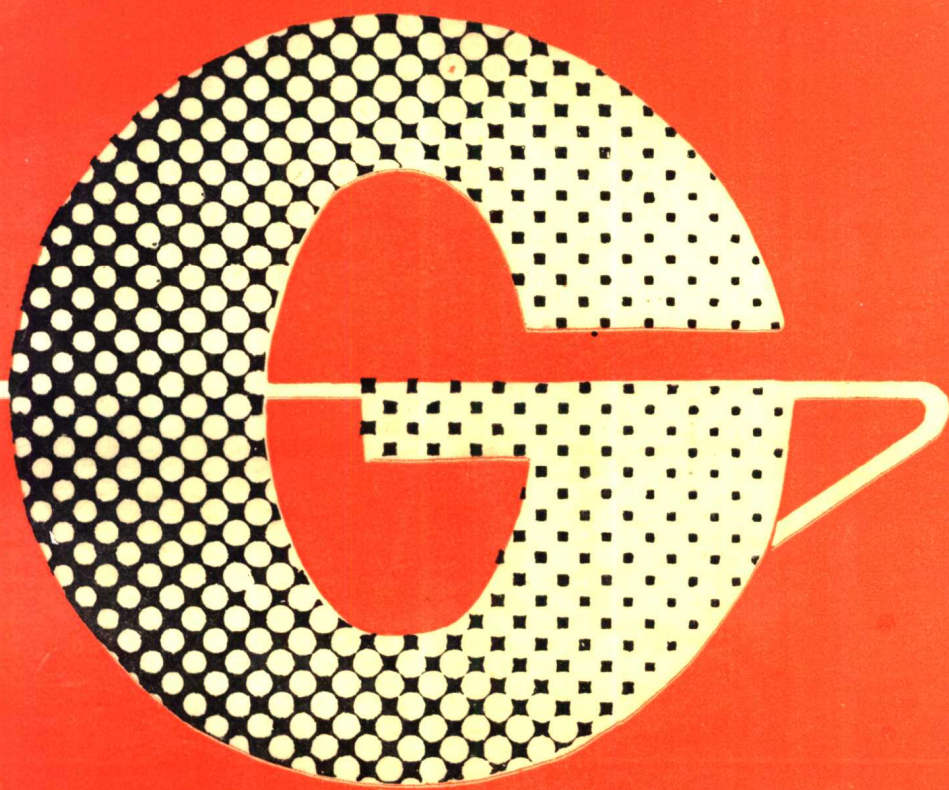


普通高等专科学校教育机电类规划教材

自动控制原理与系统

第2版



上海机械高等专科学校 孔凡才 编

机械工业出版社

普通高等专科学校教育机电类规划教材

自动控制原理与系统

第 2 版

上海机械高等专科学校 孔凡才 编



机械工业出版社

73.82
C157=2

本书是在1987年出版的高等专科学校试用教材《自动控制原理与系统》的基础上修订的,并根据课程新的教学大纲要求,增添了“可逆调速系统”和“离散系统”的内容。

本书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,结合直流调速系统和随动系统,分析自动控制系统的工作原理、自动调节过程;叙述自动控制系统数学模型的建立,系统的稳定性、稳态性能和动态性能的分析;系统的校正和工程设计以及系统的实例分析与调试。

本书的特点是自控原理与系统相结合,理论联系实际,注重方法论的叙述。章末附有小结、思考题和习题,并有较多的典型实际线路的读图练习。

本书为高等专科学校“电气技术”和“电气自动化”等电气工程类专业的规划教材。也可供职工大学、业余大学电气类专业学生选用,并可供工程技术人员参考。

本书第1版被评为第二届全国高等学校机电类优秀教材。

自动控制原理与系统

第2版

上海机械高等专科学校 孔凡才 编

*

责任编辑:贡克勤 版式设计:王颖

封面设计:姚毅 责任校对:陈立耘

责任印制:路琳

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张21.75·字数532千字

1996年10月第2版第10次印刷

印数 66 001—76 000 定价:18.50元

*

ISBN 7-111-05080-0/TM·638(课)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

ISBN 7-111-05080-0



9 787111 050803 >



著者简介

著者孔凡才1952年毕业于“国立上海高机”电机专业，1961年毕业于吉林大学物理专业。现任上海机械高等专科学校电气工程系教授，兼任全国电气技术专业教育委员会副主任委员，全国高专电气工程类专业协会副理事长等职。曾先后任电气工程系主任、高教研究室主任。主编的著作有：《晶闸管直流调速系统》、《自动控制原理与系统》、《电气工程师技术基础自检手册》、《自动控制系统及应用》等，其中《自动控制原理与系统》获第三届全国高等学校机电类优秀教材一等奖。负责《电气技术专业的改革与建设》课题获1992年优秀教学成果国家级二等奖，上海市一等奖。

前 言

本书是在1987年出版的高等专科学校试用教材《自动控制原理与系统》的基础上,根据高等工程专科〈自动控制原理与系统〉课程组在承德会议上制订的课程教学大纲的要求修订的。

本书以经典线性控制理论为主线,结合直流调速系统和随动系统,着重叙述自动控制系统的工作原理、自动调节过程、系统数学模型的建立、系统性能(稳定性、稳态性能和动态性能)的分析以及改善系统性能的途径。考虑到高等工程专科教学侧重技术应用的特点,编写时的着眼点是系统的性能分析和系统的调试(而不是系统设计)。修订时根据新大纲的要求,增添了“可逆调速系统”和“离散系统”。本课程的讲授时数为80学时。

由于自动控制理论比较抽象,学生不易接受,主要是不知自控理论用于何处和怎样具体应用。因此原书将自动控制理论与自动控制系统结合起来,以自控理论作为系统分析的工具,以实际系统分析作为理论的应用举例,来处理内容的安排。实践表明,这样的安排,有利于教学,也有利于理论联系实际,因此得到了同行专家和读者的充分肯定。基于上述原因,本书在修订时,将保持这一特点。

在编写时,考虑到高等专科学校的特点,力求做到理论联系实际,注重方法论的叙述,以期学生对自动控制理论的应用和对实际控制系统的分析、调试有一个完整的概念。书中章末还有指导复习的小结、思考题和习题,并附有较多的实例读图分析练习,以期读者能把理论知识应用于生产实际。书中的“小结”概括了每章的基本内容与要求;书中的例题与部分习题有的是后续内容的一部分,请读者加以注意。

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。

本书为高等工程专科学校“电气技术”、“电气自动化”等电气工程类专业的规划教材,也适用于职工大学、电视大学的电气工程类专业学生,并可供有关工程技术人员参考。

本书由上海机械高等专科学校孔凡才教授编写。限于编者的水平,书中难免存在错误和不妥之处,殷切期望广大读者给予指正。(来信请寄〈200031〉上海机械高等专科学校孔凡才收)。

编者

1995年8月于上海

目 录

前言		第四节 拉氏变换应用举例	104
第一章 自动控制系统概述	1	小 结	110
第一节 引言	1	习 题	111
第二节 开环控制和闭环控制	2	第五章 自动控制系统的数学模型	112
第三节 自动控制系统的组成	4	第一节 系统的微分方程	112
第四节 自动控制系统的分类	8	第二节 传递函数	116
第五节 自动控制系统的性能指标	10	第三节 系统框图(结构图)	117
第六节 研究自动控制系统的方法	12	第四节 典型环节的传递函数和 功能框	119
小 结	13	第五节 自动控制系统的框图	132
思考题	13	第六节 框图的变换、化简和系统闭环 传递函数的求取	139
习 题	14	小 结	147
第二章 直流调速系统的工作原理	17	思考题	149
第一节 有静差晶闸管直流调速系统	17	习 题	149
第二节 小功率有静差直流调速系统 实例分析	26	读图练习	153
第三节 无静差直流调速系统	32	第六章 频率特性	155
第四节 速度和电流双闭环直流调速 系统	40	第一节 频率特性的基本概念	155
第五节 可逆直流调速系统	47	第二节 频率特性与传递函数的关系	157
小 结	57	第三节 频率特性的表示方式	158
思考题与习题	59	第四节 典型环节的对数频率特性	163
读图练习	60	第五节 系统的开环对数频率特性	171
大型作业	68	第六节 系统的闭环频率特性	179
第三章 随动系统的工作原理	69	小 结	181
第一节 随动系统的组成和工作原理	69	思考题	183
第二节 随动系统的控制特点与实例 分析	83	习 题	183
小 结	86	第七章 自动控制系统的稳定性分析	187
思考题	86	第一节 系统稳定性概念	187
读图练习	87	第二节 系统稳定的充要条件	189
第四章 拉普拉斯变换及其应用	93	第三节 代数稳定判据	192
第一节 拉氏变换的概念	93	第四节 奈氏(Nyquist)稳定判据	194
第二节 拉氏变换的运算定理	97	第五节 稳定裕量与系统相对稳定性	196
第三节 拉氏反变换	102	第六节 对数频率稳定判据	197
		第七节 自动控制系统的稳定	

性分析	199	小 结	264
小 结	207	思考题	265
思考题	208	习 题	266
习 题	209	第十一章 自动控制系统的设计方法 ...	268
第八章 自动控制系统的稳态性能		第一节 系统的简化处理和系统固有	
分析	211	部分频率特性的确定	268
第一节 系统稳态误差的概念	211	第二节 系统预期对数频率特性	
第二节 系统稳态误差与系统型别、		的建立	271
系统开环增益间的关系	213	第三节 自动控制系统工程设计举例与	
第三节 系统稳态误差与输入信号		分析	275
间的关系	214	小 结	286
第四节 由系统的开环对数频率特性去		思考题	287
分析系统的稳态性能	217	大型作业	288
第五节 随动系统的稳态性能分析	217	第十二章 离散系统	289
第六节 自动调速(恒值控制)系统的		第一节 离散系统概述	289
稳态性能分析	218	第二节 采样与保持	290
小 结	222	第三节 z 变换	293
思考题	222	第四节 差分方程与脉冲传递函数	300
习 题	223	第五节 离散系统框图分析与闭环脉	
第九章 自动控制系统的动态性能		冲传递函数的求取	305
分析	224	第六节 离散系统的性能分析	309
第一节 系统跟随动态指标的求取及		小 结	314
分析	224	思考题	315
第二节 系统抗扰动态指标的求取		习 题	316
及分析	230	第十三章 自动控制系统的分析与	
第三节 系统动态性能与开环频率特性		调试	317
间的关系	236	第一节 自动控制系统的分析步骤	317
第四节 系统动态性能与闭环频率特性间		第二节 自动控制系统的调试方法	320
的关系	238	第三节 自动控制系统的维护使用和	
第五节 高阶系统动态性能的估算	240	故障检查	323
小 结	241	小 结	325
思考题	242	思考题	325
习 题	242	习 题	325
第十章 自动控制系统的校正	244	附录	328
第一节 校正装置	244	附录 A 常用文字符号	328
第二节 串联校正	248	附录 B 自动控制技术术语的中、	
第三节 反馈校正	256	英名词对照	331
第四节 顺馈补偿	261	参考文献	341

第一章 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。

第一节 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, 在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压级的单位分贝) 和 1932 年奈魁斯特 (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, 并借助于数学方面的成果, 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。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, 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, 以及计算机辅助设计 (CAD) 和计算机辅助制造 (CAM) 等高新技术。如今随着时间的推移, 将会出现更多的高新产品和高新技术。

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。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,结合直流调速系统和随动系统,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(稳定性、稳态性能和动态性能),探讨改善系统性能的途径(系统校正),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,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。

第二节 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。

一、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,这样的系统称为开环控制系统。

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,而不去检测其实际加工的程度。

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。

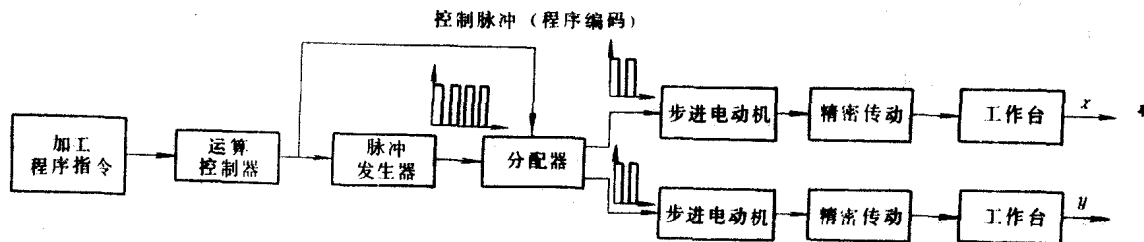


图 1-1 数控加工机床示意图

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)。

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。

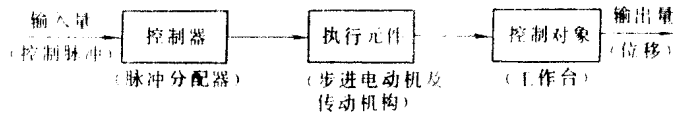


图 1-2 数控加工机床开环控制框图

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。

二、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，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 1-3 为电炉箱恒温自动控制系统。

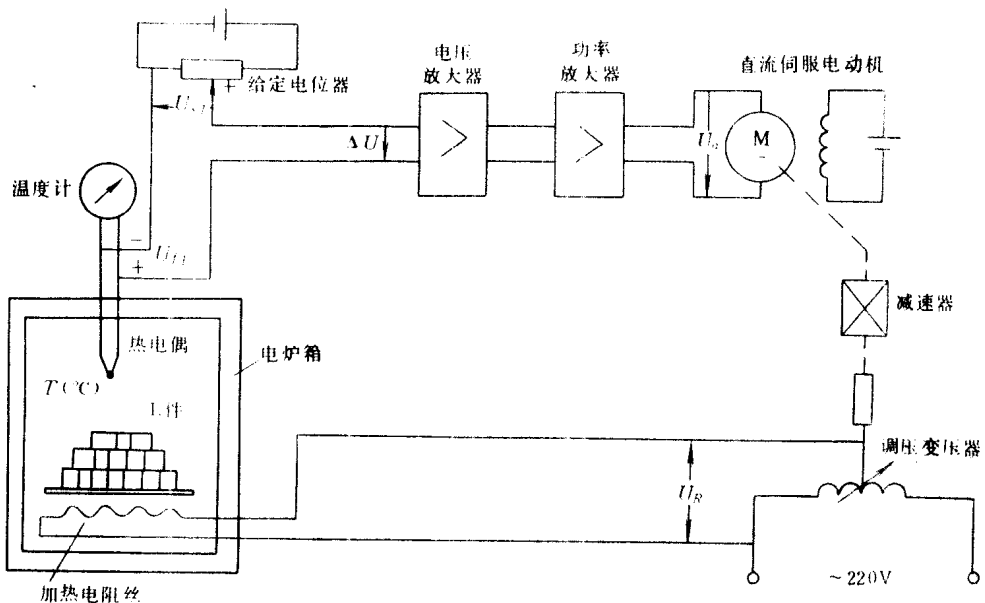


图 1-3 电炉箱恒温自动控制系统

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。

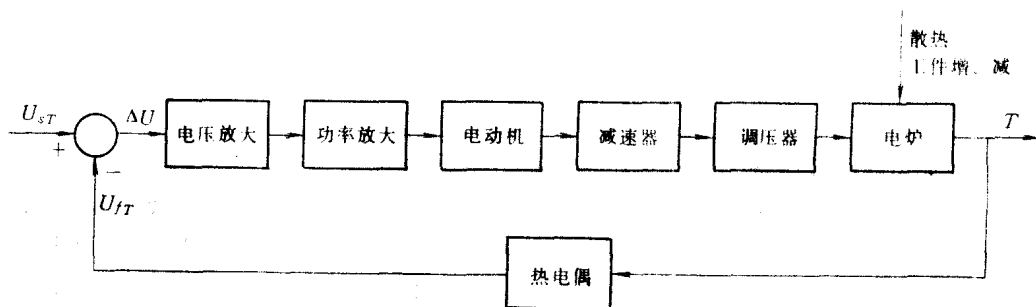


图 1-4 电炉箱自动控制框图

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。

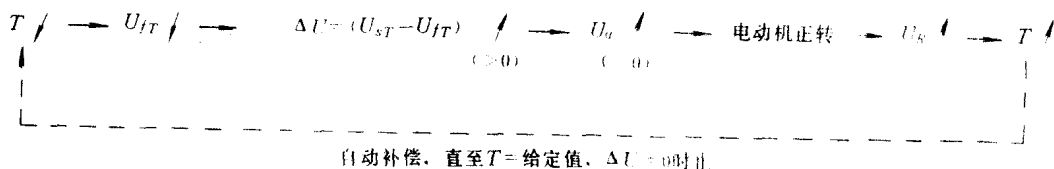


图 1-5 炉温自动调节过程

反之, 当炉温偏高时, 则 ΔU 为负, 经放大后使电动机“反”转, 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, 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。

第三节 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。

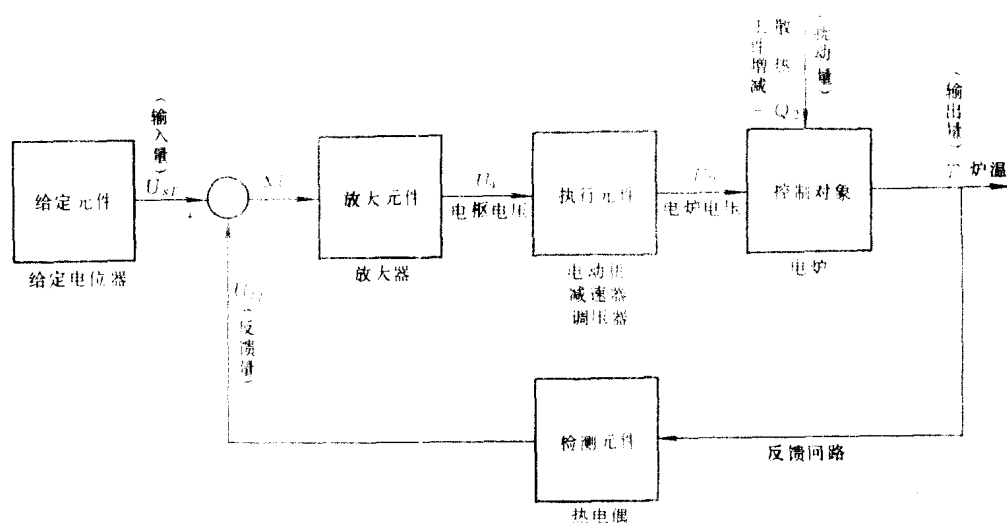


图 1-6 自动控制系统的框图

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迭加，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_{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 输入量由哪个元件给定的? 反馈量与给定量如何进行比较的?
- 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】 水位控制系统。

图 1-7 为一水位控制系统的示意图。

(1) 系统的组成

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)。

控制 Q_1 的是由电动机驱动的控制阀门 V_1 , 因此, 电动机—减速箱—控制阀便构成执行元件。电动机的供电电压 $U = U_A - U_B$, 其中 U_A 由给定电位器 RP_A 给定, (电位器 R_A 为给

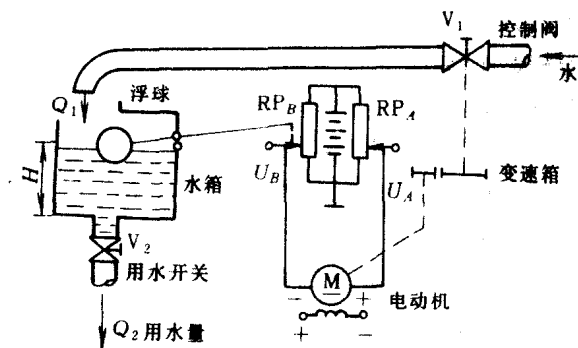


图 1-7 水位控制系统

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。

根据以上的分析, 便可画出组成系统的框图, 如图 1-8 所示。

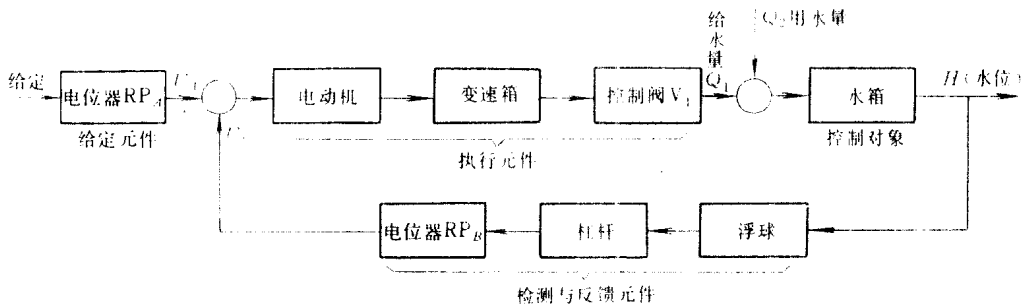


图 1-8 水位控制系统框图

(2) 工作原理

当系统处于稳态时, 此时电动机停转, $U = U_A - U_B = 0$, 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 $U = (U_A - U_B) < 0$, 此电压使电动机反转, 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), $U_B = U_A$, $U = 0$, 电机停转为止。其自动调节过程流程图如图 1-9 所示。

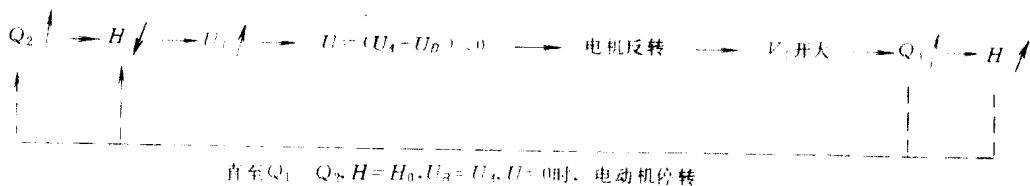


图 1-9 水位控制的自动调节过程

【例 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_{f0} 。为了保证跟随精度, 要求采用位置负反馈, 即要求 U_{f0} 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_{f0} 与 U_i 极性将相同, 于是增设了

一个反相器 1A [其比例系数为 $(-R_0/R_0 = -1)$]。这样在电压放大器输入端进行比较的信号为 U_i 与 $(-U_{f\theta})$ ，两者极性相反。根据以上分析，便可画出如图 1-11 所示的雷达天线位置跟随系统框图。

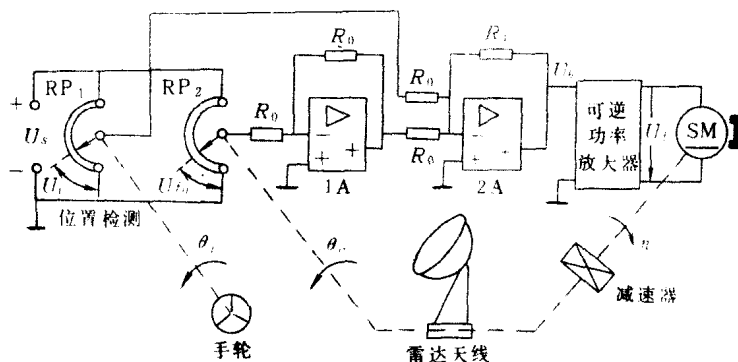


图 1-10 位置跟随系统示意图

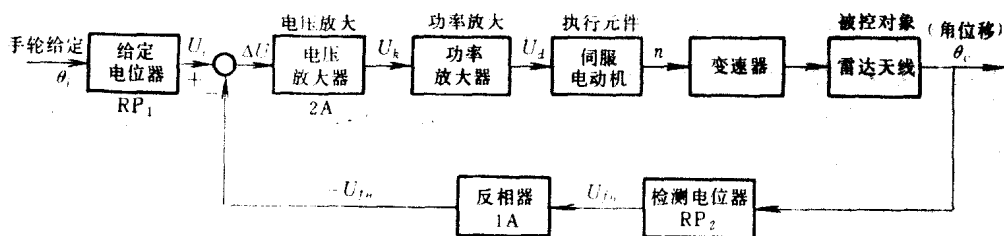


图 1-11 雷达天线位置跟随系统框图

(2) 工作原理

当手轮逆时针转动时，设 θ_i 为增加，并设 U_i 此时减小，则偏差电压 $\Delta U = (U_i - U_{f\theta})$ 将小于零。由于 2A 为反相端输入，因此其输出 U_k 将为正值，使 U_d 为正值，设此时电动机转动将带动雷达天线作逆时针转动。这过程要一直继续到 $\theta_c = \theta_i$ ， $\Delta U = 0$ ， $U_k = 0$ ， $U_d = 0$ ，电动机停转才为止。其自动调节过程如图 1-12 所示。

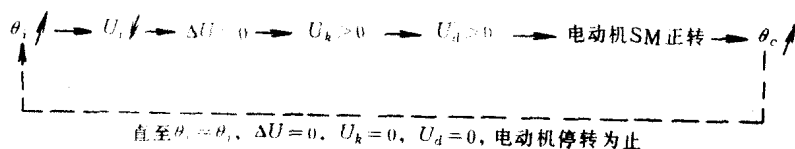


图 1-12 雷达天线位置跟随自动调节过程

第四节 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。

一、按输入量变化的规律分类

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。此外还有恒压（液压）、稳压（电压）、稳流（电流）、恒频（电频率）的自动控制系统也都是恒值控制系统。图 1-3 所示的温度控制系统和图 1-7 所示的水位控制系统都是恒值控制系统。

2. 随动系统(Follow-Up Control System)〔又称伺服系统(Servo-System)〕

随动系统的特点是：输入量是变化着的（有时是随机的），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。

这种控制系统的另一个特点是，可以用功率很小的输入信号操纵功率很大的工作机械（这只要选用大功率的功放装置和电动机即可）；此外还可以进行远距离控制。

随动系统在工业和国防上有着极为广泛的应用，例如船闸牵曳系统，刀架跟随系统，火炮控制系统，雷达导引系统和机器人控制系统等等。图 1-10 即为一雷达天线位置跟随系统。

3. 过程控制系统(Process Control System)

生产过程通常是指把原料放在一定的外界条件下，经过物理或化学变化而制成产品的过程。例如化工、石油、造纸中的原料生产；冶炼、发电中的热力过程等。在这些过程中，往往要求自动提供一定的外界条件，例如温度、压力、流量、液位、粘度、浓度等参量在一定的时间内保持恒值或按一定的程序变化。对其中的每一个局部，它们可能是一种随动控制系统，也可能是按程序指令变化的恒值控制系统。

二、按系统传输信号对时间的关系分类

1. 连续控制系统(Continuous Control System)

连续控制系统的特点是各元件的输入量与输出量都是连续量或模拟量。〔所以它又称为模拟控制系统(Analogue Control System)〕。图 1-3 所示的恒温控制系统就是连续控制系统。连续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)

离散系统又称采样数据系统(Sampled-Data 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或数字量。通常，采用数字计算机控制的系统都是离散系统。离散系统的运动规律通常可用差分方程来描述。图 1-1 所示的系统，就是离散系统。

三、按系统的输出量和输入量间的关系分类

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。线性系统的最重要的特性，是可以应用叠加原理。叠加原理说明，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的响应的叠加。

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、含有库伦摩擦等非线性特性的元件），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（分析非线性系统的工程方法常用“描述函数”和“相平面法”）。

四、按系统中的参数对时间的变化情况分类

1. 定常系统（又称时不变系统）(Time-Invariant System)

定常系统的特点是系统的全部参数不随时间变化，它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。例如宇宙飞船控制系统，就是时变控制系统的一个例子（宇宙飞船飞行过程中，飞船内燃料质量、飞船受的重力，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去进行分类。本书根据课程教学大纲的要求，只讨论定常线性系统（主要是调速系统和随动系统）。

第五节 自动控制系统的性能指标

自动控制系统的性能通常是指系统的稳定性、稳态性能和动态性能。现分别介绍如下：

一、系统的稳定性(Stability)

当扰动作用（或给定值发生变化）时，输出量将会偏离原来的稳定值，这时，由于反馈环节的作用，通过系统内部的自动调节，系统可能回到（或接近）原来的稳定值（或跟随给定值）稳定下来，如图 1-13a 所示。但也可能由于内部的相互作用，使系统出现发散而处于不稳定状态，如图 1-13b 所示。显然，不稳定的系统是无法进行工作的。因此，对任何自动控制系统，首要的条件便是系统能稳定正常运行。对系统的稳定性将在第七章中进行分析。

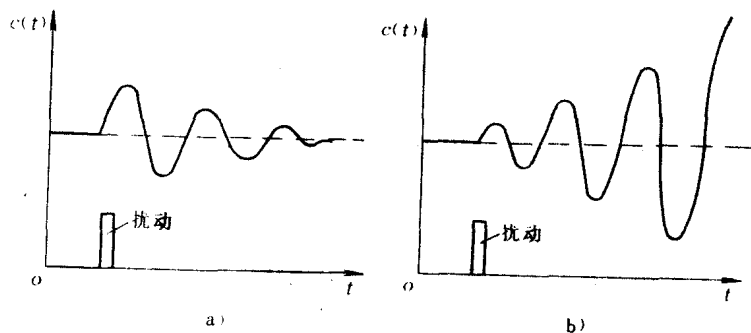


图 1-13 稳定系统和不稳定系统

a) 稳定系统 b) 不稳定系统

二、系统的稳态性能指标(Steady-State Performance Specification)

当系统从一个稳态过渡到新的稳态，或系统受扰动作用又重新平衡后，系统会出现偏差，这种偏差称为稳态误差 (e_{ss}) (Steady-State Error)。系统稳态误差的大小反映了系统的稳态精度（或静态精度）(Static Accuracy)，它表明了系统的准确程度。稳态误差 e_{ss} 越小，则系统的稳态精度越高。若 $e_{ss} = 0$ ，则系统称为无静差系统。如图 1-14b 所示。反之，若 $e_{ss} \neq 0$ ，则称为有静差系统。如图 1-14a 所示。