调节的。在自动控制系统中,反馈就是指输出量通过适当的测量环节将信号返回输入端,并与之同时作用于系统的过程,偏差量是通过输入量与反馈量的比较而获得的。这种基于反馈基础的“检测偏差用以纠正偏差”的原理又称为反馈控制原理。利用反馈控制原理组成的系统称为反馈控制系统。实现自动控制的装置可以各不相同,但反馈控制的基本原理却是相同的,可以说,反馈控制是实现自动控制最基本的方法。

1.3 自动控制系统的分类

自动控制系统可以按照多种不同的分类方法进行分类。例如,按被控制量的名称分类,有压力控制系统、转速控制系统、液位控制系统等;按组成系统的元件的种类分类,有电气系统、机械系统、液压系统等;按系统特性分类,有线性系统和非线性系统、时变系统和定常(时不变)系统、确定性系统和不确定性系统等;按输入量的变化规律分类,有恒值控制系统、程序控制系统和随动系统;按系统内部所传输信号的类型分类,有连续控制系统和离散控制系统;按输入量、输出量的个数分类,有单输入单输出系统(single input single output, SISO)、多输入多输出系统(multiple inputs multiple outputs, MIMO)。有时会将上述多种分类方法交叉组合,以全面反映自动控制系统的特性。

1. 恒值控制系统、程序控制系统和随动系统

恒值控制系统的输入量是相对恒定的数值。这种控制系统要求被控制量在各种扰动的作用下能够尽快的恢复到给定输入量,如恒温控制系统、水池水位控制系统等。

程序控制系统的输入量为一个已知时间函数,系统的控制过程按预定的程序进行,要求被控制量能迅速准确地复现输入量。这种控制系统的主要目的是保证被控制量能够按给定的时间函数变化,如数字程序控制机床。

随动系统的输入量是预先未知的随时间任意变化的函数,即输入量的变化规律事先无法确定,而要求输出量能够快速、准确地跟踪输入量。因此,随动系统又称为跟踪系统,如火炮自动瞄准目标的自动跟踪系统、位置随动系统等。

2. 线性控制系统和非线性控制系统

线性控制系统是指组成控制系统的所有元件都具有线性特性。线性控制系统的主要特点是具有叠加性和齐次性,满足叠加原理。这种控制系统的输入量与输出量的关系一般可以用微分(差分)方程、传递函数、状态方程来描述。进一步地,如果线性控制系统的各元件参数都不随时间而变化,则称为线性定常(时不变)系统;反之,则称为线性时变系统。

在组成控制系统的元件中,有一个或一个以上的元件具有非线性特性,则称该系统为非线性控制系统。非线性控制系统一般不具有齐次性,也不适用叠加原理,因此其分析方法更加复杂。

严格来说,绝对的线性控制系统实际上是不存在的,这是因为各种实际的物理系统总是具有不同程度的非线性。但为了研究问题的方便,只要非线性不是太严重,便可在一定范围内能进行线性化处理,从而用线性控制系统的理论和方法对其进行分析。

3. 连续控制系统和离散控制系统

如果控制系统中各部分的信号都是时间 t 的连续函数,则称这类系统为连续控制系统。连续控制系统中处理的变量为模拟量,如工业过程中出现的压力、流量、温度、位移等。

如果控制系统中各部分的信号至少有一处的信号是时间 t 的离散信号,则称这类系统为离散控制系统。显然,脉冲信号和数字信号都是离散信号,因此,计算机控制系统是常见的离散控制系统。离散控制系统中处理的变量为开关量或数字量。

4. 开环控制系统和闭环控制系统

根据控制系统中有无反馈作用可分为两类：开环控制系统与闭环控制系统。这两类系统在 1.4 节作详细介绍。

1.4 开环控制与闭环控制

如果系统的输出量和输入量之间不存在反馈通道,输出量对系统的控制作用没有影响,这种控制方式称为开环控制。图 1-6 是开环控制系统的结构图。

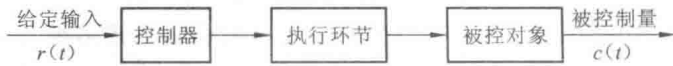


图 1-6 开环控制系统结构图

由图 1-6 可见,开环控制系统从给定输入到被控制量只有单向的信号传递,因此其具有结构简单、成本低的优点。但是,开环控制系统没有检测偏差并反馈被控制量到输入端与给定输入的比较,当系统受到外部干扰或工作过程中特性参数发生变化后,被控制量一旦偏离给定值,系统自身没有纠偏的能力。当然,如果外部干扰较弱,系统参数稳定,对控制精度的要求不是太高时,开环控制系统也是可以采用的,如自动洗衣机、普通数控机床等一般都是开环控制系统。

图 1-7 是一个开环的直流电动机转速控制系统。控制的任务是使直流电动机以恒定的转速带动负载工作。其工作原理是:调节电位器滑臂,获得给定输入电压 u_g , u_g 经放大为 u_d 后,加于直流电动机电枢两端,使电动机以所期望的转速 n 带动负载运动。当负载恒定时,只要改变给定输入电压 u_g ,便可获得相应的电动机转速。

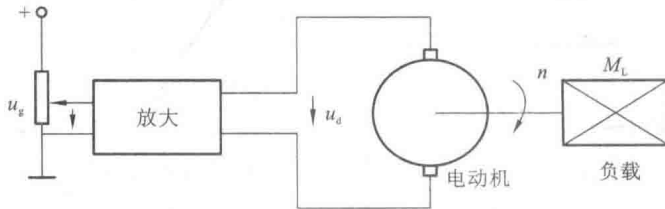


图 1-7 开环直流电动机转速控制系统

图 1-8 是开环直流电动机转速控制系统的结构图。系统中信号的传递是单向的,只有给定输入 u_g 对被控制量 n 的单向控制作用,而被控制量 n 对给定输入 u_g 却没有任何影响,因而是一个开环控制系统。开环控制系统在适当的条件下一般也能获得一定的控制效果。但是,当系统受到外部干扰,如负载发生变化时,电动机的转速就会随之变化,不能再维持 u_g 所期望的转速。

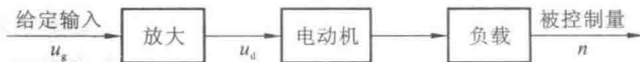


图 1-8 开环直流电动机转速控制系统结构图

开环控制系统之所以控制精度不高,抗干扰能力差,是因为缺少从系统被控制量到给定输入的反馈通道。若把系统的被控制量检测出来并反馈到它的输入端,与给定输入量相比较,产生偏差信号,根据偏差信号的大小及正负,以一定的控制规律产生控制信号,来逐步减小直至

消除偏差,便会大大提高控制精度和抗干扰能力。这种被控制量经反馈环节至给定输入端进行比较的控制系统称为闭环控制系统,又称为反馈控制系统。1.2节讨论的水池水位自动控制系统便是闭环控制系统。

闭环控制系统的工作原理是:测量环节连续不断地检测被控制量,并把所测得的被控制量的实际值与给定输入作减法运算,获得偏差信号;偏差信号经控制器按照一定的控制算法产生控制信号,去驱动执行元件;执行元件作用于被控对象,使被控制量趋近于给定输入,便达到减小直至消除偏差的控制目的。这种控制系统当受到干扰信号的作用时,通过反馈作用,能够自动地消除或削弱干扰信号对被控制量的影响。闭环控制系统具有较强的抗干扰能力,在控制工程中得到了广泛的应用。

一般闭环控制系统的结构图如图 1-9 所示。

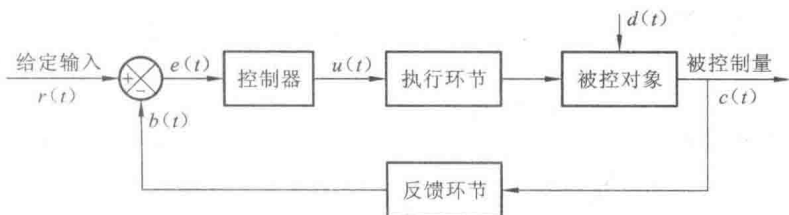


图 1-9 闭环控制系统结构图

图 1-9 中:

$r(t)$ ——系统的给定输入(又称参考输入、输入量、给定量)。

$c(t)$ ——系统的被控制量(又称输出量)。

$b(t)$ ——系统的主反馈量,与被控制量成正比或为某种函数关系的信号。其物理量纲必须与给定输入相同。因为只有物理量纲相同的信号,才能在比较点处进行相减运算。

$e(t)$ ——系统的偏差信号,等于参考输入与主反馈量之差,即 $e(t) = r(t) - b(t)$ 。

$u(t)$ ——控制信号,由控制器依据偏差信号的大小和正负,按照一定的控制算法运算后所产生。

$d(t)$ ——干扰信号,又称扰动。它是对系统被控制量产生不利影响的信号,可分为内部扰动和外部扰动。

控制器——它的输入是系统的误差信号,按照某种控制算法运算后,产生期望的控制信号传递给执行环节,执行环节作用于被控对象。

被控对象——受控的设备或过程,其输出就是系统的被控制量或输出量。

反馈环节——测量实际被控制量,并将其转换为主反馈信号的装置,这个装置一般为检测元件。

闭环控制又称反馈控制。反馈有负反馈和正反馈之分,若给定输入与反馈信号相减,则为负反馈;反之,为正反馈。图 1-9 所示系统为负反馈,若将图中比较环节中的“-”改为“+”,则系统将变为正反馈。

负反馈是通过输入量、输出量之间的偏差传递给控制器,这个偏差就反映了期望的输出和实际的输出之间的差别。控制的目的是不停地减小这个偏差直至为零。负反馈控制系统,控制精度高,抗干扰能力强。正反馈将进一步放大干扰,从而造成“恶性循环”,导致系统失稳。因此,

只有在某些特定情况下，局部使用正反馈。在系统主反馈通道中，只有采用负反馈才能达到控制的目的。若在主反馈通道使用正反馈，将使偏差越来越大，导致系统发散而无法工作。

如果在图 1-7 所示的开环直流电动机转速控制系统中，加入一台测速发电机，将电动机的实际转速测量出来，并转换为电压信号反馈到给定输入端，便可将开环控制系统改造为闭环控制系统。闭环直流电动机转速控制系统如图 1-10 所示。

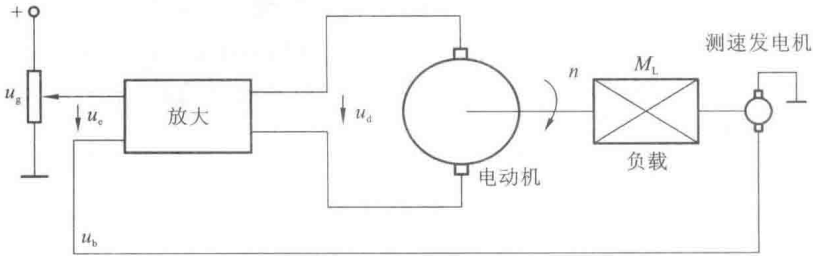


图 1-10 闭环直流电动机转速控制系统

图 1-10 中，测速发电机与负载同轴运转，将负载的实际转速 n (系统输出量) 测量出来，并转换为电压信号 u_b ，反馈到系统的输入端，与给定电压 u_g (系统输入量) 相比较，得到偏差电压 $u_e = u_g - u_b$ 。偏差 u_e 经放大后，驱动直流电动机运转。图 1-11 是闭环直流电动机转速控制系统的结构图。

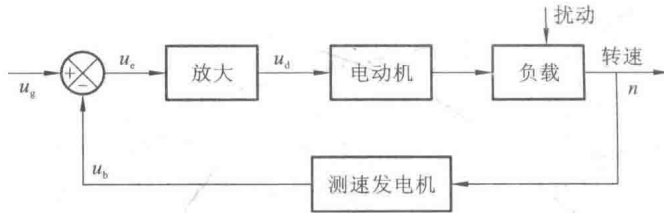


图 1-11 闭环直流电动机转速控制系统结构图

由图 1-11 可见，由于采用了反馈回路，信号的传输路径形成了闭合回路，使输出量反过来直接影响控制作用。这种通过反馈使系统构成闭环回路，并按偏差产生控制作用，用以减小直至消除偏差的控制系统，即为闭环控制系统。

在闭环控制系统中，不论是输入信号的变化、扰动的影响、系统内部的变化，只要是被控制量偏离了给定值而产生偏差，都会有相应的控制作用去消除这个偏差。因此，闭环控制具有很强的抗干扰能力。例如，在闭环直流电动机转速控制系统中，当负载增加造成电动机转速降低时，测速发电机所输出的电压 u_b 将减小，偏差电压 u_e 将增大，经放大后作用于电动机电枢的电压 u_d 将增大，从而使电动机转速增加。调节过程可用图 1-12 来表示。

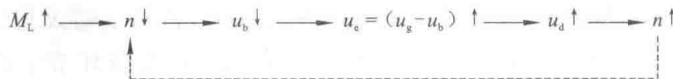


图 1-12 转速调节过程

这个调节过程是自动的、动态的，只要偏差存在，便会不断重复这个过程，直到达到平衡状态。

1.5 对自动控制系统的基本要求

自动控制系统种类繁多,不同的控制系统有不同的控制目标,因而其具体的要求也往往不一样。自动控制理论是研究各类自动控制系统共同规律的科学,对一般控制系统而言,都有一个共同的、基本的要求。无论是恒值控制系统还是随动系统,人们都希望被控制量能够准确、迅速地跟踪输入量。但在实际控制系统中,这些要求并不能完全得到满足,而只能近似地得到实现。这是因为控制系统中一般含有储能元件或惯性元件,如机械的惯性、电路中的电容与电感等,这些储能元件的能量是不可能突变的。因此,当系统受到输入量的作用时,被控制量的跟踪过程并不会立即完成,而是有一个渐变的过程。这个被控制量跟踪输入量的时间过程,称为动态过程,也称过渡过程。被控制量跟踪到输入量并达到平衡状态,称为稳态或静态。

一般而言,控制系统的性能从稳定性、准确性、快速性三个方面来评价,即对控制系统稳、准、快的要求。

1. 稳定性

稳定性是对控制系统最根本的要求,是保证控制系统正常工作的先决条件。稳定性是指控制系统能否克服扰动的影响恢复到原平衡状态的能力。简单地说,就是系统受到扰动作用后,其输出量将偏离原平衡状态;当扰动消失后,系统经过一段时间,仍能恢复到原来的平衡状态,则称系统是稳定的,否则就是不稳定的。从系统响应的角度来讲,稳定的系统其被控制量最终将基本收敛于给定输入量,不稳定的系统其被控制量将会发散,并严重偏离给定输入量,因此,稳定性实际上反映了被控制量能不能跟踪给定输入量的问题。显然,稳定的系统才能达成控制的目标,所以,稳定是控制系统正常工作的首要条件。

2. 准确性

准确性反映的是系统的稳态精度,或稳态性能,稳态精度常用稳态误差来衡量。当系统过渡过程结束达到稳态后,被控制量与给定输入量之差称为稳态误差。显然,这个误差越小,表示系统的输出跟踪输入的精度越高,准确性也越好。误差为零,则表明被控制量能完全跟踪给定输入量。

3. 快速性

快速性反映的是系统被控制量跟踪给定输入量的速度,它对被控制量跟踪给定输入量的动态过程的形式和快慢提出了要求,一般称为动态性能。

综上,稳定性、准确性、快速性针对控制系统输出量跟踪输入量的能力,分别从能不能跟踪、跟踪的精度及速度这三个方面提出了性能要求。归结起来,就是稳、准、快三个字。稳定性是前提,准确性、快速性是补充。

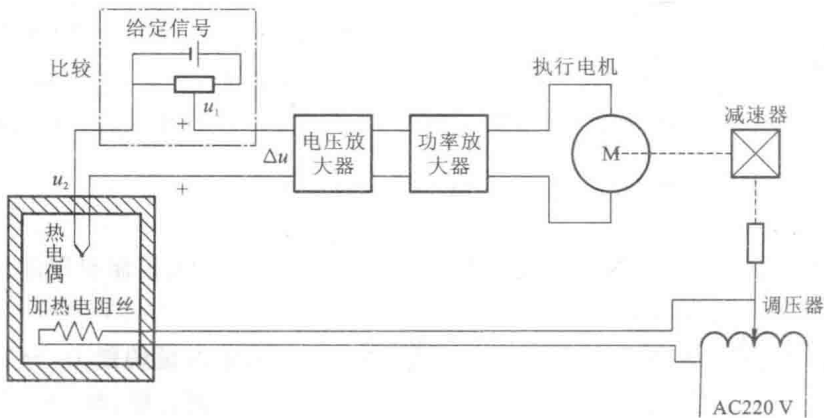
由于被控对象和控制目标的具体情况不同,各种系统对稳、准、快的要求各有侧重。例如,随动系统对快速性要求较高,而调速系统则对稳定性提出较严格的要求。同一个系统,上述三个方面的性能要求通常是相互矛盾和相互制约的。提高稳态精度,可能会破坏系统的稳定性;

改善稳定性,控制过程可能变得缓慢、控制精度也可能变坏。分析和研究这些矛盾,提出恰当的解决方法,正是本书所要讨论的主要课题。

本节所述对控制系统性能的基本要求只是一般性的概念,第3章至第5章将对稳定性、稳态性能、动态性能各指标给出具体的定义,并介绍了定性分析和定量计算的具体方法。不同的系统分析方法(时域分析法、根轨迹分析法、频域分析法)也主要是围绕这三个方面的性能指标进行。控制系统的综合与设计所提出的性能指标要求,也主要是这三个方面。

习 题 1

1. 试列举几位为自动控制理论的发展做出卓越贡献的学者,查阅资料,进一步了解其贡献。
2. 举几个日常生活中自动控制的例子,说明其工作原理,并说明是开环控制还是闭环控制。
3. 闭环控制系统一般由哪几部分组成,各部分的作用是什么?
4. 举一个你熟悉的闭环控制系统的例子,如室内温度控制系统、汽车自动巡航系统等。绘出系统的结构图,指出输入量、输出量和可能的扰动和噪声;指出控制器、被控对象、传感器是由哪些物理设备构成。简要讨论在没有反馈的情况下系统能否正常运行。
5. 对控制系统的基本要求有哪些? 这些要求分别反映了控制系统哪些方面的性能指标?
6. 题图 1.1 为恒温箱自动控制系统示意图。
 - (1) 说明该系统的工作原理;
 - (2) 指出该系统是恒值控制系统还是随动系统;
 - (3) 画出系统结构图,在图中标明控制系统各组成环节所对应的具体设备或装置及图中各处信号名称。



题图 1.1 恒温箱自动控制系统示意图

7. 某仓库大门自动控制系统的示意图,如题图 1.2 所示。
 - (1) 试说明控制大门开启和关闭的工作原理。