

自动控制原理

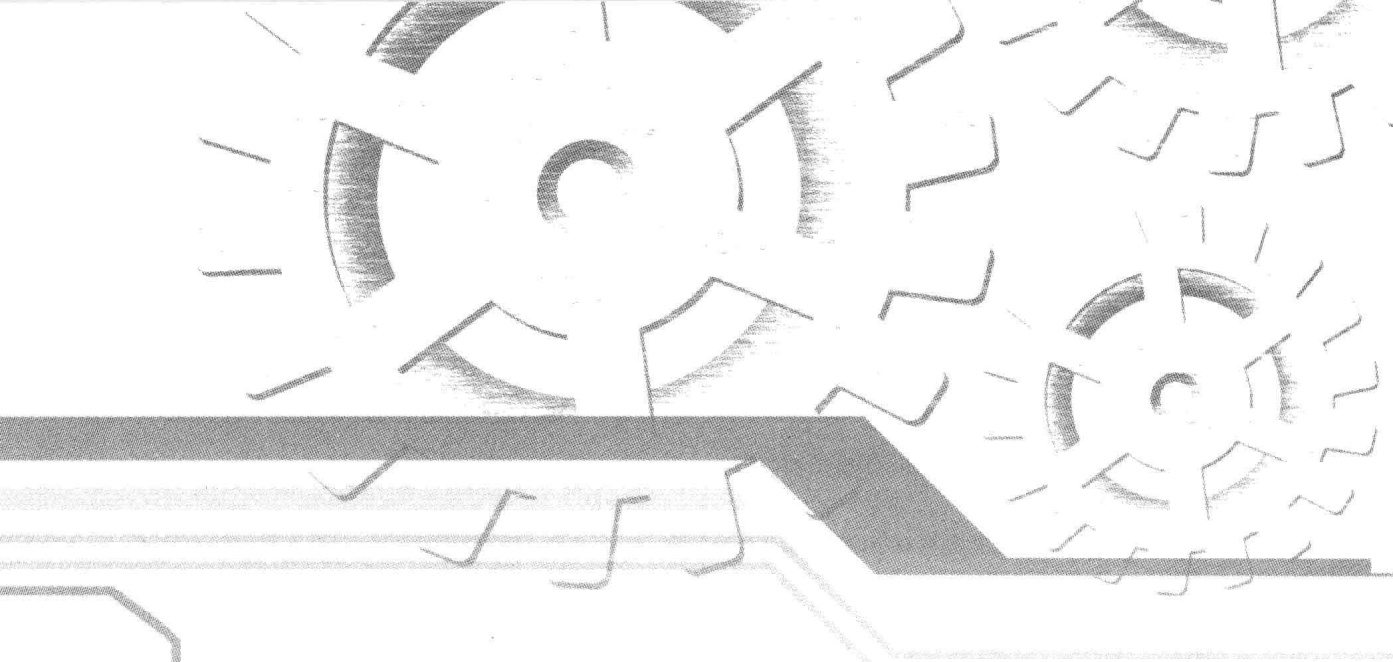
Z
idong Kongzhi Yuanli

主编◎黄勤珍

编委◎汪华章 蒋玉莲 向 强



电子科技大学出版社



自动控制原理

Zidong Kongzhi Yuanli

主编◎黄勤珍

编委◎汪华章 蒋玉莲 向 强



电子科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理 / 黄勤珍主编. —成都: 电子科技大学出版社, 2012. 8

ISBN 978-7-5647-1176-4

I. ①自… II. ①黄… III. ①自动控制理论
IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 136242 号

内 容 简 介

本书深入浅出地介绍了经典控制理论的基本概念、基本原理和基本方法,全面地阐述了线性控制系统的时域分析法、根轨迹法、频域分析法以及校正和设计等方法;详细地讨论了线性离散系统的基础理论、数学模型、稳定性和稳态误差、动态性能分析以及数字校正等问题,介绍了非线性控制系统的相平面和描述函数两种常用的分析方法。

本书可作为高等学校电子信息科学类、电气信息类、自动控制类、仪器仪表类、机械冶金类等相关专业的教材,也可供自动控制类的有关工程技术人员参考。

自动控制原理

主 编 黄勤珍

编 委 汪华章 蒋玉莲 向 强

出 版: 电子科技大学出版社(成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051)

策划编辑: 徐守铭

责任编辑: 杜 倩 徐守铭

主 页: www.uestcp.com.cn

电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn

发 行: 新华书店经销

印 刷: 成都市新都华兴印务有限公司

成品尺寸: 185 mm × 260 mm 印张 15 字数 380 千字

版 次: 2012 年 8 月第一版

印 次: 2012 年 8 月第一次印刷

书 号: ISBN 978-7-5647-1176-4

定 价: 32.00 元

■版权所有 侵权必究■

◆ 本社发行部电话:(028)83202463; 本社邮购电话:(028)83201495。

◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

前 言



随着工业生产和现代科学技术的快速发展,信息与控制学科,尤其是计算机技术、信息处理技术和智能控制技术迅猛发展。在航空航天和国防工业、工农业生产、交通运输等各大领域,自动控制理论得到了不断的完善和发展。自动控制原理作为高等院校工科重要的专业基础课,不仅对工程技术有指导作用,而且对培养学生的辩证思维能力,构建理论联系实际的科学观点有非常重要的意义。目前,新知识、新技术不断涌现,因此在专业培养目标上要求学生要有宽广的知识面、扎实的理论基础、较强的工程实践能力。自动控制原理为电气信息类学科重要的专业基础课程,对学生综合分析问题的能力,在工程实践中找到可靠的理论指导具有重要的作用。

作为一本教材,我们在编写过程中本着内容精练,循序渐进、深入浅出和联系实际等要求进行编写。全书分为八章,第一章简要介绍自动控制系统的基本概念、发展、组成以及分类;第二章介绍控制系统的数学模型、典型元部件的传递函数的求取,结构图的绘制,由结构图等效变换求传递函数,由梅森公式求传递函数等。第三章介绍时域性能指标的定义,重点研究和分析一阶和二阶系统性能指标的求取及二阶系统性能改善的方法,详细介绍稳定判据的应用、对稳态误差的分析与计算,深入讨论减小或消除稳态误差的方法。第四章介绍根轨迹的概念、根轨迹方程、绘制根轨迹的基本法则,包括 0° 根轨迹和 180° 根轨迹。第五章详细阐述频域特性的物理意义、图形表示方法、奈氏判据、对数稳定判据、稳定裕度。第六章分析和介绍串联超前校正、串联滞后校正、串联滞后-超前校正等一些基本的校正方法。第七章全面详细地介绍信号的离散化及信号保持器, z 变换定理,闭环脉冲传递函数的求取,离散系统的稳定性与稳态误差,动态性能分析。第八章重点介绍非线性系统的经典分析方法:相平面法及描述函数法,深入研究并阐述奇点及奇线的分析与确定,自激振荡存在性及自振参数的确定等内容。

本书由西南民族大学黄勤珍教授主编,汪华章编写了第2章、第3章,蒋玉莲编写了第5章、第8章,向强编写了第6章的部分内容、第7章,黄勤珍教授编写了

第1章、第4章、第6章的部分内容。

本书在编写过程中,参考了国内外许多院校老师们编写的教科书和习题书,我们尽可能在参考文献中将其列出,但因时间所限,仍有疏漏,在此谨向原作者表示歉意和诚挚的谢意。本书的编写得到了西南民族大学优秀教材出版项目的资助,同时得到了电子科技大学出版社等部门的大力帮助。在此,谨向为本教材的各项工作提供各方面帮助的朋友们表示衷心感谢,对为本书付出辛勤劳动的老师 and 朋友们表示深深的谢意!

由于时间仓促,编者水平有限,书中难免有错误和不足之处,敬请同行专家不吝指教,并期待专家的批评与建议,同时请各位读者多多包涵。

编 者

2012年7月

目 录

第一章 自动控制的基本概念	(1)
1-1 引言	(1)
1-2 自动控制理论发展概述	(1)
1-3 自动控制和自动控制系统的概念及组成	(2)
1-4 自动控制系统的分类	(4)
1-5 对控制系统性能的基本要求	(8)
习题1	(10)
第二章 控制系统的数学模型	(12)
2-1 控制系统的时域数学模型	(12)
2-2 控制系统的传递函数	(18)
2-3 系统方框图及闭环传递函数	(23)
2-4 信号流图及梅森公式	(32)
习题2	(38)
第三章 线性系统的时域分析法	(41)
3-1 时域分析的主要性能指标	(41)
3-2 一阶系统的时域分析	(44)
3-3 二阶系统的时域分析	(46)
3-4 高阶系统分析	(52)
3-5 反馈控制系统的稳态性分析	(54)
3-6 反馈控制系统的稳态误差	(59)
习题3	(68)
第四章 线性系统的根轨迹法	(72)
4-1 根轨迹的基本概念	(72)
4-2 根轨迹的基本绘制法则	(74)
4-3 参数根轨迹	(84)
4-4 零度根轨迹	(87)
习题4	(91)

第五章 线性系统的频域分析法	(93)
5-1 频率特性	(93)
5-2 典型环节的频率特性	(97)
5-3 系统的开环频率特性	(106)
5-4 频域稳定判据	(113)
5-5 稳定裕度	(121)
5-6 系统的闭环频率特性	(123)
5-7 频域指标与时域指标的关系	(129)
习题5	(133)
第六章 线性控制系统的设计和校正	(136)
6-1 系统设计与校正的基本概念	(136)
6-2 常用校正装置及其特性	(138)
6-3 频率法串联校正	(143)
6-4 反馈校正	(149)
6-5 复合校正	(152)
习题6	(153)
第七章 线性离散控制系统的分析	(157)
7-1 离散系统的基本概念	(157)
7-2 信号的采样与保持	(159)
7-3 z 变换理论	(163)
7-4 离散系统的数学模型	(171)
7-5 离散控制系统的稳定性分析	(181)
7-6 离散控制系统的动态性能分析	(190)
7-7 离散控制系统的校正	(196)
习题7	(202)
第八章 非线性控制系统	(206)
8-1 非线性控制系统概述	(206)
8-2 相平面分析法	(210)
8-3 描述函数法	(220)
习题8	(230)
参考文献	(234)

第一章 自动控制的基本概念

1-1 引言

在科学技术飞速发展的今天,自动控制在现代工业、农业、航空、航海、核能利用、国防和科学技术方面起着十分重要的作用,应用自动控制技术使空间技术、现代武器和自动驾驶等方面得以飞速的发展,使机器设备和管理机构高速高效地运行;生产过程的自动化能提高产品的质量,增加产品的数量,改善劳动条件。例如在工业控制中,对压力、温度、流量、湿度、配料比等的控制都广泛采用了自动控制技术。对于高温、高压、剧毒等对人体健康危害很大的场合,自动控制更是必不可少的。在军事和空间技术方面,宇宙飞船准确地飞行和返回地面、人造卫星按预定轨道飞行、导弹准确地击中目标等,自动控制更具有十分重要的意义。

自动控制原理是自动控制学科的基础理论,是一门理论性较强的工程科学。本课程的主要任务是研究与讨论控制系统的一般规律,从而设计出合理的自动控制系统,满足工农业生产和各种工程上的需要。

自动控制理论的发展与应用,不仅改善了劳动条件,把人类从繁重的劳动中解放出来,而且由于自动控制系统能以某种最佳方式运行,因此可以提高劳动生产率,提高产品质量,节约能源,降低成本。自动控制理论的应用是实现工业、农业、国防等方面科学技术现代化的有利工具。学习并掌握好自动控制技术,对于加快我国现代化的建设有着十分重要的意义。

1-2 自动控制理论发展概述

自动控制理论是在人类征服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。

实践中出现的问题,促使科学家们从理论上进行探索研究。英国数学家劳斯和德国数学家赫尔维茨分别在 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,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运用复变函数理论建立了以频率特性为基础的稳定性判据,奠定了频率响应法的基础。随后,伯德和尼柯尔斯在 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。

1948 年,美国科学家伊万斯创立了根轨迹分析方法,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、根轨迹分析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,为指导当时的控制工程实践发挥了极大的作用。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 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随波为核心的控制系统分析设计的新原理和方法基本确定,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、设计乃至控制的手段,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,使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,科学家们近几十年中不断提出一些新的控制方法和理论,例如自适应控制、模糊控制、预测控制、容错控制,非线性控制和大系统、复杂系统控制等,大大地扩展了控制理论的研究范围。

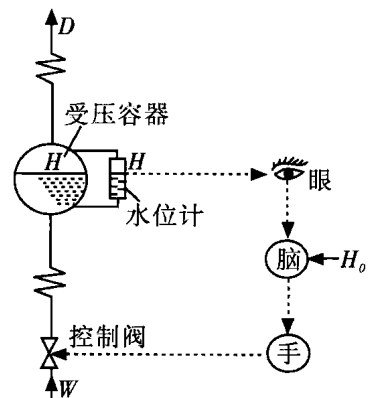
1-3 自动控制和自动控制系统的概念及组成

自动控制,就是在没有人参与的情况下,通过控制器或者控制装置来控制机器或者设备等物理装置,使得机器设备的受控物理量按照希望的规律变化,达到控制的目的。自动控制系统是对被控对象的工作状态进行自动控制的系统。

自动控制和人工控制的基本原理是相同的,它们都是建立在“测量偏差,修正偏差”的基础上,并且为了测量偏差,必须把系统的实际输出反馈到输入端。自动控制和人工控制的区别在于自动控制用控制器代替人完成控制。

下面先分析一下人在完成某项工作任务中所经历的主要过程和所需要具备的基本职能,以便找出控制装置必须具备的职能部件。

如图 1-1 所示,人工对水位的控制过程,运行人员首先用眼睛观察水位计的水位指示值 H ,并通过大脑将水位指示值 H 与给定值 H_0 进行比较。如有偏差,就手动操作控制阀门,改变流入量 W ,直到水位重新达到给定值 H_0 为止。若某种原因使流出量 D 增加时,容器的水位将下降。操作人员手动开大控制阀门,使流入量 W 相应增加,就可相应使水位 H 上升,回到原来的位置。从这个例子可以看出:所谓人工控制,就是指操作人员根据对被控参数变化原因的分析,人工操作某一调节机构如某一阀门(或挡板)的开度,改变输入量(或输出量),使被控参数恢复到给定值的过程。



1-1 受压容器水位人工控制示意图

随着生产规模的扩大,生产过程越来越复杂,人工控制越来越不能满足生产需要。因此,现代化大生产中,为了保持被控量恒定或按预定规律变化,要采用一整套自动控制装置来代替人工操作,这种通过自动控制装置进行的操作称为自动控制。受压容器水位自动控制示意图如图 1-2 所示,图中差压变送器代替人眼,起着观察水位和转换的作用,并把水位信号 i_0 传送给控制器;控制器代替人的大脑进行水位信号与给定值 i_{00} 的

比较,并用运算和放大后的电信号 i_1 ,控制执行器,执行器代替人的手,根据控制器的指令操作控制机构,改变阀门的开度 μ 以改变流入量 W ,维持水位为给定值。由此可见,自动控制是建立在人工控制基础上的,它既是模拟人工控制,又是人工控制的发展。

在上述水位自动控制系统中,受压容器是被控制对象,所要维持的正常水位 H_0 称为给定量,需要进行控制的实际水位 H 称为被控量。流出量(蒸汽流量) D 或控制阀前压力变化,都会使控制对象的平衡状态受到破坏,这种破坏平衡的作用称为扰动

作用。当实际水位 H 等于给定水位 H_0 时,给水流量 W 等于蒸汽流量 D ,这时系统处于平衡状态。扰动作用下,被控量水位 H 发生变化偏离给定值 H_0 时,改变控制阀的开度,可使水位 H 恢复到给定位 H_0 上,这种作用称为控制作用,而控制阀门则称为控制机构。

人在接受某项工作任务时,为了有效地进行工作,总是要经常了解实际的工作情况,观察实际的结果,同时还要不断地了解影响正常工作的各种干扰因素,然后将观察的结果与预期的目标进行比较、分析,根据比较的结果作出新的决策,下达到执行部门。执行的结果如何,需要再了解,再比较,再分析,循环往复地进行,直到实际工作的结果与预期的目标一致,此时任务才算完成。这一工作过程如图 1-3 所示,图中各职能机构和工作对象均以方框表示,箭头方向指示了各部分的联系。

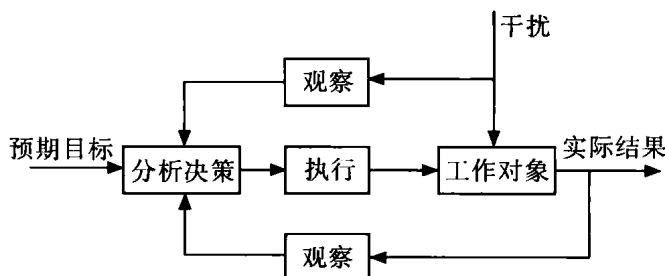


图 1-3 人工智能图

如果用技术装置代替图 1-3 中的各部分,并用工程语言来描述它们之间的职能作用,则可以将工作对象称为被控对象,工作的实际结果称为被控量,预期的目标就是给定值或参考输入。观察的任务可由各种测量元件或各种传感器来代替,比较分析的任务可由计算机或控制器来完成,执行部门可由各类执行机构来代替。自动控制的原理方框图如图 1-4 所示。

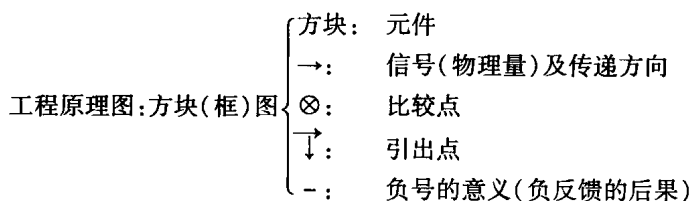


图 1-4 自动控制的工程原理图

任何一个自动控制系统都是由被控对象和控制器有机构成的。自动控制系统根据被控对象和具体用途不同,可以有各种不同的结构形式。典型反馈控制系统方框图如图 1-5 所示。

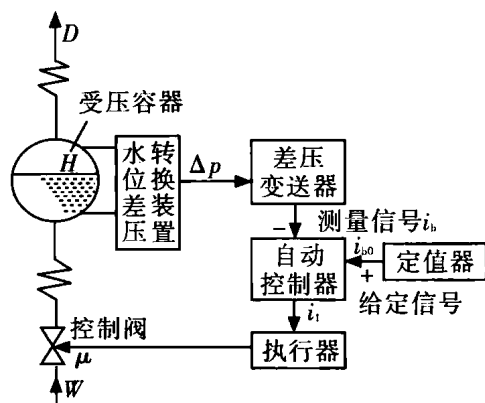


图 1-2 受压容器水位自动控制示意图

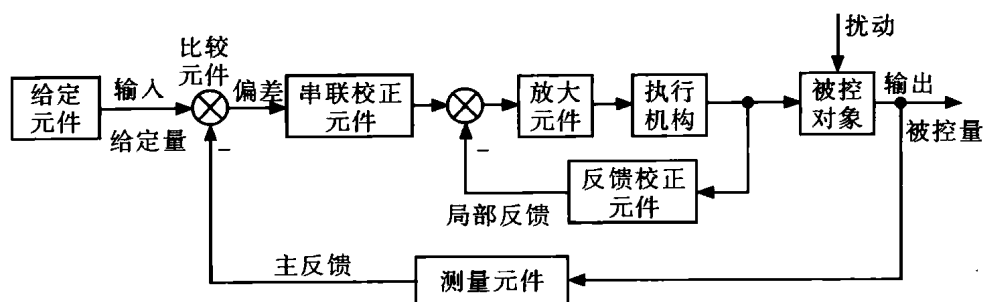


图 1-5 典型反馈控制系统方框图

被控对象:一般是指生产过程中需要进行控制的工作机械物理量及装置或生产过程。描述被控对象工作状态的物理量及需要进行控制的物理量就是被控量。

给定元件:主要用于产生给定信号或控制输入信号。

测量元件:用于检测被控量或输出量,产生反馈信号。如果测出的物理量属于非电量,一般要转换成电量以便处理。

比较元件:用来比较输入信号和反馈信号之间的偏差。可以是一个差动电路,也可以是一个物理元件(如电桥电路、差动放大器、自整角机等)。

放大元件:用来放大偏差信号的幅值和功率,使之能够推动执行机构调节被控对象。如功率放大器、电液伺服阀等。

执行机构:用于直接对被控对象进行操作,调节被控量。例如阀门、伺服电动机等。

校正元件:用来改善或提高系统的性能,常用串联或反馈的方式连接在系统中。例如 RC 网络、测速发电机等。

自动控制系统的方框图一般是一个闭合回路。图 1-2 中水位 H 的信号,经过测量变送器、调节器和执行器等环节,反过来影响水位本身,系统中的信号是在闭合回路中传递的,所以这种系统称为闭环系统或反馈系统。传递到调节器的信号是给定水位信号 i_{b0} 与实际水位信号 i_b 的偏差值。当水位升高时,偏差信号 $e = i_{b0} - i_b$ 是一个负值,其意义是要关小给水控制阀门,使水位向反方向变化。因此,自动控制系统是一个“负反馈系统”,这种负反馈的实质就是“基于偏差,消除偏差”。如果不存在被控量与给定值的偏差,就不会产生控制作用,而控制作用的最终目的是要消除偏差,使被控量重新恢复到给定值。

1-4 自动控制系统的分类

自动控制系统的形式是多种多样的,对于某一个系统,使用什么样的控制手段,要视具体的用途和目的而定。因此分类方法很多,下面介绍主要的分类方法。

一、按控制方式分类

自动控制系统按照控制方式可分为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统三类。

(一) 开环控制系统

开环控制系统是指控制器与控制对象之间只有正向作用,而没有反向联系的系统。它的工作原理是直接根据扰动进行控制,也称为前馈控制。若按扰动进行控制的控制量合适的话,就可以及时抵消扰动的影响而使被控量保持不变。但由于没有被控量的反馈,控制结束后,很难保证被控量等于给定值。因此在生产过程中,这种系统是不能单独使用的。

按给定值操纵的开环控制系统如图 1-6 所示。

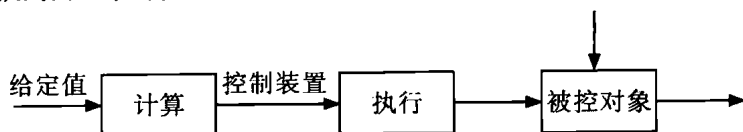


图 1-6 开环控制系统

优点:控制简单。

缺点:控制精度难以保证,系统自身没有纠偏能力。

例如,图 1-7 所示的炉温控制系统亦属于这类控制,控制的任务是保持炉温恒定。

被控对象:炉子。

被控量:炉温。

工作原理:受时间继电器控制的开关 S ,按预先规定的时间接通或断开电源 E ,对炉温进行控制,从而使炉子的温度保持在希望的炉温范围内。由于炉门开启的次数、环境温度的变化,都会使炉子的被控量偏离给定值,这些使被控量偏离给定值的因素都是干扰或扰动,系统受到干扰的影响后,受时间继电器控制的开关 S 不会因此而延长或缩短接通的时间。所以这种按给定值操纵的开环控制系统,其控制精度是不高的。

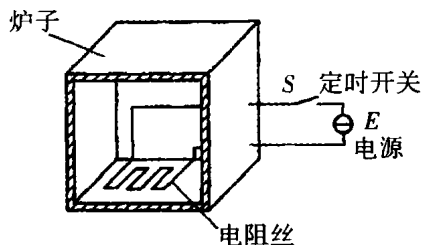


图 1-7 炉温控制系统

炉温控制系统的原理方框图如图 1-8 所示。

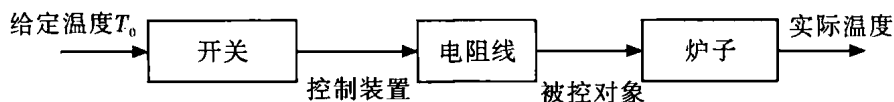


图 1-8 炉温控制系统的原理方框图

(二) 闭环控制系统

闭环控制系统是指控制器与控制对象之间既有正向作用,又有反向联系的系统。

开环控制系统精度不高和适应性不强的主要原因是缺少从系统输出到输入的反馈回路。要提高控制精度,必须把输出量的信息反馈到输入端,通过比较插入值与输出值,产生偏差信号,该偏差信号以一定的控制规律产生控制作用,逐步减小以至消除这一偏差,从而实现所要求的控制性能。

图 1-9 中,测速发电机由电动机同轴带动,它将电动机的实际转速 ω (系统输出量)测量出来,并转换成电压 U_f ,再反馈到系统的输入端,与给定值电压 U_r (系统输入量)进行比较,从而得出电压比 $U_e = U_r - U_f$ 。由于该电压能间接地反映出误差的性质(即大小和正负方向),通常称之为偏差信号,简称偏差。偏差 U_e 经放大器放大后, U_a 用以控制电动机转速 ω_0 。

直流电动机转速闭环控制系统如图 1-10 所示。通常,把从系统输入量到输出量之间的通道称为前向通道;从输出量到反馈信号之间的通道称为反馈通道。方框图中用符号 $\otimes$ 表示比较环节,其输出量等于各个输入量的代数和。因此,各个输入量均须用正负号表明其极性。图中清楚地表明:由于采用了反馈回路,使信号的传输路径形成闭合回路,使输出量反过来直接影响控制作用。这种通过反馈回路使系统构成闭环,并按偏差产生控制作用,用以减小或消除偏差的控制系统,称为闭环控制系统,或称反馈控制系统。

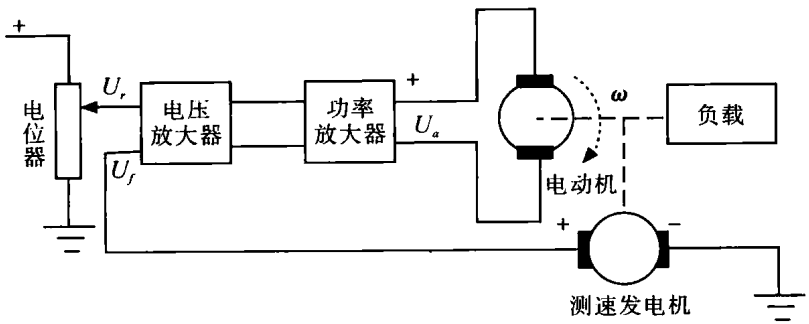


图 1-9 直流电机转速闭环控制系统

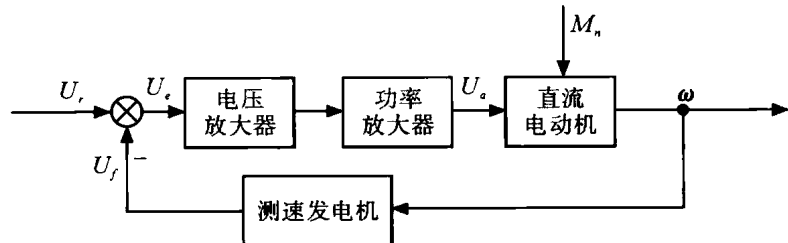


图 1-10 电动机转速闭环控制系统方框图

必须指出,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。若采用正反馈,将使偏差越来越大,导致系统发散而无法工作。

闭环系统工作的本质机理是:将系统的输出信号引回到输入端,与输入信号相比较,利用所得的偏差信号对系统进行调节,达到减小偏差或消除偏差的目的。这就是负反馈控制原理,它是构成闭环控制系统的核心。

闭环控制是最常用的控制方式,我们所说的控制系统一般都是指闭环控制系统。为了完成自动控制的任务,按偏差调节的闭环控制,一定是按负反馈原理组成的,所以负反馈闭环回路是按偏差调节的自动控制系统在结构联系和信号传递上的重要标志。这种控制方式的控制精度较高,因为无论是干扰的作用,还是系统结构参数的变化,只要被控量偏离给定值,系统就会自行纠偏。闭环控制是自动控制系统中最基本的控制方式,目前在工程中获得了广泛的应用。

(三)复合控制系统

在反馈控制系统的基础上加入对主要扰动实施前馈控制的补偿装置,就构成了复合控制系统,也称为前馈-反馈控制系统,如图 1-11 所示。

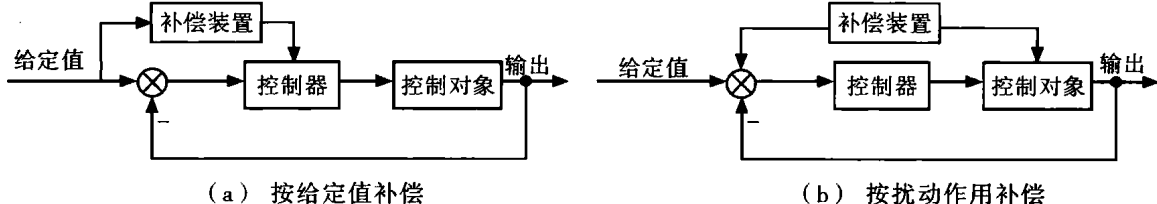


图 1-11 复合控制系统结构示意图

复合控制与反馈控制相比,有更高的控制速度和更好的控制质量,因此得到了比较广泛的应用。图 1-11(a)表示的是按给定值进行前馈补偿的系统,当输入指令发生变化时,系统的输出比纯反馈控制系统更能及时地作出响应;图 1-11(b)表示的是按主要扰动进行前馈补偿的系统,当主要扰动发生时,补偿装置将扰动信号输入控制器,控制器输出一个力求抵消扰动的信号。

影响的控制信号作用到控制对象,以减小扰动对输出的影响。

在热工自动控制系统中,这两种前馈控制都得到了广泛应用。

二、按控制系统输入信号特征分类

按控制系统输入信号变化规律分类,通常可以分为三类。

(一)恒值控制系统

给定值不变。由于扰动的存在,将使被控量偏离给定值。控制系统能自动地根据偏差产生控制作用,使被控量恢复到给定值。在工业生产过程中,被控量为温度、压力、流量、液位、速度、张力参数的控制系统都属于恒值控制系统

(二)随动控制系统

随动控制系统又称自动跟踪系统或伺服系统,这类系统的给定值是预先未知的,且随时间任意变化的函数。控制系统能够使被控量以尽可能小的误差跟随给定值。随动系统也能克服各种扰动的影响,但一般来说,扰动的影响是次要的。雷达天线的自动跟踪系统、船舶驾驶舵角位置跟踪系统、函数记录仪就是典型的随动控制系统。

(三)程序控制系统

程序控制系统的给定值不是常量,但事先是可以确定的、随时间有规律变化的量。这类系统要求被控制量能迅速、准确地跟随给定值变化。例如电梯控制系统、皮带输送机控制系统等。

三、按控制系统元件的特性分类

自动控制系统按控制系统元件特性可以分为线性控制系统和非线性控制系统两类。

(一)线性控制系统

当控制系统的各个元件的输入、输出特性是线性特性,控制系统的动态过程就可以用线性微分方程来描述,则这种系统被称为线性控制系统。如果描述系统线性微分方程的系数是不随时间变化的参数,这种系统被称为线性定常系统。若系数随时间变化则为线性时变系统。

线性系统的特点是可以运用叠加原理,当系统存在多个输入信号时,系统的输出信号等于各个输入信号分别作用于系统的输出信号之和。

(二)非线性控制系统

当控制系统有一个或一个以上的非线性元件时,控制系统的动态过程就用非线性微分方程来描述,由非线性方程描述的控制系统被称为非线性控制系统。控制系统常见的非线性元件有饱和非线性、死区非线性、迟滞非线性和继电器非线性等。

非线性控制系统的特点是不能运用叠加原理。一般来讲,实际的控制系统都存在不同程度的非线性,但根据实际情况,在一定范围内,往往对非线性特性进行线性化处理,这样便可以运用线性控制理论进行分析和研究。

四、按信号传递的连续性分类

按信号传递的连续性分类,系统可以分为连续系统和离散系统。

(一)连续系统

连续系统是指系统内各处的信号都是以连续的模拟量传递的系统,其输入与输出之间的关系可以用微分方程来描述。连续系统又可以分为线性连续系统和非线性连续系统、定常连续系统和时变连续系统。

(二) 离散系统

离散系统是指系统中有一处或多处的信号是以脉冲序列或数码形式传递的系统。其脉冲序列可由脉冲信号发生器或振荡器产生,也可用采样开关将连续信号变成脉冲序列,这类控制系统又称为采样控制系统或脉冲控制系统。而对于采用数字控制器或数字计算机控制,其离散信号以数码形式传递的系统,则称为采样数字控制系统或计算机控制系统。离散系统可分为线性离散系统 and 非线性离散系统、定常离散系统和时变离散系统。离散系统可用差分方程来描述输入与输出之间的关系。

五、按系统的输入与输出信号的数量分类

按系统的输入与输出信号的数量分类,系统可以分为单变量系统和多变量系统。

(一) 单变量系统

单输入-单输出系统通常称为单变量系统,这种系统只有一个输入(不包括扰动输入)和一个输出。多输入-多输出系统通常称为多变量系统,有多个输入和多个输出。单变量系统可以视为多变量系统的特例。

(二) 多变量系统

按控制系统闭合回路数不同分类,系统可以分为单回路系统和多回路系统。单回路控制系统中,只有一个被控量反馈到调节器的输入端,只形成一个闭合回路,因此系统结构比较简单。单回路控制系统也称单级控制系统。为了改善系统控制性能,可引入局部反馈,因此闭合回路数不止一个,这就形成了多回路控制系统。具有两个闭合回路的控制系统,由于两个控制器是串接在一起的,因此也称为串级控制系统。

1-5 对控制系统性能的基本要求

控制系统受到扰动后,被控量将偏离稳态值而产生偏差,系统的控制作用又使其趋近于稳态值,这一过程称为控制系统的控制过程,或称过渡过程。对给定值控制系统,在受到扰动后,被控量的变化总是先偏离给定值,经历一个变化过程后,又趋近于给定值。此后只要系统不受到新的扰动,系统中的参数就不再发生变化。因此,控制系统存在两种状态,即系统的稳态(静态)和动态。被控量不随时间变化而变化的平衡状态称为系统的稳态(静态),稳态出现在控制过程结束之后。处于稳态的系统,一旦受到扰动,系统内部就会发生物质或能量的不平衡,被控量将偏离给定值而随时间变化而变化,这种被控量随时间变化的不平衡状态称为系统的动态。干扰作用使系统由稳态进入动态,控制作用使系统克服扰动的影响,建立新的平衡,恢复到稳态。

图 1-12 为受压容器水位自动控制系统,当水位 H 等于给定值 H_0 时,控制系统处于稳态。当蒸汽流量 Q_2 突然减小时,水位 H 将上升,这可通过控制作用使给水流量减小,直到控制系统又重新达到稳态。系统由一个稳态过渡到另一个稳态的过程,其控制过程如图 1-13 所示。

显然,在不同形式和幅度的扰动作用下,自动控制系统的控制过程是不一样的。实际生产过程中可能遇到的扰动形式是多种多样的。为了分析控制系统工作的品质,判断控制系统能否满足生产过程的需要,通常选择实际控制过程中遇到的最典型、最经常出现的扰动形式作为标准输入信号。如果控制系统在标准输入信号扰动下能顺利完成控制任务,则在其他形式信

号扰动下必然能满足实际工作的要求。在热力过程自动控制系统中,最常用的干扰信号是阶跃信号。

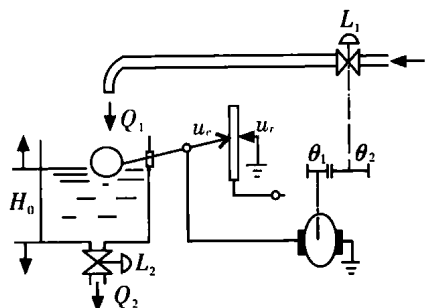


图 1-12 受压容器水位自动控制系统原理图

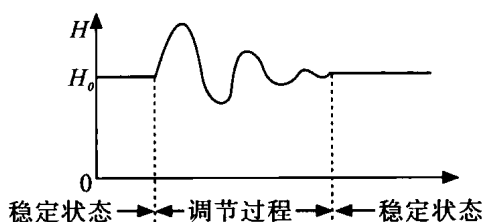


图 1-13 控制过程示意图

在分析控制系统品质时,系统在扰动作用下被控量能否通过控制作用回复到稳态值是最重要的性能。选定阶跃信号为输入信号后,需要研究的对象就是系统的输出信号了。控制系统在阶跃信号作用下,如果将其被控量(即系统的输出信号)随时间变化而变化的规律用曲线来描述,则该曲线称为控制系统的过渡过程曲线,或称为系统的阶跃响应曲线。人们可以通过对过渡过程曲线的研究来评价控制系统的工作品质。

自动控制系统在阶跃信号作用下,其过渡过程可能具有如图 1-14 所示的几种形式。由图 1-14 (a)、(b)所示的过渡过程可见,被控量在经历一个动态过程之后能够重新达到稳态值,具有这种过渡过程的系统称为稳定的控制系统,其中,图 1-14(a)所示的过渡过程没有发生振荡,称为非周期过渡过程;图 1-14(b)所示的被控量在稳态值上下来回摆动几次,最后趋于稳态值,这是衰减振荡的过渡过程。图 1-14(c)、(d)所示的过渡过程曲线表明被控量不能趋于稳态值,这类控制系统的过渡过程是不稳定的,其中,图 1-14(c)所示的过渡过程是一个不衰减的等幅振荡过程,这种过程界于稳定与不稳定的状态间,工业属于不稳定的系统;图 1-14(d)所示的过程为发散的振荡过程。

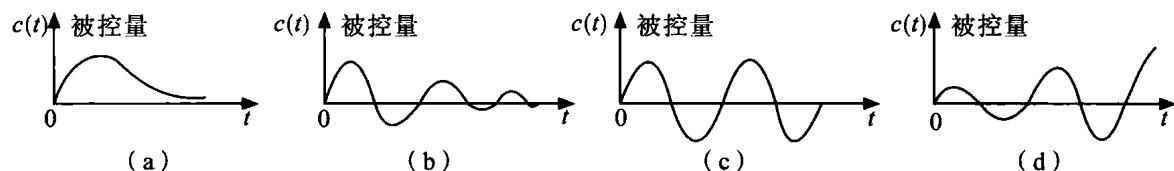


图 1-14 几种典型过渡过程曲线

从生产过程的要求看,不仅希望控制过程是稳定的,而且希望自动控制系统能随时保持被控量与给定值相等,不受任何扰动的影响。但实际上扰动经常发生,被控量总会发生变化而产生偏差。从生产的要求和控制系统的实际出发,一般从稳定性、准确性和快速性三个方面来衡量控制系统的控制品质。

一、稳定性

稳定是指控制系统的稳定性与平稳性。

控制过程的稳定性是对控制系统的基本要求,满足稳定性要求是控制系统能被采用的必要条件。只有稳定的控制系统才能完成自动控制的任务。在实际生产过程中,不仅要求系统是稳定的,而且要求系统具有一定的稳定性裕度,以保证系统在控制对象参数或控制设备参数发生变化时还能稳定地工作。控制系统的稳定性裕度一般用衰减率来衡量。衰减率是第一、第二个波峰值之差与第一个波峰值之比,即

$$\phi = \frac{c_{m1} - c_{m2}}{c_{m1}} = 1 - \frac{c_{m2}}{c_{m1}}$$

式中, ϕ 为衰减率; c_{m1} , c_{m2} 分别为被控量从新的稳态值 c_{∞} 算起的第一、第二个波峰值。

系统在受到外作用后, 若控制装置能操纵被控对象, 使其被控量 $c(t)$ 随着时间的增长而最终与希望值一致, 则称系统是稳定的, 如图 1-15 曲线①所示。如果被控量 $c(t)$ 随着时间的增长, 越来越偏离给定位, 则称系统是不稳定的, 如图 1-15 曲线②所示。

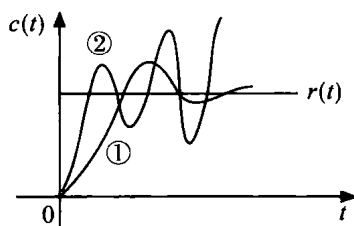


图 1-15 稳定与不稳定的响应特性曲线

稳定的系统才能完成自动控制的任务, 因此系统稳定是保证系统正常工作的必要条件。

二、准确性

准确是指系统在动态过程结束后, 其被控量 (或反馈量) 对给定值的偏差而言, 这一偏差称为稳态误差, 它是衡量系统稳态精度的指标, 反映了稳态过程后期的性能。

稳态偏差也称为静态偏差, 是指控制过程结束后被控量与给定值之间的残余偏差, 系统的静态偏差一般与负荷有关。如果在负荷变动后系统的静态偏差为零, 则这种控制系统称为无差系统; 如果静态偏差随负荷变化而变化, 则称为有差系统。不同的生产过程对静态偏差有不同的要求, 一般要求静态偏差越小越好。

三、快速性

快速性是指控制过程持续时间的长短的特性, 一般用控制过程时间来表示。控制过程时间就是从扰动引起被控量发生变化开始到被控量重新恢复到稳态值为止所需要的时间。在实际生产过程中, 要使被控量与给定值绝对相等是不可能的, 一般用过渡过程曲线衰减到与稳态值之差 Δ 不超过稳态值的 $\pm(2 \sim 5)\%$ 所需要的时间作为过渡过程时间。

过程时间越短, 说明系统快速性越好, 过程时间持续越长, 说明系统响应迟钝, 难以实现快速变化的指令信号, 如图 1-16 响应曲线①所示。

稳和快反映了系统在控制过程中的性能。系统在跟踪过程中, 被控量偏离给定值越小, 偏离的时间越短, 说明系统的动态性能越好, 如图 1-16 中的曲线②所示。

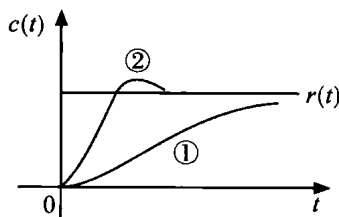


图 1-16 调节时间不同的响应特性曲线

习 题 1

1. 日常生活中有许多开环和闭环控制系统。试举几个具体例子, 并说明它们的工作原理。
2. 角位置随动系统原理如图 1-17 所示, 系统的任务是控制工作机械角位置 θ_c , 随时跟踪手柄转角 θ , 试分析其工作原理, 并画出系统的方框图。