

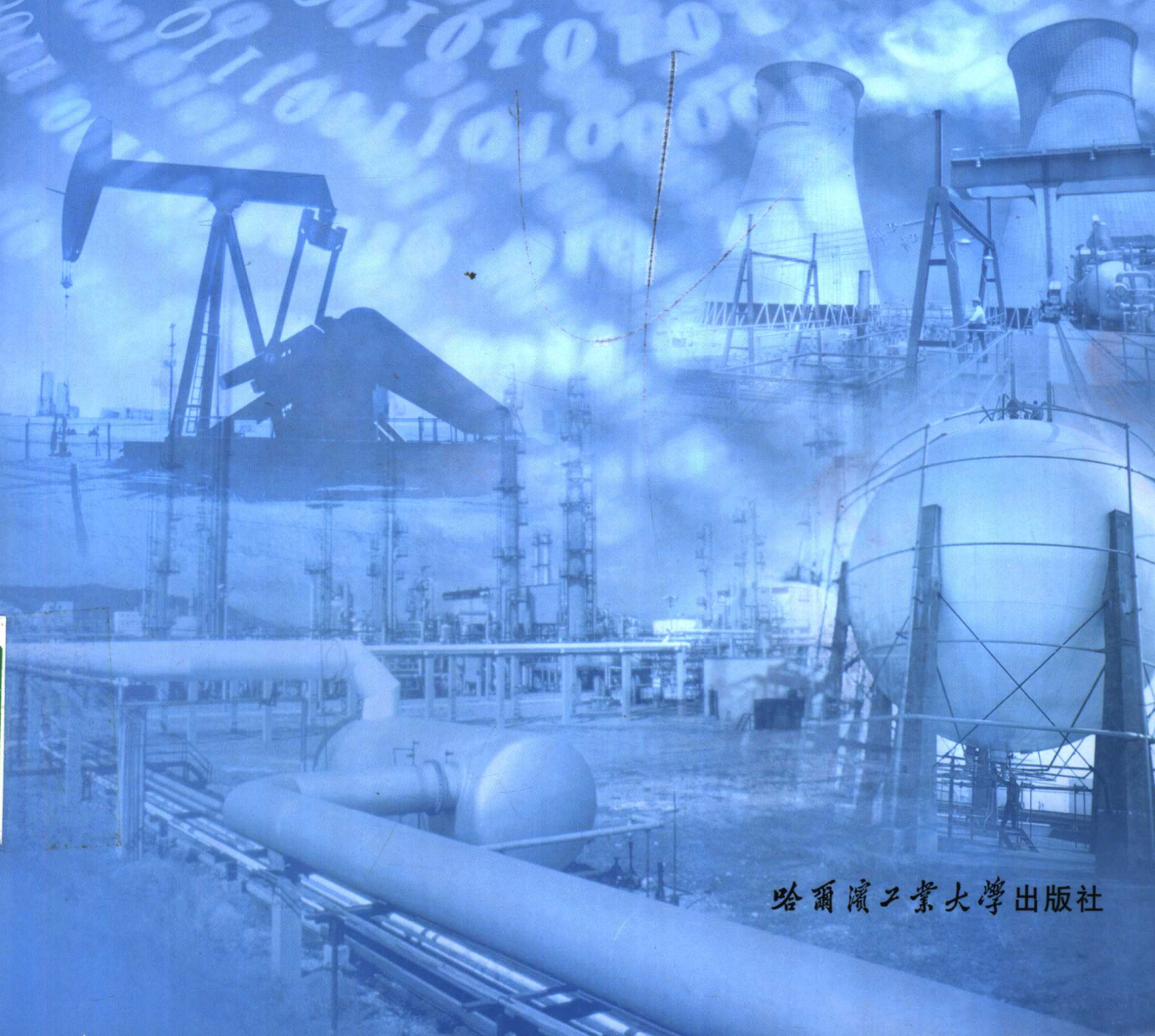
//

21 世纪高等学校教材

自动控制原理

(第2版)

于长官 等编著



哈尔滨工业大学出版社

TP13
195

21 世纪高等学校教材

自动控制原理

(第 2 版)

于长官 等编著

哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

本书内容包括控制系统的一般概念、控制系统的传递函数与方块图、时域分析法、频率特性法、控制系统的校正与设计、采样(离散)系统、控制系统综合、现代频域法、状态空间法及附录。

本书特点是自动控制原理与工程实际相结合,篇幅精简,重点突出,既讲清基本原理与基本方法,又保持内容的系统性与知识的连贯性,使本书具有鲜明的教学性与自学性。

本书既可作为非自动控制专业、成人教育自动控制专业及相近专业的本专生教材,亦可作为备考控制工程硕士的学习用书,还可作为科技人员及高级技师的培训和自学用书。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/于长官等编著. —2版. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2006. 1

ISBN 7-5603-1162-8

I. 自… II. 于… III. 自动控制理论 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 131771 号

责任编辑 黄菊英

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市龙华印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 17.5 字数 422 千字

版 次 1996 年 7 月第 1 版 2006 年 1 月第 2 版

2006 年 1 月第 4 次印刷

印 数 15 001~18 000 册

定 价 23.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

第2版前言

本书自1996年出版以来,作为高等学校非自控专业与成人教育自动控制原理课程的教材、为工程技术人员自学指导书和控制工程硕士入学考试用书,收到了较好的使用效果。但从高等教育的发展及工程硕士的教学特点考虑,还有诸多不足之处,需作较大改动,为此作者进行修订。

修订本书的基本思路是,以读者为本,引导与总结相结合,循序渐进,以图实效。修订后的自动控制原理强化了理论,注重科学技术与工程实践的应用。首先,对控制系统的教学模型,通过引入较多示例,加深对原理的认识与理解;其次,增加了时域分析法及采样(离散)系统的内容,使本书理论上有了一定深度和教学可操作性;再次,加入控制系统综合与现代频域法两章新内容,从实践性与理论性两个方面直接与间接地阐述了自动原理的应用与延伸;最后本书附录中还新加入自动控制原理的考试试题,从而使附录成为学习的必要内容,帮助读者学习总结、深入学习及学习自检。

本书作为教材,对非自动控制专业本科生,可按40~60学时组织教学,讲授第一~九章内容;对备考控制工程硕士研究生与成人教育在校生,可按40学时组织教学,讲授第一~六章;对科技人员及高级技师的培训,可考虑按24~40学时组织教学,讲授第一~九章的相应部分。

本书由哈尔滨工业大学于长官教授编著,参与编著及协助工作的还有刘英贤、于涌韩华、崔继仁、琚雪梅、于桂臻、王晔、姚东媛、召院辉、张玉峰、李晶。

本次修订由于内容变动较大,加之编者水平所限,一定还存在不妥与疏漏之处,恳请学习者批评指正。

编著者

2005年12月

目 录

第一章 控制系统的一般概念	(1)
1.1 自动控制的发展历史	(1)
1.2 开环控制与闭环控制	(2)
1.3 控制系统的组成及性能要求	(5)
1.4 控制系统示例	(8)
第二章 控制系统的传递函数与方块图	(11)
2.1 控制系统的运动方程	(11)
2.2 传递函数	(14)
2.3 方块图	(18)
2.4 传递函数与方块图示例	(25)
第三章 时域分析法	(36)
3.1 典型输入信号	(36)
3.2 系统的稳定性	(38)
3.3 一阶系统的阶跃响应	(43)
3.4 二阶系统的阶跃响应	(45)
3.5 高阶系统的阶跃响应	(52)
3.6 系统动态特性示例	(54)
3.7 系统稳态误差的概念	(61)
3.8 系统稳态误差的计算与分析	(65)
第四章 频率特性法	(73)
4.1 频率特性的概念	(73)
4.2 典型环节的对数频率特性	(75)
4.3 开环系统对数频率特性曲线的绘制	(84)
4.4 乃奎斯特判据	(92)
4.5 控制系统的相对稳定性	(96)
4.6 开环对数频率特性与性能指标	(104)
第五章 控制系统的校正与设计	(108)
5.1 控制规律及实现装置	(108)
5.2 相位超前校正	(113)
5.3 相位滞后校正	(117)
5.4 相位滞后-超前校正	(120)
5.5 按期望对数幅频特性设计	(123)
5.6 按期望对数幅频特性进行并联校正的设计	(128)

5.7	二阶工程设计法	(132)
5.8	三阶工程设计法	(135)
第六章	采样(离散)系统	(138)
6.1	信号的采样与复现	(139)
6.2	Z 变换	(143)
6.3	脉冲传递函数	(147)
6.4	闭环采样系统的阶跃响应	(152)
6.5	采样系统的稳定性分析与稳态误差计算	(154)
6.6	数字控制器的模拟化设计	(156)
第七章	实际控制系统的综合	(162)
7.1	自动控制系统的基本类型	(162)
7.2	双闭环直流调速系统	(169)
7.3	水泥生料配比控制系统	(181)
7.4	水泥生料质量控制系统	(186)
7.5	新闻纸复卷测长控制系统	(193)
第八章	现代频域法	(198)
8.1	对角优势矩阵	(198)
8.2	逆乃奎斯特矩阵列法的设计思想	(201)
8.3	对角优势系统的乃奎斯特稳定判据	(203)
第九章	状态空间法	(207)
9.1	状态空间法的基本概念	(207)
9.2	化状态空间表达式	(211)
9.3	系统的能控性与能观测性	(222)
9.4	状态反馈与输出反馈	(228)
9.5	单输入-单输出状态反馈系统的极点配置法	(230)
附录		(238)
I	思考与习题	(238)
II	要点提示	(251)
III	自动控制原理考试试题	(260)
参考文献		(272)

第一章 控制系统的一般概念

在工程与科学技术发展过程中,自动控制担负着重要角色。在宇宙飞船系统、导弹制导系统及机械人系统中,自动控制具有重要作用;在航天航空工业的自动驾驶仪系统设计与汽车工业设计中,自动控制是不可少的;在工业过程控制中,如对压力、温度、湿度、黏性与流量等控制,自动控制都是不可缺少的。因此工程技术人员和科学工作者都必须具备一定的自动控制知识。

1.1 自动控制的发展历史

自动控制 就是在无人直接参与的情况下,利用控制装置(控制器)使被控制对象或过程自动地按预定的运行规律去运行。导弹能准确地命中目标,人造卫星能按预定轨道运行并返回地面,宇宙飞船能准确地月球上着落并安全返回,都是自动控制技术发展的结果。

自动控制是一门理论性很强的工程技术,称“自动控制技术”,实现这些技术的理论叫“自动控制理论”。它分为三部分,即“经典控制理论”、“现代控制理论”、“大系统理论与智能控制理论”。

自动控制是一门年轻学科,从 1945 年开始形成。这以前,世界各国对此作出很多贡献,是自动控制理论的胚胎与萌芽时期,在这一时期,我国具有杰出的成就。“中国是世界文明发达最早的国家之一”,天文学有关领域的需要产生了自动装置。3 000 年前发明了自动计时的“铜壶滴漏”装置;公元前 2 世纪发明了用来模拟天体运动和研究天体运动规律的“浑天仪”;2 100 年前研制出指南车;公元 132 年产生了世界第一架自动测量地震的“地动仪”;公元 3 世纪发明了自动记录里数的“记里鼓车”;公元 11 世纪发明了自动调节器“平衡装置”。

工业生产和军事技术的需要,促进了经典自动控制理论和技术的产生和发展。18 世纪欧洲产业革命后,由于生产力的发展,蒸汽机被广泛用作原动力。为使工作更完善(解决不易控制问题),1765 年俄国机械师波尔祖诺夫发明了蒸汽机锅炉水位调节器;1784 年英国瓦特发明了蒸汽机离心式调速器。在蒸汽机控制中,人们总希望转速恒定,因此判定稳定、设计稳定可靠的调节器成为重要课题。1877 年 ROUTH 和 HURWITZ 提出判定系统稳定的判据。19 世纪前半期,生产中开始利用发电电动机,又促进了水利发展,出现了水电站远控、简单程序控制、电压和电流的自动调整等技术。19 世纪末到 20 世纪前半期,由于内燃机的应用,促进了船舶、汽车、飞机制造业、石油业的发展,同时对自动化又提出了要求,由此相应产生了伺服控制、过程控制等技术。二次世界大战中,为了生产和设计飞机、雷达和火炮上各种伺服机构,需要把过去自动调节技术和反馈放大器技术进行总结,于是搭起了经典控制理论的架子,战后这些理论公开,并用于一般工业生产控制中。

经典控制理论期(20世纪40~60年代) 1945年美国波德写了《网络分析和反馈放大器设计》,奠定了经典控制理论基础,在西方国家开始形成自动控制学科,1947年美国出版了《伺服机件原理》的第一本自动控制教材,1948年美国麻省理工学院出版了《伺服机件原理》另一本教材,建立了现在广泛使用的频率法。50年代是经典控制理论发展和成熟的时期。主要内容为频率法(拉氏变换及 Z 变换)、根轨迹法、相平面法、描述函数法、稳定性的代数判据和几何判据、校正网络等,这些理论基本解决了单输入单输出自动控制系统的问题。同时开始逐渐分化。由线性控制向非线性控制发展,由常系数控制向变系数控制发展,由连续控制向断续控制发展,由分散控制向集中控制发展,由反馈控制向前馈控制、最优控制、自适应控制发展。

现代控制理论期(20世纪60年代中期成熟) 空间技术的需要和电子计算机的应用,推动了现代控制理论和技术的产生与发展。50年代末60年代初,空间技术的发展迫切要求对多输入多输出、高精度参数时变系统进行分析与设计,这是经典控制理论无法有效解决的问题,于是出现了新的自动控制理论,称“现代控制理论”。1960年卡尔曼发表了“控制系统的一般理论”,1961年又与布西发表了“线性过滤和预测问题的新结果”。西方国家公认卡尔曼奠定了现代控制理论基础,他的工作是控制论创始人维纳工作的发展,主要引进了数学计算方法中的“校正”概念。现代控制理论主要内容为状态空间法、系统识辨、最佳估计、最优控制。

以经典控制理论为基础,以自动调节器为核心的自动调节系统阶段,对象是单输入单输出线性自动调节系统,数学模型用传递函数表示,方法是频域法,研究的主要内容是稳定性问题,主要控制装置是自动调节器,技术工具类型为机械、气动、液体、电子等,主要用于实现局部自动化。

以现代控制理论为基础,以控制计算机为核心的最优控制系统阶段,对象是多输入多输出的复杂系统,数学模型用状态方程表示,方法是时域法。主要内容是最优性问题,主要控制装置是电子计算机,用于实现企业管理和控制综合自动化。

大系统理论和智能控制理论 它是20世纪70年代后控制理论向广度和深度发展的结果。大系统是指规模庞大、结构复杂、变量众多的信息与控制系统,它涉及生产过程、交通运输、计划管理、环境保护、空间技术等多方面的控制和信息处理问题。而智能控制系统是具有某些仿人智能的工程控制与信息处理系统,其中最典型的就是智能机器人。

1.2 开环控制与闭环控制

一、基本定义

被控对象 指要求实现自动控制的机器、设备或生产过程。如电机、锅炉、机床、飞行器及工业生产过程等。

控制装置 也称控制器,指对被控对象起控制作用的装置的总称,目的是使被控对象完成既定任务。

自动控制系统 它是由控制装置和被控对象组成的,是以某种规律或互相依赖的方式结合为一个有机整体,并使被控对象工作状态能自动控制。自动控制系统不限于物理系统,也可应用于抽象的动态现象。

被控量 在自动控制系统中,按给定的要求加以控制的物理量。

控制量 作为被控量的控制信号,而加给自动控制系统的输入量。

干扰量 也称扰动量,在自动控制系统中,是使被控量偏离期望值的不利因素。如果干扰产生于系统的内部叫内部干扰,干扰产生于系统的外部叫外部干扰。

二、开环控制

开环控制 指组成系统的控制装置与被控对象之间,只有顺向作用而没有反向联系的控制。炉温控制系统如图 1.1 所示,方块图如图 1.2 所示。

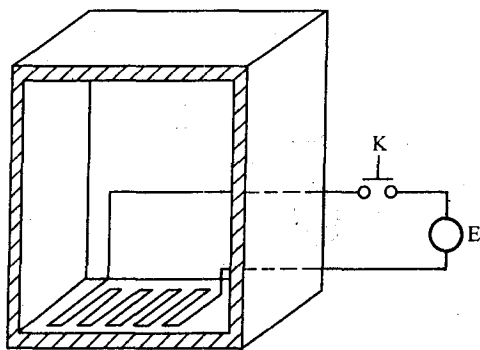


图 1.1 炉温控制系统

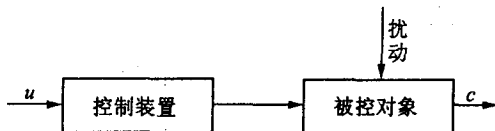


图 1.2 开环控制方块示意图

对炉温系统开环控制分析 炉子是被控对象,炉温是被控制量 c ,加热电阻丝的开关 K 受时间继电器控制,按照预先规定的时间接通或断开电源 E ,从而使炉温保持在希望炉温的一定范围内。如果工作条件变化较大,如炉门的开闭引起炉温降低,而偏离希望值,但开关 K 不因此改变接通时间,所以炉温偏差一般无法自动修正。

开环控制系统的特点 由上分析可知,系统输出量(被控量)对系统输入量(控制量)不发生影响,不需要对输出量测量,所以控制容易实现,系统的稳定性不是重要问题。它的问题是:对存在变化规律无法预测的干扰,往往无法实现控制。为保证系统精度较高,组成系统的每一个部件(或元件)质量要好,但部件或元件的高精度往往难以保证。

三、闭环控制

在开环控制的基础上,为了解决上述矛盾,人可以直接参与系统工作。如图 1.3 为人参与工作的炉温控制系统,开关 K 不是用继电器控制,而由人操纵,这样人可以通过观察

实际炉温,然后根据实际炉温偏离希望炉温的高低来操纵开关K的通断时间,从而使炉温保持在希望值。这里人的作用就是完成测量输出并改变输入的任务。用元部件代替人的作用,即实现了无人直接参与的闭环系统。控制系统如图 1.4 所示,方块示意图如图 1.5 所示。

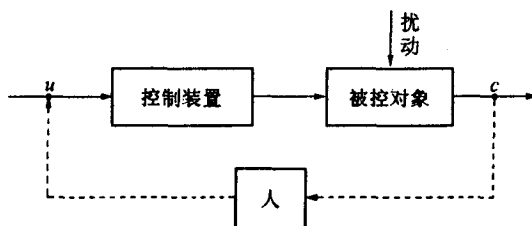


图 1.3 人直接参与系统工作的方块示意图

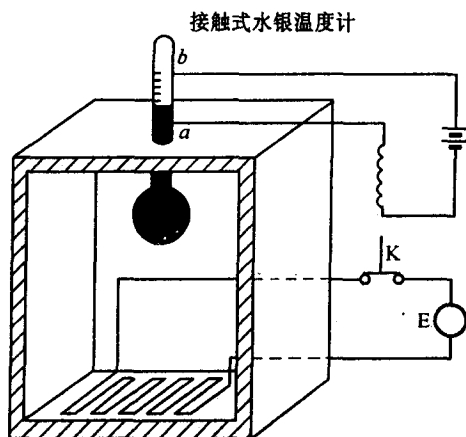


图 1.4 炉温闭环控制系统

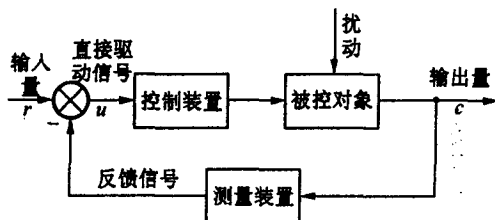


图 1.5 闭环控制方块示意图

闭环控制 指控制装置与被控对象之间既有顺向作用,又有反向联系的控制。它的控制过程大致为:对被控量(即输出量)进行测量,并与控制信号(输入量)进行比较,得到偏差信号;将偏差信号进行处理(放大与变换);利用变换与放大后的偏差信号产生控制作用;这个控制作用使被控量(即输出量)做与原来相反方向的运动。这种利用偏差产生控制作用,达到消除(或减小)偏差的控制原理叫反馈原理。如果经过反馈使系统偏差增加,即为正反馈,它不能达到自动控制的目的,所以一般地说,反馈控制系统都是负反馈。

闭环控制系统的特点 通过闭环,随着扰动而变化的直接驱动信号,使输出恢复到

扰动前的状态,因此对扰动有补偿、抵抗的能力;能用精度低的元件(或部件)组成精度较高的控制系统;因为闭环后可能超调、振荡,所以稳定性问题很重要,为此,在系统中,通常要加入校正元件(环节)。

1.3 控制系统的组成及性能要求

一、控制系统的基本类型

1. 恒值控制系统

恒值控制系统 如果控制信号为恒定常量,承受这类控制信号作用的闭环系统为恒值控制系统。自动调速系统、恒温控制系统及稳压、稳流、恒频的控制系统,均是恒值控制系统。电机调速系统如图 1.6 所示。

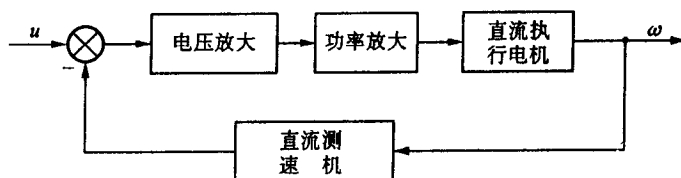


图 1.6 电机调速系统方块示意图

恒值控制系统的特点 其特点是控制信号是常量或是极为缓慢的信号。主要任务是补偿干扰,使系统输出保持恒值。

2. 随动控制系统

随动控制系统 如果控制信号为任意时间函数,此函数在系统工作之前又是无法预先确定的,承受这类控制信号作用的闭环系统称为随动控制系统。工作机械的位置控制、导弹发射架的控制、火炮的控制均是随动控制系统,工作机械的随动控制系统如图 1.7 所示。

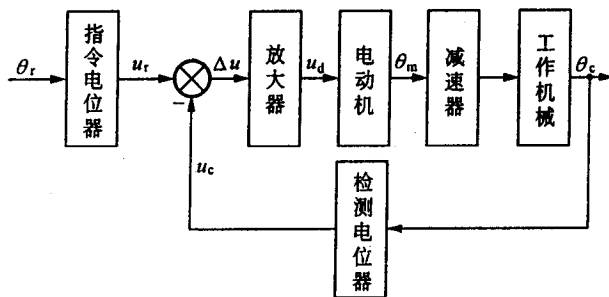


图 1.7 工作机械随动系统方块示意图

随动控制系统的特点 其特点是能以一定的准确度,使被控对象跟踪(复现)控制信号所给定的预先无法确定的运动规律。其主要任务是解决跟踪,而补偿干扰是次要的矛盾。

3. 计算机控制系统

计算机不只是作为计算工具,而是作为系统的核心部件参与工作,以完成高精度复杂系统的控制。宇宙飞船姿态控制系统如图 1.8 所示。

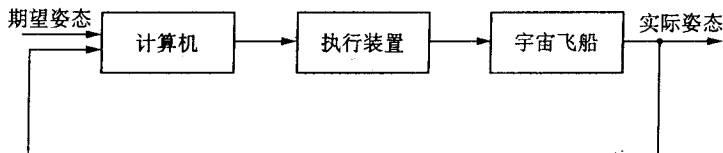


图 1.8 宇宙飞船姿态控制系统方块示意图

计算机控制系统的特点 其特点是闭环内采用计算机控制;系统信号中既有模拟量,也有数字量。

二、控制系统的基本组成

由以上闭环系统举例不难看到,尽管控制系统由不同元件组成,其功能也不一样,但它们都是基于负反馈工作原理。相同的工作原理,决定它们必然具有类似的基本结构。同样,不同系统中,可采用不同元件去实现某种相同的功能。一般来说,一个闭环自动控制系统的组成如图 1.9 所示。

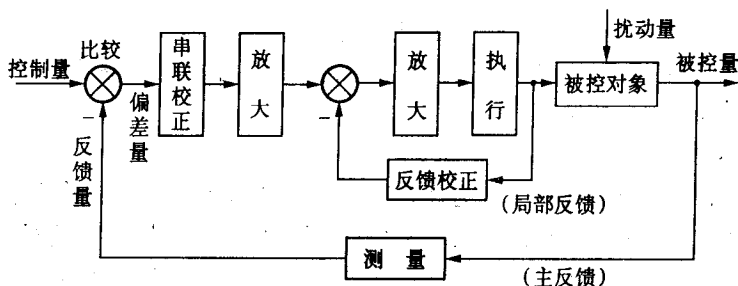


图 1.9 反馈控制系统的组成

测量元件 它是对系统被控量(输出量)进行测量的元件,因为它的精度直接影响控制系统精度,所以应尽可能用精度高的测量元件和合理测量线路。

比较元件 它是用来对系统输出量与输入量进行代数运算并给出偏差信号的元件,起综合、比较变换作用。有时,这个作用是由综合电路或测量元件一起完成的。这时这些元件统称误差检测元件。

放大元件 它被用来对微弱的偏差信号进行放大,使其有足够的幅值与功率。

执行元件 它根据放大后的偏差信号,对被控对象执行控制任务,使输出量与希望值趋于一致。

被控对象 它是指自动控制系统需要进行控制的机器、设备或生产过程。被控对象要求实现自动控制的物理量称为被控量或输出量。

校正元件 实践证明,按反馈原理由上述元件简单组合的闭环控制系统,往往不能完成任务。这是因为系统的内部存在不利控制的因素:由于有干摩擦、死区,系统输出并不马上反映输入,只有当偏差信号大到一定时系统才有反应;由于惯性的存在,在反应控制

信号过程中还可能产生振荡,严重时破坏系统正常工作。为了使系统能正常工作,要加入能消除或减弱上述不利影响的一些元件,把这样一类元件称为校正元件。

总之,可认为控制系统由对象、比较环节(包含测量元件、比较元件)、放大环节、执行环节、校正环节组成。一般来说,尽管反馈系统控制任务不同,以及使用元件的结构和能源形式不同,但就其信号传递、变换职能来说,都可抽象为上面的基本组成。

三、对控制系统的一般要求

为了实现自动控制的基本任务,必须对系统在控制过程中表现出的行为提出要求,对控制系统的基本要求,通常是通过系统反应特定输入信号(或叫试验信号),例如单位阶跃信号的过渡过程及稳态的一些特征值来表示。其基本要求可综述为三个方面,即系统的稳定性、动态特性和稳态特性。

1. 系统的稳定性

若系统有扰动或给定输入作用发生变化,系统的输出量产生的过渡过程随时间增长而衰减,而回到(或接近)原来的稳定值,或跟踪变化了的输入信号,则称系统稳定。反之,输出量过渡过程随时间增长而发散或持续等幅振荡,则称系统不稳定。

2. 系统的动态特性

由于系统的对象和元件通常都具有一定的惯性(如电磁惯性、机械惯性),又由于能源功率的限制,系统中的各种物理量(如电压、电流、位移、速度、温度等)的变化不可能突变。因此,系统从一个稳定状态过渡到另一个新的稳定状态,都需要经历一个过渡过程,它反映了系统的动态特性,通常用能描述过渡过程的特征值来表示。现以单位阶跃信号作用下,控制系统的过渡过程来说明,如图 1.10 所示。

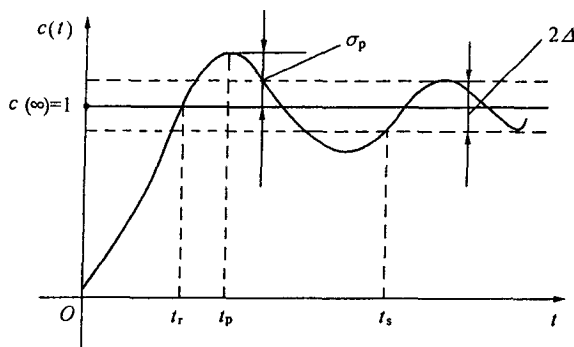


图 1.10 单位阶跃响应特性

① 系统上升时间 t_r 。系统过渡过程首先达到新的状态需要的时间为上升时间 t_r ,它是说明系统反应速度的。

② 系统超调量 σ_p 。对于稳定系统而言,系统过渡过程的第一次超调量为最大,取其为性能指标之一。

$$\sigma_p = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\%$$

它是说明系统阻尼性即振荡性的。阻尼大,振荡小,即超调量小,说明系统过渡过程进

行得平稳。不同的控制系统,对超调量要求也不同。例如,一般调速系统要求 $\sigma_p = 10\% \sim 35\%$;轧钢机的初轧机要求 $\sigma_p < 10\%$ 。

③ 系统的过渡过程时间 t_s 。它是从给定输入作用于系统开始,到输出量进入离期望值的 $\pm 5\%$ (或 $\pm 2\%$) 区域所需时间。当 $t \geq t_s$ 时,则有

$$|c(t) - c(t_s)| \leq \Delta \quad (\Delta = 0.05 \text{ 或 } \Delta = 0.02)$$

过渡过程时间 t_s 是说明系统惯性的,反映了系统的反应速度。例如,连轧机 $t_s = 0.2 \sim 0.5 \text{ s}$;造纸机 $t_s = 0.3 \text{ s}$ 。

④ 系统振荡次数 N 。它是指在过渡过程时间内,输出量在期望值上下摆动的次数。振荡次数 N 小,说明系统阻尼性好。例如,普通机床 $N = 2 \sim 3$ 次;造纸机传动 $N = 0$,即不允许有振荡。

3. 系统的稳态特性

对于稳定系统,输出的稳态值与其期望值之间出现的偏差称为系统的稳态误差 e_{ss} 。系统稳态误差的大小反映了系统的稳态精度,说明了系统的准确程度。

综上,对控制系统的性能要求可归结为,稳定好、动作快、精度高。

1.4 控制系统示例

例 1.1 液位控制系统

液位控制系统原理如图 1.11(a) 所示。其中控制部分(含比较、放大,产生控制信号)通过调整气动阀门的开度,对误差进行修正,使液位保持不变。其控制系统示意图如图 1.11(b) 所示。

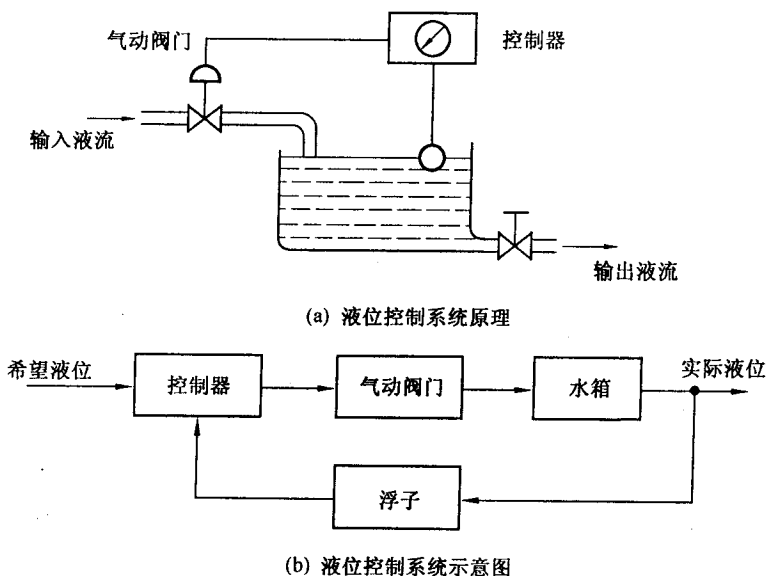


图 1.11 液位控制系统

例 1.2 发动机速度控制系统

发动机速度控制系统如图 1.12 所示。该系统被控对象为发动机,被控量为发动机的速度。给定的希望速度与实际速度之差为误差信号,通过执行环节(导阀、动力油缸、控制阀门)产生控制信号(燃料数量),作用于发动机。

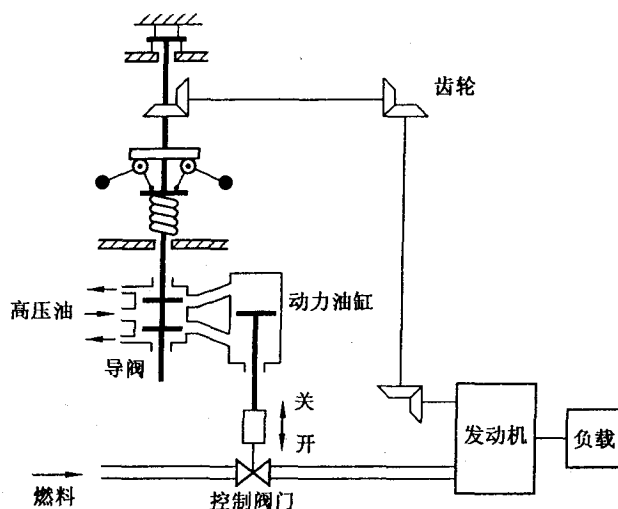


图 1.12 发动机速度控制系统

例 1.3 客车内的温度控制系统

汽车客舱温度控制原理示意图如图 1.13 所示。要求的温度转变为电信号作为输入量,来自抽气机的空气温度反映了客车内温度,通过传感器转变为电信号,作为系统的被控量,即输出量,经反馈与输入量比较得误差质量,经控制器产生控制作用,通过控制冷水或暖水数量,使客车内温度趋于要求温度。当客车行驶过程中,客车内温度受以干扰,这来自周围环境的温度和太阳辐射热量不恒定,为此该系统在闭环反馈控制基础上,又采用了前馈控制,从而构成了系统的复合控制。

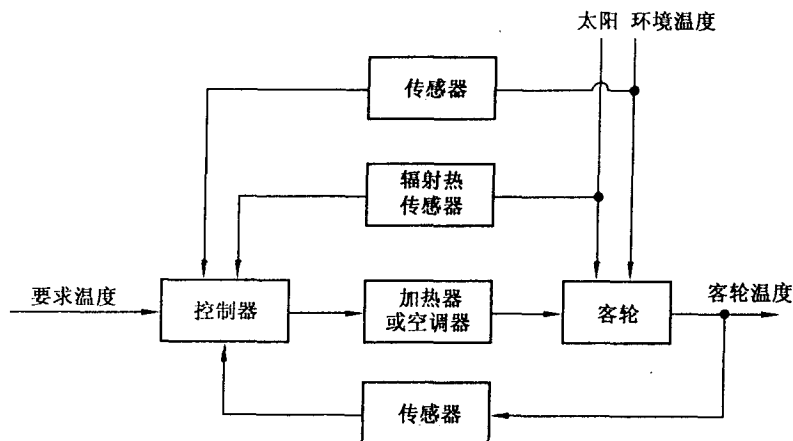


图 1.13 汽车客舱温度控制示意图

例 1.4 图 1.14 为水位控制系统,说明它的工作原理,画出方块示意图,并标明控制

量、被控量、干扰量及组成的环节。

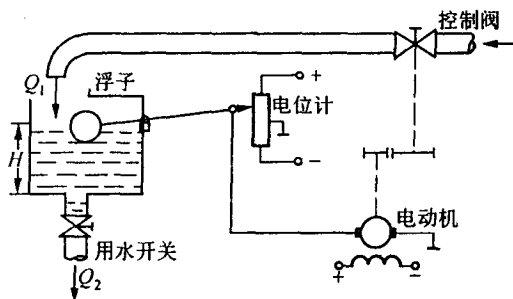


图 1.14 水位控制系统

例 1.5 图 1.15 为电机直流调速系统,试说明其组成及工作原理,并画出方块示意图。以此系统为背景,阐述闭环控制的特点。

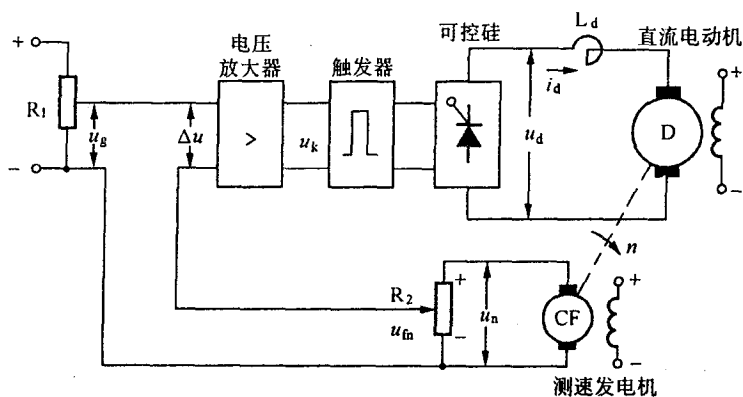


图 1.15 电机直流调速系统

第二章 控制系统的传递函数与方块图

2.1 控制系统的运动方程

一、数学模型

根据系统性质,运用相应的物理学、化学、生物学等规律列写的方程式,代表系统在运动过程中各变量间的相互关系,系统动态性能的这个微分方程式的数学表达式,叫数学模型。一个合理的数学模型,是指它既能正确地代表被控对象或系统的特性,即要求精确性,又必须是最简化的形式,即要求简化性。因此处理时,通常抓住主要因素(矛盾),忽略对系统特性影响较小的一些物理因素后,可以得到一个简化模型(起码适用于设计初步阶段)。大多数工程控制系统的简化数学模型是一个线性微分方程,这种控制系统称为线性系统。当微分方程的系数是常数时,相应的控制系统称为线性定常系统(或线性时不变系统)。当微分方程的系数是时间函数时,相应的控制系统称为线性时变系统。线性系统的重要特点是可以运用叠加原理,即几个外作用加于系统所产生的总响应,等于各个外作用单独作用时产生的响应之和。

如果系统中存在非线性特性,则需用非线性微分方程来描述,这种系统称为非线性系统。严格说,实际控制系统的元件都含有非线性,如同服电动机需一定的启动电源;放大器有饱和;齿轮减速器有间隙存在等等。所以在自然界中,真正的线性系统是不存在的,均为含有非线性特性的系统,虽然可用非线性微分方程描述,但求解很困难,除了可以用计算机进行数值计算外,大部分非线性系统,可以在一定工作范围内用线性系统模型近似,称为非线性模型的线性化。工程实践中,常常把非线性特性在工作点附近用台劳级数展开的方法进行线性化。所以线性化是研究非线性系统的一种常用方法,凡是可以进行线性化的系统,都可以用线性理论进行分析,而线性微分方程的求解一般都有标准的方法,因此线性系统的研究具有重要实用意义。

建立微分方程式的一般步骤是:

- ① 全面了解系统的工作原理,及由哪些部分如何联系在一起组成闭环系统。
- ② 一般从系统的输入端开始,根据各元件或环节所遵循的物理规律,依次列写它们的微分方程。
- ③ 将各元件或环节的微分方程联立起来消去中间变量,得到一个仅含有系统输入量与输出量的微分方程,即为整个系统的运动方程式。

二、随动系统运动方程

随动系统示意图如图 2.1 所示。

执行元件为交流两相电机,控制相电压与固定相构成 90° 相移,控制绕组与固定绕组