

現代控制系统理论
及应用

高等学校翻译教材

现代控制系统理论及应用

〔美〕S. M. 欣内尔斯 著

李育才 译

侯志林 校



机械工业出版社

译 者 的 话

本书是 1978 年 4 月在天津召开的高等学校一机部对口专业座谈会审定为工业电气自动化及自动化仪表两专业的教材及教学参考书。系根据 1978 年美国出版的 Modern Control System Theory and Application (S.M.Shinners 著) 第二版译出, 内容较第一版有所增补。

内容包括: 线性连续控制系统理论及非线性连续控制系统理论, 最后第九章以导论形式介绍最佳控制系统理论中的变分法、动态规划、极大值原理及其应用。全书采用古典控制理论方法——传递函数法, 与现代控制理论方法——状态空间法, 对比并行方式写成。纵观全书特点是: 由浅入深、内容精炼; 采用 BASIC 和 FORTRAN 语言, 介绍用数字计算机求解开环和闭环频率响应及时域响应, 根轨迹和描述函数等的计算程序; 在新课题中除变分法、动态规划和极大值原理外, 尚引进了定常和时变非线性系统的稳定判据——波波夫方法、广义圆判据以及线性状态变量反馈设计等内容; 结合电气、机械、航空、航海、宇宙空间、核子、化工过程控制、生态、医学、社会和经济管理等, 从广泛的工程实际问题, 阐明控制系统理论的应用与前景; 通过具体例子, 也介绍了自适应控制系统和仿人控制系统, 内容比较新颖。不足之处, 本书不包括离散控制系统和随机控制系统理论。随着计算机过程控制系统的大量涌现, 后两种形式的控制理论也是十分重要的。

本书可作为高等学校自动化类专业高年级学生的教材及教学参考书, 也可供从事自动控制系统设计和研究的有关科技人员参考。

本书由安徽机电学院电子工程系李育才同志翻译, 陕西机械学院自动控制系侯志林同志校对, 并经哈尔滨工业大学仪器系邱化元同志审阅, 提出许多宝贵意见。在翻译过程中还得到安徽师范大学外语系卜纯英、刘长吉、段阳泽和梁雄健等同志的指导和帮助, 在此一并表示衷心感谢!

一般情况, 控制理论要求有广泛的数理基础和实际专业知识, 而译者在这两方面都很不。因此, 本书译文中不妥和错误之处在所难免, 恳请读者批评指正。

目 录

第一章 控制系统设计的一般概念	1	§ 3-3 控制系统典型机械装置的传 递函数和状态空间方程	72
§ 1-1 引言	1	§ 3-4 控制系统中典型电气装置的 传递函数和状态空间方程	75
§ 1-2 开环控制系统	1	§ 3-5 典型液压装置的传递函数和 状态空间方程	86
§ 1-3 闭环控制系统	2	§ 3-6 热力系统的传递函数	90
§ 1-4 仿人控制系统	4	§ 3-7 模拟的一般方法—守恒与模 拟原理	91
§ 1-5 现代控制系统的应用	5	第四章 二阶系统	99
§ 1-6 术语和符号的定义	10	§ 4-1 引言	99
第二章 控制工程中的数学方法	14	§ 4-2 典型反馈控制系统的响应特征	99
§ 2-1 引言	14	§ 4-3 二阶系统的状态变量信号 流图	104
§ 2-2 复变量和 s 平面	14	第五章 性能准则	110
§ 2-3 傅里叶级数和傅里叶变换	17	§ 5-1 引言	110
§ 2-4 拉普拉斯变换	22	§ 5-2 稳定性	110
§ 2-5 常用的拉普拉斯变换	23	§ 5-3 灵敏度	111
§ 2-6 拉普拉斯变换的重要性质	24	§ 5-4 静态准确度	113
§ 2-7 利用部分分式展开求反变换	25	§ 5-5 瞬态响应	120
§ 2-8 利用拉普拉斯变换求解微分 方程	26	§ 5-6 质量指标	121
§ 2-9 传递函数的概念	28	§ 5-7 零误差系统	123
§ 2-10 一般网络的传递函数	29	§ 5-8 基于ITAE性能准则的最佳 化瞬态响应	123
§ 2-11 系统的传递函数	31	§ 5-9 其它实际问题	125
§ 2-12 信号流图和梅逊定理	34	第六章 确定控制系统稳定性的方法	135
§ 2-13 信号流图的简化	35	§ 6-1 引言	135
§ 2-14 梅逊定理和信号流图于多 回路反馈系统中的应用	37	§ 6-2 状态空间法确定特征方程	136
§ 2-15 矩阵代数的复习	38	§ 6-3 劳斯-赫尔维茨稳定判据	139
§ 2-16 状态空间概念	43	§ 6-4 奈魁斯特稳定判据	141
§ 2-17 状态变量图	48	§ 6-5 伯德图法	145
§ 2-18 数字计算机求解时间响应	50	§ 6-6 用数字计算机求开环和闭环 频率响应及时域响应	154
§ 2-19 转移矩阵	51	§ 6-7 尼柯尔斯图线	164
§ 2-20 状态空间法的应用	55	§ 6-8 闭环频率响应与时域响应之 间的关系	16
§ 2-21 数字计算机求解转移矩阵	56		
§ 2-22 小结	59		
第三章 线性控制系统中物理装置 的状态方程和传递函数	70		
§ 3-1 引言	70		
§ 3-2 电网络的状态方程	70		

IV

§ 6-9 负反馈系统的根轨迹法	170	§ 8-8 常见非线性描述函数的推导	257
§ 6-10 正反馈系统的根轨迹法	181	§ 8-9 使用描述函数预卜振荡	267
§ 6-11 绘制根轨迹图的计算机方法	184	§ 8-10 应用描述函数对非线性反 馈控制系统的设计	270
第七章 线性反馈系统的设计	203	§ 8-11 描述函数的数字计算机计算	272
§ 7-1 引言	203	§ 8-12 逐段线性近似法	276
§ 7-2 串联校正方法	203	§ 8-13 状态空间分析: 相平面	277
§ 7-3 局部回路反馈校正方法	207	§ 8-14 相平面的作图	277
§ 7-4 线性反馈控制系统的设计 举例	209	§ 8-15 相平面图的特性	283
§ 7-5 采用伯德图方法的设计	211	§ 8-16 用相平面图法对非线性反 馈控制系统的设计	288
§ 7-6 利用伯德图进行初步校正 计的近似方法	218	§ 8-17 李雅普诺夫稳定判据	291
§ 7-7 采用尼柯尔斯图线的设计	223	§ 8-18 波波夫方法	296
§ 7-8 采用根轨迹法的设计	225	§ 8-19 广义圆判据	301
§ 7-9 线性状态变量反馈概念	233	第九章 最佳控制理论和应用	314
§ 7-10 用线性状态变量反馈设计 控制系统	236	§ 9-1 引言	314
第八章 非线性反馈控制系统的设计	250	§ 9-2 最佳控制问题的特征	314
§ 8-1 引言	250	§ 9-3 可控性	315
§ 8-2 非线性微分方程	250	§ 9-4 可观测性	318
§ 8-3 对非线性系统无效的线性系 统性质	251	§ 9-5 变分法	319
§ 8-4 非线性系统所特有的异常 特性	252	§ 9-6 动态规划	323
§ 8-5 分析非线性系统可采用的 方法	253	§ 9-7 庞特里亚金极大值原理	327
§ 8-6 线性化近似方法	254	§ 9-8 极大值原理应用于空间姿态 控制问题	329
§ 8-7 描述函数的概念	256	附录 A 拉普拉斯变换表	342
		附录 B 奈魁斯特稳定判据的证明	343
		选题解答	345
		英汉名词对照	359

第一章 控制系统设计的一般概念

§ 1-1 引言

人类企图控制自然界的的要求，一直是促使整个历史发展的动力。控制自然的目的是借以完成超出人们力所能及的任务。在长于进取和高度发达的二十世纪，控制系统工程师已把人们的许多希望和梦想变成了现实。

系统的控制是一门介于许多学科之间的科学，又渗透到各个专业工程领域。本书正是根据这一事实，从电气、机械、航空、化工、核反应、经济管理、生物工程及其它有关的各个领域中的控制系统来进行阐明的。自动控制这门多科性的学科，今天已被列为最有前途的领域之一，而它的发展趋势似乎又是无可限量的。

控制系统可被定义为对能量、物质或其它介质等流量调节的装置。它们的配置、复杂程度以及结构均随其用途和职能而变化。一般情况，控制系统可分为开环和闭环两类。其区别点仅在于闭环系统采用了反馈比较。

本章将讨论开环和闭环控制系统的特征。对每种类型举出实例，使读者在往后的学习中，有一通盘的了解并打下一个较好的基础。其中将介绍一个闭环系统的动作行为和一个生物体的动作行为之间的哲理比较。此外，反馈概念也已应用于模拟我们的经济管理系统。本章的最后部分，讨论现代控制系统的应用和所使用术语及符号的定义。

§ 1-2 开环控制系统

开环控制系统是一种最简单的控制装置。本节将用几个例子说明它的概念和职能。

图 1-1 所示为一简单贮槽液面控制系统。我们希望贮槽的液面 h ，无论通过阀 V_1 的出口流量如何变化，要维持在允许偏差范围以内。这可以通过人工随时调节阀 V_2 ，即贮槽的输入流量来完成。但这是个不精确的系统。因为它没有能力对通过阀 V_1 的输出流量、阀 V_2 的输入流量或贮槽液面等进行准确的测量。图 1-2 中表明该系统的输入（期望的贮槽液面）和输出（实际的贮槽液面）之间的简单关系。这种系统信号流动的表示形式称为**方块图**，所使用的箭头表示输入端指进入控制系统，输出端指离开控制系统。这里控制系统没有任何反馈比较，故叫做**开环**。

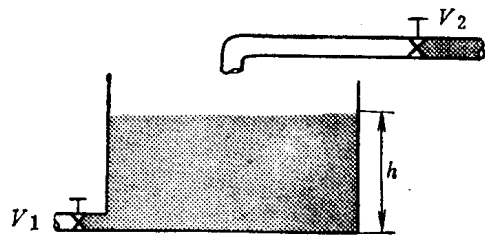


图1-1 贮槽液面控制系统

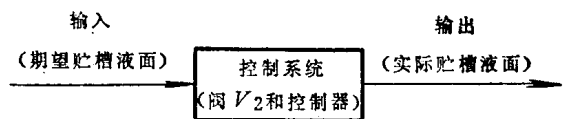


图1-2 贮槽液面控制系统方块图

图 1-3 所示为遥控导弹发射架的角定位系统。它是由远距离操作电位器所产生的指令，

来确定导弹发射架的角定位。控制信号经过放大,驱动一个与发射架相连接的电动机。图1-2所示方块图也适用于这一系统。输入是所要求的角位置,输出为实际的角位置,控制系统由放大器和电动机所组成。要准确定位,必须根据电位器标定的角度位置来准确地校准导弹发射架的角度位置;又电位器、放大器和电动机的特性应当保持稳定。但除电位器之外,构成这一开环控制系统的其它部件均为不精确装置。它们的特性容易发生改变,且将导致虚构的标定;因此,具有较差的准确度。实际上,简单的开环控制系统,由于它本身的不精确性及其种种不利因素;因此,从不用它来作为要求准确的火力控制系统的定位。

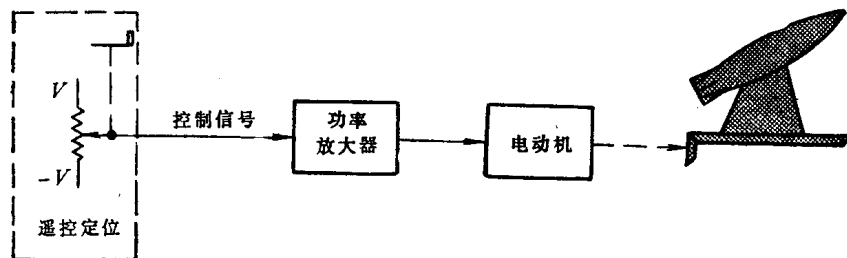


图1-3 遥控导弹发射架的角定位系统

图1-4为磁场控制直流电动机拖动的恒速切割轮控制系统。假设控制信号保持不变,当木块作用于切割轮表面时,就像有一个扰动力矩作用在电动机拖动力矩上,致使切割轮转速降低。图1-5中所示即说明这一情况。在电动机和负载之间的符号相当于存在一个减法器。

扰动力矩或其它附加输入的作用对开环系统的准确性是不利的。由于没有反馈比较的作用,它无法自动校正输出的大小。为使附加输入得以补偿,必须依靠人工去改变系统的输入。

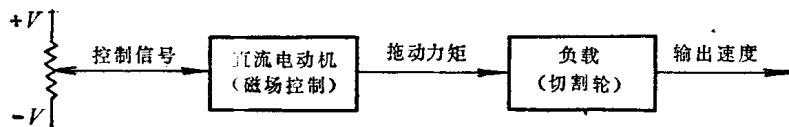


图1-4 磁场控制直流电动机拖动系统

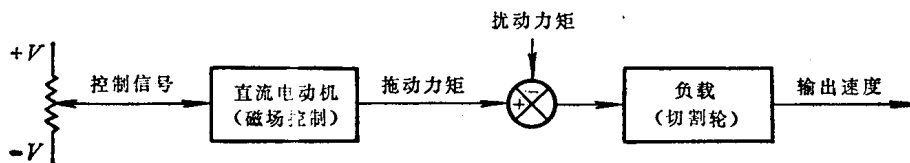


图1-5 具有扰动力矩的磁场控制直流电动机拖动系统

§ 1-3 闭环控制系统

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。当误差检测器产生一正比于输入与输出的偏差信号时,将导致闭环控制系统的输出发生改变,且一直到输出等于输入,也即是误差为零时为止。实际输出和期望输出之间的任何偏差,在闭环控制系统中将自动地进行校正。经过正确的设计,可以相对地使系统不受附加输入和部件特性变化的影响。本节叙述如何将§1-2中所讲过的开环控制系统改造成闭环控制系统。

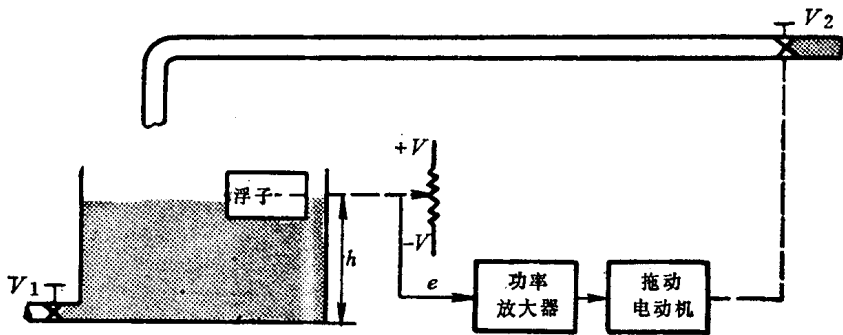


图1-6 贮槽液面自动控制系统

图 1-6 所示为图 1-1 的贮槽液面自动控制系统图。该系统不论通过阀 V_1 的输出流量怎样发生变化，也能维持所要求的贮槽液面 h 在十分准确的允许偏差之内。若贮槽液面稍有变动，就立即产生一个误差电压 e 。

误差电压经过放大后作用于调节阀 V_2 的拖动电动机上，从而调节输入流量，使之恢复到所期望的贮槽液面。类似于这一系统的方块图如图 1-7 所示。因为系统中存在着反馈比较作用，所以称为**闭环**。

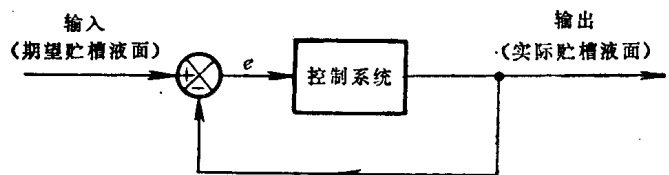


图1-7 闭环控制系统方块图

图 1-8 所示为图 1-3 的导弹发射架自动定位系统图。这一反馈系统能按照电位器 R_1 的指令，非常准确地控制导弹发射架的角位置。电位器 R_2 馈送一个信号到差动放大器。差动放大器的作用相当于一个误差检测器。如果有误差，即将误差放大，并作用于执行电动机，调节输出轴位置，直至与输入轴位置一致，且误差至零时为止。图 1-7 所示方块图，也适用于这个系统。输入量为期望的角位置，输出量是实际的角位置，整个控制系统由功率放大器和执行电动机所组成。

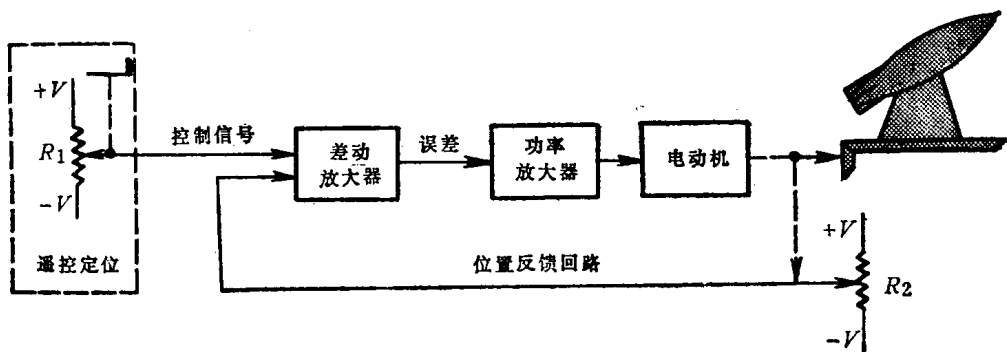


图1-8 导弹发射架自动定位系统

图 1-9 所示为图 1-4 的磁场控制直流电动机速度自动控制系统图。该系统即使承受扰动转矩，也具有维持输出速度相对恒定的能力。这里将速度变换成电压的变换器（测速计）是该系统的反馈部件。若输出速度与要求值不相同，差动放大器随即产生一误差信号，去控制

电动机的激磁电流，使之恢复到要求的输出速度。

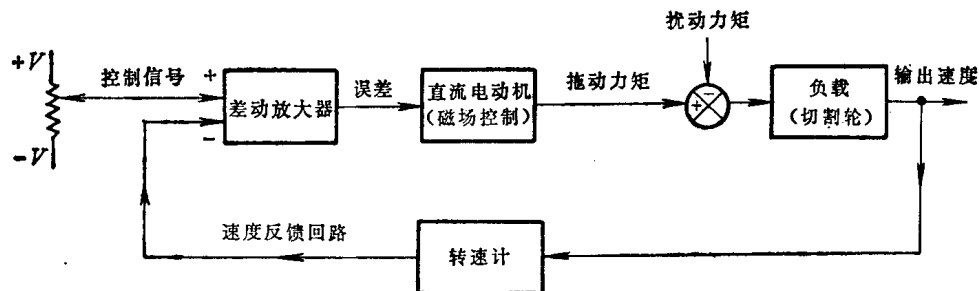


图1-9 磁场控制直流电动机速度自动控制系统

利用反馈系统控制位置、速度和加速度，在工业上和国防上都是很普遍的。这一类系统称为“伺服系统”。反馈系统具有许多的优点，但也有一个严重的缺点，即由于系统是闭环的，可能有时意外地构成了振荡器的作用。然而，只要经过精心的设计，可以消除系统的不稳定性，而充分利用反馈的全部优点。本书的主要任务是研究各种系统，如何达到以上目的。

§ 1-4 仿人控制系统

生物体的行为与反馈控制系统的功能之间的关系，近年来引起了广泛的注意。N. 维纳 (Norbert Wiener) 在其《控制论》[8] 一书中指出：各类生物的和机械的系统都是信息传输系统和反馈控制系统。他认为研究这些系统，最有效的基础是信息论和反馈控制理论。

反馈系统的某些特征，可与人的行为对照起来。在某些方面，从可以取代人的作用意义上来说，反馈控制系统是会“思考”的。但它们没有主动思考的自由，而是受设计者事先规定的功能所约束。最近自适应反馈控制系统受到广泛的注意，它能在环境改变时，自动地修改它自己的功能，以实现最佳的品质。这类系统与人的适应能力又接近了一步[14]。

的确，人体就是一个极其复杂而又高度完美的自适应反馈控制系统。例如，考察汽车驾驶中人的作用。司机的任务是保持汽车沿道路上所选择路线的中心线行驶。当道路方向改变时，由司机转动驾驶盘进行校正。他的任务是应使输出（汽车的实际路线）与输入（汽车应走的路线）之间的偏差尽可能接近于零。

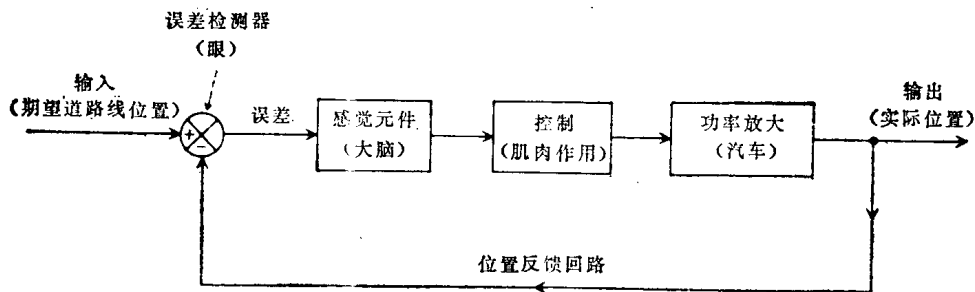


图1-10 汽车驾驶-包含仿人传递函数的反馈控制系统

图 1-10 表示汽车驾驶反馈控制系统的方块图。这里误差检测器是司机的眼睛。在拐弯时，它刺激大脑的视觉神经。信号再从大脑传送到司机的臂力去操纵方向盘。再由汽车驾驶

机构提供功率放大, 控制前轮方位。当然, 这不过是一个粗略的描述。实际上在建立该过程数学模型的各种考虑中, 还应包括人的自适应性和诸如学习效果、疲劳影响、心理状况以及对道路的熟悉程度等各种因素, 而远非如此简单。

§ 1-5 现代控制系统的应用

反馈控制系统, 在日常生活中几乎到处可见。常见的电冰箱中就采用温度控制系统。所要求的温度可以随意设定, 其中的恒温器用来测量实际温度和误差的大小。电动压缩机作为功率放大。控制技术在日常生活中的其它应用有热水电加热器(见习题1-3)、中心加热系统和烘箱等等, 它们的工作都基于一个类似的原理。

在工业上, **自动化**这一用语更加普遍。现代工业设备中, 常对温度、压力、速度和位移等物理量进行控制。在化工过程控制方面, 自动化起了很重要的作用^[1]。因此, 作为控制工程师对温度、压力、湿度、浓度、体积、质量和许多其它的变化量等的控制应给予十分的注意。自动化在其它方面的应用, 还有自动化仓库^[2]、编目控制^[3]和农业耕作自动化^[4]等等。

现代控制的概念已越来越多地帮助人们解决各种问题。例如, 在运输方面, 出现了指挥交通运输和控制高速列车的自动控制系统。受到广泛欢迎的高速铁路运输系统, 已在日本运行^{[5][6]}。这个最近投入运行的日本国营铁路系统——东京到大阪超特快列车, 见图1-11。东京——大阪间的高速铁路线, 通常称为东海道(Tokaido)线。全长320英里(515公里), 运行三小时零十分。大部分运行时速为130英里(200公里)。该系统只用了一台控制计算机, 控制所有列车按最佳方式运行。图1-12所示为该高速自动列车系统的位置控制简图。它包括有位置测量回路和速度测量回路。位置测量由车轮转动测出的, 速度测量采用速度传感装置, 如测速计测得。控制计算机监视系统中所有列车的位置和速度, 并通过高速通讯系统发出控制信号。

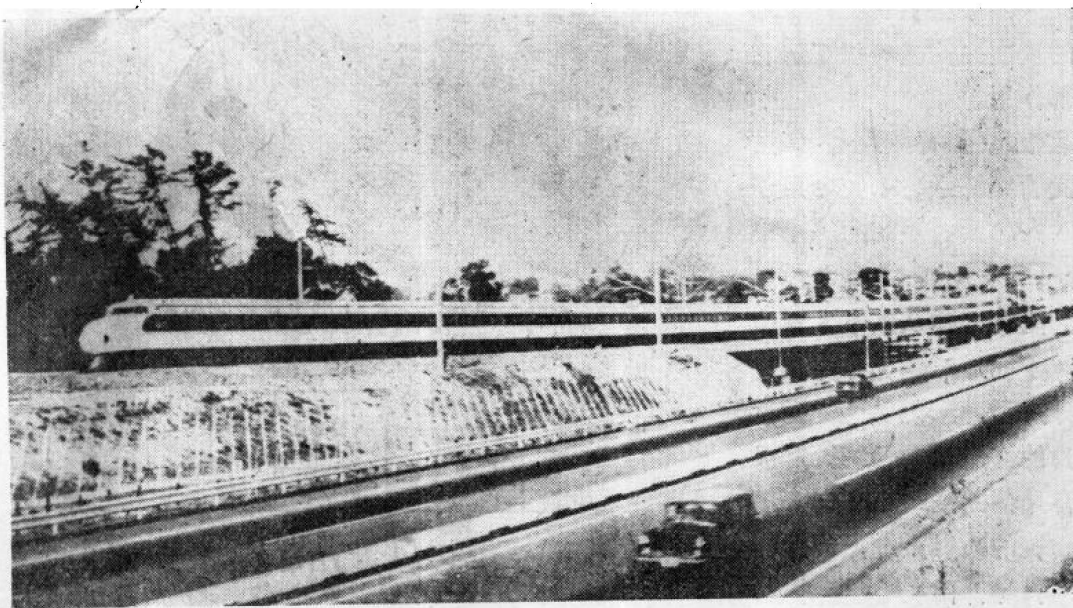


图1-11 东京——大阪超特快列车

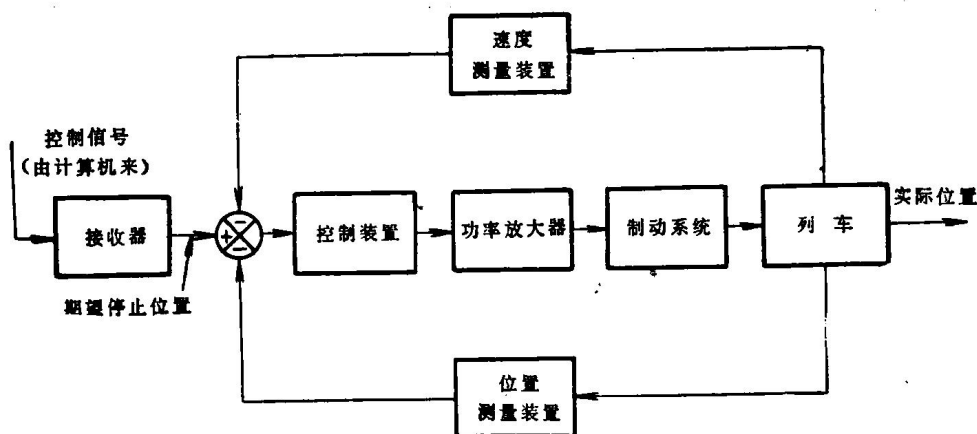


图1-12 自动位置控制系统

航空和航天工业更是大量地采用自动控制系统。现代高速飞机，如 F-4 型这样的远程全天候截击和攻击轰炸机，在其飞行期间，控制几乎完全自动化。图 1-13 所示为它的座舱检测仪器。图 1-14 为飞机典型自动驾驶仪一个轴的简图。反馈回路的概念是很明显的。图中把期望的航向与实际的航向进行比较，产生的误差信号去操纵飞机的控制部件，以使航向误差减小到零。自动控制设计原理也适应于宇宙飞船的姿态稳定问题，图 1-15 所示为阿波罗宇宙飞船。图 1-16 是宇宙飞船空间姿态控制系统一个轴的典型方块图。同样也把期望的姿态与实际的姿态进行比较，并在闭环回路内采用计算机控制。从该图中可以看出，根据简单的反馈回路就可以了解它的全部作用。

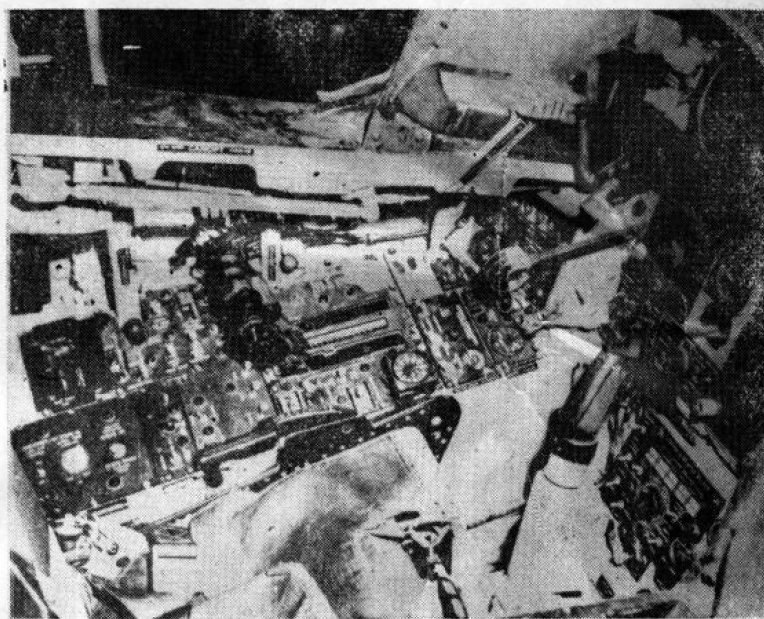


图1-13 F-4 型飞机驾驶座舱



图1-14 典型自动驾驶系统

北极星-海神式舰载弹道导弹武器系统是自动控制用于复杂的海军武器系统的一个很好例子^[9]。图 1-17 是北极星 A-3 型战略导弹从水下发射的情形。下面通过这种导弹发射和制导过程，来说明这一运行中包含的许多控制系统。北极星导弹是借助空气或气体/蒸汽发动机的喷射系统，由潜艇发射的。导弹由发射管中射出，从水下推至海面。这时，控制系统自动点燃导弹的第一级火箭发动机，进入飞行阶段。

为了有效地控制导弹，必须准确地知道目标和发射架的相对位置。而且还需很精确地知道发射时的初始速度。由于舰艇（发射架）的位置和速度在舰载弹道导弹系统中是不断变化的，因此在设计导弹的导航系统时，必须主要根据这点来考虑。纽约-大内克-斯佩里系统管理局，斯佩里-兰德公司所经营的舰载弹道导弹导航系统，为了高度准确地确定舰艇所在的位置和速度，采用了几种相互补偿修正的办法。系统的核心是舰艇的惯性导航系统，这是一个由陀螺仪、加速度计和计算机组成的复杂系统。计算机把舰艇各个方向上的方位和速度与真正指北方位及时地对比，不断地给出舰艇的信息。导弹导航是由惯性平台和数字计算机组成一个封闭系统，惯性平台是一个三轴加速度计的陀螺稳定装置。导弹一经发射后，就完全由导弹上的计算机进行导弹的全面控制。飞行期间，由惯性平台不断测量导弹的加速度，将它积分就成为速度信号，连续馈送给计算机。计算机把已获得的速度信息与参考速度不断进行比较，这个参考速度是这样确定的：如果按照这个速度，弹头就能沿着弹道轨道继续飞行而命中目标。因此，当导弹达到所要求的速度时，计算机自动发出指令，使第二级发动机分离，则有效载荷准确沿弹道飞向目标。

在生物的假肢技术工程方面，也采用了许多反馈控制系统的概念^{[10][11]}。

作为应用反馈控制系统的概念帮助一个断肢者的实例，让我们来研究一个电动假肢的新成就。图 1-18 所示为一个人工肘，称为波士顿(Boston)假肢，是由麻州理工学院、自由相互保险公司、麻州综合医院和哈佛医科学学校联合研制成功的^{[12][13]}。这一装置的依据是当肌肉组织收缩而引起的生物化学反应，产生大约一毫伏左右的电信号，称为肌电信号。甚至在臂被切除后，只要根部还保留某些可收缩的肌肉组织，就能产生这种肌电信号。由大脑向肢臂传送信息的传出神经系统，控制着肌电信号的大小，并被装在肌肉表皮上的导电传感器接受。该信号放大之后，驱动残废者假肢内用电池供电的电动机。二头

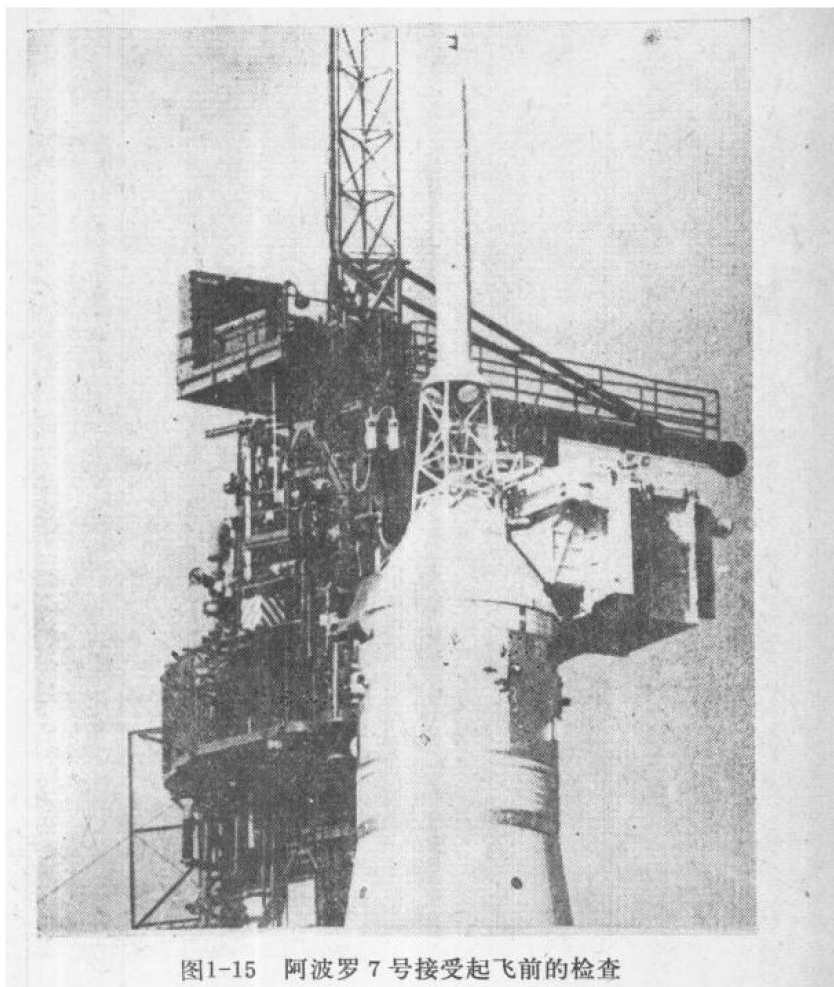


图1-15 阿波罗7号接受起飞前的检查

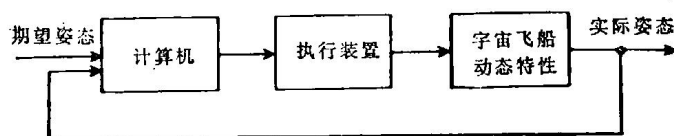


图1-16 宇宙飞船姿态典型控制系统

肌信号控制弯曲器械，三头肌信号控制伸展动作。关于力敏神经系统的传出神经反射性反馈作用，由应变元件实现，其输出电信号通过反馈系统与肌动电信号相对比，于是，残废者就能判定自己假肢臂力的大小。臂的角度位置由触觉显示变换，也反馈到神经控制系统。在使用时，只要借助平常的视觉和听力，就可以帮助残废者确定自己假肢的位置。

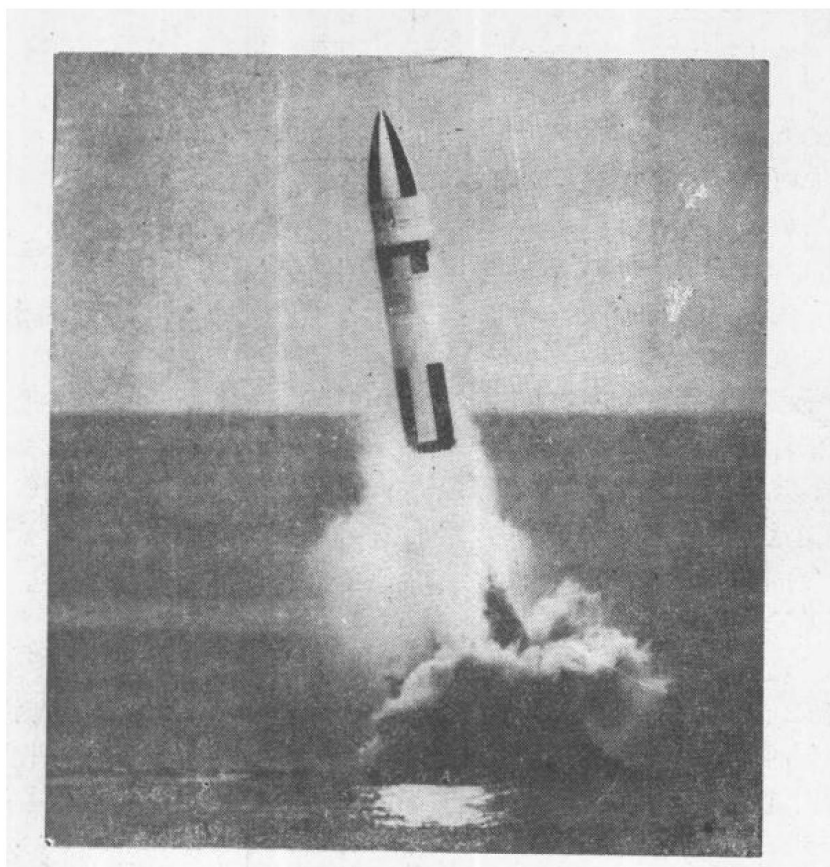


图1-17 北极星 A-3型导弹水下发射情况

自动控制理论应用于模拟经济系统的反馈过程，这样能更好地了解它。经济系统包含有许多反馈过程和调整机构。图 1-19 所示为有关国民收入、经济管理政策、私人商业投资、商品生产、纳税和消费者开支等方面的概略经济模型。借助这个反馈模型，经济分析工作者就可以了解管理政策和私人商业投资对国民收入的全部影响。

反馈控制系统尚有很大的发展前景和无限的潜力。在现代科学技术迅猛发展的时代，作为一个控制系统工程师，应该是知识渊博且能熟练解决各种问题的专家。

在开始分析和综合反馈控制系统的讨论之前，先定义一下控制方面的通用术语，以备将来使用。

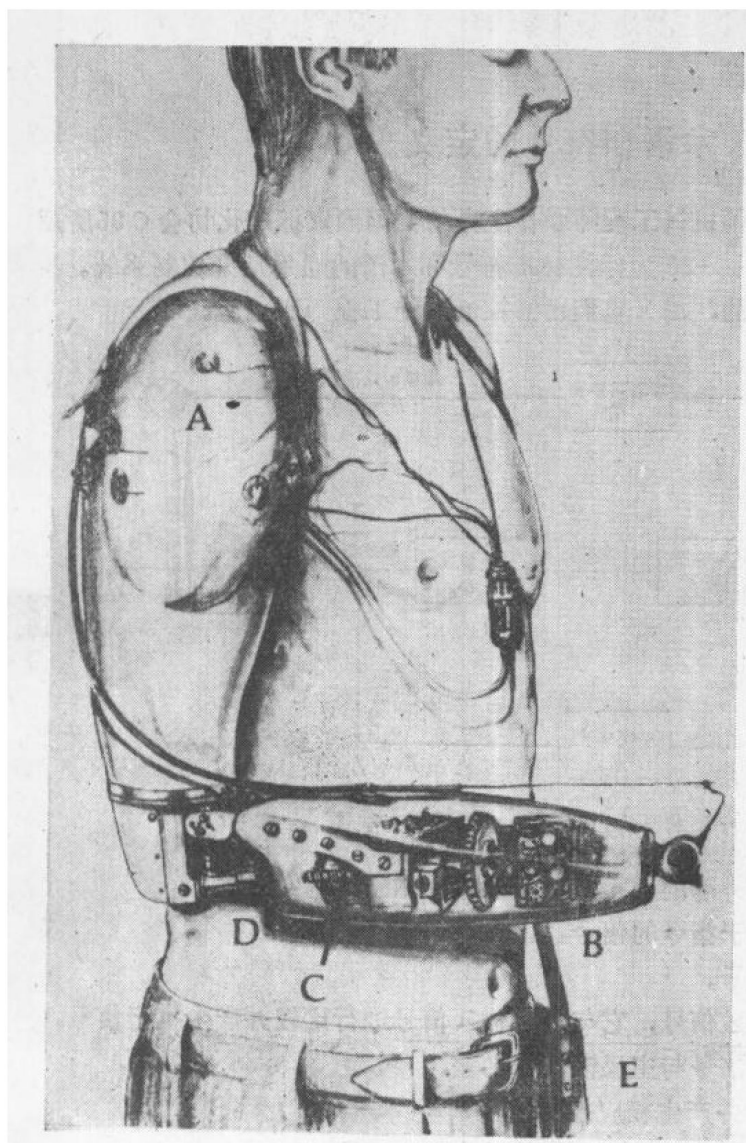


图1-18 波士顿假肢

肌电信号 (A) 由小型计算机 (B) 处理。小型计算机比较肌肉力与末端装置上的负载。控制电动机 (C) 完成前臂举起和落下所要求的速度和力。从电动机通过齿轮传动改变滚珠丝杠 (D) 的长度, 实现前臂的运动。电动机的电源置于残肢者腰带上的小电池包 (E) 内。

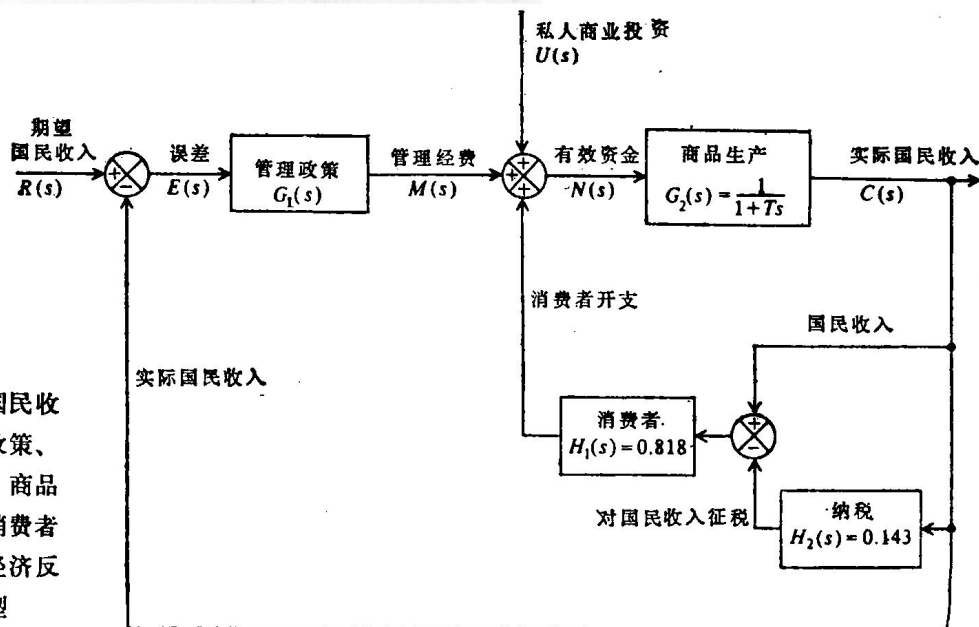


图1-19 关于国民收入、经济管理政策、私人商业投资、商品生产、纳税和消费者开支等方面的经济反馈联系模型

§ 1-6 术语和符号的定义

本节介绍的术语和符号,是以美国机械工程师学会主办的美国国家标准化协会 C 85 所规定的自动控制术语〔7〕〔15〕为基础。图 1-20 为标注标准符号和术语的通用反馈控制系统。其术语、符号和它们的定义是应该记住的,因为它们已为控制系统工程师所通用。

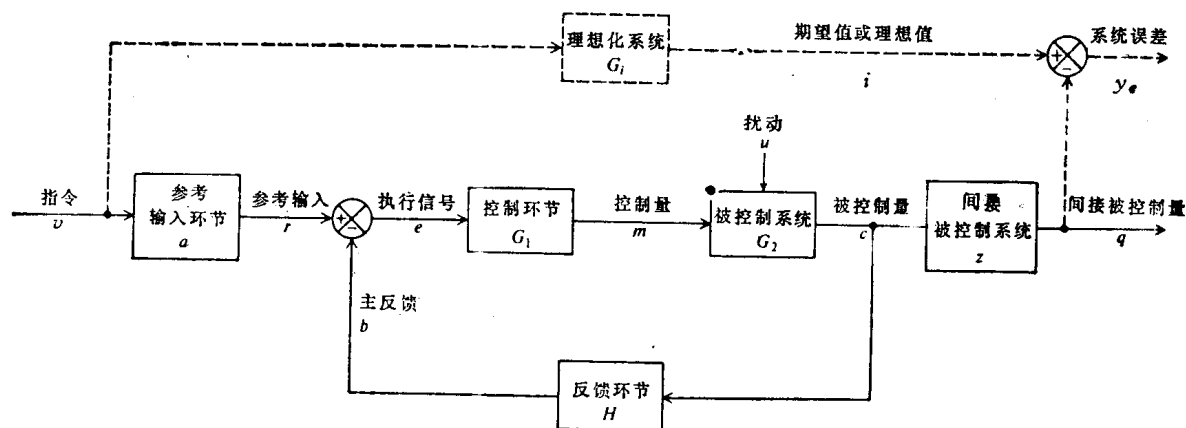


图1-20 说明符号和术语的通用反馈控制系统方块图

指令 v ——指来自反馈控制系统外部的输入量,与反馈控制系统本身无关。

参考输入环节 a ——它产生正比于指令的信号。

参考输入 r ——正比于指令的信号。

主反馈 b ——它是被控制量的函数信号,它与参考输入信号进行比较并产生执行信号。

执行信号 e ——它等于参考输入信号与主反馈信号之差。

控制环节 G_1 ——它接受执行信号并产生相应控制量。

控制量 m ——来自控制环节并作用于被控制系统的量值。

扰动 u ——代表非所需要的而又影响被控制量 c 的一些量值。

被控系统 G_2 ——它是被控制的对象。

被控制量 c ——为反馈系统中被控制的一个量值。

间接被控系统 z ——它是在反馈回路外部,联系被控制量与间接被控制量的部分。

间接被控制量 q ——被控制量经过间接被控系统所得的相应量。它在反馈系统之外,而不被控制系统直接测量。

反馈环节 H ——将被控制量转换为主反馈信号的装置。

理想化系统 G_i ——能从指令直接产生理想响应的一个系统。

理想值 i ——在与实际系统相同的指令作用下,由理想化系统所产生的间接被控制的量值。

系统误差 y_e ——是间接被控制量与理想值之间的误差值。

方块图的虚线部分表示一个理想系统。它对系统间接被控制量和理想或所要求的量进行比较。这两个量的差值就是系统的误差。对具有单位反馈的系统来说,理想化系统应为一单位。

参考输入环节和反馈环节通常由所谓**变换装置**组成。它们把输入信号的某种形式变换成

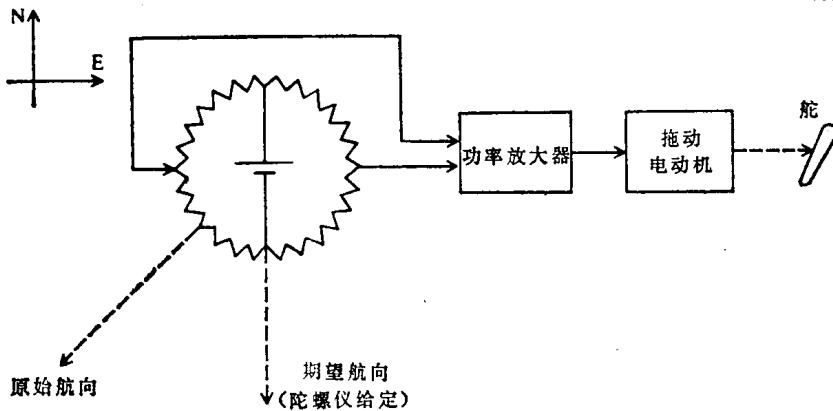
另一种形式。在工业上变换器的例子很多，电位器便是一种最简单的形式。它的基本作用是把一个转轴的角位置变换成与其成正比的电信号。测速计和加速度计便是将速度和加速度变换成与其成正比电信号的变换器。压力变换器和温度变换器分别将压力和温度变换成正比的电信号。

控制环节的基本功能是对执行信号进行放大并修正信号的频率特性，以保证系统稳定。为此，采用了电子、机电、电磁、液动、射流^[16]和气动等各种装置。

被控制系统是响应控制量并产生被控制量的部分。例如，被控制系统可以是导弹发射架、飞机机身或化工过程等等。

习 题

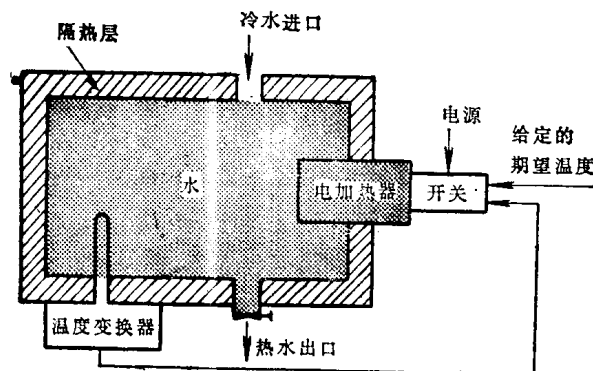
1-1 习题 1-1 图所示为控制舰船航向方位的控制系统。由陀螺给定的期望航向作为参考量。并从装在舰船上的变阻器获得正比于参考量的电信号。试定性分析，当指令向南方向行驶时，该系统应如何操作。



习题 1-1 图

1-2 试说明习题 1-1 中所述舰舵定位系统，如何改造成闭环系统。

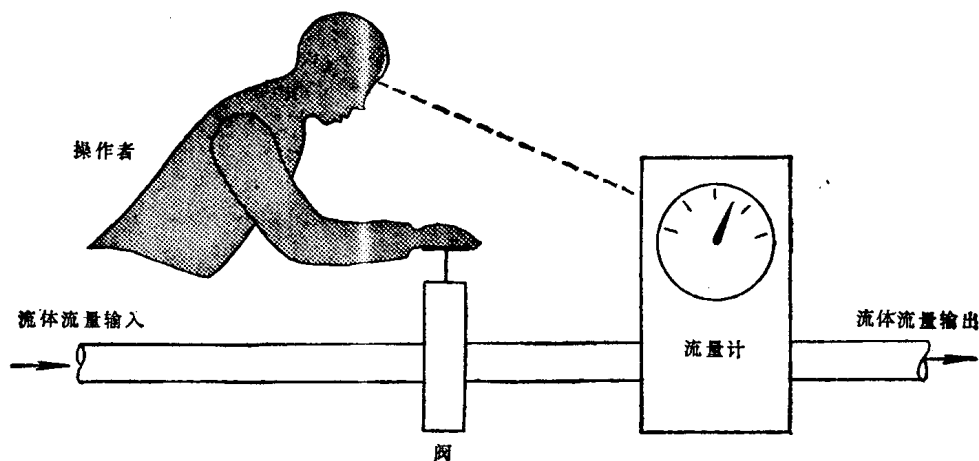
1-3 习题 1-3 图所示为热水电加热器。为了保持所期望的温度，由控温开关轮流接通或断开电加热器的电源。在使用热水时，水槽中流出热水并补充冷水。试画出这一闭环控制系统的原理方块图，若要改变所需温度时，定性地说明它应怎样操作。



习题 1-3 图

1-4 试说明习题 1-3 所述系统，当水槽周围环境温度突然变化时，应如何操作。参考方块图加以说明。

1-5 习题 1-5 图是由人工操作者作为构成这个闭环控制系统一部分的控制系统。试画出该流量控制系统的方块图。



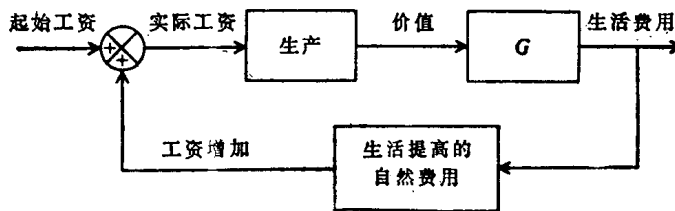
习题 1-5 图

1-6 试设计一个以电压形式作为指令的内燃机速度控制系统，并阐明系统的动作过程。

1-7 试设计某公寓的电梯控制系统，要求该系统能控制位置、速度和加速度。所设计系统的位置、速度和加速度应具有哪些要求或限制？

1-8 对于习题 1-7 所设计的控制系统，当有一个 200 磅重的人进入停在公寓某层楼的电梯时，利用原理性方块图，说明系统出现了何种现象？

1-9 习题 1-9 图所示为说明工资、价值和生活费用之间关系的经济模型。注意生活提高的自然费用导致工资的正反馈作用。试指出如何能以立法管理方式，附加一个反馈回路，使经济系统稳定下来。



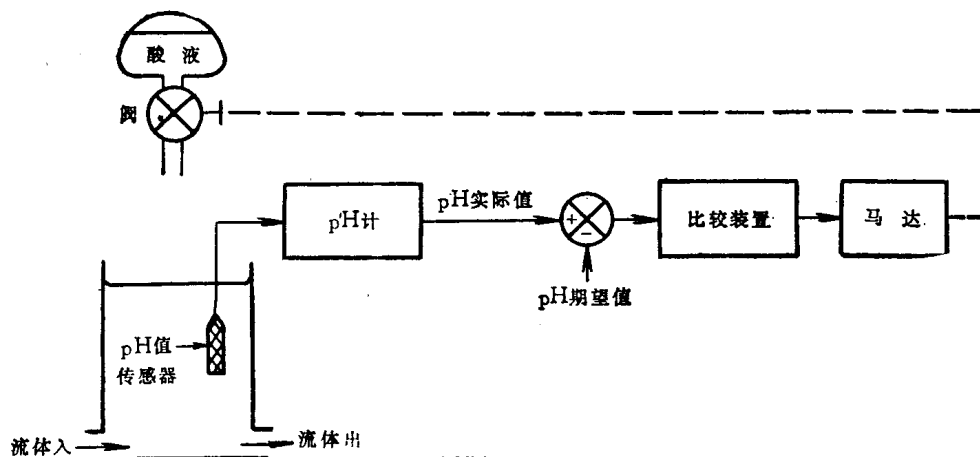
习题 1-9 图

1-10 试说明图 1-12 所示的位置自动控制系统中，若速度测量装置失灵时，对系统产生什么影响？系统能否继续工作？

1-11 如果飞机突然进入湍流大气层，试说明对图 1-14 所示自动驾驶仪系统的影响。

1-12 试修改图 1-16 宇宙飞船姿态控制系统的方块图，使之在计算机一旦失灵时可由人去操纵飞船。

1-13 化工过程控制系统中 pH（氢离子）比的控制是一个非重要的因素。习题 1-13 图所示为溶液通



习题 1-13 图