

控制工程基础

孟宪蕃 主编



航空工业出版社



控制工程基础

孟宪蕃 主编

航空工业出版社

1993

(京)新登字161号

内 容 简 介

本书精辟地阐述了经典控制理论,全书共分七章,内容包括:控制系统的基本概念,控制系统的数学模型,分析线性系统的时域法、根轨迹法、频率法和频率法校正,线性离散系统的分析与综合,以及分析非线性系统的描述函数法。为了巩固所学的知识,每章后均备有一定数量的习题。书末附有拉氏变换一节供查用,并附有用上述几种方法分析和设计自动控制系统的计算机算法和通用程序,这些程序兼有作图功能,使用方便。

本书可作为机械、仪表、电气等非控制专业的本科生教材,也可供控制类专业的本科生以及从事自动控制工作的科技人员参考。

控 制 工 程 基 础

孟宪菁 主编

航空工业出版社出版发行
(北京市安定门外小关东里14号)

—邮政编码: 100029—

全国各地新华书店经售
南京航空学院印刷厂印刷

1993年3月第1版	1993年3月第1次印刷
开本: 787×1092 1/16	印张: 17.825
印数: 1—1900	字数: 439千字

ISBN 7-80046-486-5/G·076

定 价: 5.00 元

前 言

随着现代科学技术的迅速发展,自动控制技术在机械工程中的应用越来越广泛、深入。为了适应当前科学技术发展的新形势,机械类专业均开设了有关控制理论方面的专业基础课。为了满足教学的需要,1987年我们根据“控制工程基础”教学大纲的要求,结合多年的教学实践,编写了本教材,并在以后五年的教学中,多次做了必要的补充与修改。

本书作为专业基础课教材,编写中力求通过既简单又典型的实例,着重阐明控制工程的基本概念、基本原理与基本方法,因此所举的实例和习题不限于纯机械,而是包含了机、电、液等不同的类型。

全书共分七章:第一章阐述控制系统的基本概念;第二章研究控制系统的数学模型;第三章至第五章分别介绍分析和设计自动控制系统的时域法、根轨迹法和频率法;第六章讨论分析和设计线性离散系统的方法;第七章介绍分析非线性系统的描述函数法,各章内容都经过了精选。为了巩固所学的知识,每章后均备有一定数量的习题。附录1为拉氏变换,供读者查用。附录2为用上述几种方法分析和设计自动控制系统的算法和通用程序,这些程序简短并具有作图功能,便于工程应用。

本教材在叙述方法上尽量做到由浅入深,条理清晰,符合读者的逻辑思维并富有启发性,以便读者自学。

本教材由南京航空学院孟宪嵩任主编。参加编写的有孟宪嵩(第一章、第六章和附录1),高福祥(第二章),邓为民(第三章1至4节和第五章),陈兴盛(第三章5、6节、第四章和第七章),潘高志(附录2)。全书由北京理工大学冯淑华副教授主审,在审稿过程中冯淑华同志提出了不少宝贵意见,在此表示衷心的感谢。在本书出版的过程中,还得到了其他有关同志的大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,恳请读者提出指正。

编 者

1992.9

目 录

第一章 控制系统的一般概念	(1)
§ 1-1 引 言.....	(1)
§ 1-2 自动控制系统的基本概念.....	(2)
§ 1-3 自动控制系统的分类及组成.....	(6)
§ 1-4 对自动控制系统的基本要求.....	(11)
习题	(15)
第二章 控制系统的数学模型	(17)
§ 2-1 引 言.....	(17)
§ 2-2 微分方程的建立及线性化.....	(18)
§ 2-3 传递函数.....	(27)
§ 2-4 结构图.....	(36)
§ 2-5 信号流图.....	(45)
习题	(50)
第三章 时域分析法	(54)
§ 3-1 控制系统的时域性能指标.....	(54)
§ 3-2 一阶系统的时间响应.....	(55)
§ 3-3 二阶系统分析.....	(57)
§ 3-4 高阶系统的阶跃响应.....	(65)
§ 3-5 控制系统的稳定性与代数判据.....	(67)
§ 3-6 稳态误差的分析和计算.....	(73)
习题	(83)
第四章 根轨迹法	(86)
§ 4-1 根轨迹方程.....	(86)
§ 4-2 绘制根轨迹的基本法则.....	(90)
§ 4-3 广义根轨迹.....	(98)
§ 4-4 用根轨迹分析系统的性能.....	(104)
习题	(108)
第五章 频率响应法	(111)
§ 5-1 频率特性.....	(111)

§ 5-2 典型环节的频率特性·····	(116)
§ 5-3 系统的开环频率特性·····	(125)
§ 5-4 频域稳定判据·····	(134)
§ 5-5 用频率特性分析控制系统的性能·····	(144)
§ 5-6 控制系统的频率法设计和校正·····	(150)
习题·····	(166)
第六章 离散系统理论 ·····	(171)
§ 6-1 离散控制系统的基本概念·····	(171)
§ 6-2 信号采样和保持的数学描述·····	(177)
§ 6-3 Z 变换理论·····	(183)
§ 6-4 离散系统的数学模型·····	(191)
§ 6-5 离散系统的稳定性与稳态误差·····	(203)
§ 6-6 离散系统动态性能分析·····	(210)
§ 6-7 离散系统的校正与设计·····	(213)
习题·····	(220)
第七章 非线性系统分析 ·····	(223)
§ 7-1 非线性控制系统的概念·····	(223)
§ 7-2 常见的非线性特性及其对系统运动的影响·····	(225)
§ 7-3 描述函数法·····	(229)
§ 7-4 用描述函数分析非线性系统·····	(238)
习题·····	(244)
参考文献 ·····	(246)
附录 1 拉氏变换 ·····	(247)
附录 2 控制系统的计算机辅助分析与设计 ·····	(255)

第一章 控制系统的一般概念

§ 1-1 引言

一、自动控制技术

近几十年来,自动控制技术得到了迅速的发展,并且在工农业生产、交通运输、国防建设和航空、航天事业等许多部门中获得了广泛的应用。如今,它已经渗透到了许多学科领域,成为促进当代生产发展和科学技术进步的重要因素,是最有发展前途的技术科学之一。

所谓自动控制,就是在没有人直接参与的情况下,利用控制装置使被控对象如机器、设备或生产过程中的某些物理量自动地按照预定的要求而变化。

例如,导弹能准确命中目标,气象、通信等各类人造卫星能在预定的轨道上运行并正确地完成任务,宇宙飞船能在38万公里之遥的月球上实现软着陆并安全返回,数控机床能按事先排定的工艺程序加工工件,另外,化学反应塔内的浓度、炼钢炉的炉温、锅炉设备中的压力能自动维持恒定,各种机器人具有神奇的本领等等,都是自动控制技术的应用实例。

在军事工业中应用自动控制技术,对提高武器的命中率和战斗力,加强国防建设,起着特别重要的作用。在国民经济各部门中广泛应用自动控制技术的结果,使生产过程实现了自动化,已经把人们从高温、高压、有害、有毒的危险工作环境中解放出来,大大改善了人们的劳动条件,减轻了劳动强度,提高了产品质量和劳动生产率。如今,自动控制技术又为人类征服宇宙开辟了美好的前景。近20年来,计算机的发展异常神速,使计算机参与控制不仅成为现实,而且日益广泛。由于计算机具有大量存储信息的能力,强大的逻辑判断功能以及快速运算的本领,使得自动控制技术如虎添翼,无论在理论上或应用上都产生了巨大的飞跃,其发展前途是不可估量的。

二、自动控制理论

自动控制理论是研究自动控制共同规律的科学技术,根据自动控制理论发展的不同阶段与内容,可分为经典控制理论和现代控制理论两大部分。

经典控制理论也就是自动控制(调节)原理,是本世纪40年代到50年代形成的一门独立学科。早期的控制系统比较简单,手解微分方程就可以分析它们的性能,因此是时域的方法。第二次世界大战前后,由于生产和军事的需要,出现了较复杂的控制系统,手解高阶微分方程遇到了困难,促进了自动控制原理的大发展。1932年奈奎斯特(H. Nyquist)创立了稳定判据。在此基础上,1945年伯德(H. W. Bode)提出了分析控制系统的一种图解方法即频率法,使研究控制系统的方法由初期的时域转到了频域。随后,1948年伊凡思(W. R. Evans)又创立了另一种图解法即根轨迹法。到此,经典控制理论已经比较完善。由于频率法和根轨迹法不用手解微分方程就能分析和设计高阶系统,故至今仍被工程界广泛应用。50年代中,经典控制理论又添加了非线性系统理论和离散系统理论,形成了完整的理论体系。

经典控制理论是以单输入单输出线性定常系统作为主要研究对象的。它的研究方法是以传递函数作为系统的基本数学描述,以频率法和根轨迹法作为分析和设计系统的两种方法。它的基本内容是研究系统的稳定性,在给定输入下系统性能的分析和在给定指标下系统的设计。多年来,经典控制理论在工程实践中得到了成功的应用。经典控制理论明显地具有依靠图表和特性曲线用手工进行分析和设计的特点,这是与当时生产过程局部自动化的发展现状以及计算机尚处于初期阶段密切相关的。如今可以用计算机代替某些图表和特性曲线,对系统进行辅助分析和设计,它为经典控制理论增添了新的光彩。

现代控制理论是60年代前后开始形成的。当时,由于人类探索空间以及军事上的需要,各种高速高性能的飞行器相继出现,要求控制理论解决多输入多输出、非线性、时变、最优和自适应等控制系统的设计问题,这些要求是经典控制理论无法解决的。与此同时,泛函分析、线性代数等现代数学以及数字计算机的发展,又为现代控制理论准备了数学基础和计算工具,促成了现代控制理论的诞生。

现代控制理论研究的对象要广泛得多。它适于研究多输入多输出系统,这些系统可以是线性的、非线性的、定常的或时变的。它的研究方法是以状态空间表达式作为系统的基本数学描述,以状态空间法为主要研究方法,研究系统内部状态的运动规律,是一种时域的方法。它分析和设计的目的是寻找一个最优的控制规律,以使系统的性能指标达到最佳化。最优控制、自适应控制、最优滤波、系统辨识都是现代控制理论研究的主要课题。目前现代控制理论又向大系统理论和人工智能等方面继续发展。

必须指出,现代控制理论虽然解决了经典控制理论所不能解决的许多工程问题和理论问题,但这并不意味着经典控制理论可以被抛弃。因为许多工业系统宁愿使用性能次最佳、但结构简单、成本低的单输入单输出系统。所以经典控制理论今后仍会继续起理论指导作用,现代控制理论可以补其不足,二者相辅相成,才能不断促进控制理论和应用的发展。

顺便指出,自动控制理论不仅适用于工程技术领域。事实上,它已在生物学、医学、经济学甚至社会科学中获得应用,并引起越来越广泛的重视。

§ 1-2 自动控制系统的基本概念

控制理论研究的对象是各种自动控制系统。下面我们先说明什么是自动控制系统,然后通过开环控制系统和闭环控制系统,介绍自动控制系统的一些基本概念和名词术语。

一、自动控制系统

工业自动控制系统,是指由一些相互作用和相互依赖的元部件与被控对象结合成的、能够对被控对象的某些物理量进行自动控制的一个有机整体。

一个自动控制系统可以分成被控对象和控制装置两大部分。被控对象是指要求实现自动控制的机器、设备或生产过程。例如机床、锅炉以及化工生产过程等。控制装置是指除了被控对象以外,自动控制系统中所有元部件的总合,它是能够对被控对象起控制作用的设备总称。自动控制系统就是靠控制装置按照预定的控制规律,给被控对象以适当的控制作用,来完成特定任务的。

如今,自动控制系统的概念已经延伸,它不仅仅指工程系统,也可以是生物系统、或既

非工程也非生物的系统。例如发电机的电压调节系统是一个系统；一个生物体，一个社会组织或经济体系也是一个系统。

自动控制系统可以按照开环、闭环、复合、最优、自适应、自学习等多种方式实现自动控制。我们只介绍按照开环和闭环两种基本控制方式实现自动控制的系统，即开环控制系统和闭环控制系统。

二、开环控制系统

输出量与输入量之间没有反向联系，只靠输入量对输出量单方向控制的系统叫做开环控制系统。目前在国民经济各部门中应用的开环控制系统有自动售货机、自动洗衣机、产品生产自动流水线、包装机及线切割机。等。

图 1-1 所示的直流电机转速控制系统就是一个开环控制系统，它的任务是控制直流电机以恒定的转速带动负载工作。这种系统在起重、运输机械以及许多辅助传动设备中被广泛应用。系统的工作原理是：调节电位器 W 的滑臂触点 p ，则给定电压 u_r 就

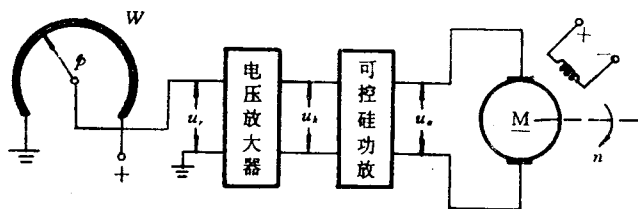


图 1-1 开环直流电机转速控制系统

改变，从而改变了电压放大器和可控硅功率放大器的输出电压 u_s 和 u_a ，由于他激直流电机的转速 n 与电枢电压 u_a 成正比，于是就可以控制电机以不同的恒定转速带动负载工作。

电机输出轴的转速 n 是被控对象中需要严格加以控制的物理量，称为被控制量（或输出量、输出信号）。电位器滑臂的位置 p 与电动机的转速 n 相对应，它相当施加于控制系统中的命令，控制输出量按要求的值变化，所以 p 的位置称为系统的控制量（或输入量、输入信号）。通常，系统的输入量和输出量之间应保持一定的函数关系。系统在特定输入下的输出，又称为系统对该特定输入的响应。这个系统在一般情况下是能够正常工作的，但是在实际运行中，由于电网电压的波动、负载的变动、各元部件内部参数的变化等等，都会使被控制量偏离希望值。上述这些破坏控制量与被控制量之间正常函数关系的因素，称为系统的扰动（或干扰）。扰动有内扰与外扰之分，如果扰动来自系统的外部，例如电网电压的波动和负载的变化，称为外扰。如果扰动产生在系统内部，如系统中各元部件参数的变化，称为内扰，扰动也是系统的一种输入量。

图 1-1 的系统，只有控制量 p 的位置对被控制量 n 的单向控制作用，而被控制量 n 对控制量 p 的位置没有任何影响和联系。在控制理论中，把这种输出量与输入量之间无反向联系，只靠输入量对输出量单方向控制的系统叫做开环控制系统。

开环直流电机转速控制系统可以用图 1-2 所示的框图表示。图中，用方块代表系统中

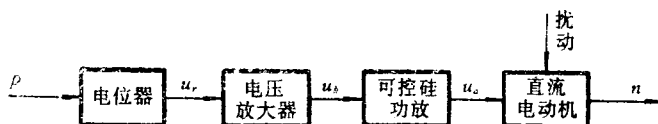


图 1-2 开环直流电机转速控制系统框图

具有相应职能的元部件，各元部件的输入量和输出量是系统中传递的信号，分别用指向方块和离开方块的箭头表示。实际系统中存在着各种扰动，且扰动可以作用在系统中的不同地方，但是在框图中，为了表示上的方便，常把所有的扰动集中起来，用一个作用在被控对象上的箭头表示。

在开环直流电机转速控制系统中，电机是被控对象，电位器、电压放大器和可控硅功率放大器可以对直流电机的转速起控制作用，总称为控制装置。因此，凡开环控制系统都可以用图 1-3 所示的框图表示。

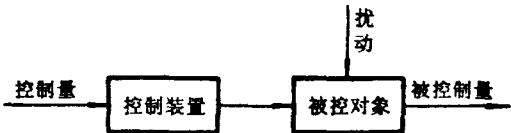


图 1-3 开环控制系统的框图

三、闭环控制系统

输出量与输入量之间有反向联系，靠输入量与主反馈信号（输出量的函数）之间的偏差对输出量进行控制的系统叫闭环控制系统。在国民经济各部门中广泛应用的自动控制系统，大多数是闭环控制系统。

在介绍闭环控制系统之前，先说明反馈这一术语的意义十分必要。通常，把元件或系统输出量的全部或一部分回送到输入端，以增强或减弱输入信号的效应称为反馈。凡使输入信号增强者称为正反馈，使输入信号减弱者称为负反馈。

在图 1-1 所示开环系统的基础上，加一条从系统输出量到输入量之间的负反馈通道，可以组成闭环直流电机转速控制系统，如图 1-4 所示。这种系统在工业机械的主传动中被广泛应用，例如自动车床主轴的转速控制系统、轧钢机轧辊的转速控制系统、龙门刨床工作台的拖动系统等。

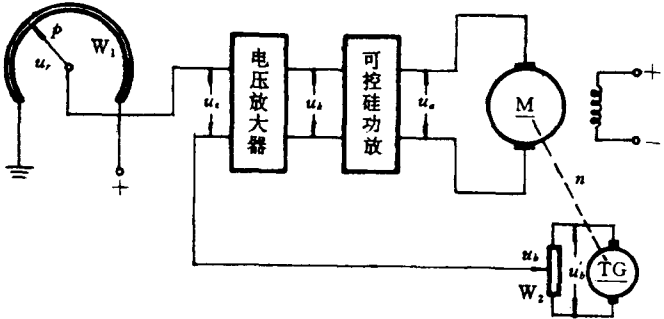


图 1-4 闭环直流电机转速控制系统

系统中的给定电位器 W_1 是给定元件，它给出系统的输入量 u_r ，其设置与电动机转速的希望值相对应。直流测速发电机 TG 是测量系统输出量的测量元件，因为当它与电机同轴安装时，其电枢电压 u'_s 与电动机的转速 n 成正比。分压电位器 W_2 取 u'_s 的一部分 u_b 反馈到放大器的输入端，与输入量 u_r 相比较。我们把直接取自系统输出端 n 、经过测量和变换、反馈到系统输入端的信号 u_b 叫做主反馈信号，相应的反馈叫做主反馈，主反馈建立了输出量与输入量之间的反向联系。给定电压 u_r 与主反馈信号 u_b 的差 $u_c = u_r - u_b$ 叫做偏差信号。显然，系统是根据偏差信号的大小，控制直流电机以希望的转速稳定运行的。改变电位器滑臂的位置 p ，可以调节电动机恒定的转速 n 。

在图 1-4 所示的系统中，输出量通过主反馈与输入量有反向联系，系统是靠输入量与主反馈信号之间的偏差对输出量进行控制的，在控制理论中，把这类系统叫做闭环控制系统。

在闭环直流电机转速控制系统中，一旦因为各种扰动作用使电机的转速偏离了希望值，

譬如负载增加使电机转速 n 下降, 这一速度的变化立即由测速机检测出来, 使反馈电压 u_b 降低, u_b 与给定电压 u_r 比较后, 偏差电压 $u_c = u_r - u_b$ 就会增加, 最终使电机的转速回升, 重新趋于希望值。若干扰使电机转速 n 增加, 则调节过程相反。总之, 系统可以自动保持电机转速近似不变。因此与图 1-1 的开环系统相比, 该闭环系统由干扰引起的转速误差要小得多。

闭环直流电机转速控制系统可以用图 1-5 所示的框图表示。通常, 把从系统输入量到

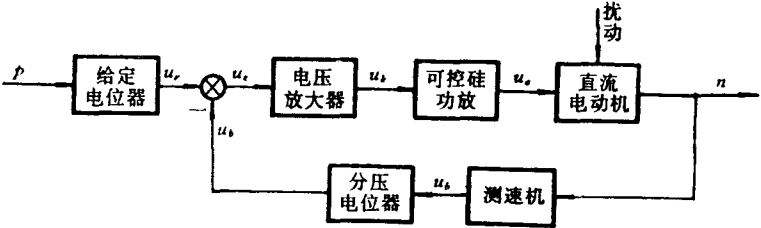


图 1-5 闭环直流电机转速控制系统框图

输出量之间的通道称为前向通道；从输出量到主反馈信号之间的通道称为主反馈通道。主反馈信号等于输出量的系统叫单位反馈系统；主反馈信号不等于输出量的系统叫非单位反馈系统。主反馈闭合了除系统输入信号和干扰信号以外的所有其它信号，它所形成的闭合回路称为主回路。有的系统还存在着只闭合了系统中一部分信号的局部反馈和相应的内回路，这主要是为改善系统性能而加入的。

“⊗”号代表比较元件或比较点，它的输出量等于各输入量的代数和，各输入量若为正号可以不标，若为负号必须在箭头旁标注“-”。在一个具体系统中，不一定有一个“⊗”号就有一个比较元件，在大多数控制系统中，综合信号的任务是由给定元件和测量元件组成的误差检测器或由综合线路来完成的，这一点由本例显而易见。“⤵”号叫引出点（测量点），它表示信号在此分两路传递。

在闭环控制系统中，为了检测偏差，必须直接或间接地检测出输出量，并将其变换为与输入量相同的物理量，以便与输入量相比较，得出偏差信号。所以闭环系统必须具有测量元件、给定元件和比较元件。在该系统中，给定电位器是给定元件，测速发电机和分压电位器是测量变换元件，综合电路完成了比较输入量与主反馈信号的任务。闭环控制系统是利用偏差作为控制信号的，但只有放大的了的偏差信号才能推动执行元件对被控对象进行控制，这里电压放大器就是可以使微弱的偏差信号产生很强烈控制作用的放大元件。可控硅功率放大器可以使被控对象运转起来，起着执行控制任务的作用，称为执行元件。上述元件共同组成了控制装置，电动机是被控对象。因此，凡闭环控制系统都可以用图 1-6 所示的典型框图表示。

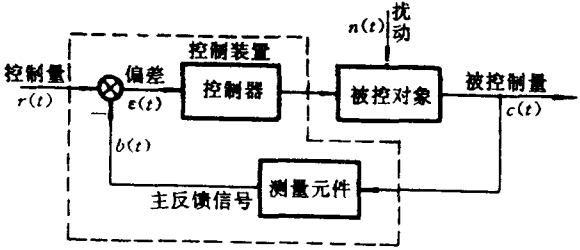


图 1-6 闭环控制系统的典型框图

本书中，控制量用 $r(t)$ 表示，被控制量用 $c(t)$ 表示，偏差信号用 $e(t)$ 表示，主反馈信号用 $b(t)$ 表示，干扰用 $n(t)$ 表示。

在闭环控制系统中，只要被控制量与要求的值不等，就有调节过程出现，而产生调节过

程的关键是偏差信号。偏差信号是对被控制量不断测量转换,并把被控制量的全部或一部分反馈到系统的输入端与控制量相减而得到的。这种利用负反馈得到的偏差信号产生控制作用,使被控制量趋于要求值,从而使偏差消除或减小的控制原理叫做反馈控制原理。按反馈控制原理组成的系统称为反馈控制系统或闭环控制系统。

综上所述,闭环控制系统所以能实现自动控制,其根本原因就是由于应用了反馈控制原理。因为通过测量被控制量并与控制量相比较,它能自动察觉实际的输出量和预定输出量之间的偏离,并能根据这一偏离产生控制作用,来减少或消除这一偏离。

必须指出,只有按负反馈原理组成的闭环系统才能完成自动控制的任务,正反馈使系统的偏差越来越大,是达不到自动控制目的的。

四、开环与闭环控制系统的比较

在开环控制系统中,既不需要对被控制量进行测量,也不需要将被控制量反馈到系统的输入端与控制量进行比较,因而结构简单、经济。同时也不存在闭环控制系统中可能出现的工作不稳定问题,调试方便。但开环控制系统的抗干扰能力差,若由于干扰使被控制量偏离了希望值,开环控制系统既不能察觉也不能修正,从而造成控制误差,所以控制精度不高。另外,开环控制系统对每一个输入量必有一个确定的工作状态和输出量与之对应。这样,系统的精度就完全取决于组成系统各元部件的精度和参数稳定性。为提高系统的精度,必须采用高质量的元件。

闭环控制系统由于采用了负反馈,使系统的输出量对各种扰动作用都很不敏感,当输出量因受扰动偏离希望值时,系统具有自动修正这一偏离的能力,因而控制精度高,抗干扰能力强。但另一方面,闭环控制系统需用测量元件、给定元件和比较元件来检测偏差,包含的元件多,结构复杂、价格高。另外,由于采用了负反馈,若系统的参数选择不当,或因存在传动链的间隙等原因,都将引起输出量在趋于希望值之前产生激烈的振荡,甚至失去控制。所以在闭环控制系统中,稳定性始终是一个重要问题。要达到满意的性能,常需进行仔细的调试。

应当指出,当系统输入量的变化能预先知道,或对系统中可能出现的干扰有办法测量和补偿时,采用开环控制系统就能得到比较满意的结果,特别是对输出量很难测量的地方。但由于开环系统的抗干扰能力差,使它的应用范围不如闭环系统广泛。

当系统的输入量无法预先知道,系统中存在着无法预计的扰动或系统中元件参数变化较大时,采用闭环系统有明显的优越性。精心设计的闭环系统具有很好的控制性能,因而在各个工业部门和日常生活中获得了广泛的应用。

通常所说的自动控制系统就是指闭环控制系统。如何分析和设计闭环控制系统是本书要研究的主要内容。

将开环控制系统和闭环控制系统有机地结合起来,所构成的系统叫复合控制系统,它兼有二者的优点,并可构成精度很高的控制系统。因为在第三章中还要详细分析,这里不再赘述。

§ 1-3 自动控制系统的分类及组成

一、分类

自动控制系统的种类繁多,其结构、功用、性能和所用的元件也各不一样,因此,自动

控制系统的分类方法有多种。根据描述系统的微分（差分）方程是否是线性的和定常的，可以分成线性与非线性系统、定常和时变系统；根据系统中传递的信号有没有离散时间信号或交流载波信号，可以分成连续或离散系统、交流和直流系统；根据系统中所用的元件类型，也可以分为机电、液压和气动系统等；根据系统的功用又可以分成温度、位置控制系统等。

根据输入信号的变化规律不同进行分类，抓住了自动控制系统的主要差别，按照这种分类方法，使人们在分析和设计某一类系统之前就能对该系统有一个大体的了解，便于分析研究，因此被广泛采用。下面通过实例重点介绍这种分类方法。

恒值控制系统 输入量为恒定的常值，承受这类输入信号的闭环系统叫恒值控制系统（或定值调节系统、自动镇定系统）。这类系统的任务是：在各种扰动作用下都能使输出量保持在恒定的希望值附近。水位、恒温、恒压及恒速控制系统都是典型的恒值控制系统。

例 1-1 电炉炉温自动控制系统

电炉炉温自动控制系统的任务是控制炉温维持在 680°C 附近，以满足硅钢片热处理的要求，系统的原理图如图 1-7 所示。在这系统中，炉子的温度是由毫伏级的给定电压 u_r 控制的，其

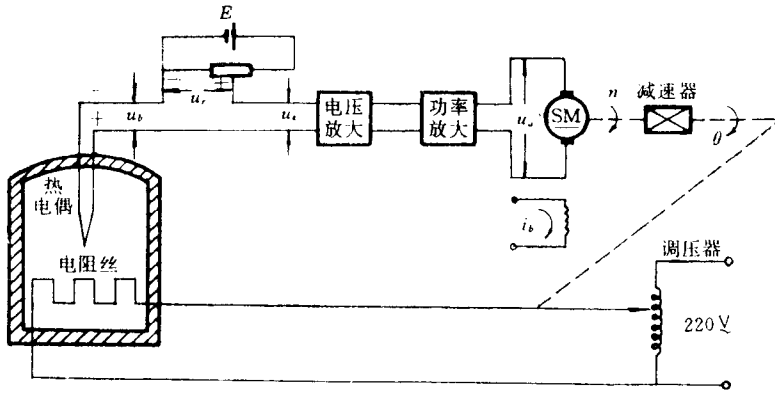


图 1-7 电炉炉温自动控制系统原理图

设置与炉温的希望值 T_r 相对应。热电偶用来测量炉温的实际值 T_c ，因为它的输出 u_b 是正比于炉温的毫伏级电压信号 $u_b = kT_c$ ， k 为比例系数。 u_b 反馈到系统的输入端，与给定电压 u_r 进行比较，得到偏差电压 $u_e = u_r - u_b$ 。它表示要求的炉温与实际的炉温之间的偏差。如果 $u_e = 0$ ，便意味着实际的炉温等于要求值，此时系统处于平衡状态，不产生调节作用。

若由于干扰使实际的炉温低于希望值，则 $u_e = u_r - u_b \neq 0$ ，该电压经电压放大和功率放大后驱动直流电机，电机经减速器带动调压变压器的滑臂，向增加加热电流的方向移动，于是反馈电压 u_b 增加， u_e 下降，直到炉温达到给定值为止，此时偏差信号 $u_e = 0$ ，电机停转，系统重新处于平衡状态，从而完成了自动调节炉温的任务。若由于干扰使实际的炉温高于希望值，整个调节过程反方向进行。

电炉炉温自动控制系统的框图如图 1-8 所示。

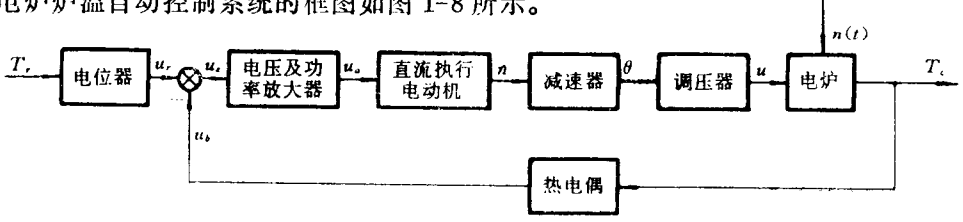


图 1-8 电炉炉温自动控制系统框图

必须说明,因为组成系统的元件存在不灵敏区,因此实际情况是只有当偏差电压大到一定数值后电机才转动,进行控制。所以上述系统只是一个能完成 $680 \pm 5^\circ\text{C}$ 控制精度的炉温控制系统。

随动系统 输入量是事先不知道的任意时间函数,承受这类输入信号的闭环系统叫随动系统(或伺服系统、跟踪系统)。这类控制系统的任务是:使输出量迅速而准确地跟随输入量的变化而变化。雷达自动跟踪系统,火炮自动瞄准系统以及飞机和舰船的操舵系统等等,都是典型的随动系统。

例 1-2 函数记录仪

函数记录仪是一种通用的记录仪表,有双笔和三笔的两种规格,其中每一支笔都由两套独立的随动系统带动,它们的结构基本相同。 x 通道的随动系统可带动垂直安装的笔架沿水平方向左右移动。 y_1 和 y_2 通道的随动系统可带动笔架上的记录笔沿笔架上下移动。仪表在 x 方向具有走纸机构,调节走纸速度可以代替时标 t 。该系统的任务是控制记录笔在直角坐标中自动描绘两个电量的函数关系曲线 $y_1=f(x)$ 和 $y_2=f(x)$; 或者一个电量对时间的函数关系曲线 $y_1=f_1(t)$ 和 $y_2=f_2(t)$ 。

x 、 y_1 和 y_2 各通道随动系统的工作原理完全相同。下面仅以 y_1 通道随动系统为例,说明函数记录仪随动系统的工作原理,其原理图如图 1-9 所示。待记录电压 u 先通过衰减器衰减到系统允许的范围,衰减后的电压为 u_r 。 u_r 与微分校正网络的输出电压 u_b 比较,得到偏差电压 $u_e = u_r - u_b$ 。测量电路是由调零电位器 R_q 和测量电位器 R_m 组成的桥式线路, u 加入前,测量电桥平衡,输出电压 $u'_b = u_b = 0$,所以在 u 加入的瞬间,偏差电压最大 $u_e = u_r$ 。该电压经双 T 滤波网络滤除夹杂在外加输入信号中的干扰,输出微伏级的直流信号 u_r 。 u_r 经放大器(调制、交流放大、解调、双 T 滤波、直流放大)输出伏特级的直流电压 u_s ,加到直流伺服电机 SM 的电枢两端,使电机转动。电机通过减速器与绳轮带动记录笔沿笔架上下移动。因记录笔与 R_m 的电刷固联,因此 R_m 的电刷被带动,而 R_q 的电刷在记录过程中不动,于是测量电桥失去平衡,输出电压 u'_b 。 u'_b 经微分校正网络输出电压 u_b 。由于 u_b 与 u_r 极性相反,因而误差电压 u_e 逐渐减小,最后趋于零,记录笔停止移动,此时记录笔的位移 L 与输入信号 u 相对应。当 u 随时间连续变化时,打开 x 方向的走纸机构,记录笔便在坐标纸上迅速而又准确地描绘出 u 随时间变化的连续曲线。

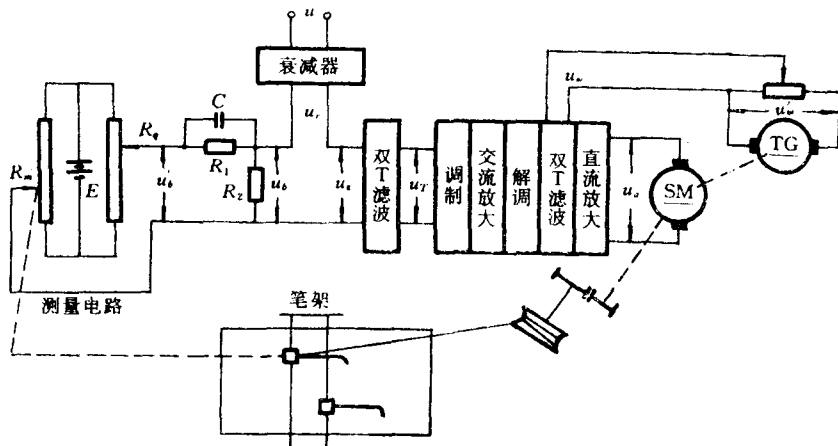


图 1-9 函数记录仪随动系统原理图

函数记录仪中各随动系统的框图如图 1-10 所示。

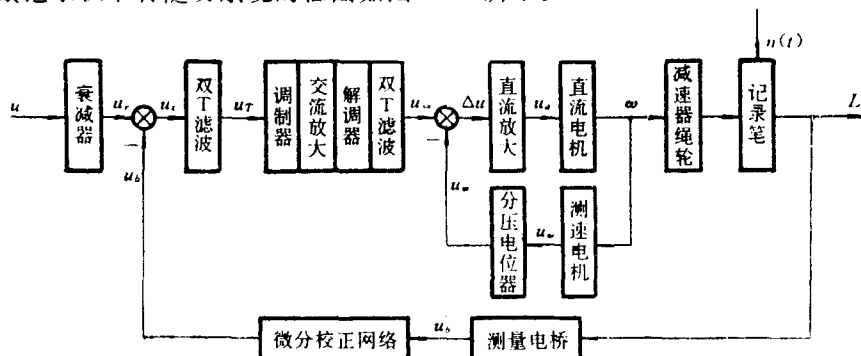


图 1-10 函数记录仪随动系统框图

图中微分校正网络和直流测速发电机是为改善系统性能而加入的校正装置。有关校正装置的作用和设计问题，将在第五章中详细介绍，这里不再多述。

程序控制系统 输入量按照预先给定的程序变化，承受这类输入信号的闭环系统叫程序控制系统。这类控制系统的任务是：使输出量按照预先给定的程序指令而动作。仿型铣床、数控车床以及机器人控制系统都是典型的程序控制系统。

例 1-3 示教式机械手程序控制系统

工业机械手是一种新型的自动化操作装置，它可以根据预先排定的程序搬运物体、装卸零件以及操持喷枪焊把等工具，去完成一定的作业，因此可以在重复、繁重和有害有毒的工作条件中部分地代替人工操作。

机械手完成自己动作的程序，可以用外部编制的程序存入机械手存贮装置即计算机的存储器中；也可以通过示教存贮的办法，先将需要机械手完成的动作对机械手示教一遍，这时，有关运动的路径、速度以及在该过程中应完成的功能如抓取等，都记载在计算机的存储器中，以后可以随时使之再现。前一种办法需要熟练的程序员，并要耗费大量时间，故通用机械手的数据存贮多半采用后一种方法，因为这种方法简单，普通人就能适应。

示教机械手控制系统的任务是，使系统的输出量以一定的精度重复出现人示教时所教给它的动作。示教机械手通常有手臂伸缩及左右上下摆动，手腕上下摆动及回转，手爪抓握六个自由度，它们的控制系统类同，下面仅介绍手臂伸缩系统的工作原理，其原理图如图 1-11 所示。

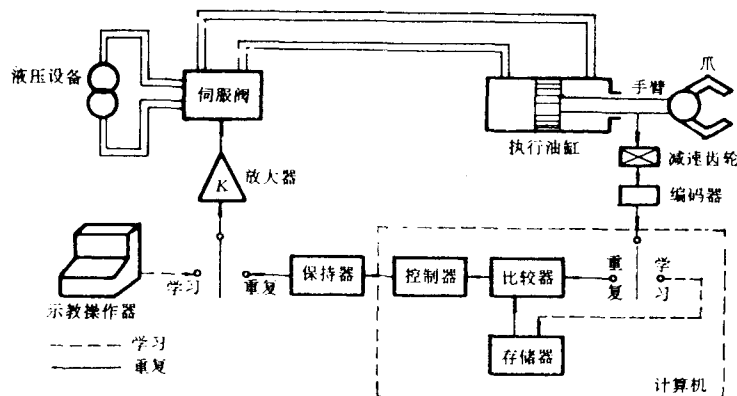


图 1-11 示教机械手伸缩系统原理图

手臂的伸缩动作可分为人教操作示教和重复示教两种。在人教操作示教时，系统中的开关打到“学习”位置，系统呈开环状态。人操作示教操作器，将信号送到伺服放大器，放大器给电液伺服阀一个电流信号，伺服阀便输出流量推动油缸动作，当信号一消失，油缸就停止运动。为了防止由于电液伺服阀的零飘而引起机械手位置飘移，所以当机械手在停留位置时，系统中的开关与“重复”位置闭合，系统是闭环的。操作示教操作器可以使机械手停留在任意位置上。对于所需要的工作位置，只要按下示教操作器上的记录按钮，就可以使位置编码器把机械手的位置这一模拟量变为数字量后，送到计算机中存放起来，使得机械手的位置与计算机中的数字相对应，上面的过程称为示教过程。

重复示教时，系统中的开关与“重复”位置闭合，系统呈闭环工作状态。此时操作示教操作器的执行按钮，则计算机依次从存储器中取出原来存入的位置信号，每次取出一个位置信号并与机械手当前的位置相比较，若存在偏差，则该偏差经过改善系统性能的控制器的，再经保持器把数字量变成模拟量后，去控制机械手运动，以减小偏差，直到偏差为零时，机械手就复现了原来示教时存入的位置。根据需要，可以规定机械手在某点停留的时间，停留时间到了以后就复现下一个位置。这样的过程称为重复示教或再现过程。

示教机械手伸缩系统的框图如图 1-12 所示。注意，框图中带“*”号的量是离散的数字量。

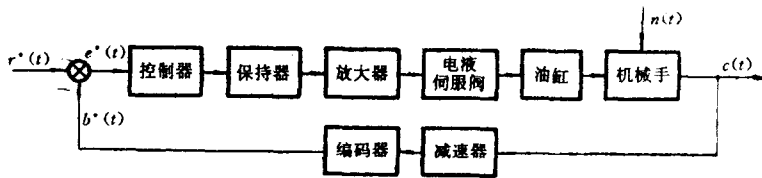


图 1-12 示教机械手伸缩系统框图

二、组成

从上述几个闭环控制系统来看，虽然它们使用的元件和功用各不相同，但它们却都是按照完全相同的反馈控制原理建立的。相同的工作原理，决定了它们必然具有相同功能的元件。因为要得到偏差信号，每一个系统都必须具有给定元件、测量元件和比较元件，为了使微弱的偏差信号能够控制被控对象，又必须具有放大元件和执行元件，只不过在不同的系统中，同一种功能可以用不同的元件来实现罢了。例如炉温控制系统中的测量元件是热电偶，函数记录仪系统中的测量元件是电位器电桥，机械手控制系统中的测量元件则是位置编码器。

通常，一个典型的自动控制系统应包含如下几个基本元件：

给定元件 给出与系统输出量希望值相对应的系统输入量。

测量元件 测量系统输出量的实际值，并把输出量的量纲转换成与输入量相同，又称敏感元件。

比较元件 比较系统的输入量和主反馈信号，并给出两者之间的偏差，起综合信号的作用。在多数控制系统中，这个比较作用是由给定元件和测量元件组成的误差检测器或由综合电路来实现的。

放大元件 对微弱的偏差信号进行放大和变换，使之具有足够的幅值和功率，以适应执行元件动作的要求。

执行元件 根据放大后的偏差信号产生控制动作，操作系统的输出量，使之按照输入量的变化规律而变化。

被控对象 自动控制系统需要进行控制的机器、设备或生产过程。被控对象内需要严格加以控制的物理量称为被控制量。

实践证明，仅包含上述基本元件的控制系统往往是不能正常工作的。为了能够较好地完成任务，还需要在系统中加入一些能改善系统性能的元件，我们把这类元件叫做校正元件，其结构参数是容易改变的。校正元件可以加在前向通道内，也可以加在局部反馈通道内，前者称为串联校正，后者称为反馈校正。有时，为了更有效地提高系统的性能，可以同时应用串联校正和反馈校正。

图 1-13 所示的框图，表明了一个典型自动控制系统的基本组成，也表明了各元部件在系统中的位置及其相互连接情况。

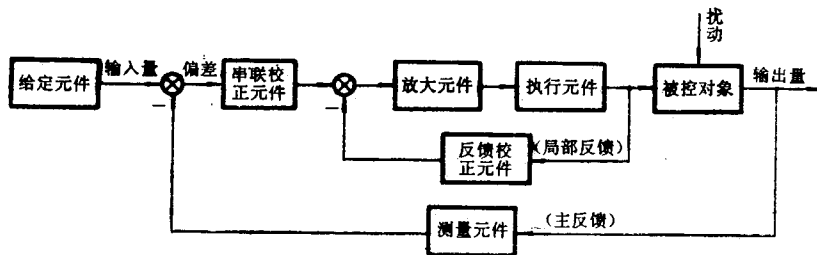


图 1-13 典型自动控制系统的基本组成

§ 1-4 对自动控制系统的基本要求

一个系统的外作用有两种，一是有用的输入信号，二是扰动。我们希望系统只受输入信号的控制，而丝毫不受扰动的影响，所以下面只需研究系统在输入信号作用下，对系统性能的要求。

当输入量突然发生跳变时，由于输出量仍处于原平衡状态，于是系统出现了偏差，偏差控制输出量最终趋于新的平衡状态，这就是一个调节过程。理想的调节过程是，突然的输入量使系统突然出现偏差，执行机构突然动作，使输出量立即达到新的平衡状态，即调节过程是瞬时完成的。事实上，这样的调节过程并不存在。因为组成系统的元件无论是电的还是机械的都有惯性，电感电容及电磁元件有惯性，机械部分的质量也有惯性，并且由于能源功率的限制，使得运动部件的加速度不会很大，速度和位移不会瞬间变化。因此，当输入量突然发生跳变时，任何实际系统从原平衡状态到达新的平衡状态都要经历一个过渡过程。过渡过程曲线的形状视系统的功能而异，有的单调增长到稳态值，多数系统是衰减振荡到稳态值，但都要经过一段时间，待过渡过程结束之后，系统才能达到新的平衡状态。因此，整个调节过程可以分为两个阶段，前一阶段的特点是输出量处于激烈变化状态，称为过渡过程，它反映了系统的动态特性（动特性）；后一阶段的特点是输出量稳定在新的平衡状态并保持不变，称为稳态过程，它反映了系统的稳态特性（静特性）。输入信号，理想调节过程与实际调节