

自动控制原理

(第 3 版)

胡寿松 主编

自动控制原理

(第3版)

胡寿松 主编

国防工业出版社

(京)新登字 106 号

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/胡寿松主编.-3版.-北京:国防工业出版社,1994

ISBN 7-118-01196-7

- I. 自…
- II. 胡…
- III. 自动控制
- IV. TP13

自动控制原理

(第3版)

胡寿松 主编

责任编辑 陈子玉

国防工业出版社出版

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京市王史山胶印厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 40 937千字

1994年5月第3版 1994年5月北京第6次印刷 印数:76901—85400册

ISBN 7-118-01196-7/TP·160 定价:18.30元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

第3版前言

自动控制理论的形成和发展,经历了近半个世纪的历程。40年代中到50年代末形成的经典控制理论,比较成功地解决了简单控制系统的分析和设计问题,至今仍在广泛成功地应用。然而,鉴于60年代初进入了空间技术时代,控制工程向高性能方向发展,并采用了数字计算机进行分析设计和实时控制,因而需要并可能处理时变、非线性以及多输入-多输出等复杂控制系统问题。由于用经典控制理论处理这类问题时存在较大的局限性,因此出现了现代控制理论并获得了迅速发展。随着快速和微型计算机的出现和普及,现代控制理论早已进入了实际应用阶段。但是,现代控制理论并不能完全取代经典控制理论,需根据不同的具体情况加以选用。本书的主要内容包括经典控制理论和现代控制理论两大部分,以经典控制理论为主。

本书初版是1979年问世的,由国防工业出版社出版。初版受到广大有关读者的欢迎,被许多兄弟高等院校选作《自动控制原理》课程的教科书,并于1985年被评为航空工业部优秀教材。为了进一步提高本书质量,1984年由国防工业出版社出版了本书的修订版,修订依据是原航空工业部制订的《自动控制原理》教学大纲。本书修订版继续得到了广大读者的爱护和帮助,1988年被评为全国优秀教材。从1984年至今,时光又流逝了10年,科学技术在不断发展,推陈出新,部订《自动控制原理》教学大纲也进行了相应修订。为了适应新的形势发展,本书第3版与广大读者见面了。本书第3版在不断总结提高修订版内容的基础上进行了全面修改,使其不仅具有理论严谨、系统性强的特点,而且富有工程性,便于读者自学。我们希望并相信,本书对培养读者的辩证思维能力,树立理论联系实际的科学观点和提高综合与分析问题的能力,都具有重要的作用。

本书精选了修订版中的主要内容,加强了对基本理论及其应用的阐述,深入浅出地介绍了自动控制的基本概念;在时域和复域中,建立了控制系统的数学模型及其结构图和信号流图的表示方法;比较全面地给出了线性控制系统的时域分析法、根轨迹法、频域分析法,以及校正和设计等方法;对于线性离散系统的理论及应用,在基本概念、数学模型、稳定性、稳态误差、动态性能以及数字校正等方面,进行了详细讨论;对于非线性控制系统理论,给出了相平面和描述函数两种常用的分析方法。在现代控制理论方面,本书最后两章系统地阐述了线性系统的状态空间分析与综合方法,以及动态系统的最优控制方法。

为了使读者在定性分析能力、定量估算能力、综合运用能力、数-形结合能力以及初步联系工程实际能力等方面有所增强,1990年国防工业出版社出版了由胡寿松任主编、沈程智任副主编的《自动控制原理习题集》,作为本书的配套教学用书。

本书由胡寿松教授主编,胡裕德教授主审。各章编者有:田林(第一、二章),胡寿松(第三、六、七章),沈程智(第四章),林代业(第五章),孟宪藩(第八章),阙志宏(第九章)以及李言俊(第十章)。此外,西北工业大学的陈新海教授参与了本版编写

IV

纲要的讨论和组织工作；北京科技大学孙昭圆认真校阅了本书；许多同行曾给以热情的支持和帮助，提出过不少宝贵的修改意见；作者的研究生范存海等为本书的出版也付出了辛勤的劳动。在此，一并表示由衷的感谢。

对于本版中存在的错误和不妥之处，恳请广大读者不吝指正。

胡寿松

内 容 简 介

本书系《自动控制原理》一书的第3版，比较全面地阐述了自动控制的基本理论与应用。全书共分十章，前八章着重介绍经典控制理论及应用，后两章扼要介绍现代控制理论及应用。

本书精选了修订版中的主要内容，加强了对基本理论及其应用的阐述，深入浅出地介绍了自动控制的基本概念；建立了控制系统在时域和复域中的数学模型，及其结构图和信号流图表示法；比较全面地给出了线性控制系统的时域分析法，根轨迹法，频域分析法以及校正和设计等方法；对线性离散系统的基础理论，数学模型，稳定性及稳态误差，动态性能分析，以及数字校正等问题，进行了比较详细的讨论；在非线性的分析方面，给出了相平面和描述函数两种常用的分析方法。考虑到与研究生课程的衔接，本书最后两章系统地阐述了线性系统的状态空间分析与综合，以及动态系统的最优控制方法。

本书1985年被评为航空工业部优秀教材，1988年被评为航空航天部优秀教材。

本书可作为高等工业院校自动控制、工业自动化、电气自动化、仪表及测试、机械、动力、冶金等专业的教科书，亦可供从事自动控制类的各专业工程技术人员自学与参考。

目 录

第一章 自动控制的一般概念	1	5-6 闭环频率特性	212
1-1 自动控制的基本原理与方式	1	5-7 系统时域指标估算	222
1-2 自动控制系统示例	7	5-8 传递函数的实验确定法	230
1-3 自动控制系统的分类	11	习题	232
1-4 对自动控制系统的基本要求	13	第六章 线性系统的校正方法	239
习题	16	6-1 系统的设计与校正问题	239
第二章 控制系统的数学模型	20	6-2 常用校正装置及其特性	247
2-1 控制系统的时域数学模型	20	6-3 串联校正	259
2-2 控制系统的复域数学模型	29	6-4 反馈校正	274
2-3 控制系统的结构图与信号流图	39	6-5 复合校正	282
习题	64	习题	291
第三章 线性系统的时域分析法	71	第七章 线性离散系统的分析与校正	296
3-1 线性系统时间响应的性能指标	71	7-1 离散系统的基本概念	296
3-2 一阶系统的时域分析	73	7-2 信号的采样与保持	308
3-3 二阶系统的时域分析	77	7-3 z 变换理论	317
3-4 高阶系统的时域分析	96	7-4 离散系统的数学模型	330
3-5 线性系统的稳定性分析	103	7-5 离散系统的稳定性与稳态误差	348
3-6 线性系统的稳态误差计算	111	7-6 离散系统的动态性能分析	360
习题	124	7-7 离散系统的数字校正	367
第四章 线性系统的根轨迹法	128	习题	379
4-1 根轨迹方程	128	第八章 非线性控制系统分析	384
4-2 根轨迹绘制的基本法则	131	8-1 非线性控制系统概述	384
4-3 广义根轨迹	144	8-2 常见非线性特性及其对系统运动的影响	388
4-4 系统性能的分析与估算	154	8-3 相平面法	393
习题	164	8-4 描述函数法	419
第五章 线性系统的频域分析法	168	习题	437
5-1 引言	168	第九章 线性系统的状态空间分析与综合	442
5-2 频率特性	168	9-1 线性系统的状态空间描述	442
5-3 典型环节和开环系统频率特性	175		
5-4 奈奎斯特稳定判据	203		
5-5 稳定裕度	209		

9-2 线性系统的可控性与可观测性	480	10-1 最优控制的一般概念.....	558
9-3 线性定常系统的状态反馈与状态 观测器	518	10-2 变分法求泛函极值问题	561
9-4 李雅普诺夫稳定性分析	542	10-3 极小值原理及其应用.....	579
习题	552	10-4 线性二次型问题的最优控制 ...	598
第十章 动态系统的最优控制方法	558	10-5 动态规划	614
		习题	625
		参考文献	630

第一章 自动控制的一般概念

1-1 自动控制的基本原理与方式

自动控制技术及其应用 在现代科学技术的许多领域中，自动控制技术起着越来越重要的作用。所谓自动控制，是指在没有人直接参与的情况下，利用外加的设备或装置（称控制装置或控制器），使机器、设备或生产过程（统称被控对象）的某个工作状态或参数（即被控量）自动地按照预定的规律运行。例如，数控车床按照预定程序自动地切削工件；化学反应炉的温度或压力自动地维持恒定；雷达和计算机组成的导弹发射和制导系统，自动地将导弹引导到敌方目标；无人驾驶飞机按照预定航迹自动升降和飞行；人造卫星准确地进入预定轨道运行并回收等，这一切都是以高水平的自动控制技术为前提的。

在国民经济各部门中，由于广泛应用了自动控制技术，改善了劳动条件，提高了产品质量和劳动生产率。近几十年来，随着电子计算机技术的发展和运用，在宇宙航行、导弹制导以及核动力等高新技术领域中，自动控制技术更具有特别重要的作用。不仅如此，自动控制技术的应用范围现已扩展到生物、医学、环境、经济管理和其它许多社会生活领域中，自动控制已成为现代社会活动中不可缺少的重要组成部分。

自动控制理论 自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术科学。它的发展初期，是以反馈理论为基础的自动调节原理，并主要用于工业控制。第二次世界大战期间，为了设计和制造飞机及船用自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达跟踪系统以及其它基于反馈原理的军用装备，进一步促进并完善了自动控制理论的发展。到战后，已形成完整的自动控制理论体系，这就是以传递函数为基础的经典控制理论，它主要研究单输入-单输出、线性定常系统的分析和设计问题。

60年代初期，随着现代应用数学新成果的推出和电子计算机技术的应用，为适应宇航技术的发展，自动控制理论跨入了一个新阶段——现代控制理论。它主要研究具有高性能、高精度的多变量变参数系统的最优控制问题，采用的方法是以状态为基础的时域法。目前，自动控制理论还在继续发展，并且已跨越学科界限，正向以控制论、信息论、仿生学为基础的智能控制理论深入。

反馈控制原理 为了实现各种复杂的控制任务，首先要将被控对象和控制装置按照一定的方式连接起来，组成一个有机总体，这就是自动控制系统。在自动控制系统中，被控对象的输出量，即被控量是要求严格加以控制的物理量，它可以要求保持为某一恒定值，例如温度、压力、液位等，也可以要求按照某个给定规律运行，例如飞行航迹、记录曲线等；而控制装置则是对被控对象施加控制作用的机构的总体，它可以采用不同的原理和方式对被控对象进行控制，但最基本的一种是基于反馈控制原理组成的反馈控制

系统。

在反馈控制系统中，控制装置对被控对象施加的控制作用，是取自被控量的反馈信息，用来不断修正被控量的偏差，从而实现对被控对象进行控制的任务，这就是反馈控制的原理。

其实，人的一切活动都体现出反馈控制的原理，人本身就是一个具有高度复杂控制能力的反馈控制系统。例如，人用手拿取桌上的书，汽车司机操纵方向盘驾驶汽车沿公路平稳行驶等，这些日常生活中习以为常的平凡动作都渗透着反馈控制的深奥原理。下面，通过解剖手从桌上取书的动作过程，透视一下它所包含的反馈控制机理。在这里，书位置是手运动的指令信息，一般称为输入信号（或参据量）。取书时，首先人要用眼睛连续目测手相对于书的位置，并将这个信息送入大脑（称为位置反馈信息）；然后由大脑判断手与书之间的距离，产生偏差信号，并根据其大小发出控制手臂移动的命令（称控制作用或操纵量），逐渐使手与书之间的距离（即偏差）减小。显然，只要这个偏差存在，上述过程就要反复进行，直到偏差减小为零，手便取到了书。可以看出，大脑控制手取书的过程，是一个利用偏差（手与书之间距离）产生控制作用，并不断使偏差减小直至消除的运动过程；同时，为了取得偏差信号，必须要有手位置的反馈信息，两者结合起来，就构成了反馈控制。显然，反馈控制实质上是一个按偏差进行控制的过程，因此，它也称为按偏差的控制，反馈控制原理就是按偏差控制的原理。

人取物视为一个反馈控制系统时，手是被控对象，手位置是被控量（即系统的输出量），产生控制作用的机构是眼睛、大脑和手臂，统称为控制装置。我们可以用图 1-1 的系统方块图来展示这个反馈控制系统的基本组成及工作原理。

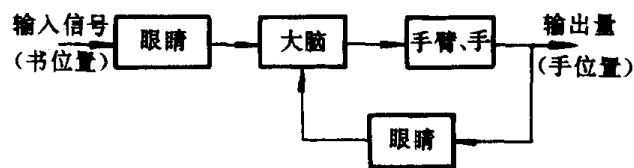


图 1-1 人取书的反馈控制系统方块图

通常，我们把取出输出量送回到输入端，并与输入信号相比较产生偏差信号的过程，称为反馈。若反馈的信号是与输入信号相减，使产生的偏差越来越小，则称为负反馈；反之，则称为正反馈。反馈控制就是采用负反馈并利用偏差进行控制的过程，而且，由于引入了被控量的反馈信息，整个控制过程成为闭合的，因此反馈控制也称闭环控制。

在工程实践中，为了实现对被控对象的反馈控制，系统中必须配置具有人的眼睛、大脑和手臂功能的设备，以使用来对被控量进行连续的测量、反馈和比较，并按偏差进行控制。这些设备依其功能分别称为测量元件、比较元件和执行元件，并统称为控制装置。

在工业控制中，龙门刨床速度控制系统就是按照反馈控制原理进行工作的。通常，当龙门刨床加工表面不平整的毛坯时，负载会有很大的波动，但为了保证加工精度和表面粗糙度，一般不允许刨床速度变化过大，因此必须对速度进行控制。图 1-2 是利用速度反馈对刨床速度进行自动控制的原理示意图。图中，刨床主电动机 SM 是电枢控制的直流电

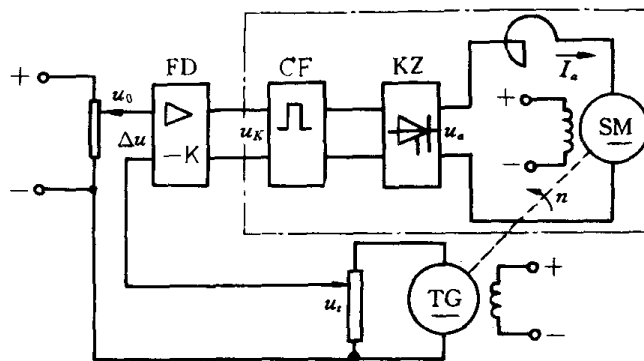


图 1-2 龙门刨床速度控制系统原理图

动机，其电枢电压由晶闸管整流装置 KZ 提供，并通过调节触发器 CF 的控制电压 u_c ，来改变电动机的电枢电压，从而改变电动机的速度（即被控量）。测速发电机 TG 是测量元件，用来测量刨床速度并给出与速度成正比的电压 u_i 。然后，将 u_i 反馈到输入端并与给定电压 u_0 反向串联便得到偏差电压 $\Delta u = u_0 - u_i$ 。在这里， u_0 是根据刨床工作情况预先设置的速度给定电压，它与反馈电压 u_i 相减便形成偏差电压，因此 u_i 称为负反馈电压。一般，偏差电压比较微弱，故需经放大器 FD 放大后才能作为触发器的控制电压。在这个系统中，被控对象是电动机，触发器和整流装置起了执行控制动作的作用，故称为执行元件。现在具体分析一下刨床速度自动控制的过程。当刨床正常工作时，对于某给定电压 u_0 ，电动机必有确定的速度给定值 n 相对应，同时亦有相应的测速发电机电压 u_i ，以及相应的偏差电压 Δu 和触发器控制电压 u_c 。如果刨床负载变化，例如增加负载，将使速度降低而偏离给定值，同时，测速发电机电压 u_i 将相应减小，偏差电压 Δu 将因此增大，触发器控制电压 u_c 也随之增大，从而使晶闸管整流电压 u_a 升高，逐步使速度回升到给定值附近。这个过程可用图 1-3 的一组曲线表明。由图可见，负载 M_1 在 t_1 时突增为 M_2 ，致使电动机速度由给定值 n_1 急剧下降。但随着 Δu 和 u_a 的增大，速度很快回升， t_2 时速度便回升到 n_2 ，它与给定值 n_1 已相差无几了。反之，如果刨床速度因减小负载致使速度上升，则各电压量反向变化，速度回落过程完全一样。另外，如果调整给定电压 u_0 ，便可改变刨床工作速度。因此，采用图 1-2 的自动控制系统，既可以在不同负载下自动维持刨床速度不变，也可以根据需要自动地改变刨床速度，其工作原理都是相同的。它们都是由测量元件（测速发电机）对被控量（速度）进行检测，并将它反馈回比较电路与给定值相减而得到偏差电压（即速度负反馈），经放大器放大、变换后，执行元件（触发器和晶闸管整流装置）便依据偏差电压的性质对被控量（速度）进行相应调节，从而使偏差消失或减小到允许范围。可见，这是一个由负反馈产生偏差，并利用偏差进行控制直到最后消除偏差的过程，这就是负反馈控制原理，简称反馈控制原理。

应当指出的是，图 1-2 的刨床速度控制系统是一个有静差系统。由图 1-3 的速度控制过程曲线可以看出，速度最终达到的稳态值 n_2 与原给定速度 n_1 之间始终有一个差值存在，这个差值是用来产生一个附加的电动机电枢电压，以补偿因增加负载而引起的速度下降。因此，差值的存在是保证系统正常工作所必需的，一般称为稳态误差。如果从结

构上加以改进，这个稳态误差是可以消除的。

图 1-4 是与图 1-2 对应的刨床速度控制系统方块图。在方块图中，被控对象和控制装置的各元部件（即硬件）分别用一些方块表示。系统中感兴趣的物理量（即信号），如电流、电压、温度、位置、速度、压力等，用箭头表示。用进入方块的箭头表示各元部件的输入量，用离开方块的箭头表示其输出量，被控对象的输出量便是系统的输出量，即被控量，一般置于方块图的最右端；系统的输入量，即参据量，一般置于系统方块图的左端。

反馈控制系统的基本组成 反馈控制系统是由各种结构不同的元部件组成的。从完成“自动控制”这一职能来看，一个系统必然包含被控对象和控制装置两大部分，而控制装置是由具有一定职能的各种基本元件组成的。在不同系统中，结构完全不同的元部件却可以具有相同的职能，因此，将组成系统的元部件按职能分类主要有以下几种。

测量元件 其职能是检测被控制的物理量，如果这个物理量是非电量，一般再转换为电量。例如，测速发电机是用于检测电动机轴的速度并转换为电压；电位器、旋转变压器或自整角机是用于检测角度并转

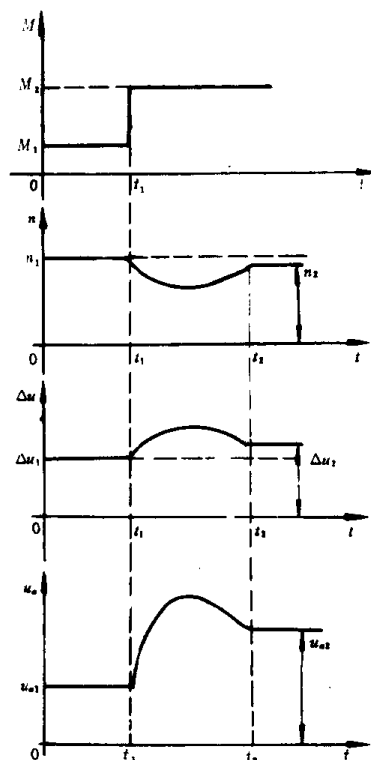


图 1-3 龙门刨床速度自动控制过程

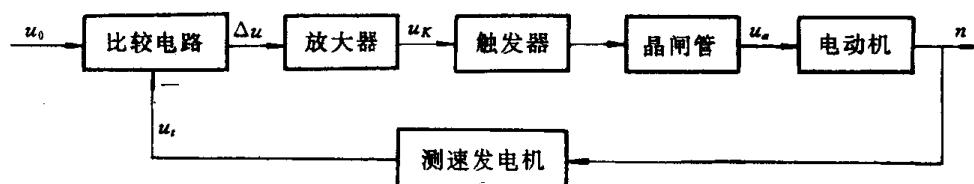


图 1-4 龙门刨床速度控制系统方块图

换为电压；热电偶是用于检测温度并转换为电压等。

给定元件 其职能是给出与期望的被控量相对应的系统输入量（即参据量）。例如图 1-2 中给出电压 u_0 的电位器。

比较元件 其职能是把测量元件检测的被控量实际值与给定元件给出的参据量进行比较，求出它们之间的偏差。常用的比较元件有差动放大器、机械差动装置、电桥电路等。图 1-2 中，由于给定电压 u_0 和反馈电压 u_f 都是直流电压，故只需将它们反向串联便可得到偏差电压。

放大元件 其职能是将比较元件给出的偏差信号进行放大，用来推动执行元件去控制被控对象。电压偏差信号，可用电子管、晶体管、集成电路、晶闸管等组成的电压放大级和功率放大级加以放大。

执行元件 其职能是直接推动被控对象，使其被控量发生变化。用来作为执行元件的有阀、电动机、液压马达等。

校正元件 也叫补偿元件，它是结构或参数便于调整的元件，用串联或反馈的方式连接在系统中，以改善系统的性能。最简单的校正元件是由电阻、电容组成的无源或有源网络，复杂的则用电子计算机。

一个典型的反馈控制系统基本组成可用图 1-5 方块图表示。图中，用“○”代表比较

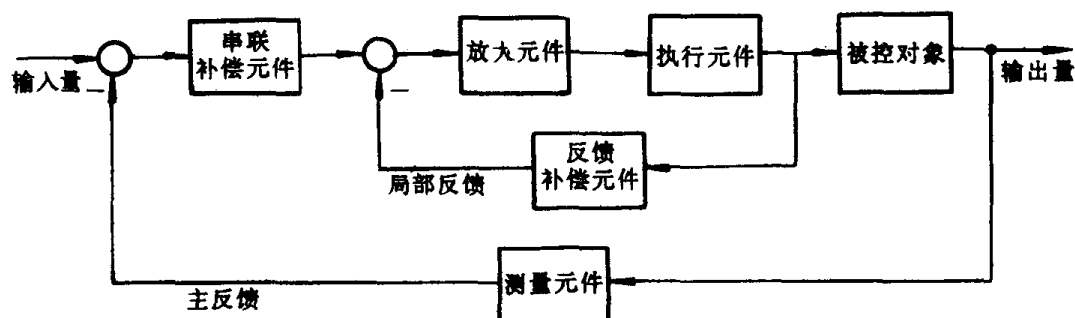


图 1-5 反馈控制系统基本组成

元件，它将测量元件检测到的被控量与参据量进行比较，“-”号表示两者符号相反，即负反馈；“+”号表示两者符号相同，即正反馈。信号从输入端沿箭头方向到达输出端的传输通路称前向通路；系统输出量经测量元件反馈到输入端的传输通路称主反馈通路。前向通路与主反馈通路共同构成主回路。此外，还有局部反馈通路以及由它构成的内回路。只包含一个主反馈通路的系统称单回路系统；有两个或两个以上反馈通路的系统称多回路系统。

一般，加到反馈控制系统上的外作用有两种类型，一种是有用输入，一种是扰动。有用输入决定系统被控量的变化规律，例如参据量；而扰动是系统不希望有的外作用，它破坏有用输入对系统的控制。在实际系统中，扰动总是不可避免的，而且它可以作用于系统中的任何元部件上，也可能一个系统同时受到几种扰动作用。电源电压的波动，环境温度、压力以及负载的变化，飞行中气流的冲击，航海中的波浪等，都是现实中存在的扰动。在图 1-2 的速度控制系统中，切削工件外形及切削量的变化就是一种扰动，它直接影响电动机负载转矩，并进而引起刨床速度的变化。

自动控制系统基本控制方式 反馈控制是自动控制系统最基本的控制方式，也是应用最广泛的一种控制系统。除此之外，还有开环控制方式和复合控制方式，它们都有各自的特点和不同的适用场合。近几十年来，以现代数学为基础，引入电子计算机的新的控制方式也有了很大发展，例如最优控制、极值控制、自适应控制、模糊控制等。

反馈控制方式 如前所述，反馈控制方式是按偏差进行控制的，其特点是不论什么原因使被控量偏离期望值而出现偏差时，必定会产生一个相应的控制作用去减小或消除这个偏差，使被控量与期望值趋于一致。可以说，按反馈控制方式组成的反馈控制系统，具有抑制任何内、外扰动对被控量产生影响的能力，有较高的控制精度。但这种系统使用的元件多，线路复杂，特别是系统的性能分析和设计也较麻烦。尽管如此，它仍是一

种重要的并被广泛应用的控制方式，自动控制理论主要的研究对象也是用这种控制方式组成的系统。

开环控制方式 开环控制方式是指控制装置与被控对象之间只有顺向作用而没有反向联系的控制过程，按这种方式组成的系统称为开环控制系统，其特点是系统的输出量不会对系统的控制作用发生影响。开环控制系统可以按给定量控制方式组成，也可以按扰动控制方式组成。

按给定量控制的开环控制系统，其控制作用直接由系统的输入量产生，给定一个输入量，就有一个输出量与之相对应，控制精度完全取决于所用的元件及校准的精度。在图 1-2 刨床速度控制系统中，若只考虑虚线框内的部件，便可视为按给定量控制的开环控制系统，刨床期望的速度值是事先调节触发器 CF 的控制电压 u_k 确定的。这样，在工作过程中，即使刨床速度偏离期望值，它也不会反过来影响控制电压 u_k ，因此，这种开环控制方式没有自动修正偏差的能力，抗扰动性较差。但由于其结构简单、调整方便、成本低，在精度要求不高或扰动影响较小的情况下，这种控制方式还有一定的实用价值。目前，用于国民经济各部门的一些自动化装置，如自动售货机、自动洗衣机、产品生产自动线、数控车床以及指挥交通的红绿灯的转换等，一般都是开环控制系统。

按扰动控制的开环控制系统，是利用可测量的扰动量，产生一种补偿作用，以减小或抵消扰动对输出量的影响，这种控制方式也称顺馈控制。例如，在一般的直流速度控制系统中，转速常常随负载的增加而下降，且其转速的下降是由于电枢回路的电压降引起的。如果我们设法将负载引起的电流变化测量出来，并按其大小产生一个附加的控制作用，用以补偿由它引起的转速下降，这样就可以构成按扰动控制的开环控制系统，如图 1-6 所示。可见，这种按扰动控制的开环控制方式是直接从扰动取得信息，并据以改变被控量，因此，其抗扰动性好，控制精度也较高，但它只适用于扰动是可测量的场合。

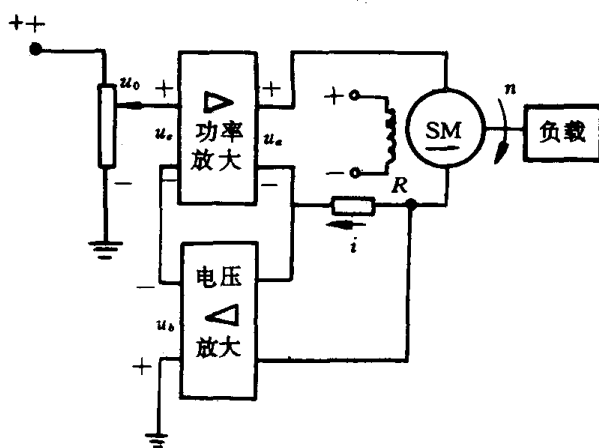


图 1-6 按扰动控制的速度控制系统

复合控制方式 按扰动控制方式在技术上较按偏差控制方式简单，但它只适用于扰动是可测量的场合，而且一个补偿装置只能补偿一个扰动因素，对其余扰动均不起补偿作用。因此，比较合理的一种控制方式是把按偏差控制与按扰动控制结合起来，对于主要扰动采用适当的补偿装置实现按扰动控制，同时，再组成反馈控制系统实现按偏差控

制，以消除其余扰动产生的偏差。这样，系统的主要扰动已被补偿，反馈控制系统就比较容易设计，控制效果也会更好。这种按偏差控制和按扰动控制相结合的控制方式称为复合控制方式。图 1-7 表示一种同时按偏差和扰动控制电动机速度的复合控制系统原理线路图和方块图。

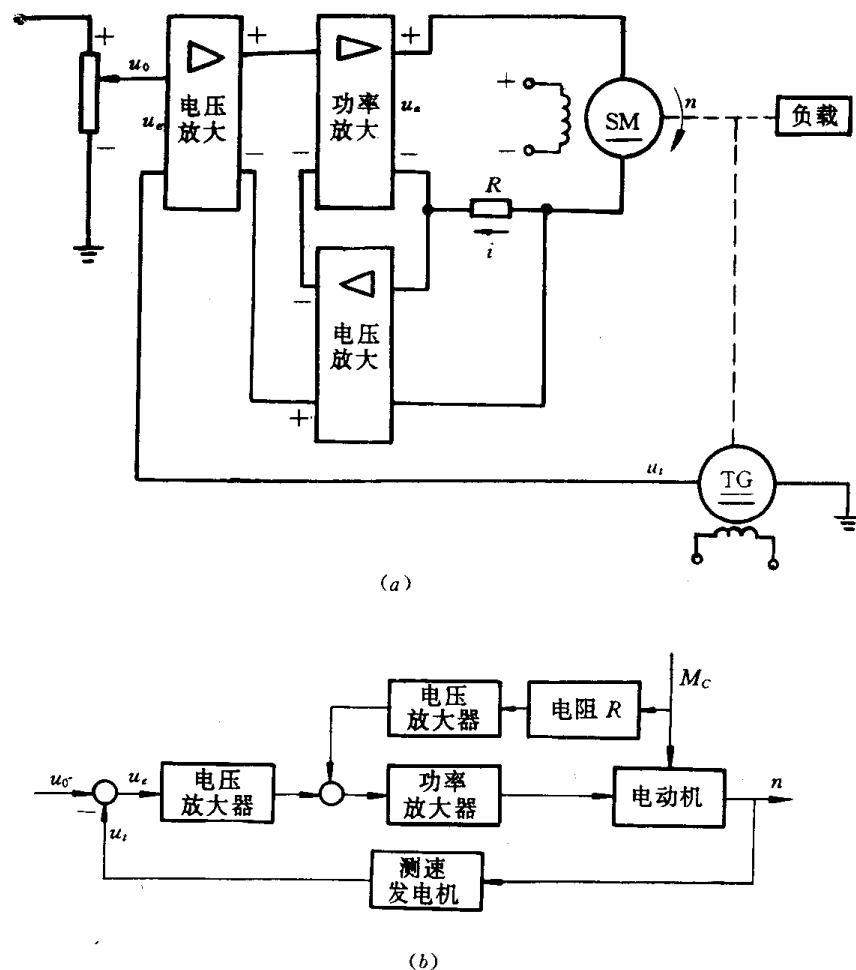


图 1-7 电动机速度复合控制系统

1-2 自动控制系统示例

函数记录仪 函数记录仪是一种通用的自动记录仪，它可以在直角坐标上自动描绘两个电量的函数关系。同时，记录仪还带有走纸机构，用以描绘一个电量对时间的函数关系。

函数记录仪通常由衰减器、测量元件、放大元件、伺服电动机-测速机组、齿轮系及绳轮等组成，采用负反馈控制原理工作，其原理如图 1-8 所示。系统的输入是待记录电压，被控对象是记录笔，其位移即为被控量。系统的任务是控制记录笔位移，在记录纸上描绘出待记录的电压曲线。

在图 1-8 中，测量元件是由电位器 R_Q 和 R_M 组成的桥式测量电路，记录笔就固定在电

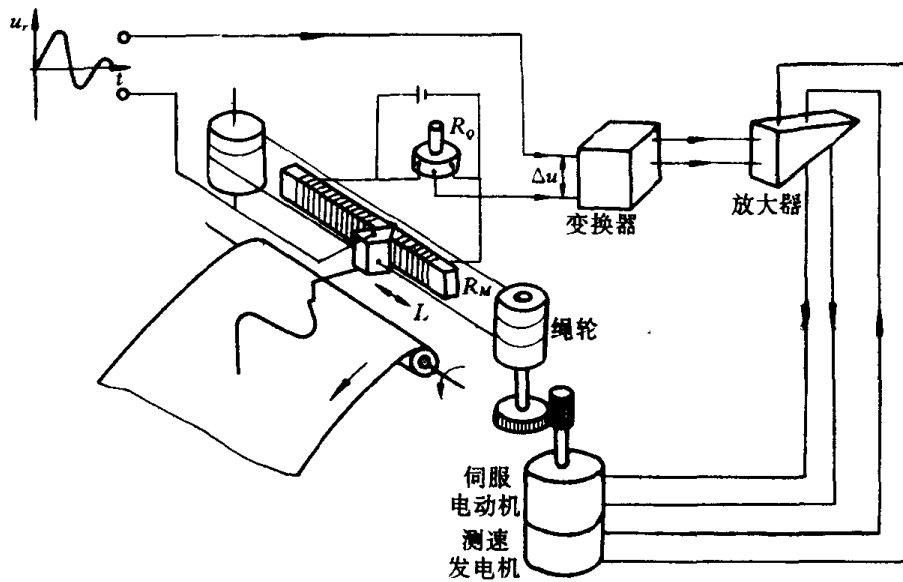


图 1-8 函数记录仪原理示意图

位器 R_M 的滑臂上，因此，测量电路的输出电压 u_p 与记录笔位移成正比。当有慢变的输入电压 u_r 时，在放大元件输入口得到偏差电压 $\Delta u = u_r - u_p$ ，经放大后驱动伺服电动机，并通过齿轮系及绳轮带动记录笔移动，同时使偏差电压减小。当偏差电压 $\Delta u = 0$ 时，电动机停止转动，记录笔也静止不动。此时， $u_p = u_r$ ，表明记录笔位移与输入电压相对应。如果输入电压随时间连续变化，记录笔便描绘出随时间连续变化的相应曲线。函数记录仪方块图见图 1-9，图中测速发电机反馈与电动机速度成正比的电压，用以增加阻尼，改善系统性能。

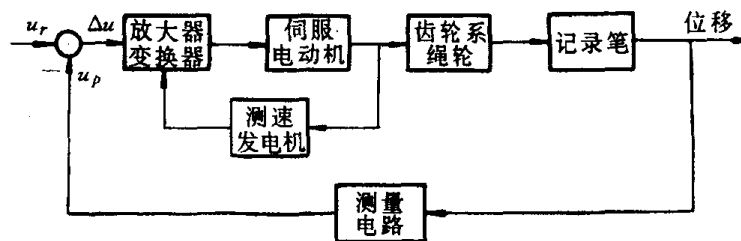


图 1-9 函数记录仪方块图

飞机-自动驾驶仪系统 飞机-自动驾驶仪是一种能保持或改变飞机飞行状态的自动装置。它可以稳定飞行的姿态、高度和航迹；可以操纵飞机爬高、下滑和转弯。飞机与自动驾驶仪组成的自动控制系统称为飞机-自动驾驶仪系统。

如同飞行员操纵飞机一样，自动驾驶仪控制飞机飞行是通过控制飞机的三个操纵面

(升降舵、方向舵、副翼)的偏转,改变舵面的空气动力特性,以形成围绕飞机质心的旋转转矩,从而改变飞机的飞行姿态和轨迹。现以比例式自动驾驶仪稳定飞机俯仰角为例,说明其工作原理。图 1-10 为飞机-自动驾驶仪系统稳定俯仰角的原理示意图。

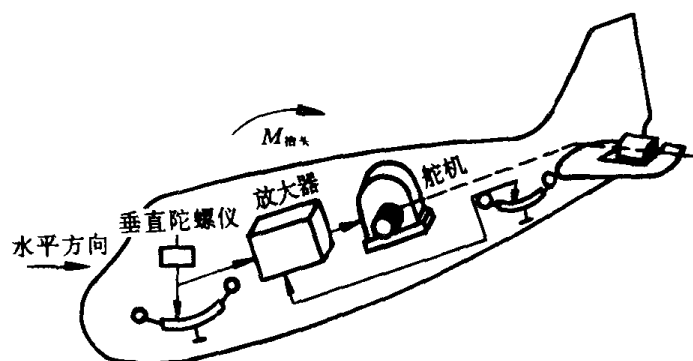


图 1-10 飞机-自动驾驶仪系统原理图

图中,垂直陀螺仪作为测量元件用以测量飞机的俯仰角,当飞机以给定俯仰角水平飞行时,陀螺仪电位器没有电压输出;如果飞机受到扰动,使俯仰角向下偏离期望值,陀螺仪电位器输出与俯仰角偏差成正比的信号,经放大器放大后驱动舵机,一方面推动升降舵面向上偏转,产生使飞机抬头的转矩,以减小俯仰角偏差;与此同时,带动反馈电位器滑臂,输出与舵偏角成正比的电压并反馈到输入端。随着俯仰角偏差的减小,陀螺仪电位器输出信号越来越小,舵偏角也随之减小,直到俯仰角回到期望值,这时,舵面也恢复到原来状态。

图 1-11 是飞机-自动驾驶仪系统稳定俯仰角的方块图,图中,飞机是被控对象,俯仰角是被控量,放大器、舵机、垂直陀螺仪、反馈电位器等是控制装置,即自动驾驶仪。参据量是给定的常值俯仰角,控制系统的任务就是在任何扰动(如阵风或气流冲击)作用下,始终保持飞机以给定俯仰角飞行。

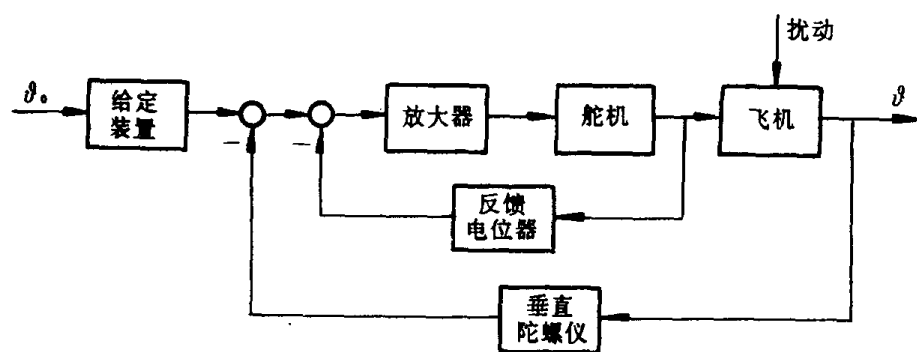


图 1-11 俯仰角控制系统方块图

电阻炉微型计算机温度控制系统 用于工业生产中炉温控制的微型计算机控制系统,具有精度高、功能强、经济性好、无噪声、显示醒目、读数直观、打印存档方便、操作简单、灵活性和适应性好等一系列优点。用微型计算机控制系统代替模拟式控制系统