



面向


21世纪

高级应用型人才

中国高等职业技术教育研究会推荐
高职高专系列教材

自动控制原理及其应用

温希东 主编



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

中国高等职业技术教育研究会推荐

高职高专系列教材

自动控制原理及其应用

温希东 主编

西安电子科技大学出版社

2004

内 容 简 介

本书是中国高等职业教育研究会推荐的第二轮规划教材(IT及机电类)之一。

全书介绍了经典控制理论的基本概念、基本理论、基本分析方法以及实际应用。主要内容有:自动控制系统概述、自动控制系统的数学模型、时域分析法、频域分析法、自动控制系统的校正、自动控制系统的工程设计方法、自动控制系统的分析与调试等。各章均配有内容提要、小结和大量习题。全书常用术语配有英文。时域、频域分析法配有 MATLAB 仿真分析。附录给出了五个典型的基本实验。

自动控制原理是一门理论性很强的课程。根据高职教育人才培养的特点:理论知识够用、强调实际应用,本书第1章就给出了应用实例,并针对实例中的问题由浅入深地给出了解决方法。全书力求突出物理概念、定性分析,回避繁琐的数学推导,叙述深入浅出,通俗易懂。

本书适用于高职高专及成人高校中的电气技术、自动化技术、机电一体化以及应用电子技术等电类专业,也可供有关专业的师生和从事自动化工作的工程技术人员参考。

★本书配有电子教案,需要的老师可与出版社联系,免费提供。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理及其应用/温希东主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2004.7

(高职高专系列教材)

ISBN 7-5606-1421-3

I. 自... II. 温... III. 自动控制理论—高等学校:技术学校—教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 056888 号

策 划 马乐惠

责任编辑 王素娟 马乐惠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http://www.xduph.com

E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 西安兰翔印刷厂

版 次 2004年7月第1版 2004年7月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 13.375

字 数 312千字

印 数 1~4000册

定 价 15.00元

ISBN 7-5606-1421-3/TP·0759(课)

XDUP 1692001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

随着科学技术的迅猛发展,自动控制技术的应用领域日益广阔。自动控制技术的广泛应用,不但使生产设备或生产过程实现了自动化,大大提高了劳动生产率和产品质量,改善了劳动条件,而且在人类征服自然、改善居住条件、提高生活水平等方面也发挥了非常重要的作用。

由于自动控制原理是一门理论性很强的专业技术基础课程,比较抽象,学生不易接受(主要是不知用于何处和怎样具体应用),因此,本书开始就以双闭环直流调速系统等实例引出问题,并结合具体问题由浅入深地引出课程内容,最后,又以实例的题解收尾,前后呼应,使学生明确自动控制原理在具体工程中的应用。

本书以经典线性控制理论为主线,结合具体应用实例,着重叙述自动控制系统的工作原理、系统数学模型的建立、系统性能(稳定性、动态性能、稳态性能)的分析方法以及改善系统性能的途径。离散控制系统由于内容更加抽象、不易理解,没有编入此书,待学习计算机控制技术课程时,再从应用角度去讲授、学习。

高等职业技术教育培养的是生产一线的应用型人才,落脚点是技术应用,不求理论的系统 and 完整,只求必需、够用。所以,在编写此书时,我们力求做到理论联系实际,注重方法论的叙述,强调“三基本”(基本概念、理论、分析方法),回避繁琐的数学推导,叙述深入浅出,方便自学,以期学生对自动控制原理的应用和对实际控制系统的分析、调试有一个完整的概念。

书中每章的开始有内容提要,结尾有小结和大量习题。其中,小结概括了每章的基本内容与要求。经过精心挑选的习题可以巩固学生对知识点的掌握并学会具体的实际应用。全书常用术语配有英文注释,目的在于双语教学。由于频域分析法中的频率特性曲线很难手工绘制,为了形象、直观,书中还介绍了如何应用MATLAB软件分析自动控制系统的性能。为了师生实践教学的方便,附录中给出了编者在教学实践中总结出的五个典型的基本实验项目。

本课程内容涉及到高等数学、电工基础等课程的基础知识,因此在学习时,要注意基础知识的复习和综合运用。本书建议讲授60学时,各校教师在教学时,可以根据具体情况对教材的内容进行适当的取舍。

本书由深圳职业技术学院温希东教授主编。唐建东老师编写了3.7节和4.8节;王毅峰老师编写了第2章、附录1,以及3.1~3.3节,并对全书的计算机文字处理和绘图做了大量的工作;其余部分由温希东编写。

在本书的编写过程中,编者学习并参考了兄弟院校的优秀教材。在此,向所有为本书的编写和出版给予帮助的同志致以衷心的感谢。

由于高职教育在我国还处于起步阶段,再加上编者的水平有限,且时间较紧,书中不妥与错误之处在所难免,恳请广大读者和专家批评指正。

编 者

2004年3月于深圳

目 录

第 1 章 自动控制系统概述	1
1.1 自动控制理论的发展史及内容	1
1.2 开环控制和闭环控制	3
1.3 自动控制系统的组成	6
1.4 自动控制系统的分类	7
1.5 对自动控制系统的基本要求	9
1.6 自动控制系统实例	10
小结	14
习题	15
第 2 章 自动控制系统的数学模型	17
2.1 系统的微分方程	17
2.2 拉普拉斯变换	22
2.3 传递函数	29
2.4 系统方框图	30
2.5 典型环节的传递函数和方框图	32
2.6 环节的基本连接方式及其总传递函数	39
2.7 方框图的等效变换及化简	41
小结	45
习题	46
第 3 章 时域分析法	50
3.1 典型输入信号和时域性能指标	50
3.2 一阶系统的动态响应	53
3.3 二阶系统的动态响应	54
3.4 高阶系统的动态响应	61
3.5 系统的稳定性分析	62
3.6 系统的稳态误差分析	69
3.7 应用 MATLAB 进行时域分析	74
小结	77
习题	78
第 4 章 频域分析法	84
4.1 频率特性	84
4.2 典型环节的频率特性	92
4.3 系统的开环频率特性	99
4.4 奈奎斯特(Nyquist)稳定性判据	108

4.5	稳定裕量与系统相对稳定性	111
4.6	系统开环频率特性与系统性能的关系	117
4.7	系统闭环频率特性与时域指标的关系	121
4.8	应用 MATLAB 进行频域分析	123
	小结	130
	习题	131
第 5 章	自动控制系统的校正	137
5.1	串联校正	137
5.2	反馈校正	154
5.3	顺馈补偿	158
	小结	161
	习题	162
第 6 章	自动控制系统的工程设计方法	165
6.1	系统固有部分的简化处理	166
6.2	系统预期频率特性的确定	167
6.3	校正装置的设计	171
6.4	自动控制系统的工程设计举例	174
	小结	180
	习题	181
第 7 章	自动控制系统的分析与调试	183
7.1	自动控制系统的分析步骤	183
7.2	自动控制系统的调试方法	185
7.3	自动控制系统的维护使用	187
	小结	188
	习题	189
附录 1	实验项目	190
实验 1	一阶系统的阶跃响应	190
实验 2	一阶系统阶跃响应的数字仿真	191
实验 3	二阶系统的阶跃响应	192
实验 4	二阶系统阶跃响应的数字仿真	194
实验 5	系统的稳定性	195
附录 2	自动控制技术常用术语中、英文对照	197
	参考文献	205

第 1 章 自动控制系统概述

【内 容 提 要】

本章概括地叙述了开环控制和闭环控制的特点及应用,介绍了自动控制系统的基本组成、分类和性能指标,自动控制理论的发展史和主要内容,以及经典自动控制原理的研究方法。最后,给出了几个实例。

1.1 自动控制理论的发展史及内容

在工业、农业、交通运输和国防各个方面都离不开自动控制。所谓自动控制,就是在没有人直接参与的情况下,利用控制装置对生产过程、工艺参数、目标要求等进行自动的调节与控制,使之按照预定的方案达到要求的指标。自动控制系统性能的优劣,将直接影响到产品的产量、质量、成本、劳动条件和预期目标的完成。因此,自动控制越来越受到人们的重视,在控制理论和技术应用方面也获得了飞速的发展。

自动控制技术的应用可以追溯到 18 世纪(1788 年)瓦特(Watt)利用小球离心调速器使蒸汽机转速保持恒定的开创性的突破,以及 19 世纪(1868 年)麦克斯韦(Maxwell)对轮船摆动(稳定性)的研究。但在初期,自动控制技术的应用进展很缓慢。自动控制技术的真正发展是在 20 世纪。例如,1920 年海维赛得(Heaviside)在无线电方面的研究(首先引入了拉普拉斯变换、傅里叶变换和表征声强比的单位分贝)和 1932 年奈奎斯特(Nyquist)对控制系统稳定性的研究(奈氏稳定判据)等。此后,在第二次世界大战中,由于对更快和更精确的武器系统的需要,借助于数学方面的成果,自动控制理论获得了迅速的发展。1945 年,伯德(Bode)提出用图解法来分析和综合反馈控制系统的方法,形成控制理论的频域法。1948 年,维纳(Weiner)出版了划时代著作《控制论》,对控制理论作了系统的阐述。随后,伊文斯(Evans)在 1950 年创立了根轨迹法;1954 年钱学森创立工程控制论;1962 年柴达(Zadeh)提出状态变量法等等。20 世纪 60 年代以后,以现代控制理论为核心,对多输入多输出、变参量、非线性、高精度、高效能等控制系统的研究,在最优控制、最佳滤波、系统辨识、自适应控制等理论方面都获得了重大的发展,特别是近年来由于计算机技术和现代应用数学研究的迅速发展,在大系统理论和人工智能控制等方面都取得了很大的进展。

同样,在机电控制技术方面,早在 20 世纪 30 年代就出现了电子管调节器、模拟计算机和液压仿型机床;20 世纪 40 年代出现了电机放大机—发电机—电动机控制系统;20 世纪 50 年代出现了晶体管、集成电路、步进电动机和三维数控机床;20 世纪 60 年代出现了晶闸管、大规模集成电路、新型伺服电动机,液电伺服阀得到了普及,计算机技术也得到

了发展；20世纪70年代及以后，随着微电子技术和计算机技术的迅猛发展，相继出现了大型多功能数控机床、数控加工中心、机械手、机器人等机电一体化的高新设备，以及计算机辅助设计(CAD)和计算机辅助制造(CAM)等高新技术。可以预计，随着时间的推移，还会有更多的高新产品和高新技术出现。

自动控制理论通常可分为经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论。

1) 经典控制理论

经典控制理论产生并发展于20世纪40~60年代。1945年，美国人伯德编写了《网络分析和反馈放大器设计》一书，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，美国出版了第一本自动控制教材《伺服机件原理》；1948年，美国麻省理工学院出版了另一本教材《伺服机件原理》，建立了现在广泛使用的频域法。20世纪50年代是经典控制理论发展和成熟的时期，主要内容有频域法、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。

此后，自动控制理论开始逐渐分化，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。

2) 现代控制理论

现代控制理论于20世纪60年代中期发展成熟。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。20世纪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》一文，1961年，他又与布西共同发表了《线性过滤和预测问题的新结果》一文。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。现代控制理论主要包括状态空间法、系统辨识、最佳估计和最优控制。

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系统，数学模型用传递函数表示，分析方法是频域法，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，分析方法是时域法，主要内容是最优性问题，主要控制装置是电子计算机，主要用于实现企业管理和控制综合自动化。

3) 智能控制理论

智能控制理论是20世纪70年代后，控制理论向广度和深度发展的结果。智能控制系统是指具有某些仿人智能的工程控制与信息处理系统，其中最典型的的就是智能机器人。

对自动控制理论的具体描述可表示为图1-1。

本书只能说是自动控制理论的入门，以经典线性控制理论中常用的时域分析法和频域分析法为主线，分析常见的自动控制系统的工作原理、自动调节过程，叙述系统数学模型的建立，分析系统的性能，探讨改善系统性能的途径，并在最后介绍工程设计方法以及实

例分析、计算和系统调试。编者希望通过上述内容的阐述,使读者对自动控制系统的工作原理、数学模型、性能分析、系统校正和系统调试等方面有一个相对完整的认识,为读者在自动控制技术方面,打下一个初步的但却是非常重要的基础。

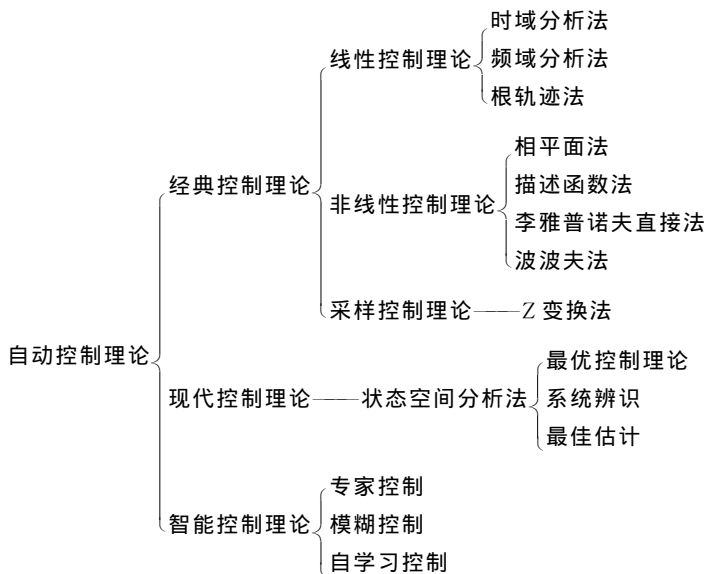


图 1-1 对自动控制理论的具体描述

1.2 开环控制和闭环控制

若通过某种装置将能反映输出量的信号引回来去影响控制信号,则这种作用称为“反馈”(Feedback)作用。我们通常按照控制系统是否设有反馈环节来对其进行分类:设有反馈环节的,称为闭环控制系统;不设反馈环节的,称为开环控制系统。这里所说的“环”,是指由反馈环节构成的回路。下面介绍这两种控制系统的控制特点。

1. 开环控制系统(Open-loop Control System)

若系统的输出量不被引回来对系统的控制部分产生影响,则这样的系统称为开环控制系统。

例如,一台洗衣机就是一个开环控制系统。其浸湿、洗涤、漂清和脱水过程都是根据设定的时间程序依次进行的,而无需对输出量(如衣服清洁程度、脱水程度等)进行测量。

又如,普通机床的自动加工过程也是开环控制。它是根据预先设定的加工指令(切削深度、行程距离)进行加工的,而不用去检测其实际加工的程度。

再如,如图 1-2 所示的由步进电动机驱动的数控加工机床,也是一个没有反馈环节的开环控制系统。

由图 1-2 可以看出,预先设定的加工程序指令通过运算控制器(可为微机或单片机)去控制脉冲的产生和分配,发出相应的脉冲;再由这些脉冲(通常还要经过功率放大)驱动步进电动机,通过精密传动机构带动工作台(或刀具)进行加工。如果能保证不丢失脉冲,

能有效地抑制干扰的影响,再采用精密传动机构(如滚珠丝杆)。这样,整个加工系统虽然为开环系统,但仍能达到相当高的加工精度(常用的简易数控机床,即有采用这种控制方式的)。

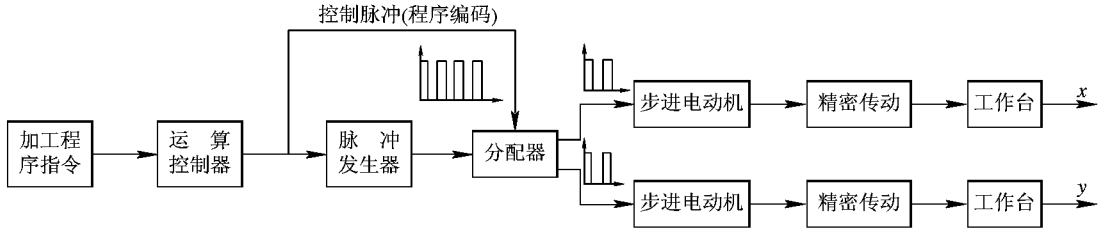


图 1-2 数控加工机床示意图

图 1-3 为数控加工机床开环控制方框图。此系统的输入量为加工程序指令,输出量为机床工作台的位移,系统的控制对象为工作台,执行机构为步进电动机和传动机构。由图可见,系统无反馈环节,输出量并不返回来影响控制部分,因此是开环控制。

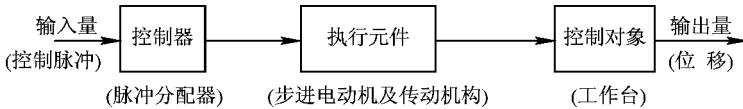


图 1-3 数控加工机床开环控制方框图

开环系统的优点是无反馈环节,一般结构简单、系统稳定性好、成本低。因此,在输出量和输入量之间的关系固定,且内部参数或外部负载等扰动因素不大,或这些扰动因素产生的误差可以预先确定并能进行补偿的情况下,应尽量采用开环控制系统。

开环控制的缺点是当控制过程受到各种扰动因素影响时,将会直接影响输出量,而系统不能自动进行补偿。特别是当无法预计的扰动因素使输出量产生的偏差超过允许的限度时,开环控制系统便无法满足技术要求,这时就应考虑采用闭环控制系统。

2. 闭环控制系统(Closed-loop Control System)

若系统输出量通过反馈环节返回来作用于控制部分,形成闭合环路,则这样的系统称为闭环控制系统,又称为反馈控制系统(Feedback Control System)。

图 1-4 为电炉箱恒温自动控制系统。

一只由电阻丝通电加热的电炉箱,由于炉壁散热和工件增减,将使炉温产生变化,而这种变化通常是无法预先确定的。因此,若工艺要求保持炉温恒定,则开环控制将无法自动补偿,必须采用闭环控制。由于需要电炉箱保持恒定的温度,因此最常用的方法是采用温度负反馈。由图 1-4 可见,采用热电偶来检测电炉箱温度,并将炉温转换成电压信号 U_{TT} ,然后反馈至输入端与给定电压 U_{ST} 进行比较,由于是采用负反馈控制,因此两者极性相反,两者的差值 ΔU 称为偏差电压($\Delta U = U_{\text{ST}} - U_{\text{TT}}$)。此偏差电压作为控制电压,经电压放大和功率放大后,去驱动直流伺服电动机,电动机经减速器带动调压变压器的滑动触头来调节炉温。电炉箱的自动控制方框图如图 1-5 所示。

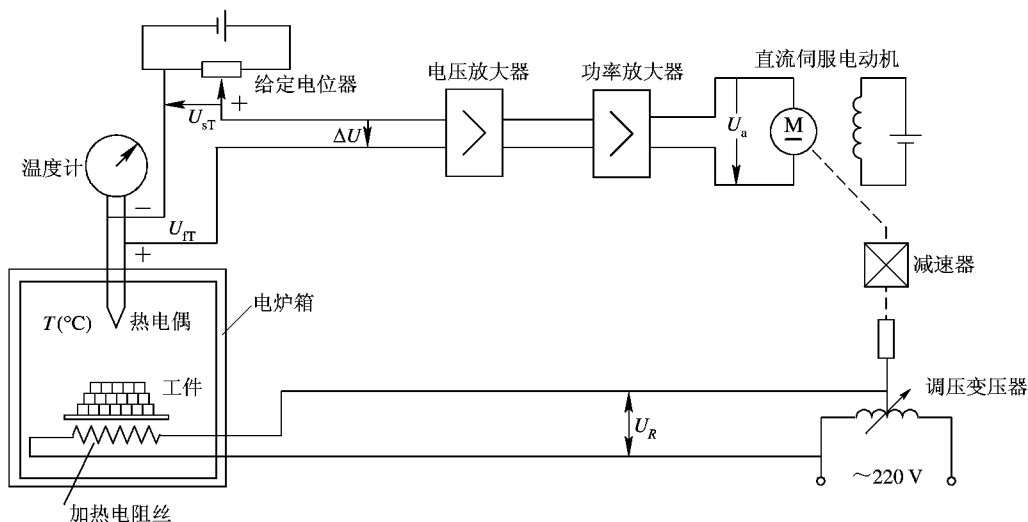


图 1-4 电炉箱恒温自动控制系统

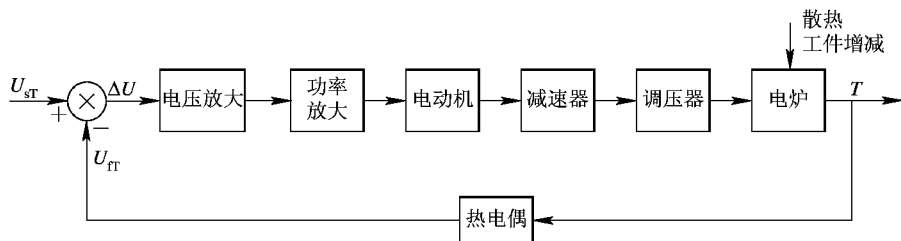


图 1-5 电炉箱自动控制方框图

当炉温偏低时, $U_{fT} < U_{sT}$, $\Delta U = (U_{sT} - U_{fT}) > 0$, 此时偏差电压极性为正。此偏差电压经电压放大和功率放大后, 产生的电压 U_a (设 $U_a > 0$) 供给电动机电枢, 使电动机“正”转, 带动调压器滑点右移, 从而使电炉供电电压 (U_R) 增加, 电流加大, 炉温上升, 直至炉温升至给定值, 即 $T = T_{sT}$ (T_{sT} 为给定值), $U_{fT} = U_{sT}$, $\Delta U = 0$ 时为止。这样炉温可自动恢复, 并保持恒定。

炉温自动调节过程如图 1-6 所示。

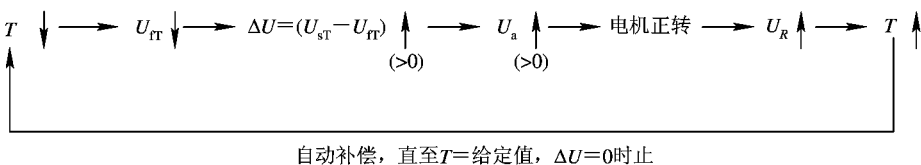


图 1-6 炉温自动调节过程

反之, 当炉温偏高时, 则 ΔU 为负, 经放大后使电动机“反”转, 调压器滑点左移, 供电电压减小, 直至炉温降至给定值。

炉温处于给定值时, $\Delta U = 0$, 电动机停转。

由以上分析可见, 反馈控制可以自动进行补偿, 抗干扰能力强、精度高, 这是闭环控

制的一个突出的优点。当然，闭环控制要增加检测、反馈比较、调节器等部件，会使系统复杂、成本提高。而且闭环控制会带来副作用，使系统的稳定性变差，甚至造成不稳定。这是采用闭环控制时必须重视并要加以解决的问题。

1.3 自动控制系统的组成

现以图 1-4 和图 1-5 所示的恒温控制系统来说明自动控制系统的组成和有关术语。

为了表明自动控制系统的组成以及信号的传递情况，通常把系统各个环节用框图表示，并用箭头标明各作用量的传递情况，图 1-7 便是图 1-4 所示系统的方框图。方框图可以把系统的组成简单明了地表达出来，而不必画出具体的线路。

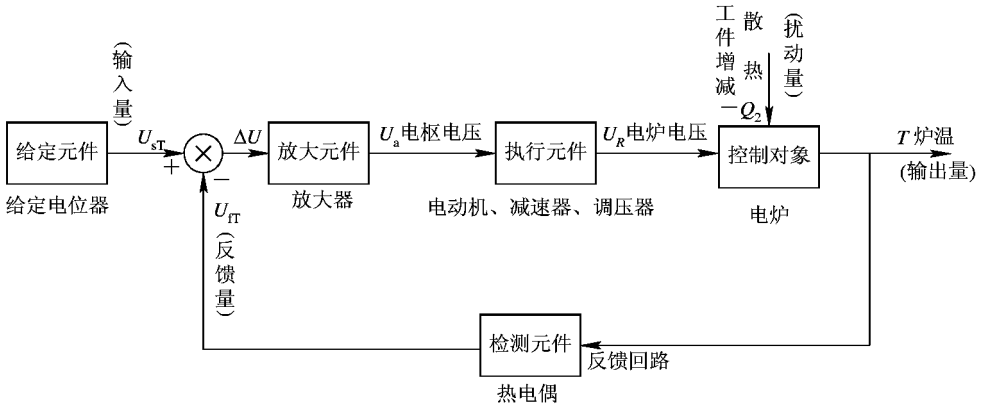


图 1-7 自动控制系统的方框图

由图 1-7 可以看出，一般自动控制系统包括：

- (1) 给定元件(Command Element)：由它调节给定信号(U_{sT})，以调节输出量的大小。此处为给定电位器。
- (2) 检测元件(Detecting Element)：由它检测输出量(如炉温 T)的大小，并反馈到输入端。此处为热电偶。
- (3) 比较环节(Comparing Element)：在此处，反馈信号与给定信号进行叠加，信号的极性以“+”或“-”表示。若为负反馈，则两信号极性相反；若极性相同，则为正反馈。
- (4) 放大元件(Amplifying Element)：由于偏差信号一般很小，因此要经过电压放大及功率放大，以驱动执行元件。此处为晶体管放大器或集成运算放大器。
- (5) 执行元件(Executive Element)：驱动被控制对象的环节。此处为伺服电动机、减速器和调压器。
- (6) 控制对象(Controlled Plant)：亦称被调对象。在此恒温系统中电炉即为控制对象。
- (7) 反馈环节(Feedback Element)：由它将输出量引出，再回送到控制部分。一般的闭环系统中，反馈环节包括检测、分压、滤波等单元。

排列各个元件(环节)时，通常将给定元件放在最左端，控制对象放在最右端。即输入量在最左端，输出量在最右端。从左至右(即从输入至输出)的通道称为顺馈通道(Feedfor-

word Path)或前向通路(Forward Path),将输出信号引回输入端的通道称为反馈通道或反馈回路(Feedback Path)(参见图 1-7)。

由图 1-7 可见,系统中的各种作用量和被控制量包括:

(1) 输入量(Input Variable):又称控制量或参考输入量(Reference Input Variable),所以输入量的角标常用 i (或 r)表示。输入量通常由给定信号电压构成,或通过检测元件将非电输入量转换成信号电压。如图 1-7 中的给定电压 U_{ST} 即为输入量。

(2) 输出量(Output Variable):又称被控制量(Controlled Variable),所以输出量角标常用 o (或 c)表示。它是被控制对象的输出,是自动控制的目标。如图 1-7 中的炉温 T 即为输出量。

(3) 反馈量(Feedback Variable):通过检测元件将输出量转变成与给定信号性质相同且数量级相同的信号。如图 1-7 中的反馈量即为通过热电偶将温度 T 转换成与给定电压信号性质相同的电压信号 U_{FT} 。反馈量的角标常以 f 表示。

(4) 扰动量(Disturbance Variable):又称干扰或“噪声”(Noise),所以扰动量的角标常以 d (或 n)表示。它通常指引起输出量发生变化的各种因素。来自系统外部的扰动称为外扰动,例如电动机负载转矩的变化,电网电压的波动,环境温度的变化等。图 1-7 中的炉壁散热、工件增减均可看成是来自系统外部的扰动量。来自系统内部的扰动称为内扰动,如系统元件参数的变化,运算放大器的零点漂移等。

(5) 中间变量(Semifinised Variable):系统中各环节之间的作用量。中间变量既是前一环节的输出量,也是后一环节的输入量。如图 1-7 中的 ΔU 、 U_a 、 U_R 等就是中间变量。

由图 1-7 可以看到,方框图可以直观地将系统的组成、各环节间的相互关系以及各种作用量的传递情况简单明了地概括出来。

1.4 自动控制系统的分类

自动控制系统可以从不同的角度来进行分类,常见的有以下几种。

1. 按输入量变化的规律分类

自动控制系统按输入量变化的规律可分为以下三类。

1) 恒值控制系统(Fixed Set-Point Control System)

恒值控制系统的特点是:系统的输入量是恒量,并且要求系统的输出量相应地保持恒定。恒值控制系统是最常见的一类自动控制系统,如自动调速系统、恒温控制系统、恒张力控制系统等。图 1-4 所示的温度控制系统即为恒值控制系统。

2) 随动控制系统(Follow-Up Control System)

随动控制系统又称伺服系统(Serve-System),其特点是:输入量是随机变化着的,并且要求系统的输出量能跟随输入量的变化而作出相应的变化。随动控制系统在工业和国防上有着极为广泛的应用,例如刀架跟随系统、火炮跟踪控制系统、雷达导引系统和机器人控制系统等等。

3) 程序控制系统(Programme Control System)

程序控制系统的特点是:输入量按照一定的时间函数变化,并且要求输出量随之变

化。例如数控伺服系统以及一些自动化生产线等。

2. 按系统传输信号对时间的关系分类

自动控制系统按系统传输信号对时间的关系可分为两类。

1) 连续控制系统(Continuous Control System)

连续控制系统的优点是：各元件的输入量与输出量都是连续量(模拟量)，因此它又称为模拟控制系统(Analogue Control System)。图 1 - 4 所示的恒温控制系统就是连续控制系统。连续控制系统的运动规律通常可用微分方程来描述。

2) 离散控制系统(Discrete Control System)

离散控制系统又称采样数据控制系统(Sampled-Date Control System)。它的特点是：系统中有的信号是脉冲序列，或采样数据量、数字量。通常，采用数字计算机控制的系统都是离散控制系统。离散控制系统的运动规律通常可用差分方程来描述。图 1 - 2 所示的系统就是离散系统。

3. 按系统的输出量和输入量间的关系分类

自动控制系统按系统的输出量和输入量间的关系可分为两类。

1) 线性系统(Liner System)

线性系统的特点是：系统全部由线性元件组成，它的输出量与输入量间的关系用线性微分方程来描述。线性系统最重要的特性，是可以应用叠加原理(叠加原理：两个不同的作用量，同时作用于系统时的响应，等于两个作用量单独作用时响应的叠加)。

2) 非线性系统(Non Liner System)

非线性系统的特点是：系统中存在有非线性元件，如具有死区、出现饱和、含有库仑摩擦等非线性特性的元件，它的输出量与输入量间的关系要用非线性微分方程来描述。非线性系统不能应用叠加原理。

4. 按系统中的参数对时间的变化情况分类

自动控制系统按系统中的参数对时间的变化情况可分为两类。

1) 定常系统(Time-Invariant System)

定常系统(又称时不变系统)，其特点是：系统的全部参数不随时间变化，它的输出量与输入量间的关系用定常微分方程来描述。在实践中遇到的系统大多属于(或基本属于)这一类系统。

2) 时变系统(Time-Varying System)

时变系统的特点是：系统中有的参数是时间 t 的函数，它随时间变化而改变。宇宙飞船控制系统就是时变控制系统的例子，宇宙飞船飞行过程中，飞船内燃料质量、飞船受的重力时刻都在发生变化。

当然，除了以上的分类方法外，还可以根据其他的条件对自动控制系统进行分类。本书根据课程教学大纲的要求，只讨论线性定常系统。

1.5 对自动控制系统的基本要求

自动控制理论是研究各种自动控制系统的共同规律的一门学科。尽管自动控制系统有不同的类型,对每个系统也都有不同的特殊要求,但对于各类系统来说,在已知系统的结构和参数时,我们感兴趣的都是系统在某种典型输入信号作用下,其被控量(输出量)变化的全过程。例如,对恒值控制系统是研究扰动作用引起被控量变化的全过程;对随动系统是研究被控量如何克服扰动影响并跟随输入量变化的全过程。但是,对每一类系统,被控量变化全过程提出的共同基本要求都是一样的,且可以归结为稳定性、快速性和准确性,即稳、准、快的要求。

1. 稳定性

稳定性是保证控制系统正常工作的先决条件。一个稳定的控制系统,其被控量偏离期望值的初始偏差应随时间的增长逐渐减小或趋于零。具体来说,对于稳定的恒值控制系统,被控量因扰动而偏离期望值后,经过一个过渡过程时间,被控量应恢复到原来的期望值状态;对于稳定的随动系统,被控量应能始终跟踪输入量的变化。反之,不稳定的控制系统,其被控量偏离期望值的初始偏差将随时间的增长而发散,因此,不稳定的控制系统无法实现预定的控制任务。

线性自动控制系统的稳定性是由系统结构所决定的,与外界因素无关。这是因为控制系统中一般含有储能元件或惯性元件,如绕组的电感、电枢转动惯量、电炉热容量、物体质量等,储能元件的能量不可能突变,因此,当系统受到扰动或有输入量时,控制过程不会立即完成,而是有一定的延缓,这就使得被控量恢复期望值或跟踪输入量会有一个时间过程,称之为过渡过程。例如,在反馈控制系统中,由于被控对象的惯性,会使控制动作不能瞬时纠正被控量的偏差;控制装置的惯性则会使偏差信号不能及时完全转化为控制动作。这样,在控制过程中,一方面,当被控量已经回到期望值而使偏差为零时,执行机构本应立即停止工作,但由于控制装置的惯性,控制动作仍继续向原来方向进行,致使被控量超过期望值又产生符号相反的偏差,导致执行机构向相反方向动作,以减小这个新的偏差;另一方面,当控制动作已经到位时,又由于被控对象的惯性,偏差并未减小为零,因而执行机构继续向原来方向运动,使被控量又产生符号相反的偏差;如此反复进行,致使被控量在期望值附近来回摆动,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,控制目的能得以实现,我们便称该系统为稳定系统;反之,如果振荡过程逐步增强,系统被控量将失控,则该系统为不稳定系统。

2. 快速性

为了很好地完成控制任务,控制系统仅仅满足稳定性要求是不够的,还必须对其过渡过程的形式和快慢提出要求,一般称为动态性能。例如,对于稳定的高射炮射角随动系统,虽然炮身最终能跟踪目标,但如果目标变动迅速,而炮身跟踪目标所需过渡过程时间过长,就不可能击中目标;对用于稳定的自动驾驶仪系统,当飞机受阵风扰动而偏离预定航线时,具有自动使飞机恢复预定航线的的能力,但在恢复过程中,如果机身摇晃幅度过大,或恢复速度过快,就会使乘客感到不适;函数记录仪记录输入电压时,如果记录笔移动很

慢或摆动幅度过大,不仅会使记录曲线失真,而且还会损坏记录笔。因此,对控制系统过渡过程的时间(即快速性)和最大振荡幅度(即超调量)一般都有具体要求。

3. 准确性

理想情况下,当过渡过程结束后,被控量达到的稳态值(即平衡状态)应与期望值一致。但实际上,由于系统结构,外作用形式以及摩擦、间隙等非线性因素的影响,被控量的稳态值与期望值之间会有误差存在,称为稳态误差。稳态误差是衡量控制系统控制精度的重要标志,在技术指标中一般都有具体要求。

1.6 自动控制系统实例

要分析一个实际的自动控制系统,首先要了解它的工作原理,然后画出组成系统的方框图。在画方框图之前,必须明确以下问题:

- (1) 哪个是控制对象?被控量是什么?影响被控量的主扰动量是什么?
- (2) 哪个是执行元件?
- (3) 测量被控量的元件有哪些?有哪些反馈环节?
- (4) 输入量由哪个元件给定?反馈量与给定量如何进行比较?
- (5) 此外还有哪些元件(环节)?它们在系统中处于什么地位?起什么作用?

下面将通过几个例子来说明如何分析系统的组成,并画出了系统的原理方框图。

1. 轧钢计算机控制系统

轧钢计算机控制系统的工作原理如图 1-8 所示。

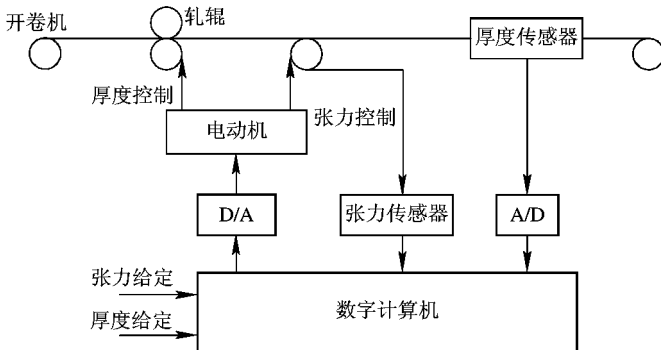


图 1-8 轧钢计算机控制系统的原理图

被控对象:轧辊。

被控量:轧辊的输出量——厚度和张力。

干扰量:主要是元件参数的变化而引起的干扰力矩。

测量元件:厚度传感器和张力传感器。

给定量:厚度给定、张力给定,是人们设计的希望值。

计算装置:数字计算机。

执行元件：电动机。

轧钢计算机控制系统的原理方框图如图 1-9 所示。

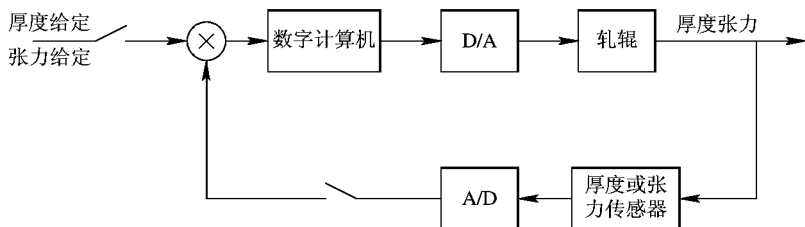


图 1-9 轧钢计算机控制系统的原理方框图

2. 机床台控制系统

机床台控制系统的工作原理如图 1-10 所示。

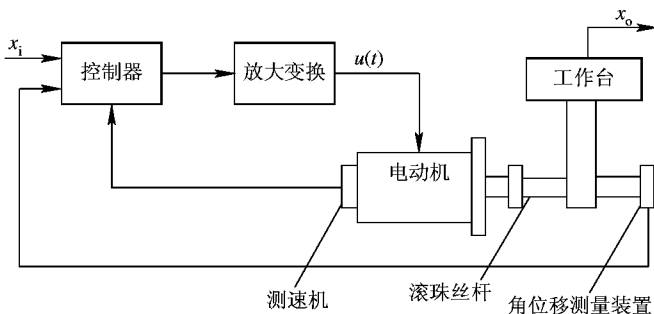


图 1-10 机床台控制系统的原理图

被控对象：工作台。

被控量：工作台的输出量——位移 x_o 。

干扰量：主要是元件参数的变化而引起的干扰力矩。

测量元件：角位移测量装置和测速机。角位移测量装置测出滚珠丝杆转角，即测出工作台的位移；测速发电机测出电动机的转速，即测出工作台的运动速度。

给定量： x_i ，是设计者要把零件的毛胚加工成理想的那个模线。

计算装置：控制器，用来把三个输入信号比较后得到的差值输出给放大变换器，进而控制电动机的转动。

执行元件：电动机，用来拖动工作台按理想的模线运动。

机床台控制系统的原理方框图如图 1-11 所示。

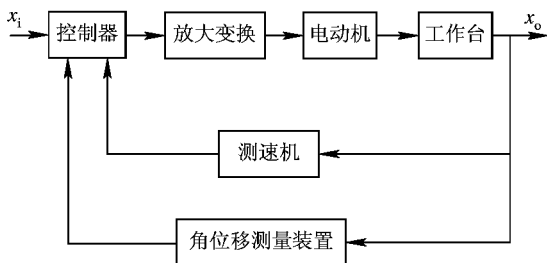


图 1-11 机床台控制系统的原理方框图