

顾瑞龙 编著

工程控制理论

Gongcheng Kongzhi Lilun

● 北京科学技术出版社

《工程控制理论》 内容提要

工程控制理论适用于工业的各个领域,包括电气、机械、航空、冶金、化工、核工业、生物工程等。由于计算机的飞速发展,控制工程及其理论也得到了长足的进步。本书将控制理论和工程实践紧密地结合起来并提供了大量有应用价值的实例。既阐述了经典理论,又阐述了现代理论,将两种理论有机地联系起来。本书由浅入深,通俗易懂,结构编排突出实用性。

本书适用于科技界的广大工程技术人员对各种控制系统的设计和分析参考,也可用于高等院校有关专业的师生、研究生参考。

工程控制理论

顾瑞龙 编著

北京科学技术出版社出版

(北京西直门南顺城街12号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
国防科工委印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 30.5印张 761千字

1990年9月第一版 1990年9月第一次印刷

印数1—1500册

ISBN7-5304-0481-4/T·94 定价:16.50元

序

20世纪以来,由于科学技术的发展,人类的活动领域不断扩大,物质生产的规模获得了前所未有的发展,人类对自然和社会现象的认识与需求也不断深化和发展。因此,无论在运载工具、工艺过程、社会现象范围内,都提出了越来越高的控制要求,从而推动了控制理论由古典走向现代化,应用领域也愈加广泛。工程控制已成为人类征服自然和驾驭自身社会发展的重要手段。工程控制技术不仅为人类运载工具的进步创造了条件,而且为工业生产过程实现高效、优质、节能制造了新的可能,甚至成为人类社会经济和生产发展预测与控制的新工具。

工程控制理论已成为现代工程技术人员的必需基础之一。现代电子技术、计算机技术和传感器技术的进展又为工程控制的高水平的实现提供了相关技术条件,这是工程控制技术得以广泛应用和发展的物质基础和技术条件。

本书是作者多年来潜心研究和大量实践的结晶。既系统论述了经典理论,又简明引述了现代理论,并联系电液控制、机器人等领域分析了许多典型实例,是一部控制理论和工程实际相结合的论著。它对于机械工程师和机械类高等学校师生是一本很好的教学参考书。作者在电液伺服系统分析、系统补偿、非线性控制系统工程分析技巧等方面均有独到之处,本书包含了这些研究成果。取材既严谨又适合工程师的水准,具有很好的可读性。

值此书出版之际,祝贺作者的成就并感谢作者为读者所作出的新贡献。相信本书的出版一定能对我国机械行业中控制理论工程应用的普及和提高起到积极的推动作用。

路甬祥

于杭州玉泉 浙江大学

1990年1月4日

绪 论

在 20 世纪 90 年代的今天,科学技术的发展已使人类控制自然的速度大大加快。登上月球,核能发电,生物工程进展等都是人类在控制自然过程中取得的辉煌成就。在这些进展中,控制工程师起了很大的作用,他们把人类的许多理想变成了现实。控制工程师所根据的理论基础就是控制理论。

工程控制理论是一门介于许多学科之间的科学,反过来它又渗透到各个工程领域,诸如电气、机械、液压气动、航空、航天、核反应、化工、经济管理、生物工程等。工程控制这门多学科的学科,今天已被列为最有发展前途的领域之一。

控制系统是为了达到某个目的而设置的某些元件的组合。自动控制系统是指利用某些元件的组合使某些被控对象(如机器、设备或生产过程)的某一物理量(如位置、速度、电压、温度等)自动地按预定的规律运行(或变化)。开环控制系统是一种最简单的控制装置。譬如,一个人用电磁阀打开水龙头,根据经验,定时 2 分钟后关闭,希望最后这水箱内的水平面升到某一期望高度。当 2 分钟时间到达后,电磁阀关闭,动作就完成。但最后水箱的水平面到底达到多高,操作者不进行即时控制。这样的开环控制是没有反馈比较的,所以叫“开环”。闭环控制系统是采用反馈比较来达到对输入信号的准确复现。当输出量被一传感器(反馈传感器)测量后反馈到一比较装置,和输入量比较产生偏差信号时,将导致控制系统输出发生改变,一直到偏差为最小时为止。实际输出和期望输出间的任何偏差,在闭环系统中将自动地进行校正、消除。正确设计的闭环系统可使系统精确地按预定规律进行变化。

这种用反馈信号组成闭环系统的概念给人们很大的启迪。生物体的行为可以和反馈控制系统的某些特征进行对照。在一些情况下,可以取代人的作用。所以可以说,反馈控制系统是会“思考”的。但这不是主动思考,而是设计者事先规定的功能。自适应反馈系统就是这种会“思考”的系统类型之一。当环境变化时,能自动修改自己的功能,以获得最优性能。工程控制理论就是研究如何将各种元件组合成优秀的控制系统,并获得不同要求的技术性能。

在工业和其他领域中,用各种自动化元件组成机器人系统(图 1)的研究和应用已达到新的高潮。全世界先进的汽车制造厂,成百台地采用点焊、弧焊、喷涂和搬运机器人。采用机器人作业的结果,不仅大大提高了生产率,而且大大提高了质量,增加了多品种生产的柔性,从而使汽车生产达到了一个新的高度。目前,全世界已有 20 万台机器人在不同场合下作业,而且每年以 10~20% 的速度递增。电器产品和一些轻工业产品,采用装配机器人的趋势方兴未艾。智能机器人的研究目前已成为全世界科技工作者研究的新热点。视觉、触觉、力觉和其他感觉,以及学习、判断、决策等智能一旦装备到机器人身上,则可以设想,不仅仅是工业界,而且在宇航、深水、危险作业、战斗等场合都可用机器人来代替人类来作业。在这些系统组成过程中,控制理论起的作用越来越重要。新的理论——最优控制、多输入多输出、大系统等理论将进一步发展。

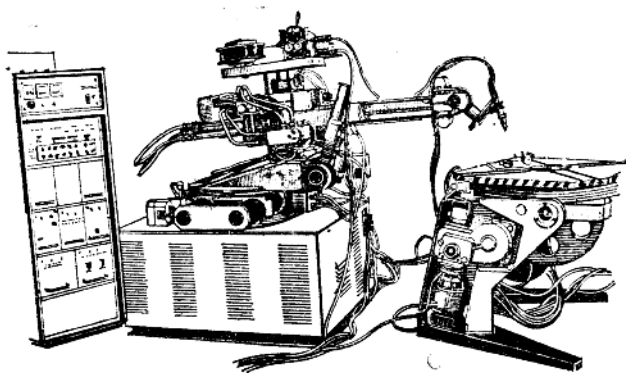


图1 工业机器人

航空工业和宇航工业已是大量应用控制理论成果并用各种元件组成控制系统的场合。现代高速飞机，包括全天候截击机和攻击轰炸机，其控制几乎全部自动化。譬如飞机的自动驾驶仪就是一个非常典型的例子。图2所示的是飞机的自动驾驶仪的一个坐标的方块图。这里的反馈概念非常明确。图中把期望的航向与实际航向进行比较，产生的误差信号去操纵飞机的控制部件，以使航向误差减少到零。图3是阿波罗宇宙飞船姿态控制的一个坐标的控制方块图。从图中可知，这种控制也是把期望姿态和实际姿态比较，并在闭环回路内采用计算机控制。图4所示为美国哥伦比亚航天飞机及其伸出在飞机体外、长15米的机器人手臂。它受宇航员的控制。宇航员用电视摄像机观察，操纵在航天飞机外的负载。最大负载为150公斤。用这个机器人手臂可以将卫星放入预定轨道中，将失效或该回收的卫星，或其他残片收回到航天飞机中去。

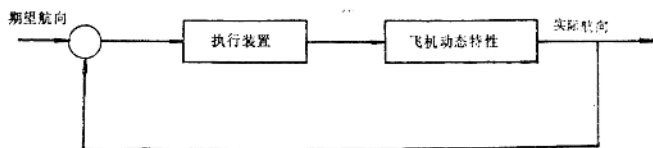


图2 飞机的自动驾驶系统

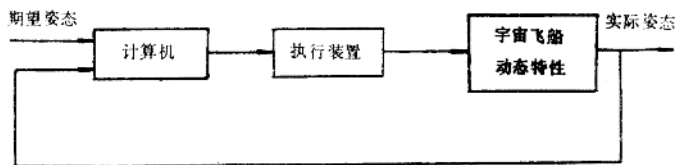


图3 阿波罗宇宙飞船的姿态控制

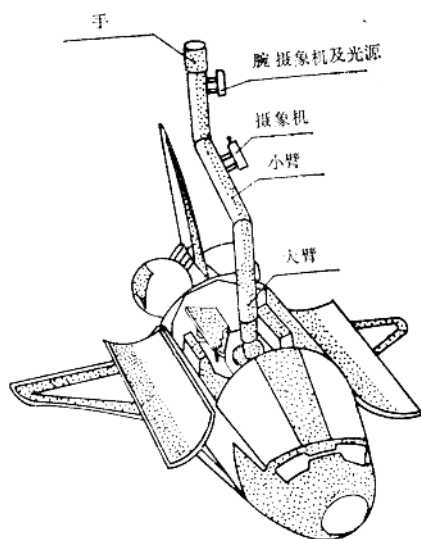


图4 哥伦比亚航天飞机及其机器人手臂

我国高技术研究发展计划纲要提出，从1987年开始实施七个技术领域的十几个项目作为高技术研究发展目标。这七个技术领域是生物技术、信息技术、激光技术、自动化技术、能源技术、航天技术和新材料技术等领域。而上述七个领域的研究发展，绝大多数项目都要应用控制理论研究成果。所以可以预期，随着各项研究工作的不断深化，控制理论对这些项目的支持也将日益加深。反过来，上述新技术领域取得的成就，又将进一步把控制理论推到新的高度。

目 录

绪论	(V)
第一章 控制理论的一般概念	(1)
一、引言	(1)
二、系统的分类和组成	(2)
第二章 控制系统的数学描述	(7)
一、线性化	(7)
二、线性系统微分方程	(8)
三、复变量和 s 平面	(9)
四、拉普拉斯变换	(10)
五、部分分式展开法	(12)
六、用拉氏变换法求解线性常微分方程	(14)
七、系统的数学描述法	(17)
八、系统的时间域的输入输出描述	(19)
九、系统的频率域的输入输出描述	(22)
十、系统的时间域的状态变量描述	(24)
十一、系统的频率域的状态空间描述	(25)
十二、一个系统的四种数学描述举例	(26)
第三章 传递函数和它的运算	(28)
一、传递函数	(28)
二、工程中各种典型的机、电、液系统的传递函数	(29)
三、传递函数的运算	(40)
四、液压系统和电机系统的传递函数运算例	(44)
第四章 系统的频率响应与博德图	(48)
一、频率响应的概念与计算	(49)
二、奈魁斯特图	(52)
三、博德图及典型环节的博德图	(55)
四、系统的博德图绘制举例	(62)
五、闭环频率响应	(65)
第五章 典型电液控制元件与系统的传递函数描述	(70)
一、阀控制液压缸与阀控制液压马达	(70)
二、泵控制液压缸	(74)
三、液压力矩放大器	(76)
四、液压仿形刀架	(77)
五、力反馈电液伺服阀	(79)
第六章 控制系统的性能准则	(81)
一、性能准则的提出	(81)
二、灵敏度	(81)

三、瞬态响应	(85)
四、频率响应	(86)
五、工程中的稳态精度(稳态误差)——在输出端对稳态误差的讨论	(87)
六、性能指标	(102)
七、控制系统的性能准则一览	(104)
第七章 稳定性分析	(105)
一、用劳斯-霍维茨判据判定稳定性	(106)
二、用奈魁斯特判据判定稳定性	(107)
三、博德图上的奈魁斯特判据	(109)
四、液压系统稳定性分析举例	(110)
五、奈魁斯特稳定判据	(113)
第八章 根轨迹法	(116)
一、根轨迹法的基本概念	(116)
二、闭环极点和瞬态响应	(119)
三、极点位置的选择	(124)
四、根轨迹的作图法	(130)
五、一个电液控制系统的根轨迹作图示例	(140)
六、按瞬态响应要求用根轨迹法设计电液控制系统	(143)
七、根轨迹的作图诀窍及图形举例	(145)
第九章 位置控制系统	(152)
一、位置控制系统的特点	(152)
二、电流负反馈放大器的分析	(155)
三、双电位器位置控制系统	(159)
四、伺服阀-液压缸系统	(163)
五、伺服阀-液压马达系统	(167)
六、数控机床中的高增益系统和低增益系统	(171)
第十章 速度控制系统	(173)
一、速度控制回路中加补偿的必然性	(173)
二、速度控制系统设计举例	(177)
三、速度环和位置环控制速度的比较	(182)
四、出现于位置环内的速度环	(185)
五、速度环的阻尼作用	(188)
第十一章 力控制系统	(191)
一、力控制系统中阀的选用	(191)
二、力环中液压缸的传递函数	(193)
三、材料试验机的力控制系统	(198)
四、轧机液压压下系统	(204)
五、力环的阻尼作用	(210)
第十二章 工业机器人用伺服系统	(212)
一、伺服电机	(212)
二、机器人伺服系统工作原理	(214)
三、用电流放大器的伺服系统	(217)

四、用电压放大器的伺服系统	(220)
五、一种实用的工业机器人伺服系统原理及分析计算	(222)
第十三章 控制系统的设计和补偿	(227)
一、设计中的几种补偿方法	(228)
二、用频率法分析补偿装置	(230)
三、用频率法分析顺馈补偿	(236)
四、用频率法分析反馈微分补偿	(239)
五、用根轨迹法分析顺馈补偿	(240)
第十四章 非线性控制系统的分析	(244)
一、描述函数的概念	(245)
二、典型非线性特性的描述函数	(248)
三、用描述函数法研究非线性系统的稳定性	(257)
四、数控机床、机器人及常见装置中非线性特性的影响及其分析	(266)
五、用描述函数法设计非线性控制系统	(274)
六、相平面法	(278)
七、相平面作图	(279)
八、用相平面法分析线性控制系统	(286)
九、用相平面法分析非线性数控机床、喷漆机器人控制系统	(293)
十、由相平面图求时间解	(301)
第十五章 现代控制理论中的状态空间概念	(303)
一、矩阵理论中的一些定义	(304)
二、矩阵代数	(309)
三、状态空间的概念	(317)
四、状态空间的矩阵表示法	(318)
五、状态转移矩阵-矩阵方程求解的工具	(321)
六、状态转移方程-线性非齐次状态方程求解	(323)
七、状态方程和高阶微分方程的关系	(327)
八、传递函数和状态方程的关系	(329)
九、特征方程、特征值和特征根的不变性	(338)
十、一个电压控制系统用频率法、根轨迹法和状态空间法的分析和比较	(342)
第十六章 最优控制理论和在伺服系统中的应用	(348)
一、最优控制系统和性能指标	(348)
二、可控性和可观性	(350)
三、给定权因子求优法——最优控制系统的分析设计法之一	(354)
四、限制控制量求优法——最优控制系统的分析设计法之二	(362)
五、参数最优系统的设计	(367)
六、用状态可观性的概念来设计有指定特征值的系统	(374)
七、状态观测器的设计	(376)
八、带观测器的闭环控制系统	(382)
九、最优控制问题和线性二次型问题(调节器问题、跟踪器问题)	(387)
十、计算机辅助设计最优位置控制系统举例	(398)
第十七章 线性离散系统的分析与综合	(408)

一、离散系统介绍	(408)
二、离散系统的研究方法	(413)
三、信号的采样过程	(414)
四、采样定理 (香农定理)	(416)
五、零阶保持器	(418)
六、 Z 变换	(420)
七、 Z 反变换	(433)
八、用 Z 变换法解线性常系数差分方程	(438)
九、脉冲传递函数	(442)
十、线性离散系统的稳定性分析	(453)
第十八章 系统辨识简介	(464)
一、辨识问题的组成和分类	(464)
二、参数估计法和最小二乘法	(465)
三、直接的曲线拟合	(468)
参考文献	(474)
后记	(475)

第一章 控制理论的一般概念

一、引言

自动控制系统近年来已获得飞跃的发展,而工程控制理论又是自动控制系统的理论基础。工程控制理论在现代技术与现代文明的发展中起着日益重要的作用。在各类工业中,自动控制系统已被大量采用,例如飞机、宇宙飞船的控制,运输系统,机器人,机床数控系统,轧钢机系统、武器系统的控制等,都采用自动控制系统。在研究社会和经济系统的管理,以及环境、水文系统的管理这类问题时,都可以用控制理论来研究。

追溯历史,在工业中起重要作用的第一个自动控制系统是1784年瓦特(J.Watt)发明的蒸汽机中的调速器。当蒸汽机速度增加时,杠杆上的飞球升高,使和它联结在一起的汽阀开口减少,从而使蒸汽机的速度下降。但是后来发现,汽阀的速度调节并不完善,一些参数处理不好时会使蒸汽机产生剧烈的振荡。这就迫使一些数学家思考并解决这些问题。1868年马克斯威尔(Maxwell)从描述系统的微分方程的解中是否有增长指数函数项来判断稳定性。1895年,劳斯(Routh)和赫尔维茨(Hurwitz)导出了著名的稳定性判据。第一次和第二次世界大战中武器的进展促使很多装备的自动调节装置有了飞跃的发展。在这期间由于通信的需要,发明了负反馈放大器,这时劳斯-赫尔维茨理论的实际意义又不大了。因为描述放大器的微分方程阶次太高,而用“频率响应”及图解形式处理更实际。奈奎斯特(H.Nyquist)于1932年创立了稳定判据及“稳定裕量”的概念。在此基础上,博德(H.W.Bode)于1945年提出用图解法来分析和综合线性反馈控制系统的方法,这就是频率法。与此同时,依万斯(W.R.Evans)于1948年创立了“根轨迹法”,对用微分方程模型来研究问题提供了一个简单而有效的方法。在某些情况下,它比频率法更简单,更直接。到此,“经典控制理论”已比较完善,并在各行业中广泛地应用这些理论,促进了控制工程的进展。1948年,美国数学家维纳(N.Wiener)首创了控制论(Cybernetics)这个名词,他认为,到那时为止,反馈理论已可以解决许多生物控制机理,经济发展过程等问题。事实证明,从那以后控制理论有了新的发展,跨入了“现代控制理论”的阶段。

60年代初,美国执行“阿波罗”计划时,由于客观发展的需要比较明确地形成了所谓“现代控制理论”。经典控制理论的主要缺点是:①所研究的系统限于线性时不变系统,即其部件可用常系数线性微分方程描述的系统;②研究的系统只能是单回路的;③只提供分析的方法,然后改进系统再进行尝试,不能提供最好的设计。这些问题的存在促使现代控制理论的迅速发展。1956年苏联庞特略金(Понтрягин)提出的最优控制,1957年美国贝尔曼(Bellman)提出的动态规划理论和1960年美国卡尔曼(Kalman)提出的最优过滤理论形成了现代控制理论的基础。状态空间概念的引入、计算机的发展和普及,对现代控制理论起了极重要的推动作用。现代控制理论的发展,已使它不仅应用于工程控制领域,而且进一步发展并形成了生物控制论和经济控制论等新的领域。

但是必须提出，现代控制理论的发展，虽然解决了某些经典控制理论不能解决的问题，但这绝不意味着经典控制理论已经过时。相反，在自动控制技术的发展中，经典控制理论仍将继续发挥其指导作用。相当多的问题用它来解决是非常有效的。并且现代理论是从经典理论蜕变出来的，因此，本书将用较多的篇幅介绍经典理论。还要指出，现代控制理论仍处于发展之中，每个领域中仍有许多有待解决的问题。

本书将控制理论和工程实践紧密结合起来，把电液控制系统和电控制系统作为研究对象，探讨用理论指导系统的设计问题。本书内容对气动控制系统也同样适用。

二、系统的分类和组成

控制理论的研究对象是各种系统，下面定义一些名词，并对系统进行分类。

系统 将一些装置或计划进行组合，使它能达到某一目的的，都叫做系统。这个定义的含义是非常广泛的。它不仅包括用电机，电气元件或伺服阀、液压缸这样的元件组成的物理系统，而且包括一些抽象的动态现象，如在经济学、人口学中遇到的一些现象。也就是说，经济的运行，人口的变迁都各自组成系统。

开环系统 在开环系统中，动作信号是预先确定，不会变化的。例如通常的洗衣机就是这种系统的一个例子（图1-1），当洗衣时间确定后，不管衣服洗得干净与否，到指定时间即自动停机。所以说，这个系统是开环的。

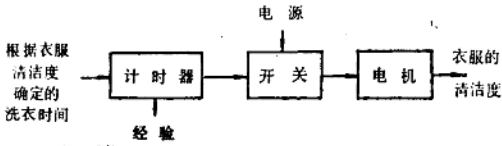


图1-1 简单洗衣机的原理图

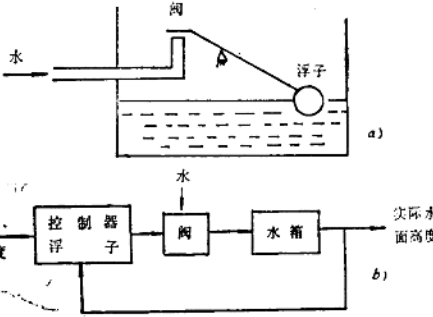


图1-2 水箱水面控制原理图

闭环系统（反馈控制系统） 在闭环系统中，动作信号是所希望信号的函数，或者是实际输出量的函数。譬如图1-2所示的水箱水面控制装置就是一个闭环系统的例子。当水面达到一定高度时，杠杆机构就自动关闭阀的出口。这个系统具备一个闭环系统所必需的全部组件。和一般闭环系统一样，它也有稳定性，稳态误差，瞬态过程等问题。只是因为系统的要求不严，参数又是经过考验的，所以应用中很少出问题。

又如机器人手臂受输入信号的控制，使它以一定的速度运行，到达目的地即行停止。其工作原理见图1-3。很明显，这也是一个闭环系统。在很多现代化的装置中，闭环控制系统是必不可少的。例如核发电厂的发电过程是一个较复杂的闭环系统（见图1-4）。为了将蒸汽的压力和温度保持在某一水平上，由一个控制系统调节控制杆的位置。另一个控制系统调节发电机电压，使它保持在某一电平上。另外该发电站还有蒸汽轮机轴的速度调节、锅炉的水面调节等控制系统。从以上这些例子可见，闭环系统的应用是非常普遍的。而且一个设计得好

的闭环系统的性能要比开环系统的性能好多。通常按被控量的不同情况，又可将闭环控制系统分为三类：

① 伺服系统 伺服系统的被控量是指位置、速度之类的机械量，并要求这些量和输入量有一个函数关系。现在通常把力控制系统也划归这一类系统。图 1-3 所示就是伺服系统的一个例子。

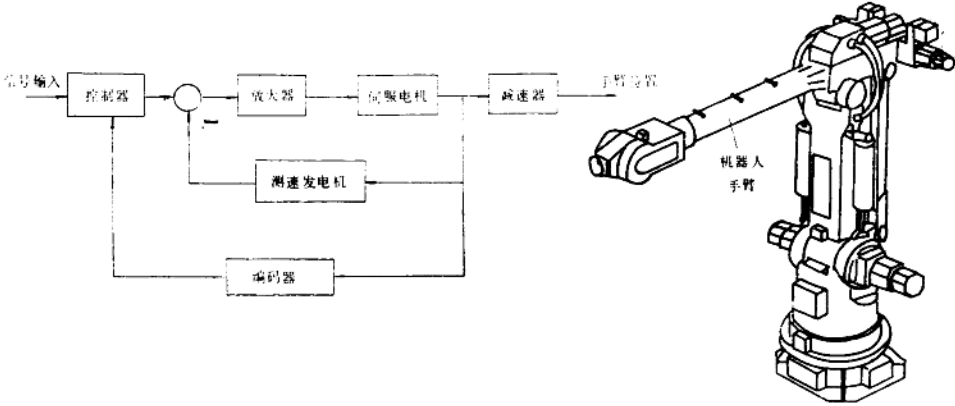


图1-3 机器人手臂控制原理图

② 自动调整系统 是指输出量为常量，或随时间变化得很慢的系统。这类系统的主要任务是在受到干扰时保持输出量为希望值。被控量通常为电压、电流、转速、力矩等物理量。图1-4所示系统就是自动调整系统的一个例子。

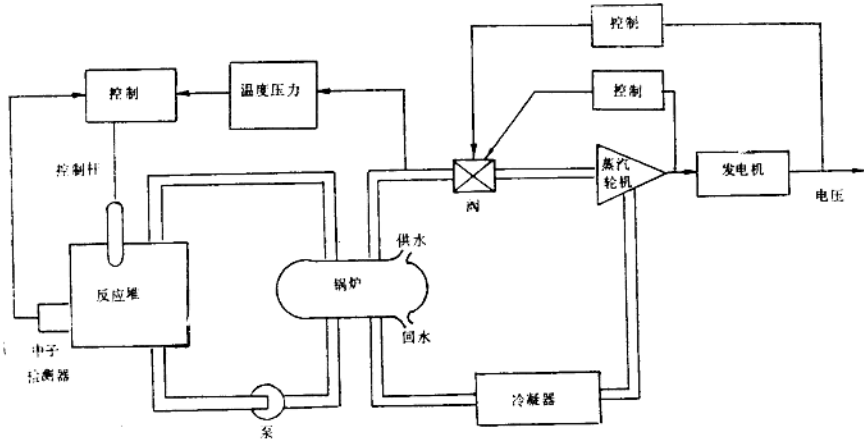


图1-4 核电站原理图

③ 过程控制系统 是指输出量按已知的时间函数变化的系统。这类系统都用于化工、冶炼、造纸等工业中，被控量通常为温度、压力、液面、浓度、功率等。伺服系统往往作为一个组成部分发现这种系统中。

还有一些其他的分类法，如：

① 线性控制系统和非线性控制系统 凡是元件特性呈线性、即符合叠加性原理的系统叫线性系统，否则就是非线性系统。必须指出，线性控制系统仅仅是理论分析者为了简化分析工作量而假设的理想模型，严格地说线性系统实际上是不存在的，只有当控制系统中信号幅度限制在某一范围内时，系统元件才可能有线性特性，这时的系统可认为基本是线性的。

② 时不变系统（定常系统）和时变系统 当控制系统在工作时其参数不随时间而变的系统叫时不变系统，否则就是时变系统。运行中的宇宙飞船由于燃料损耗的变化，卷纸装备中滚筒上纸卷直径（质量）的变化，都使这些系统成为时变系统。时变系统的分析远较时不变系统复杂。

③ 连续数据控制系统 若一个控制系统各部分的信号是连续时间变量 t 的函数，则这个系统就叫做连续数据控制系统或叫连续系统。这种系统中的信号又可分为交流信号和直流信号两种。交流控制系统通常指系统中的交流信号是用某种方式调制过的。直流控制系统并不是指系统中所有信号都是直流的，而是指所用信号是没有调制过的。交流控制系统的常用元件有同步机、交流放大器、交流电机、加速度计、陀螺仪等。直流控制系统的常用元件有电位器、直流放大器、直流电机和直流测速发电机等。实际上，有时系统是用各种元件混合组成的，采用相应的调制、解调以适应系统各点的需要。

④ 采样数据控制系统和数字控制系统 这两种系统和连续数据控制系统的不同是，这系统的一点或某几点，信号的形式是脉冲串或数码。通常采样数据系统是指信号为脉冲数据形式的系统，而数字控制系统是指系统中有数字计算机或控制机的系统。“离散数据控制系统”泛指这两种系统。

⑤ 集中参数系统 有有限数量的状态变量的系统。

⑥ 确定性系统 没有噪声的系统。

本书将研究线性、时不变、连续和离散控制、集中参数和确定性系统，而且以电液控制系统和电控制系统为实例进行讨论。被研究的系统应该具有最初的方案，即执行元件根据静态计算为已知，被控对象为已知，所以可将被研究的基本问题归结成图1-5。

在结束本章之前，再看一个电液伺服系统的实例，并从这个典型系统中对一些元件的名词作一解释。

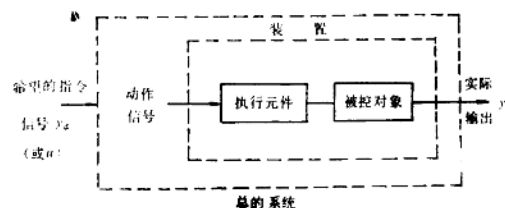


图1-5 被研究的基本问题

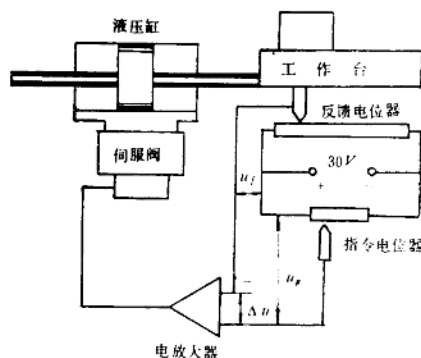


图1-6 双电位器位置控制电液伺服系统

图1-6为双电位器电液伺服系统的原理图，该系统的被控对象是工作台，被控量是它的

位置，执行元件是液压缸。操作者移动指令电位器滑臂，滑臂位置转换成电压 u_g 。被控制的工作台位置由反馈电位器检测，转换成电压 u_f 。两个电位器接成桥式电路，该电桥的输出为 $\Delta u = u_g - u_f$ 。如果在开始时指令电位器和反馈电位器的滑臂都处于左端位置，此时 $u_g = 0$ ， $u_f = 0$ ， $\Delta u = u_g - u_f = 0$ 没有偏差信号。若突然将指令电位器滑臂移到中间位置，则 $u_g = 15$ 伏，而在工作台改变位置之前反馈电压 $u_f = 0$ ，所以 $\Delta u = 15\text{伏} - 0 = 15\text{伏}$ 。该偏差电压经放大后变为电流信号去控制伺服阀，使它输出流量，由液压缸推动工作台移动，直到反馈电位器滑臂达到中间位置时， $u_f = 15\text{伏}$ ， $\Delta u = 15\text{伏} - 15\text{伏} = 0$ ，伺服阀恢复零点而不再输出流量，液压缸活塞停止。如果指令电位器滑臂位置不断改变，则工作台位置也跟随着变化。

从这个伺服系统可以看出，被控制量（工作台位置）是用传感器（反馈电位器）进行检测的。把测得的输出信号引回输入端，与指令信号进行比较，这就是反馈。用通过比较得到的偏差信号来进行控制，以便消除偏差。

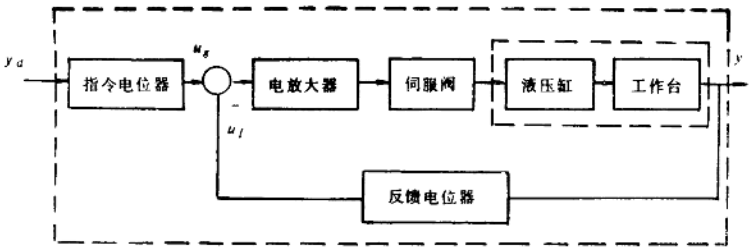


图1-7 双电位器位置控制电液伺服系统的方块图

为了便于研究伺服系统的工作原理，通常把系统用方块图画出。图 1-7 就是上述双电位器位置控制电液伺服系统的方块图（和图1-5比较），图中每个方块表示组成系统的一个元件或环节，方块之间的连线表示信号，箭头指出信号传递的方向。圆圈表示比较元件或加法点，加法点的含意如图1-8所示。

无论多么复杂的反馈控制系统，都是由一些基本元件所组成的。图 1-9 表示组成反馈控制系统的基本元件，其中包括控制元件、反馈元件、比较元件、放大变换元件、执行元件、被控对象。

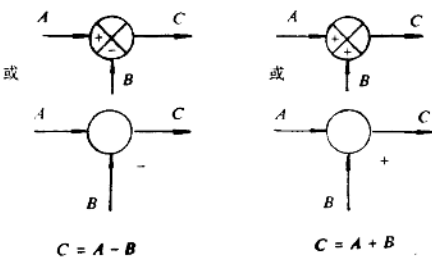


图1-8 加法点的含意

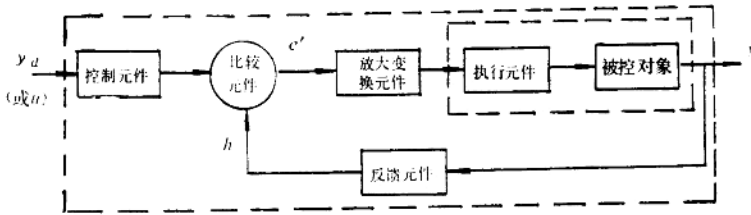


图1-9 反馈控制系的组成

控制元件 控制元件的作用是产生控制信号，如图1-6中的指令电位器。

反馈元件 它产生与被控量有一定函数关系的反馈信号，如图1-6中的反馈电位器。

比较元件 它产生偏差信号，该信号反映控制信号与反馈信号的差值，如图1-6中的电位器电桥。

放大变换元件 把偏差信号放大并对信号的能量形式（电气、机械、液压等）进行变换的元件，如图1-6中的电放大器和伺服阀。

执行元件 直接对被控对象进行控制的元件，如图1-6中的液压缸。

被控对象 就是控制系统进行控制的对象，它的输出量即为系统的被控制量，例如图1-6中的工作台。

反馈控制系统中的各种信号：

控制信号（或输入量） 它是控制输出量变化的信号，用 y_d 或 u 表示。

被控信号（或输出量） 它的变化规律是要加以控制的。应保持它与控制信号之间有一定的函数关系，用 y 表示。

偏差信号（或偏差） 它是控制信号与主反馈信号之差，用 e' 表示。

误差信号（或误差） 它是输出量的实际值与希望值之差，用 e 表示。

干扰信号（或干扰） 除控制信号外，对系统输出量产生影响的因素都叫干扰，用 f 表示。

反馈信号（或反馈） 从系统（或元件）的输出端取出信号，经过变换后再加到系统（或元件）的输入端，这就是反馈信号，用 h 表示。当它与系统（或元件）的输入信号符号相同时叫正反馈，符号相反时叫负反馈。直接取自系统的最终输出端的反馈叫主反馈。主反馈一定是负反馈，否则偏差会越来越大，直到使系统完全失去控制。除了主反馈外，有的系统还有局部反馈，这往往是为了对系统进行补偿、线性化而设的，有些局部反馈是元件所固有的。

第二章 控制系统的数学描述

在线性、时不变、连续、集中参数和确定性系统的设计中涉及的数学工具，有复变函数、拉普拉斯变换、矩阵代数等。这里将根据工程设计结合实例进行叙述。本章先简单介绍线性化算法、线性微分方程，再介绍复变函数和拉普拉斯变换。矩阵代数将在十三章中介绍。差分方程在十五章中介绍。本章末将介绍控制系统的几种数学描述方法。

一、线性化

控制系统的行为可以用联系系统变量的方程来描述。可以用线性方程来描述的系统叫线性系统。本文只讨论线性系统。但是纯粹的线性系统实际上是不存在的。为了利用线性理论来分析和设计系统，必须对系统运动方程进行线性化。线性化有两种方法：一种是忽略那些比较次要的非线性因素，如小的死区、磁滞、干摩擦等；另一种是切线法，即将工作点附近的小变化量之间的关系用线性方程来近似表达，称为该工作点的增量方程。把非线性函数在工作点展开成台劳级数，取台劳级数的一阶近似式，即可得到增量方程。台劳级数的一阶近似式为：

$$F(x) = F(x_0) + \left(\frac{dF}{dx}\right)_0 \Delta x \quad (2-1)$$

$$F(x, y) = F(x_0, y_0) + \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_0 \Delta x + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)_0 \Delta y \quad (2-2)$$

$$F(x, y, z) = F(x_0, y_0, z_0) + \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_0 \Delta x + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)_0 \Delta y + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)_0 \Delta z \quad (2-3)$$

在液压伺服系统的分析中，经常采用这种方法。例如，滑阀节流口的流量公式为：

$$q = c\omega x_v \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \quad (2-4)$$

式中 c ——流量系数；
 ω ——滑阀的面积梯度；
 x_v ——阀芯位移量；
 p ——节流口压降；
 ρ ——油液密度。

流量 q 取决于 x_v 和 p 两个变量。运用台劳公式(2-2)，得

$$q = c\omega x_{v0} \sqrt{\frac{2p_0}{\rho}} + c\omega \sqrt{\frac{2p_0}{\rho}} \Delta x_v + c\omega x_{v0} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{p_0}} \Delta p \quad (2-5)$$