

高等学校“十一五”规划教材

 机械设计制造及其自动化系列

CONTROL THEORY AND APPLICATIONS

控制理论基础与应用

主编 吴振顺 张健成

哈尔滨工业大学出版社

高等学校“十一五”规划教材

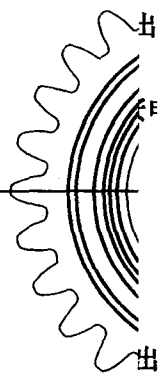


机械设计制造及其自动化系列

**CONTROL THEORY
AND APPLICATIONS**

控制理论基础与应用

主编 吴振顺 张健成
参编 李国康 赵 慧
主审 卢泽生



哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

本书详细介绍了控制系统的基本概念、数学模型、时域特性分析、频率特性分析、稳定性分析、误差分析、系统的校正、离散控制系统和非线性控制系统的分析等。

本书取材力求通俗易懂、刻意求新、学以致用,从基本原理、基本方法出发,着眼于使读者具有提出问题、分析问题、解决问题的能力,而不去过多地追求严格的数学推证。在编写的过程中,注意兼顾科学知识的传授与创新能力的培养,引进国内外先进技术和最新成果,充分利用 MATLAB 及其 SIMULINK 仿真平台分析和设计系统。

本书可作为高等院校机械类及其他相关专业学生教材,也可作为从事控制技术研究人员自学与参考书籍。

Abstract

This book discusses basic concepts of control system, including mathematical models, time domain analysis, frequency domain analysis, system stability analysis, error signal analysis and the compensation network in control systems.

This book emphasizes on presenting, analysing and solving problems seriously, but not the mathematical deduction. For the development of science and technology it introduces the latest development and makes full use of MATLAB and SIMULINK as a powerful tool both in system simulation and system design.

This book can be a textbook or a reference book for college students or some researchers in mechanics or in relatively field.

图书在版编目(CIP)数据

控制理论基础与应用/吴振顺等主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2007. 1

ISBN 978-7-5603-2447-0

I. 控… II. 吴… III. 控制论 IV. 0231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 155086 号

责任编辑 田 秋

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 哈尔滨工业大学印刷厂

开 本 787mm × 1092mm 1/16 印张 21 字数 511 千字

版 次 2007 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-2447-0

印 数 1 ~ 4 000 册

定 价 29.80 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

高等学校“十一五”规划教材

机械设计制造及其自动化系列

编写委员会名单

(按姓氏笔画排序)

主 任 姚英学

副主任 尤 波 巩亚东 高殿荣 薛 开 戴文跃

编 委 王守城 巩云鹏 宋宝玉 张 慧 张庆春

郑 午 赵丽杰 郭艳玲 谢伟东 韩晓娟

编审委员会名单

(按姓氏笔画排序)

主 任 蔡鹤皋

副主任 邓宗全 宋玉泉 孟庆鑫 闻邦椿

编 委 孔祥东 卢泽生 李庆芬 李庆领 李志仁

李洪仁 李剑峰 李振佳 赵 继 董 申

谢里阳

总 序

自 1999 年教育部对普通高校本科专业设置目录调整以来,各高校都对机械设计制造及其自动化专业进行了较大规模的调整和整合,制定了新的培养方案和课程体系。目前,专业合并后的培养方案、教学计划和教材已经执行和使用了几个循环,收到了一定的效果,但也暴露出一些问题。由于合并的专业多,而合并前的各专业又有各自的优势和特色,在课程体系、教学内容安排上存在比较明显的“拼盘”现象;在教学计划、办学特色和课程体系等方面存在一些不太完善的地方;在具体课程的教学大纲和课程内容设置上,还存在比较多的问题,如课程内容衔接不当、部分核心知识点遗漏、不少教学内容或知识点多次重复、知识点的设计难易程度还存在不当之处、学时分配不尽合理、实验安排还有不适当的地方等。这些问题都集中反映在教材上,专业调整后的教材建设尚缺乏全面系统的规划和设计。

针对上述问题,哈尔滨工业大学机电工程学院从“机械设计制造及其自动化”专业学生应具备的基本知识结构、素质和能力等方面入手,在校内反复研讨该专业的培养方案、教学计划、培养大纲、各系列课程应包含的主要知识点和系列教材建设等问题,并在此基础上,组织召开了由哈尔滨工业大学、吉林大学、东北大学等 9 所学校参加的机械设计制造及其自动化专业系列教材建设工作会议,联合建设专业教材,这是建设高水平专业教材的良好举措。因为通过共同研讨和合作,可以取长补短、发挥各自的优势和特色,促进教学水平的提高。

会议通过研讨该专业的办学定位、培养要求、教学内容的体系设置、关键知识点、知识内容的衔接等问题,进一步明确了设计、制造、自动化三大主线课程教学内容的设置,通过合并一些课程,可避免主要知识点的重复和遗漏,有利于加强课程设置上的系统性、明确自动化在本专业中的地位、深化自动化系列课程内涵,有利于完善学生的知识结构、加强学生的能力培养,为该系列教材的编写奠定了良好的基础。

本着“总结已有、通向未来、打造品牌、力争走向世界”的工作思路,在汇聚多所学校优势和特色、认真总结经验、仔细研讨的基础上形成了这套教材。参加编写的主编、副主编都是这几所学校在本领域的知名教授,他们除了承担本科生教学外,还承担研究生教学和大量的科研工作,有着丰富的教学和科研经历,同时有编写教材的经验;参编人员也都是各学校近年来在教学第一线工作的骨干教师。这是一支高水平的教材编写队伍。

这套教材有机整合了该专业教学内容和知识点的安排,并应用近年来该专业领域的科研成果来改造和更新教学内容、提高教材和教学水平,具有系列化、模块化、现代化的特点,反映了机械工程领域国内外的新发展和新成果,内容新颖、信息量大、系统性强。我深信:这套教材的出版,对于推动机械工程领域的教学改革、提高人才培养质量必将起到重要推动作用。

蔡鹤皋

哈尔滨工业大学教授

中国工程院院士

丁酉年 8 月

前 言

本书是在编者总结几十年的教学经验和科研工作的基础上,吸收同类教材成功的编写经验和先进的编写思路,注意引进最新教学和科研成果,精心编写而成。

本书共分 9 章。第 1 章控制系统的基本概念,简明扼要地介绍了控制理论的发展、控制系统的结构、工作原理、基本概念及其开闭环控制系统的特点等。第 2 章控制系统的数学模型,详细地介绍了包括控制系统的微分方程、控制系统的传递函数、控制系统的方框图、控制系统的信号流图、非线性系统模型的线性化以及 MATLAB 软件在控制系统建模中的应用等。第 3 章控制系统的时域特性分析,主要介绍控制系统的典型输入信号及其特点、控制系统瞬态性能指标、低阶系统和高阶系统的时域特性分析等。第 4 章控制系统频率特性分析,主要介绍控制系统频率特性的基本概念、典型环节的频率特性、开闭环系统的频率特性以及频率特性的辨识实验方法等。第 5 章控制系统的稳定性分析,主要介绍控制系统稳定性基本概念、系统稳定的定义、相对稳定、稳态误差、控制系统稳定的充要条件,重点介绍劳斯、奈魁斯特稳定判据等。第 6 章控制系统稳态误差分析,主要介绍控制系统稳态误差的基本概念、两种稳态误差的计算方法。第 7 章线性控制系统的校正,主要讲述串联校正、反馈校正和复合校正的原理、特点及规律,结合 MATLAB 软件及工程实例介绍系统校正的实现方法等。第 8 章离散控制系统,主要介绍 Z 变换与 Z 反变换、 Z 变换的基本定理、离散系统的脉冲传递函数、离散系统时域特性分析、离散系统频率特性分析及稳定性分析等。第 9 章非线性控制系统的分析,主要介绍非线性控制系统的基本概念,其中包括典型非线性特性、非线性控制系统的特点、研究问题及其研究方法,重点介绍了描述函数法和相平面分析法等。

在编写的过程中,始终贯彻取材精练、通俗易懂、刻意求新、学以致用方针,兼顾科学知识的传授和创新能力的培养,注意引进国内外先进技术和最新科研成果,着眼于使读者尽快掌握控制这一门科学技术,从基本原理、基本方法出发,培养读者提出问题、分析问题和解决问题的能力。

本书由吴振顺、张健成主编,由哈尔滨工业大学卢泽生教授主审并提出许多宝贵意见和建议,在此表示深切感谢。参加本书编写的有东北大学张健成(第 1 章、第 3 章和附录 A)、沈阳理工大学李国康(第 2 章、第 6 章、第 7 章)、武汉科技大学赵慧(第 4 章、第 8 章)、哈尔滨工业大学吴振顺(第 5 章、第 9 章和附录 B),全书由吴振顺修改整理定稿。

由于编者水平所限,缺点、疏漏在所难免,殷切期望广大读者批评指正。

作者

2006 年 8 月

目 录

// 第 1 章 控制系统的基本概述

1.1 控制理论发展概况	(1)
1.2 控制系统的工作原理及其组成	(2)
1.3 控制系统的基本类型	(5)
1.4 对控制系统的基本要求	(7)
1.5 几种常见的控制系统	(7)
本章小结	(10)
练习题	(10)

// 第 2 章 控制系统的建模

2.1 控制系统的微分方程	(13)
2.2 控制系统的传递函数	(19)
2.3 控制系统方块图及信号流图	(25)
2.4 非线性模型的线性化	(31)
2.5 典型控制系统传递函数的推导	(34)
2.6 几种实际系统的建模	(36)
2.7 MATLAB 在控制工程数学建模上的应用	(39)
本章小结	(43)
练习题	(43)

// 第 3 章 控制系统时域特性分析

3.1 典型输入信号和系统瞬态性能指标	(46)
3.2 低阶系统时域特性分析	(49)
3.3 高阶系统时域特性分析	(59)
3.4 工程实例的时域特性分析	(63)
本章小结	(67)
练习题	(67)

// 第 4 章 控制系统频率特性分析

4.1 频率特性的基本概念	(70)
4.2 频率特性的表示方法	(73)
4.3 典型环节的频率特性	(75)

4.4 开环系统的频率特性	(85)
4.5 闭环系统的频率特性	(91)
4.6 频域与时域性能指标间的关系	(93)
4.7 频率特性辨识的实验方法	(95)
4.8 实际工程系统频率特性分析	(96)
本章小结	(98)
练习题	(99)

// 第5章 控制系统的稳定性分析

5.1 系统稳定的基本概念	(100)
5.2 劳斯(Routh)稳定判据	(103)
5.3 奈魁斯特(Nyquist)稳定判据	(111)
5.4 控制系统的相对稳定性分析	(122)
5.5 多回路控制系统的稳定性分析	(125)
5.6 系统稳定性分析应用举例	(126)
本章小结	(135)
练习题	(135)

// 第6章 控制系统稳态误差分析

6.1 稳态误差的基本概念	(139)
6.2 稳态误差的计算	(140)
6.3 多个信号作用时的误差叠加	(148)
6.4 减小稳态误差的方法	(150)
6.5 实际工程系统稳态误差分析	(150)
6.6 误差准则与最优化问题	(154)
本章小结	(158)
练习题	(158)

// 第7章 线性控制系统的校正设计

7.1 系统的设计与校正问题	(162)
7.2 串联相位超前(微分)校正	(165)
7.3 串联相位滞后(积分)校正	(173)
7.4 串联滞后-超前(积分-微分)校正	(180)
7.5 具有延时环节的串联校正	(183)
7.6 串联校正的特性比较	(185)
7.7 反馈校正	(186)
7.8 复合(顺馈)校正	(190)
7.9 控制系统校正实例	(192)
本章小结	(194)

练习题	(195)
-----	-------

第 8 章 离散控制系统的分析

8.1 Z 变换与 Z 反变换	(200)
8.2 脉冲传递函数	(209)
8.3 离散系统时域特性分析	(212)
8.4 离散系统稳定性分析	(216)
8.5 离散系统频率特性分析	(218)
8.6 离散系统稳态误差分析	(220)
8.7 离散系统的校正设计	(223)
8.8 实际离散控制系统的分析与校正	(233)
本章小结	(237)
练习题	(237)

第 9 章 非线性控制系统的分析

9.1 非线性控制系统	(240)
9.2 描述函数法	(243)
9.3 相平面分析法	(272)
9.4 利用非线性特性改善系统的控制性能	(297)
本章小结	(301)
练习题	(301)
附录 A 拉普拉斯变换与反变换	(308)
附录 B 参考答案	(315)
参考文献	(322)

第1章

控制系统的基本概述

本章简要介绍了控制理论的发展过程及其展望。通过实际例子说明了与控制系统结构、组成、工作原理相关的一些基本概念和开环、闭环控制系统的特点,并对控制系统的分类和基本要求做了简要的阐述。最后给出几个典型控制系统的例子。要求学生熟悉控制系统的结构、组成、工作原理及一些相关的基本概念,开、闭环控制系统的特点,了解控制系统的分类及基本要求。

1.1 控制理论发展概况

人类利用控制技术的历史可以追溯到两千多年以前,即使从1769年瓦特(J. Watt)发明基于反馈原理的蒸汽机飞球调速机构算起,至今也已经有二百多年的历史。然而,从控制技术到形成理论体系,并作为一门独立学科迅速发展却只是近五六十年事情。

按理论体系形成时间和研究问题方法的不同,控制理论通常被分为经典控制理论和现代控制理论两部分。在经典控制理论的形成和发展过程中做出重要贡献的有:1868年,麦克斯威尔(J. C. Maxwell)发表了“调速器”一文,首先把“反馈控制”作为重要概念提出来,并建立了蒸汽机调速器的数学模型;劳斯(E. J. Routh)和赫尔维茨(A. Hurwitz)分别在1884年和1895年先后独立提出判别系统稳定性的代数判据;1927年,伯德(H. W. Bode)系统分析了负反馈放大器,得出很多重要结论;1932年,奈魁斯特(H. Nyquist)提出了著名的系统稳定性判据;1948年,维纳(N. Wiener)发表了著名的《控制论》,第一次系统地总结、归纳了上述理论方法,这部著作被认为是经典控制理论体系的奠基。1950年,埃文斯(W. R. Evans)提出了根轨迹法,进一步充实了经典控制理论。

经典控制理论主要以系统传递函数和频率特性作为研究工具,讨论单变量线性定常控制系统的分析与设计问题。经典控制理论是一个比较成熟的理论体系,在工程中得到普遍应用。然而,受研究方法限制,经典控制理论研究的对象和讨论的问题都具有较大局限性。

20世纪50~60年代,计算机技术日趋成熟,控制理论在这一时期有了突破性发展。1956年,苏联学者庞特里雅金(Л. С. Понтрягин)提出了极大值原理,使最优控制的求解方法有了很大发展;1957年,美国学者贝尔曼(R. I. Bellman)提出了动态规划理论,面对多级决策过程提出了简明的全局最优求解方法;1960年,美国学者卡尔曼(R. E. Kalman)提出了能控性、能观测性概念和新的滤波方法,把确定性最优控制问题推广到随机最优控制,使最优控制理论更具实用性。再加上早期(1882年)俄国学者李雅普诺夫(А. М. Ляпунов)提出的系统稳定性判别方法,上述研究结果构成了现代控制理论的基础。

现代控制理论以系统状态方程作为研究工具,研究对象扩展到多变量、非线性、时变系统,讨论上述控制系统的分析与设计问题。现代控制理论的特点在于不仅描述系统的外部

特性,还揭示了系统的内部状态及其变化规律,并在此基础上求解某种意义下的最优控制。与经典控制理论相比,现代控制理论在研究方法、研究对象和研究内容上都向前迈进了一大步。

20世纪70年代以后,控制理论进入了一个多样化发展时期。伴随着计算机技术和现代应用数学的发展,控制理论在最优滤波、系统辨识、最优控制、自适应控制和智能控制等方面都有了重要发展。今天,控制理论已经发展成几十个分支,具有各种仿生特点和机器智能的控制系统被广泛用于各个领域。有理由相信,控制理论和技术将应社会需求向着智能化方向不断发展。

本书介绍经典控制理论及其应用。力求从基本概念、理论方法和实际应用上给出一个比较完整的知识体系。使学习者在掌握控制理论基础与应用技术的同时,学会用理性的原则、实践的原则以及系统的观点、动态变化的观点来分析、解决实际问题,为掌握科学的思想和方法奠定基础。

1.2 控制系统的工作原理及其组成

在自然界和人类社会活动中,控制现象普遍存在。例如,植物通过收卷叶面或落叶方式控制水分蒸发;大自然中的物竞天择保持了物种的进化;汽车司机借助操纵方向盘保持汽车与路面的相对位置;市场的调节作用维持了供求关系的基本平衡。由此可见,控制是事物之间一种不对称的相互作用,具有明显的规律性和目的性。本书讨论的控制问题将局限在人对机器的控制,即按人的思想与需求设计相应的控制系统,使被控制对象(机器)按某种要求完成相应的工作。

1.2.1 控制系统的工作原理

所谓控制系统,是指以控制作用为工作机理,具有某种协调、控制功能的物理系统。为了加深理解控制系统的具体含义,在这里首先分析一个温度控制系统。温度控制通常指恒温控制,即通过控制手段使某一环境中的温度保持在希望值上。控制温度的方式有很多,图1.1所示的系统是控制温度的一种方式。该系统由调压器、加热电阻丝和恒温箱三部分组成。当调压器触头被固定在某个位置上之后,加热电阻丝中将有一个与之对应的电流值。如果没有外界干扰,此时恒温箱中的温度将随之确定。在上述过程中,控制作用体现在调压器触头位置与恒温箱温度之间确定的对应关系上。但是,如果存在外界干扰,比如某一时段电网电压向下波动,流经加热电阻丝中的电流就要减小,恒温箱的温度将随之降低,从而破坏了调压器触头位置与恒温箱温度之间的对应关系。由此可见,这种控制系统没有纠正偏差的能力,抗干扰性差,通常用在控制精度要求不高的场合。

图1.2所示的系统是温度控制的另一种方式,与前者不同的是这里增添了一个温度计和一个现场操作工人。当外界干扰造成恒温箱中的温度上下波动时,操作者可以通过温度计观测到这种变化,并根据观测到的实际温度与希望得到的温度之间偏差的大小和正负来调节调压器触头的位置,从而增大或减小流经加热电阻丝中的电流,使恒温箱中的温度接近希望值。可见,这是一个检测温度、确定偏差、根据偏差决定控制行为、并随时纠正偏差的过程。显然,由于人作为系统中的一个环节参与了具体调节过程,这种人工控制方式的控制精

度将与人的工作经验、工作状态和对变化的敏感程度等因素密切相关。

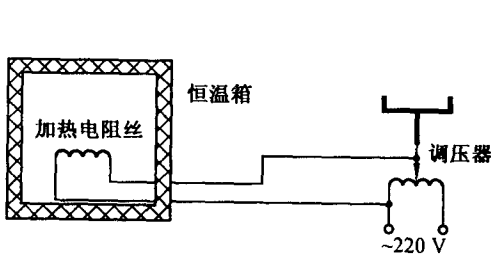


图 1.1 温度控制系统 I

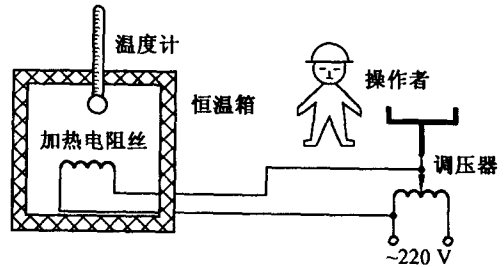


图 1.2 温度控制系统 II

温度控制的第三种方式如图 1.3 所示。这里用一套控制装置取代操作者实现控制作用。这套控制装置由电位计、热电偶、电压放大器、功率放大器、执行电机和减速器组成。电位计输出的电压信号 u_i 决定恒温箱中希望的温度值。该值根据需要设定, 设定后不再变化。热电偶是一种温度检测元件, 它将恒温箱中的实际温度转换成相应的电压信号 u_f 对外输出。显然, $\Delta u = u_i - u_f$ 反映了实际温度与希望温度之间的偏差。具有运算功能的电压放大器完成了 u_i 与 u_f 的比较, 并和功率放大器一起将偏差信号 Δu 放大到具有足够功率的信号, 从而驱动执行电机转动, 并通过减速器带动调压器触头移动, 达到改变流经加热电阻丝中的电流、调节恒温箱温度的目的。当恒温箱中的实际温度值与希望温度值相等时, $\Delta u = 0$ 。此时放大器输出为零, 电机停止转动, 调压器的触头不发生移动。当外界环境发生变化造成恒温箱中的温度降低时, 此时 u_f 减小, Δu 增加, 功率放大器输出的驱动功率增加, 电机将迅速转动, 移动调压器触头向增大输出电流的方向移动, 从而提高恒温箱中的温度, 直到 $\Delta u = 0$ 为止。同样道理, 当恒温箱中的温度升高时, 控制装置会使调压器触头向减小输出电流的方向移动, 迫使恒温箱中的温度降低, 直到恒温箱中的实际温度值与希望温度值相等。所以, 恒温过程仍是时时“检测偏差并以此纠正偏差”的控制过程。这一原则反映了高水平控制系统的基本工作机制, 与控制系统的具体组成无关。值得注意的是, 为确保上述“偏差现象与控制动作”之间的逻辑关系, 在系统各环节的连接上要特别注意极性和方向性。

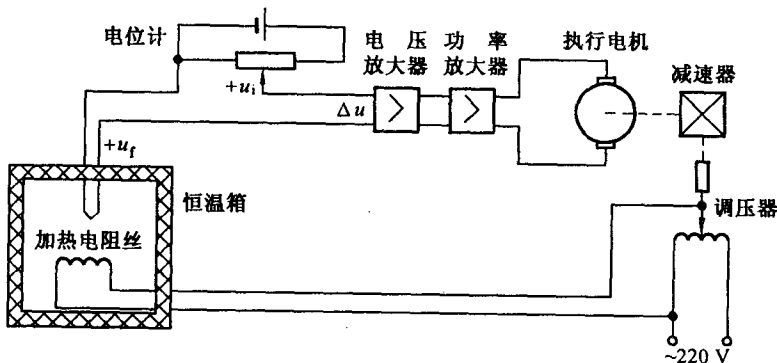


图 1.3 温度控制系统 III

由此可见, 一个系统的控制作用和自动化水平取决于是否具有、如何具有纠正偏差的能力。图 1.1 所示系统没有纠正偏差的能力, 因此对温度的控制作用较弱; 图 1.2 和图 1.3 所示系统分别具有人工纠正偏差和自动纠正偏差的功能, 它们对温度具有较强的控制作用, 而且

后者的自动化水平更高。上述例子表明,时时“检测偏差并以此纠正偏差”是高水平控制系统的基本工作原理,该原理体现了智能行为中普遍包含的“奖惩”机制。

1.2.2 开环控制与闭环控制

首先,介绍控制系统方框图的概念。方框图是控制系统的一种表达形式,是系统分析与设计的重要工具。方框图直观表达了控制系统的结构、各环节之间的关系以及信号流向等重要信息。

图 1.1 所示控制系统的方框图如图 1.4 所示。该系统为串联结构,箭头表示控制信号从输入端流向输出端。该系统的输入量代表调压器触头的位置,干扰信号代表电源的电压波动,调压器将输出的电流施加在加热电阻丝上,加热电阻丝产生相应的热量,并在恒温箱中表现出一定的温度,是系统的输出量(被控量)。由于该系统的温度控制过程只受输入量支配,输出量对控制过程没有影响,这样的系统称为开环控制系统。

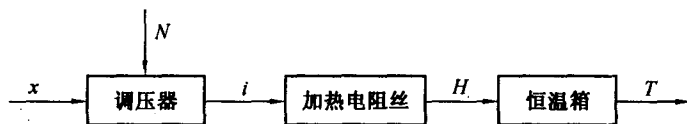


图 1.4 开环温度控制系统方框图

开环控制实际应用的例子很多,例如十字路口的交通信号系统。在这个系统中,信号灯通断时间指令是输入量,总的车流量是输出量。正常情况下,二者之间的对应关系可以满足实际需求。但也有这种情况:由于某种原因,一个方向上没有车辆通过,可对应的却是绿灯。另一个方向上有很多车辆等待通过,对应的却是红灯。由于系统输出量不能对控制过程产生影响,有些时候控制效果不是很好。即便如此,由于开环控制系统结构简单,造价低廉,在一些控制精度要求不高的场合仍被广泛使用。

图 1.3 所示控制系统的方框图如图 1.5 所示。系统的输入量是 u_i , 输出量(被控量)是温度 T 。该系统对温度的控制过程前面已经做过说明,这里不再赘述。需要说明的是系统的环状结构。形成这种结构的原因是系统输出量通过热电偶反馈到输入端,形成的反馈信号 u_f 与输入量 u_i 在比较环节 $\otimes$ 处进行比较,得到的偏差信号 Δu 被用于实际控制过程。因此看到了系统中的控制信号由前向通路从输入端流向输出端,同时也从反馈通路由输出端流向输入端。这表明系统的输入量和输出量对控制过程都将产生作用。这种在输出端和输入端之间存在反馈连接的系统称为闭环控制系统。闭环控制系统中的反馈有正负之分。若比较运算是 $u_i - u_f$, 对应的反馈称为负反馈;若是 $u_i + u_f$, 则为正反馈。正、负反馈的形成与系统的内部作用和外部连接有关。由于负反馈是控制过程收敛的必要条件,因此闭环控制系统通常设计成负反馈控制系统。如没有特别说明,本书中的闭环控制系统均指负反馈控制系统。

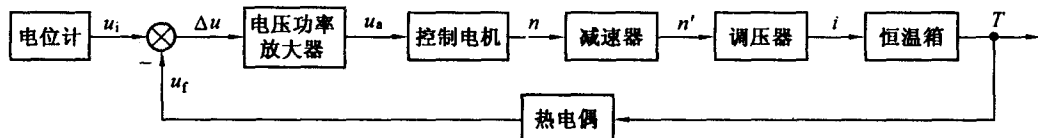


图 1.5 闭环温度控制系统方框图

闭环控制系统控制精度高的特点使其在很多领域得到应用。例如家庭中使用的热水器就是一个闭环控制系统。在这个系统中,给定电压是输入量,水温是输出量。温度检测元件构成反馈连接,输入量与反馈量之差是系统的实际控制量。偏差值的大小、正负决定了加热时间的长短和加热器的启停,从而保证热水器的水温基本恒定。

尽管闭环控制系统有各种不同形式和控制目的,但概括起来可以归纳为由以下几个基本环节组成。

(1) 给定环节。给定环节是控制系统输入量的设定装置,如图 1.5 中的电位计。给定环节的精度直接影响系统的控制精度。在精度要求比较高的控制系统中,输入量通常是计算机给定的数字量。

(2) 反馈环节。反馈环节是用来检测被控制量(对于单变量系统,被控制量通常是系统的输出量)并将其转换为与输入量具有相同物理量纲的装置,如图 1.5 中的热电偶。检测环节是闭环控制系统中的关键部件,它的精度直接影响系统的控制精度,因此要有很高的精度、灵敏度和稳定性。反馈环节是闭环控制系统投资份额较大的地方。

(3) 比较环节。比较环节是完成系统输入量与反馈量的比较运算并得到相应偏差值的装置,如图 1.5 中具有运算功能的电压放大器。除此之外,自整角机、旋转变压器和一些差动装置都是常见的比较装置。在有计算机参与的控制系统中,比较运算由计算机完成。

(4) 中间环节。中间环节包括放大器和一些校正装置。放大器的作用是将微弱的偏差信号放大到具有足够功率的驱动信号,从而驱动后面的执行机构,如图 1.5 中的电压、功率放大器。校正装置通常是用于改善控制系统性能的控制装置,这部分内容后面会讲到。

(5) 执行机构。执行机构是直接对控制对象进行操作的动力元件、传动装置和调节机构,如图 1.5 中的执行电机、减速器和调压器。驱动执行机构通常需要较大的能量。

(6) 控制对象。控制对象是指要进行控制的设备或过程。控制对象的工作过程可能涉及若干物理量,这些物理量反映控制对象的工作状态。根据实际需要,这些物理量中至少有一个是被控制的。在图 1.5 中,恒温箱是控制对象,恒温箱中的温度是被控量或系统的输出量。

开环系统和闭环系统具有不同的结构,从而体现了系统中包含的不同关系和不同的工作机制,最终决定系统具有不同的控制性功能。简而言之,没有负反馈的结构就不会有输出量与控制量之间的关系,不会有“检测偏差并以此纠正偏差”的工作机制,当然也不会有自动消除偏差的控制功能。所以,控制系统的结构对系统性能有非常大的影响,新型结构设计也是难度最大的设计工作。

1.3 控制系统的基本类型

控制系统的种类很多,确切分类比较困难。为便于讨论,将常见的几种控制系统的分类概括如下。

1. 按控制系统结构分类

控制系统按结构分类可以分为开环控制系统、闭环控制系统以及由开、闭环系统共同组成的前馈控制系统。除此之外,各种仿生环、适应环和学习环对应的控制系统都在系统结构设计上做了很多尝试,并取得了很多成果。开、闭环控制系统的工作原理和特点前面已经做过介绍,前馈控制系统后面会讲到。其他内容超出本书范围,这里不做深入探讨。

2. 按系统中的元件特征分类

控制系统按系统中的元件特征分类,可将控制系统分为线性控制系统与非线性控制系统。

(1) 线性控制系统。由线性微分方程描述的系统称为线性控制系统。即

$$a_n x_o^{(n)}(t) + \cdots + a_1 \dot{x}_o(t) + a_0 x_o(t) = b_m x_i^{(m)}(t) + \cdots + b_1 \dot{x}_i(t) + b_0 x_i(t) \quad (1.1)$$

方程中输出量及其各阶导数都是一次的,并且各系数与输入量无关。

线性控制系统满足叠加原理,即具有叠加性和齐次性,这是判别系统是否是线性控制系统的根本依据。

所谓叠加原理是指当输入量为 $x_{i1}(t)$ 和 $x_{i2}(t)$ 时,输出量分别为 $x_{o1}(t)$ 和 $x_{o2}(t)$ 。如果输入量为 $x_i(t) = ax_{i1}(t) + bx_{i2}(t)$,则输出量为 $x_o(t) = ax_{o1}(t) + bx_{o2}(t)$ 。

线性控制系统是由线性元件组成的。但在实际问题中,理想的线性控制系统几乎不存在。有一些非线性控制系统在一定条件下可以简化为线性控制系统,从而可以用成熟的线性控制理论对控制系统进行分析和设计。

(2) 非线性控制系统。由非线性微分方程描述的系统称为非线性控制系统。在非线性的控制系统中,至少有一个环节是非线性环节。继电器特性、饱和特性、死区特性、滞环特性等都是典型的非线性环节。应该说,非线性控制系统是普遍存在的。控制系统理论告诉我们,非线性和开放性是控制系统具有自组织功能的基础,是控制系统从无序到有序、从而获得生命力的根本所在。所以,研究非线性控制理论意义重大。然而,由于非线性控制系统的复杂性,非线性控制系统理论远没有线性控制系统理论那样完整,很多问题只能定性描述和数值求解。

3. 按输入量特征分类

控制系统按输入量的特征分类,可将其分为恒值控制系统、伺服控制系统和程序控制系统 3 种类型。

(1) 恒值控制系统。恒值控制系统是指在某一时段中,控制系统的输入量是一个恒定值,控制系统的作用是保证其输出量也维持恒定,这样的系统称为恒值控制系统。在工业生产中,恒温、恒压、恒速都是恒值控制系统。恒值控制系统有时也称为调节器,它是一类重要的控制系统。

(2) 伺服控制系统。伺服控制系统也称为随动系统或伺服机。该系统的输入量是关于时间的某个函数(可能事先无法预测),控制的目的是使系统输出量以尽量小的偏差跟随输入量的变化,“跟踪”是伺服控制系统的特点。仿形加工机床、雷达跟踪系统都是伺服控制系统的例子。

(3) 程序控制系统。程序控制系统简称程控系统,该系统的输入量是事先确定的,按某种规律变化,系统的输出量也按相应规律变化。程控系统的工作过程相对固定,而且系统中通常有多个被控对象,整个系统以循环方式工作。例如工业生产中的程控机床,事先按工艺要求把加工程序编写好,控制指令由程序发出,系统按固定时序完成一系列指定动作,之后等待下一个循环。

4. 按系统中传递信号的性质分类

控制系统按系统中传递信号的性质分类,可将控制系统分为连续控制系统和离散控制系统。

(1) 连续控制系统。如果系统中传递的信号都是关于时间连续变化的模拟量,该系统称为连续控制系统。

(2) 离散控制系统。如果系统中传递的信号有一处或几处是脉冲序列或数字量,该系统称为离散控制系统,有时也称数字控制系统。所以,有计算机或其他数字元件参与的控制系統都是离散控制系统。与连续控制系统相比,离散控制系统有比较高的控制精度,在分析方法上也有自己的特点。

1.4 对控制系统的基本要求

不同的控制系统服务于不同的目的,因此对不同的控制系统会有不同的性能要求。然而,对控制系统共性方面的基本要求可以归结为三个方面:稳定性、快速性和准确性。控制理论中的很多分析和设计方法都是围绕这些基本要求展开的。

1. 稳定性

稳定性是控制系统正常工作的必要条件。所谓稳定性是指当系统受到外界扰动作用时,系统平衡的工作状态被打破;当外界扰动消失后,系统有能力自动返回原来的平衡状态继续工作。换言之,稳定性是扰动背景下系统的一种收敛性,是一种动态属性。显然,没有稳定性,控制系统的其他性能都无从谈起。稳定性是对控制系统最基本、最重要的要求。

2. 快速性

快速性是在系统稳定的前提下提出来的,是衡量系统过渡过程中动态性能的一个重要指标。所谓快速性,是指当系统的输出量与输入量(或与相应输出量的稳态值)之间产生偏差时,消除这种偏差的快慢程度。快速性好的系统跟踪性能好,反应敏捷。对于伺服控制系统来说,这一点非常重要。

3. 准确性

准确性是用来衡量系统控制精度的,是系统稳态性能的一种度量。所谓准确性,是指系统进入稳态后输出量与输入量(或与相应输出量的稳态值)之间误差的大小,这个误差称为稳态误差。显然,稳态误差小的系统控制精度高,反之亦然。对于恒值调节系统来说,准确性设计显得尤为重要。准确性也是在系统稳定前提下提出来的,只有稳定的系统才有稳态及稳态误差。

在这里有两个问题需要说明。第一,在对一个控制系统进行设计时,上述三方面的要求往往是相互制约的。为了兼顾各个指标,有时不得不采取一些折中方法。比如在允许的范围内用牺牲快速性换取稳定性;第二,随着社会化生产和科学技术的发展,人们完善自己、探索未知的步子越来越大,致使各种最优化、智能化控制理论和方法不断出现,同时对控制系统提出了诸如鲁棒性和诊断性等更高的性能要求。只是这些内容超出本书范围,在此不作讨论。

1.5 几种常见的控制系统

控制系统在各类工程中得到了广泛应用。尽管实际需求造成控制系统在结构和性质上的差异,但它们都遵循着“检测偏差并以此纠正偏差”的控制机制。下面给出几种典型控制系统,了解这些系统的组成和工作过程可加深对控制问题的理解。

1. 位置控制系统

位置控制系统是以位置作为被控量的一种恒值调节系统。在汽车生产线、机械加工设备以