




教育部高等职业教育示范专业规划教材

机械工业出版社精品教材

自动控制原理与系统

上海理工大学 孔凡才 编著

(第**3**版)

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

附光盘

教育部高等职业教育示范专业规划教材

机械工业出版社精品教材

自动控制原理与系统

第 3 版

编 著 孔凡才
光盘制作 姚存治 张桂香
 孟庆波 马全广
主 审 陈铁牛



机械工业出版社

本书是在1996年出版的高专规划教材《自动控制原理与系统》(第2版)的基础上,根据当今高新技术的发展和高职高专更侧重现场技术应用的特点而进行更新与修订的。全书分为两篇,第1篇为自动控制原理,它包括系统数学模型的建立,分析系统性能常用的方法,对系统的性能进行分析,探讨改善系统性能的途径,其中包括时域分析法,频率特性法和MATLAB软件的应用。第2篇为自动控制系统,它包括直流调速系统、交流调速系统、位置随动系统和实际系统的分析与调试。其中新增加了BJT-PWM控制系统,IGBT-SPWM-VVVF交流变频调速系统,微机控制的、采用专用集成芯片的位置随动系统等。

本书第3版修订时,仍将保持原书获得好评的特色,以自控理论作为分析的工具,自控系统则作为分析的对象,围绕系统性能的分析与改善途径,以方法论为主线,通过应用举例的形式,着重物理含义和物理过程的阐述,努力做到理论联系实际、分析细致、通俗易懂和切合实用。

全书每章均有小结、思考题与习题,它们多为生产实际中的问题。书中还安排了较多的阅读材料、实例分析和读图练习,以利学生的自学、分析和实践能力的提高。

为便于新版教材的使用,本书还附带一张配套的多媒体光盘。光盘内容包括【教学指导】、【参考电子教案】、【自学辅导】、【疑难问题解答】及【实例分析】等。该光盘对教师教学及学生学习,都将会有很大的帮助。

本书可供高职高专院校、应用型本科、职工大学的自动化类专业、电气类专业、机电一体化类专业和应用电子类专业使用,也可作自学考试教材,并可供工程技术人员参考。

本书第1版获第二届全国高校机电类优秀教材一等奖;

第2版获机械部科技进步三等奖。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理与系统/孔凡才编著. —3版. —北京:机械工业出版社, 2005.1

教育部高等职业教育示范专业规划教材

ISBN 7-111-05080-0

I. 自... II. 孔... III. ①自动控制理论-高等学校:技术学校-教材 ②自动控制系统-高等学校:技术学校-教材 IV. ①TP13 ②TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第102997号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:于宁 版式设计:霍永明 责任校对:李秋荣

封面设计:鞠杨 责任印制:李妍

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005年1月第3版第1次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·18.5印张·457千字

定价:34.00元(含1CD)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

68326294、68320718

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是在1996年出版的高等专科教育机电类规划教材《自动控制原理与系统》(第2版)的基础上,根据当今高新技术的发展和高等职业教育人才培养更侧重现场技术应用的特点而进行更新和修订的。

当今高新技术发展对本课程的影响有:

(1) 计算机(微机)控制的广泛使用,数字控制逐渐取代模拟控制,软件功能逐渐取代硬件功能;

(2) MATLAB软件在自动控制的分析与设计方面的广泛应用;

(3) 新的电力电子器件(MOSFET、IGBT等)逐渐取代晶闸管,因此脉宽调制(PWM、SPWM)控制逐渐取代移相控制;

(4) 交流调速逐渐取代直流调速。

基于以上情况,本书修订时,在自控原理方面,增添了MATLAB软件的应用,适当降低了时域分析与频域分析方面的要求;在自控系统方面,增添了BJT-PWM控制、数字可逆直流调速、交流调速(IGBT-SPWM-VVVF交流变频调速、矢量控制交流调速、通用变频器等)和微机控制的、采用专用集成电路的位置随动系统等内容;适当精减了分立元件线路和模拟可逆直流调速方面的内容。

当前高等职业教育更侧重现场技术应用的特点,对本课程的影响是,提高了实际操作与现场调试方面的要求,而降低了对理论与计算方面的要求。为此,本书修订时,更加突出了系统的性能分析和系统调试,突出实际应用,删去了系统设计方法一章和有关系统设计的内容。此外,考虑到离散系统多与计算机控制系统合在一起讲授,所以修订时也删去了离散系统一章。

本书的第1版和第2版,采取以自控理论作为系统分析的工具,以系统分析作为理论的应用举例,使学生理解所学理论用于何处和怎样具体应用,收到了很好的效果,得到了同行专家和读者的充分肯定,因此本书修订时,仍将保持这一特色。全书以方法论为主线,通过应用举例,着重物理含义和物理过程的阐述。本书的特点是:理论联系实际,分析细致,通俗易懂和切合实用。

全书每章均有小结、思考题与习题,它们多为生产实际中的问题,“小结”概括了每章的基本内容和要求;书中的例题与习题,有的是后续内容的一部分,请读者加以注意。书中安排了较多的阅读材料、实例分析和读图练习,以利学生自学能力、分析能力和实践能力的提高,此外也是为了帮助解决参考图书不足的困难。

本书的参考教学时数为60~80学时,书中打“*”的为选学内容。书中的阅读材料可采取学生课外阅读、课内讨论、教师总结的方式进行,也可作为课外提高内容。编者在编写时,不得不考虑全书的系统性和完整性,但教师和读者使用时,请注意抓住主干,选择要点,把主要精力放在对分析方法的掌握上。本书可作一门课程开设,也可分作《自动控制原理》和《自动控制系统》两门课程开设。此处,书中许多章节的内容都相对独立,便于

不同的专业选用。

为便于新版教材使用，本书还附带一张配套的多媒体光盘。光盘内容包括【教学指导】、【参考电子教案】、【自学辅导】、【疑难习题解答】及【实例分析】等。该光盘对教师教学及学生学习，都将会有很大的帮助。

本课程内容涉及到高等数学、电工基础、电子技术基础、电机学和半导体变流技术等多门课程的基础知识，因此在学习时，要注意基础知识的复习和综合运用。

本书为高等职业技术学院、应用型本科、职工大学自动化类专业、电气类专业、机电一体化类专业和应用电子类专业的规划教材，也可作自学考试教材，并可供工程技术人员参考。

本书由上海理工大学孔凡才教授编著。全书由昆明高等冶金专科学校陈铁牛教授审阅，陈教授对本书提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。此外，在编写过程中，还得到了上海理工大学王楠老师、上海电机学院刘军老师和龚建芳老师的大力帮助，也在此表示衷心的感谢。

本书所附光盘的脚本初稿，由孔凡才教授和郑州铁路职业技术学院的马全广老师合编，光盘由郑州铁路职业技术学院姚存治、张桂香、孟庆波、马全广等老师联合制作。

编者在修编过程中虽然花了不少精力，但限于编者水平，仍会有错误与不足之处，殷切期望广大读者批评指正，来信请寄（200031）上海市复兴中路1195号上海理工大学孔凡才收。

编 者

目 录

前言

第 1 篇 自动控制原理

第 1 章 自动控制系统概述	1
1.1 引言	1
1.2 开环控制和闭环控制	2
1.2.1 开环控制系统	2
1.2.2 闭环控制系统	3
1.3 自动控制系统的组成	5
1.4 自动控制系统的分类	9
1.4.1 按输入量变化的规律分类	9
1.4.2 按系统传输信号对时间的关系分类	10
1.4.3 按系统的输出量和输入量间的关系分类	10
1.4.4 按系统中的参数对时间的变化情况分类	10
1.5 自动控制系统的性能指标	11
1.5.1 系统的稳定性	11
1.5.2 系统的稳态性能指标	11
1.5.3 系统的动态性能指标	12
1.6 研究自动控制系统的方法	13
小结	14
思考题	14
习题	15
第 2 章 拉普拉斯变换及其应用	18
2.1 拉氏变换的概念	18
2.2 拉氏变换的运算定理	21
2.3 拉氏反变换	22
2.4 应用拉氏变换求解微分方程	22
小结	24
习题	24
第 3 章 自动控制系统的数学模型	25
3.1 系统的微分方程	25
3.1.1 系统微分方程式的建立	25
3.1.2 微分方程建立举例	26
3.2 传递函数	27

3.2.1 传递函数的定义	28
3.2.2 传递函数的一般表达式	28
3.2.3 传递函数的性质	29
3.3 系统框图(结构图)	29
3.4 典型环节的传递函数和功能框	30
3.4.1 比例环节	30
3.4.2 积分环节	31
3.4.3 理想微分环节	34
3.4.4 惯性环节	34
3.4.5 比例微分环节	37
3.4.6 振荡环节	37
3.4.7 延迟环节	39
3.4.8 运算放大器	41
3.5 自动控制系统的框图	42
3.5.1 系统框图的画法	42
3.5.2 系统框图的物理含义	44
3.6 框图的变换、化简和系统闭环传递函数的求取	44
3.6.1 框图的等效变换规则	44
3.6.2 自动控制系统闭环传递函数的求取	48
3.6.3 交叉反馈系统框图的化简及其闭环传递函数的求取	50
小结	52
思考题	53
习题	54
第 4 章 分析自动控制系统性能常用的方法	56
4.1 时域分析法	56
4.2 频率特性法	60
4.2.1 频率特性的基本概念	60
4.2.2 频率特性的表示方式	62
4.2.3 典型环节的对数频率特性	66
4.2.4 系统的开环对数频率特性	72
* 4.2.5 系统的闭环频率特性	78
4.3 MATLAB 软件在系统性能分析中的应用	80

4.3.1	MATLAB 的安装与启动	80			
4.3.2	MATLAB 指令窗	81			
4.3.3	MATLAB 中的数值表示、变量命名、 运算符和表达式	82			
4.3.4	应用 MATLAB 进行数值运算	83			
4.3.5	应用 MATLAB 绘制二维图线	84			
4.3.6	应用 MATLAB 处理传递函数的 变换	85			
4.3.7	应用 MATLAB 求取输出量对时间 的响应	86			
4.3.8	SIMULINK 仿真软件及其应用	87			
	小结	93			
	思考题	96			
	习题	96			
第 5 章	自动控制系统的性能分析	98			
5.1	自动控制系统的稳定性分析	98			
5.1.1	系统稳定性概念	98			
5.1.2	系统稳定的充要条件	99			
5.1.3	奈氏稳定判据和对数频率判据	103			
5.1.4	稳定裕量与系统相对稳定性	104			
5.1.5	自动控制系统的稳定性分析 举例	105			
5.2	自动控制系统的稳态性能分析	112			
5.2.1	系统稳态误差的概念	112			
5.2.2	系统稳态误差与系统型别、系统 开环增益间的关系	114			
5.2.3	系统稳态误差与输入信号间的 关系	115			
5.2.4	由系统的开环对数频率特性去 分析系统的稳态性能	117			
5.2.5	自动控制系统稳态性能分析 举例	118			
5.3	自动控制系统的动态性能分析	121			
5.3.1	系统跟随动态指标的求取及 分析	121			
5.3.2	跟随动态性能分析	126			
5.3.3	系统动态性能与开环频率特性 间的关系	127			
5.4	系统分析举例——水位控制系统	129			
	小结	131			
	思考题	133			
	习题	134			
第 6 章	自动控制系统的校正 (改善系 统性能的途径)	137			
6.1	校正装置	137			
6.1.1	无源校正装置	137			
6.1.2	有源校正装置	138			
6.2	串联校正	141			
6.2.1	比例(P)校正	141			
6.2.2	比例-微分(PD)校正(相位超前 校正)	143			
6.2.3	比例-积分(PI)校正(相位滞后 校正)	145			
6.2.4	比例-积分-微分(PID)校正 (相位滞后-超前校正)	149			
6.3	反馈校正	153			
6.4	顺馈补偿	158			
6.4.1	扰动顺馈补偿	159			
6.4.2	输入顺馈补偿	159			
6.4.3	顺馈补偿应用举例	160			
	小结	162			
	思考题	163			
	习题	163			
第 2 篇 自动控制系统					
第 7 章	直流调速系统	165			
7.1	转速负反馈晶闸管直流调速系统	165			
7.1.1	系统的组成	165			
7.1.2	系统的框图	169			
7.1.3	系统的自动调节过程	169			
7.1.4	系统的性能分析	171			
*7.2	小功率有静差直流调速系统实例分 析(阅读材料)	173			
7.2.1	系统结构特点和技术数据	173			
7.2.2	定性分析	173			
7.2.3	系统框图	178			
7.2.4	系统的自动调节过程	178			
7.2.5	系统性能分析	179			
7.3	速度和电流双闭环直流调速系统	179			
7.3.1	双闭环直流调速系统的组成	180			
7.3.2	系统框图	181			
7.3.3	双闭环直流调速系统的工作原 理和自动调节过程	183			
7.3.4	系统性能分析	184			
7.3.5	双闭环直流调速系统的优点	186			
7.3.6	给定积分器的应用	186			

* 7.3.7 调节器的实用线路(阅读材料)	187	* 8.5 矢量控制的交流变频调速系统简介	228
7.4 双极晶体管脉宽调制控制的直流调速系统	189	8.5.1 三相交流电机(绕组)和直流电机(绕组)物理模型的等效变换	228
7.4.1 双极晶体管(BJT)一脉宽调制(PWM)型直流调压电路	189	8.5.2 矢量控制的基本思路	229
7.4.2 由专用集成电路控制的BJT-PWM直流调速系统	193	8.5.3 异步电动机矢量控制变频调速系统的框架结构	229
7.4.3 BJT-PWM控制系统的特点	198	* 8.6 直接转矩控制交流变频调速装置实例(阅读材料)	231
* 7.5 晶闸管可逆直流调速系统	199	8.7 通用变频器	232
7.5.1 可逆直流调速电路的几种形式	199	8.7.1 通用变频器的功能	232
7.5.2 可逆拖动的四种工作状态	201	8.7.2 通用变频器的结构	232
7.5.3 逻辑控制的无环流可逆直流调速系统	203	8.7.3 通用变频器的使用	233
* 7.6 转速、电流双闭环数字式直流调速系统	206	小结	235
7.6.1 数字式直流调速系统的组成	206	思考题	236
7.6.2 数字式直流调速系统的软件功能	206	习题	237
7.6.3 数字式直流调速系统的硬性组成	207	读图练习	238
7.6.4 数字式与模拟式直流调速系统的比较	209	第9章 位置随动系统	240
小结	210	9.1 位置随动系统概述	240
思考题	212	9.1.1 位置随动系统的组成	240
习题	213	9.1.2 位置随动系统的特点	241
读图练习	213	9.2 位置随动系统的主要部件	241
第8章 交流调速系统	218	9.2.1 线位移检测元件(感应同步器)	241
8.1 绝缘栅双极晶体管(IGBT)——正弦脉宽调制(SPWM)型交流变频电路	218	9.2.2 角位移检测元件	243
8.1.1 绝缘栅双极晶体管(IGBT)及其驱动、保护电路	218	9.2.3 直流伺服电动机的基本结构、工作原理与工作特性	244
8.1.2 二极管整流器—IGBT逆变器构成的交—直—交变压变频电路	219	9.2.4 交流伺服电动机的基本结构、工作原理和工作特性	246
8.2 交流调速的基本方案与变压变频的基本控制方式	223	9.3 位置随动系统的组成和工作原理	248
8.2.1 交流调速的基本方案	223	9.3.1 系统的组成	248
8.2.2 变压变频调速的基本控制方式	223	9.3.2 系统的组成框图	250
8.3 模拟式IGBT—SPWM—VVVF交流调速系统	225	9.3.3 系统的工作原理	251
* 8.4 微机控制的IGBT—SPWM—VVVF交流调速系统简介	227	9.3.4 系统框图	252
		9.4 位置随动系统性能分析	252
		9.4.1 系统稳态性能分析	252
		9.4.2 系统稳定性分析	253
		9.4.3 系统动态性能分析	253
		* 9.5 位置随动系统实例读图分析(阅读材料)	254
		9.5.1 系统的组成	254
		9.5.2 专用集成控制芯片的工作原理	255
		9.5.3 微机控制的、由L290/1/2芯片	

组成的直流位置随动系统的工 作原理	257	* 10.2.3 系统调试过程	267
小结	258	10.2.4 由专用的（或通用的）控制器 驱动的自动控制系统的调试	269
思考题	258	10.3 自动控制系统的维护、使用和故障的 排除	269
习题	259	10.3.1 系统的维护和使用	270
读图练习	259	10.3.2 系统故障的检查与排除	271
第 10 章 自动控制系统的分析、调试 与故障的排除	262	小结	273
10.1 自动控制系统的分析步骤	262	思考题	273
10.1.1 了解工作对象对系统的要求	262	习题	273
10.1.2 搞清系统各单元的工作原理	263	附录	275
10.1.3 搞清整个系统的工作原理	265	附录 A 常用文字符号	275
10.2 自动控制系统的调试方法	265	附录 B 自动控制技术术语的中、英名词 对照	278
10.2.1 系统调试前的准备工作	265	参考文献	287
10.2.2 制订调试大纲的原则	266		

第 1 篇 自动控制原理

第 1 章 自动控制系统概述

内 容 提 要

本章概括地叙述开环控制和闭环控制的特点，介绍自动控制系统的基本组成、自动控制系统的分类和自动控制系统的性能指标，并简单介绍了自动控制的发展历史和研究方法。

1.1 引言

在工业、农业、交通运输和国防各个方面，凡要求较高的场合，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，使控制理论和技术应用方面因此也获得了飞速的发展。

自动控制的应用虽然可以追溯到 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）麦克斯威尔（Maxwell）对轮船摆动（稳定性）的研究；但在初期，自动控制应用的进展是不快的。自动控制的真正发展是在 20 世纪。例如 1920 年海维赛得（Heaviside）在无线电方面的研究（并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，并借助数学方面的成果，自动控制理论获得迅速的发展。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，形成控制理论的频率法。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，在多输入—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，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；特别是 80 年代后 MATLAB 软件的开发与应用，使得自动控制的研究方法发生了深刻的变化；功能强大的 MATLAB 软件使自动控制系统的仿真与设计变得简单、精确和灵活，如今 MATLAB 已成为控制领域应用最广的计算机辅助工具软件。

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和模拟计算

机,出现了液压仿型机床;到40年代出现了电机放大机—发电机—电动机控制系统;到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;到60年代,出现了晶闸管、大规模集成电路、新型伺服电机,以及电液伺服阀的普及和计算机技术的发展;到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;近年来,由于新器件的涌现和计算机控制技术的发展,在电力拖动控制方面,原先的晶闸管器件已逐渐被 MOSFET 与 IGBT 所取代,相位控制逐渐被脉宽调制(PWM)控制取代,模拟控制逐渐被数字控制取代,直流调速(与伺服)逐渐被交流调速(与伺服)取代;在生产制造技术方面,相继出现了计算机辅助设计 CAD(Computer Aided Design)、计算机辅助制造 CAM(Computer Aided Manufacturing)、柔性制造系统 FMS(Flexible Manufacturing System)、虚拟制造系统 VMS(Virtual Manufacturing System)和计算机集成制造系统 CIMS(Computer Integrated Manufacturing System)等高新技术。

面对深奥的自动控制理论和浩如烟海的各种自动控制系统,本书只能说是一个入门。在自动控制原理方面,本书将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,叙述系统数学模型的建立,系统性能的分析(包括系统稳定性、稳态性能和动态性能的分析),探讨改善系统性能的途径(系统校正),并适当介绍 MATLAB 软件在系统性能分析中的应用。在自动控制系统方面,本书将通过典型的自动控制系统(如水位、温度控制系统,直流调速系统,交流调速系统和位置随动系统)和实例分析,来阐述如何分析系统的组成,怎样搞清系统的工作原理、工作特点和自动调节过程,如何建立系统的数学模型(系统框图)和怎样应用自控原理来分析系统的性能,探讨改善系统性能的途径。书中在最后还介绍了系统的调试和故障的排除。

编者期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,能掌握对自动控制系统的一般分析方法,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。

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,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,则称为开环控制系统。(这里所说的“环”,是指由反馈环节构成的回路)。下面将概括地介绍这两种控制系统的控制特点。

1.2.1 开环控制系统

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

例如,一般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依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,而不依检测的实际加工的程度去进行自动修正。

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

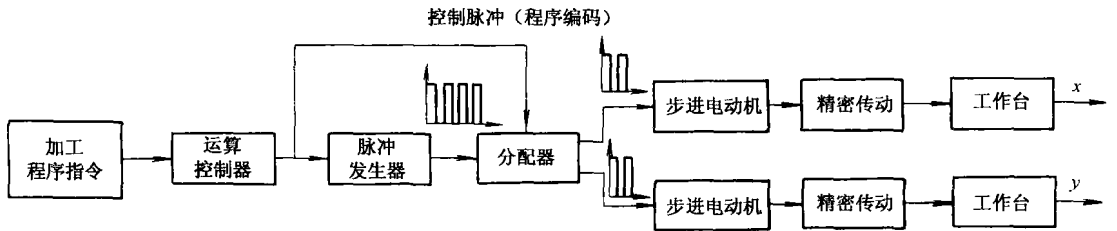


图 1-1 数控加工机床示意图

它由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，由它（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，再带动工作台（或刀具）进行加工。如果能保证不丢失脉冲，并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）。

如今采用微机控制，应用专用步进驱动模块驱动的伺服系统，可达到每转 10 000 步的高分辨率。因此对小功率伺服系统，采用开环控制也可达到很高的控制精度。

图 1-2 为数控加工机床开环控制框图。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。

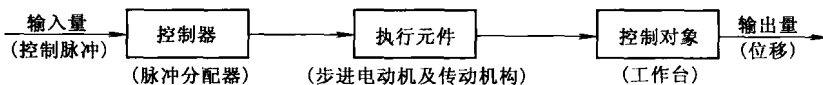


图 1-2 数控加工机床开环控制框图

由于开环系统无反馈环节，一般结构简单，系统稳定性好，成本也低，这是开环系统的优点。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计确定并能进行补偿，则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。

1.2.2 闭环控制系统

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，这样的系统称为闭环控制系统（Closed-loop Control System），又称为反馈控制系统（Feedback Control System）。

图 1-3 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，由于炉壁散热和增、减工件，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。由于需要保持恒定的物理量是温度，所以最常用的方法便是采用

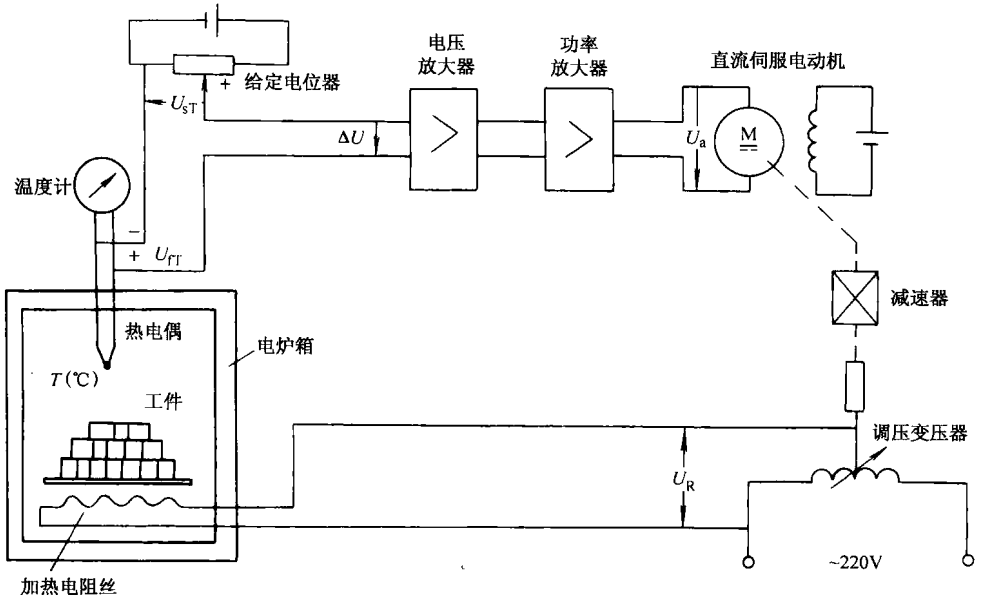


图 1-3 电炉箱恒温自动控制系统

温度负反馈。由图可见，如今采用热电偶来检测温度，并将炉温转换成电压信号 U_{fT} （毫伏级），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（ $\Delta U = U_{sT} - U_{fT}$ ）。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（控制电动机电枢电压），电动机经减速器带动调压变压器的滑动触头，来调节炉温。电炉箱自动控制框图如图 1-4 所示。

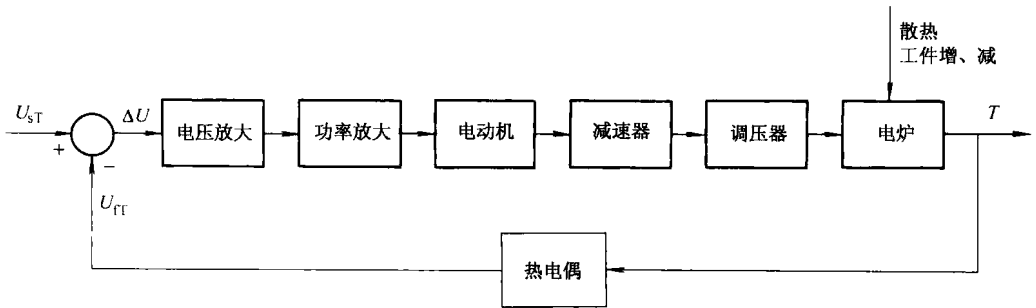


图 1-4 电炉箱自动控制框图

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。这样炉温可自动回复，并保持恒定。

炉温自动调节过程见图 1-5。

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

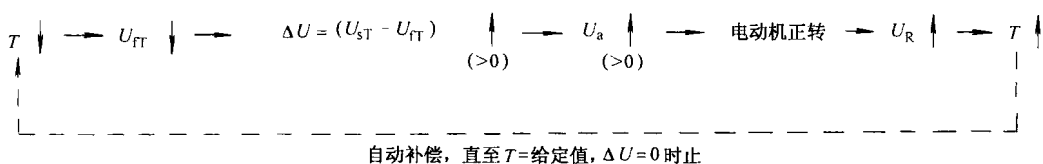


图 1-5 炉温自动调节过程

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，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

现以如图 1-3 和图 1-4 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 1-6 便是图 1-3 所示系统的框图。框图可以把系统的组成简单明了地表达出来，而不必画出具体线路。

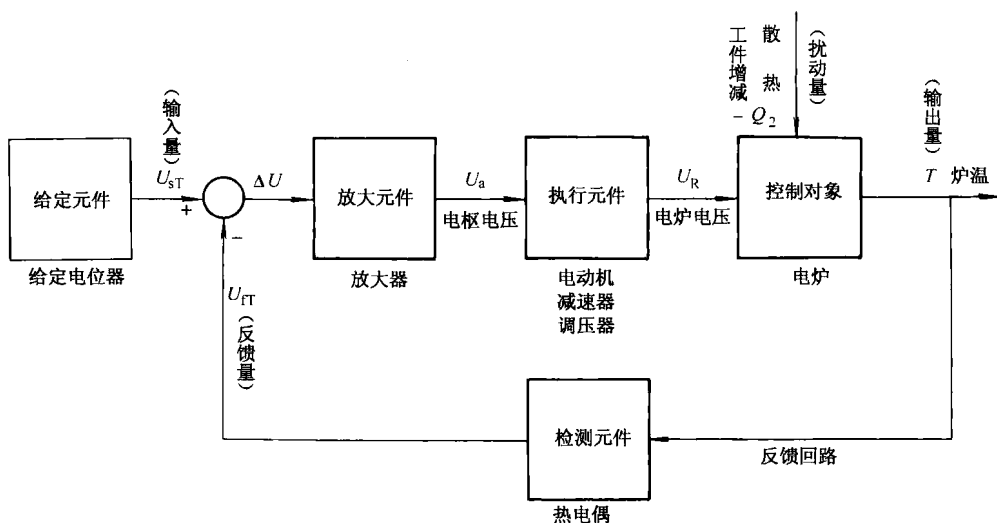


图 1-6 自动控制系统的框图

由图 1-6 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，所以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) ——是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。在此恒温系统中即为电炉。

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，反馈信号与输入信号极性相同则为正反馈，相反则为负反馈。

各个元件的排列，通常将给定元件放在最左端，控制对象排在最右端。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 (Feedforward Path) 或前向通路 (Forword 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 1-6)。

由图 1-6 可见，系统的各种作用量和被控制量有：

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。它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 1-6 中的给定电压 U_{sT} 。

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 1-6 中的炉温 T 。

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 1-6 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_{iT} 。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 1-6 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，运放器的零点飘移等。

⑤ 中间变量——它是系统各环节之间的作用量。它是前一环节的输出量，也是后一环节的输入量。如图 1-6 中的 ΔU 、 U_a 、 U_R 等就是中间变量。

由图 1-6 可以看到，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。

综上所述，要了解一个实际的自动控制系统的组成，要画出组成系统的框图，就必须明确下面的一些问题：

- 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 输入量是由哪个元件给定的？反馈量与给定量是如何进行比较的？
- ⑤ 此外还有哪些元件（或单元），它们在系统中处于什么地位？起什么作用？

下面将通过两个例子来说明如何分析系统的组成和画出系统的框图。

【例 1-1】 水位控制系统。

1. 系统的组成

图 1-7 为一个水位控制系统的示意图。由图可见，系统的控制对象是水箱（而不是控制阀）。被控制量（或输出量）是水位高度 H （而不是 Q_1 或 Q_2 ）。使水位 H 发生改变的外界因素是用水量 Q_2 ，因此 Q_2 为负载扰动量（它是主要扰动量）。使水位能保持恒定的可控因素是给水量 Q_1 ，因此 Q_1 为主要作用量（理清 H 与 Q_1 、 Q_2 间的关系，是分析本系统的组成的关键）。

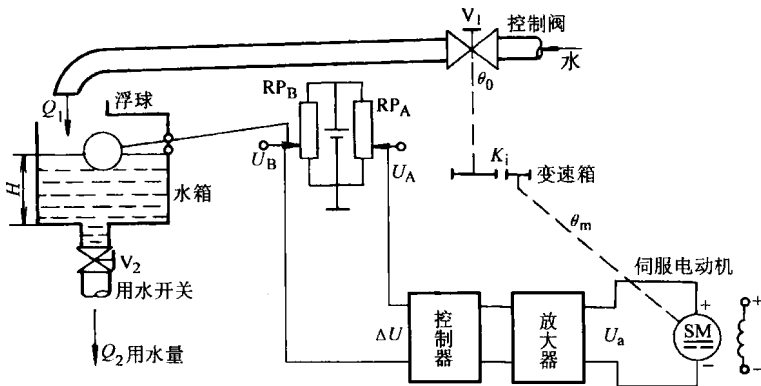


图 1-7 水位控制系统示意图

控制 Q_1 的是由电动机驱动的控制阀门 V_1 ，因此，电动机—变速箱—控制阀便构成执行元件。电压 U_A 由给定电位器 RP_A 给定（电位器 RP_A 为给定元件）。 U_B 由电位器 RP_B 给出， U_B 的大小取决于浮球的位置，而浮球的位置取决于水位 H 。因此，由浮球—杠杆—电位器 RP_B 就构成水位的检测和反馈环节。 U_A 为给定量， U_B 为反馈量， U_B 与 U_A 极性相反，所以为负反馈。 U_A 与 U_B 的差值即为偏差电压 ΔU ($\Delta U = U_A - U_B$)，此电压经控制器与放大器放大后即成为伺服电动机电枢的控制电压 U_a 。

根据以上的分析，便可画出系统的组成框图[⊙]，如图 1-8 所示。

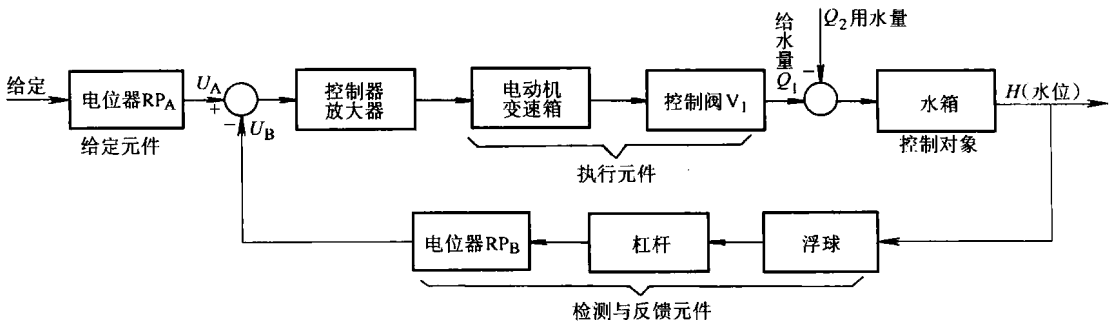


图 1-8 水位控制系统的组成框图

⊙ 为区别由传递函数构成的系统框图，因此将由文字构成的框图称为“组成框图”。无需区别时，则按国家标准，统称“框图”。

2. 工作原理

当系统处于稳态时,此时电动机停转, $\Delta U = U_A - U_B = 0$, 即 $U_B = U_A$; 同时, $Q_1 = Q_2$, $H = H_0$ (稳态值), (它由 U_A 给定)。若设用水量 Q_2 增加, 则水位 H 将下降, 通过浮球及杠杆的反馈作用, 将使电位器 RP_B 的滑点上移, U_B 将增大; 这样 $\Delta U = (U_A - U_B) < 0$, 此电压经放大后, 使伺服电动机反转, 再经减速后, 驱动控制阀 V_1 , 使阀门开大 (这是安装时, 做成如此的), 从而使给水量 Q_1 增加, 使水位不再下降, 且逐渐上升并恢复到原位。这个自动调节的过程一直要继续到 $Q_1 = Q_2$, $H = H_0$ (回复到原水位), $U_B = U_A$, $\Delta U = 0$, 电动机停转为止。

3. 自动调节过程

水位控制系统的自动调节过程流程图如图 1-9 所示。

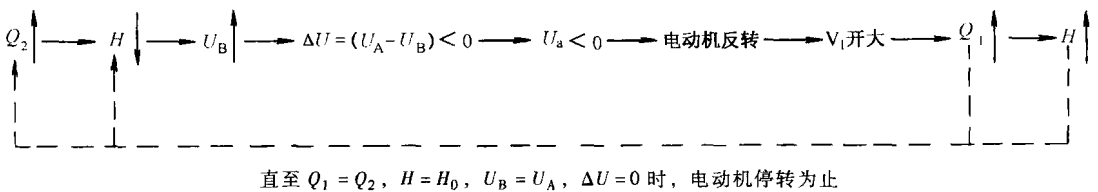


图 1-9 水位控制系统的自动调节过程

【例 1-2】 位置跟随系统。

(1) 系统的组成

图 1-10 为一位置跟随系统示意图。由图可见, 系统的控制对象为雷达天线。被控制量是雷达天线转动的角位移 θ_c 。驱动雷达天线的是伺服电动机, 因此, 永磁式直流伺服电动机 SM 及减速器为执行元件。为电动机提供电能的可逆直流调压电路为功率放大器。图中 2A 为由运算放大器构成的比例放大器, 它兼作电压放大器 (其比例系数为 $-R_1/R_0$) 和比较环节 (在其输入端有给定量与反馈量进行比较叠加)。该系统的给定指令 θ_i 由手轮转动给出, 它通过与手轮联动的给定电位器 RP_1 转化为电压信号 U_i , 因此 RP_1 为给定元件。图中 RP_2 为检测电位器, 它与雷达天线联动。被控量 θ_c 通过 RP_2 转化为反馈信号电压 U_{fb} 。为了保证跟随精度, 要求采用位置负反馈, 即要求 U_{fb} 与 U_i 极性相反, 而图中电位器 RP_1 与 RP_2 并接在同一个电源上, 又具有公共的接地端, 这样 U_{fb} 与 U_i 极性将相同, 于是增设了一

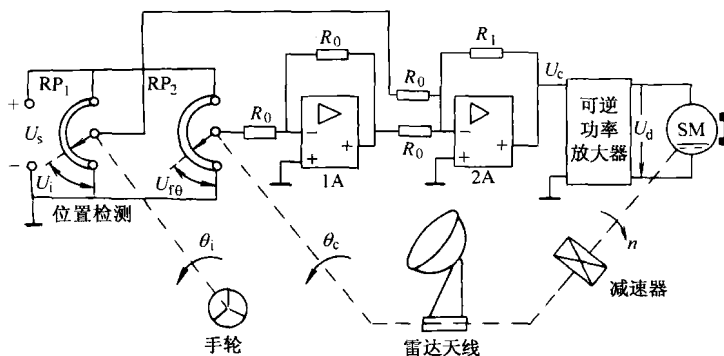


图 1-10 位置跟随系统示意图