

自动控制原理

(上册)

南京航空学院
西北工业大学 合编
北京航空学院



国防工业出版社

内 容 简 介

本书比较全面地阐述了自动控制的基本理论,着重介绍经典控制理论,同时简要地介绍了现代控制理论。

全书分上、下两册。上册主要介绍线性定常控制系统的基本理论,其中第一章为控制系统的基本概念,第二章讨论控制系统的数学模型,第三章至第六章介绍分析和设计线性控制系统的时域分析法、频率响应法和根轨迹法。下册介绍非线性系统理论(第七章)、采样系统理论(第八章)、现代控制理论的数学基础(第九章)和现代控制理论(第十章)。书中选编了一定数量的例题和习题,以帮助读者理解和运用基本理论。

本书主要作为高等航空工业院校自动控制类有关专业的教科书,也可供其他工业院校自动控制类有关专业的教师、研究生、高年级学生以及从事自动控制工作的科技人员参考。

自 动 控 制 原 理

(上 册)

南京航空学院
西北工业大学 合编
北京航空学院

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
国防工业出版社印刷厂印装

787×1092¹/₁₆ 印张22 510千字

1979年12月第一版 1979年12月第一次印刷 印数: 98,001—12,500册

统一书号: 15034·1967 定价: 2.25元

前 言

目前, 自动控制技术已广泛地应用于工农业生产、交通运输和国防建设, 自动控制技术的发展水平是衡量一个国家科学技术水平的重要标志之一。近十几年来, 国内外自动控制技术和自动控制系统理论发展很快, 为了满足高等院校教学及广大科技人员学习和参考的迫切需要, 我们组织编写了《自动控制原理》一书, 主要供高等航空工业院校教学之用。

自动控制理论大体上是在近四十年中形成和发展起来的。四十年代中到五十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。但是, 对于五十年代后期出现的大型复杂的控制问题, 例如宇航技术、多输入-多输出、高精度、参数时变系统的分析和设计等问题, 经典控制理论表现出了一定的局限性。从五十年代末开始, 出现了现代控制理论并获得了迅速发展。快速和微型电子计算机的出现, 使现代控制理论进入了实际应用阶段。然而, 现代控制理论并不能取代经典控制理论, 可根据不同情况, 具体分析, 灵活选用。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, 而以经典控制理论为主。在介绍经典控制理论时, 又以线性控制理论为主要内容。在本书的第一章至第六章中, 除介绍控制系统的基本概念和数学模型外, 着重介绍了分析和设计线性定常控制系统的三种主要方法, 即时域分析法、频率响应法和根轨迹法。第七、八两章分别介绍了非线性系统理论和采样系统理论。为了便于学习现代控制理论, 第九章扼要介绍了必要的数学基础知识, 包括矩阵、概率论、随机过程和参数估计等内容。第十章介绍了状态空间法、最优控制、系统辨识和卡尔曼滤波等现代控制理论的主要内容, 以作为读者进一步深入研究现代控制理论的基础。

本书在编写过程中, 吸取了我们在教学和科研工作中取得的经验和成果, 参考了国内外有关书籍和文献, 力求通过工程实例来阐述基本理论和应用方法。在编写中注意到全书技术内容的系统性和完整性, 在叙述方法上力求深入浅出, 突出重点。各章末均选编了一定数量的习题, 供读者练习之用。

本书由南京航空学院主编, 西北工业大学和北京航空学院参加编写。参加本书编写工作的计有: 胡寿松(前言、第三、五、六章)、田林(第一、二章)、林代业(第四章)、程鹏(第七章)、胡干跃(第八章)、陈新海(第九章和§10-8)、徐缤昌(第十章)。书稿编成后, 由孟宪仲、宋子善等同志进行了审阅。全书最后由胡寿松、程鹏修改定稿。

在本书编写过程中, 得到了许多同志的热情支持和帮助, 提出了许多宝贵的修改意见, 谨此致谢。

由于我们水平所限, 书中可能存在许多不妥和错误之处, 敬请读者不吝指正。

目 录

第一章 关于自动控制的一般概念	1	§ 4-1 引言	131
§ 1-1 引言	1	§ 4-2 频率特性	131
§ 1-2 开环控制与闭环控制	1	§ 4-3 典型环节和开环系统的频率特性	139
§ 1-3 闭环控制系统示例及其组成	5	§ 4-4 稳定性分析	176
§ 1-4 对控制系统的性能要求	9	§ 4-5 闭环频率特性	190
§ 1-5 其他控制方式	12	§ 4-6 系统动态性能的估算	203
§ 1-6 控制系统分析和设计的一般介绍	14	§ 4-7 传递函数的实验确定法	214
习题	15	习题	217
第二章 控制系统的数学模型	16	第五章 根轨迹法	224
§ 2-1 引言	16	§ 5-1 引言	224
§ 2-2 富里埃变换和拉普拉斯变换	17	§ 5-2 根轨迹方程	225
§ 2-3 传递函数	39	§ 5-3 根轨迹的绘制	229
§ 2-4 结构图	55	§ 5-4 对数螺旋尺	245
§ 2-5 信号流程图	63	§ 5-5 广义根轨迹	248
§ 2-6 反馈控制系统的传递函数	69	§ 5-6 系统时间响应的确定	258
习题	72	§ 5-7 延迟系统根轨迹	278
第三章 时域分析法	76	习题	284
§ 3-1 引言	76	第六章 线性系统的校正方法	287
§ 3-2 稳定性	79	§ 6-1 引言	287
✓ § 3-3 稳态误差与误差系数	86	§ 6-2 常用校正装置及其特性	289
§ 3-4 一阶系统	100	§ 6-3 频率响应法校正	301
§ 3-5 非振荡二阶系统	103	§ 6-4 根轨迹法校正	316
§ 3-6 振荡二阶系统	108	§ 6-5 复合控制校正	332
§ 3-7 系统最优化概述	123	§ 6-6 后记	338
习题	127	习题	340
第四章 频率响应法	131	参考文献	342

第一章 关于自动控制的一般概念

§ 1-1 引言

自动控制技术广泛地应用于工农业生产、交通运输、国防建设和宇宙航行等部门。随着生产和科学技术的发展,自动控制技术所起的作用越来越重要,自动化的水平也越来越高。

所谓自动控制,就是在没有人直接参加的情况下,利用控制装置使被控制的对象(如机器、设备或生产过程等)自动地按照预定的规律运行(或变化)。例如,化工生产中反应塔的温度和压力能够自动维持恒定不变,跟踪雷达和指挥仪所组成的防空系统能使火炮自动地瞄准目标,无人驾驶飞机能按预定航迹自动飞行,人造地球卫星能够发射到预定轨道并能准确回收等等,都是应用自动控制技术的结果。自动控制理论就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,随着工业生产和科学技术的发展,现已发展成为一门独立的学科——控制论。控制论包括工程控制论、生物控制论和经济控制论。工程控制论主要研究自动控制系统中的信息变换和传送的一般理论及其在工程设计中的应用。而自动控制原理则仅仅是工程控制论的一个分支,它只研究控制系统分析和设计的一般理论。

自动控制技术在宇宙航行、导弹制导、飞机及舰船的驾驶系统等技术领域中具有特别重要的作用;同时,也是实现农业、工业、国防和科学技术现代化的重要手段。目前,电子计算机已成为控制系统的一个重要组成部分,为自动控制技术的应用开辟了新的广阔前景。

在国外,第二次世界大战以后,由于生产和军事的需要,自动控制技术开始迅速地发展起来。到五十年代末期,自动控制理论已经形成比较完整的理论体系,并在工程实践中得到成功的应用。一般把这个时期以前应用的自动控制理论称为经典控制理论。五十年代末,由于宇航技术的发展,要求组成高性能、高精度的复杂控制系统,这样一来,经典控制理论已不能完全满足要求;而另一方面,电子计算机的高度发展,又在客观上提供了必要的技术手段,使得自动控制理论又发展到一个新的阶段——现代控制理论。目前,现代控制理论已成功地应用在航天、航空、航海以及工业生产中。

§ 1-2 开环控制与闭环控制

自动控制系统 能够对被控制对象的工作状态进行自动控制的系统,称为自动控制系统。它一般由控制装置和被控制对象组成。被控制对象(简称被控对象)是指要求实现自动控制的机器、设备或生产过程,例如,飞机、锅炉、机床以及化工生产过程等。控制装置则是指对被控对象起控制作用的设备总体。

自动控制系统可以按照多种方式组成。

开环控制 开环控制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。因此,开环控制系统的输出量不对系统的控制作用发生影响。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、产品自动生产线、自动车床等，一般都是开环控制系统。

图 1-1 所示电阻丝加热炉是一个开环控制系统。炉子是被控对象，炉温是要求实现自动控制的物理量，称为被控制量（或输出量）。加热电阻丝的开关 K 受时间继电器控制，按照规定的时间（称为输入信号）接通或断开电源，对炉温进行控制，使其保持在希望值的一定范围内。开关 K 与电阻丝对被控制量起控制作用，故称其为控制装置。开关 K 的接通或断开时间，一般是参照在正常情况下炉温可以达到希望值的经验数据来确定的，虽然实际炉温可能稍高于或稍低于希望值，但仍满足恒温要求。然而，如果工作条件变化，例如炉门的开闭次数增加，则炉温散失增大，实际炉温将不再等于希望值而出现偏差。这种使被控制量（炉温）偏离希望值的因素（炉门开闭次数）称为对系统的扰动（或干扰）作用。

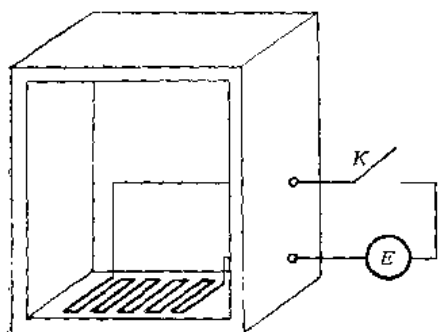


图1-1 电阻丝加热炉

由于开环控制的特点是控制装置只按照给定的输入信号对被控对象进行单向控制，而不对被控制量进行测量并反向影响控制作用，因此当炉温偏离希望值时，这种开环控制系统不具有修正由于扰动而引起的使被控制量偏离希望值的能力。

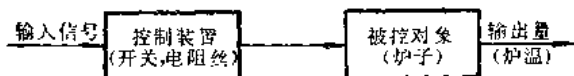


图1-2 开环控制方块图

开环控制系统可用图 1-2 所示方块图表示。图中，控制装置与被控对象分别用方块表示，系统中感兴趣的物理量，如电流、电压、温度、力等，称为信号。在图中用箭头表示信号的传递，进入方块的箭头表示输入信号（也称输入量），离开方块的箭头表示输出量（也称输出信号）。系统的输出量即是被控制量，它的希望值是系统输入信号的函数。

在开环控制中，对于系统的每一个输入信号，必有一个固定的工作状态和一个系统输出量与之对应。例如，一定的时间间隔对应于电阻丝的通电和断电状态以及相应的炉温。这种对应关系调整越准确，开环系统的工作精度便越高。但由于开环控制的抗扰动能力差，因此使用有一定的局限性。

闭环控制 闭环控制是指控制装置与被控对象之间既有顺向作用，又有反向联系的控制过程。闭环控制是自然界中一切生物控制自身运动的基本规律，也是现代自动控制的基本原理，它可以实现复杂而准确的控制。

人本身就是一个具有高度复杂控制能力的闭环系统。例如，人可以用手准确地去拿放在桌上的书、笔等物。这个出现于日常生活中的习以为常的现象，正好体现了闭环控制的原理。当人去拿书时，大脑送出一个信号令手执行任务。这时，眼睛连续观测手的位置，并将这个信息送入大脑；然后，由大脑判断手对于书的偏差，并根据其大小发出命令控制手臂移动，使偏差减小。只要这个偏差存在，上述过程就要反复进行。一旦手拿到书，偏差减小为零，人便完成了用手拿书的控制过程。在此，手是被控对象，手的位置即为被控制量，控制目的是使手的位置与书的位置一致，控制作用是通过眼睛、大脑和手臂来实现

的。人作为一个闭环控制系统可用图 1-3 所示方块图表示。

通常，我们把输出量送回到输入端并与输入信号比较的过程称为反馈。若反馈的信号是与输入信号相减而使偏差值越来越小，则称为负反馈，反之则称为正反馈。图 1-3 中，由于眼睛不断观测手的位置并反应到大脑进行判断，产生了手与大脑之间的反向联系即反馈，然后，大脑根据偏差控制手臂移动使偏差减小，形成了负反馈控制。显然，负反馈控制是一个利用偏差进行控制并最后消除偏差的过程，因此也称为按偏差的控制。同时，由于有反馈存在，整个控制过程是闭合的，因此负反馈控制也称闭环控制。

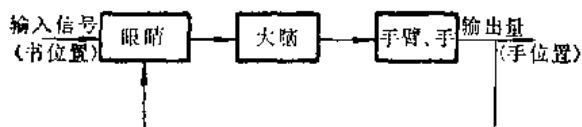


图1-3 人作为闭环系统的方块图

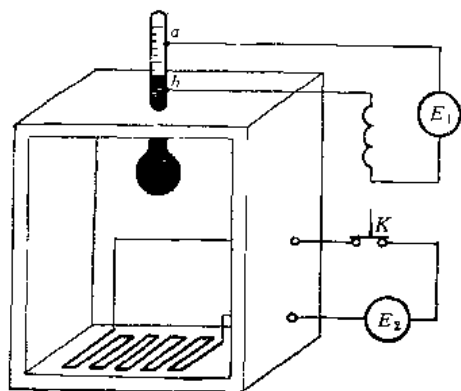


图1-4 电阻丝加热炉闭环系统

在工程实践中，为了实现对被控对象的闭环控制，系统中必须配置具有人的眼睛、大脑和手臂功能的装置，用来对被控制量进行连续测量和反馈，并进行按偏差的控制。这些装置分别称为测量装置、比较装置、放大装置和执行机构，并统称为控制装置（控制器）。

一种可以自动修正炉温偏离的电阻丝加热炉如图 1-4 所示，它是一个闭环控制系统。电阻丝电源的通断由接触式水银温度计控制，水银温度计的两个触点 a 和 b 接在常闭继电器的线圈电路中，它们随着水银柱的升降而接通或断开，从而控制继电器触点 K ，以便切断或接通电阻丝电源 E_2 。例如，若炉温高于希望值，则由于水银柱升高，触点 a 和 b 接通，使继电器启动触点 K 而切断电阻丝电源 E_2 ，停止加热。调整水银温度计触点的位置，可以改变炉温的希望值。

闭环控制的电阻丝加热炉可用图 1-5 所示方块图表示。图中，炉温（被控制量）由温度计测量并与希望值进行比较，一旦出现偏差，即通过继电器和电阻丝对炉温进行控制，以消除偏差，保持恒温。在此，炉子是被控对象，控制装置由温度计、继电器和电阻丝组成。与开环控制的电阻丝加热炉相比，由于采用了接触式水银温度计，可以不断地对炉温进行测量和比较，从而根据炉温的实际偏离进行控制，提高了抗扰动的能力。

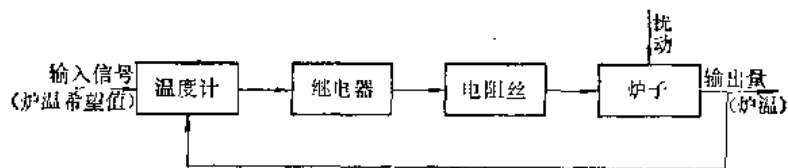


图1-5 电阻丝加热炉系统方块图

在闭环控制中，被控制量一般是由测量装置测量并反馈到输入端，然后由比较装置将它与输入信号进行综合而得到偏差（或误差）。有时，测量与综合作用是由同一个装置完成的，因此，往往把测量装置和比较装置合称为误差检测器。一个闭环控制系统的典型方块

图表示在图 1-6 中, 图中, 用“ $\otimes$ ”表示误差检测器, “-”号则表示负反馈。

必须指出, 只有按负反馈原理组成的闭环系统才能实现自动控制的任务。例如, 在电阻丝加热炉闭环系统中, 负反馈能使炉温对于希望值的偏离逐渐减小; 而正反馈则相反, 将使炉温偏离越来越大, 从而不可能达到自动控制的目的。

开环控制与闭环控制的比较 开环控制结构简单、成本低廉、工作稳定。因此, 在系统的输入量能预先知道并且不存在任何扰动时, 使用开环控制有一定的优越性。但由于它不能自动修正被控制量的偏离, 所以有时元件参数变化以及外来的未知扰动对控制精度影响较大。

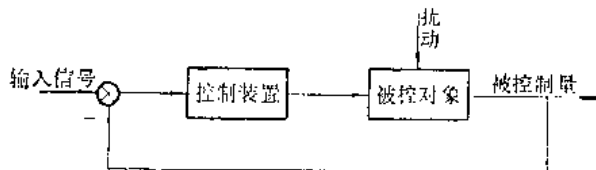


图1-6 闭环控制系统典型方块图

闭环控制具有自动修正被控制量偏离的能力, 因此可以修正元件参数变化以及外界扰动引起的误差, 其控制精度较高。但由于存在反馈, 系统可能产生振荡, 甚至无法工作, 这是自动控制系统设计中必须解决的一个重要课题。

如果要求实现复杂而准确度较高的控制任务, 则可将开环控制和闭环控制适当结合起来, 组成一个比较经济而性能较好的控制系统。

复合控制 复合控制就是开环控制和闭环控制相结合的一种控制方式。实质上, 它是在闭环控制的基础上, 用开环通路提供一个附加的输入作用, 以提高系统的控制精度和动态性能。开环通路通常是由对输入信号的补偿装置或对扰动作用的补偿装置组成, 分别称为按输入的补偿和按扰动的补偿, 如图 1-7 所示。补偿装置的参数按照不变性原理选择。所谓不变性, 是指系统能达到与作用在其上的扰动完全无关或部分无关, 详见本书第六章。

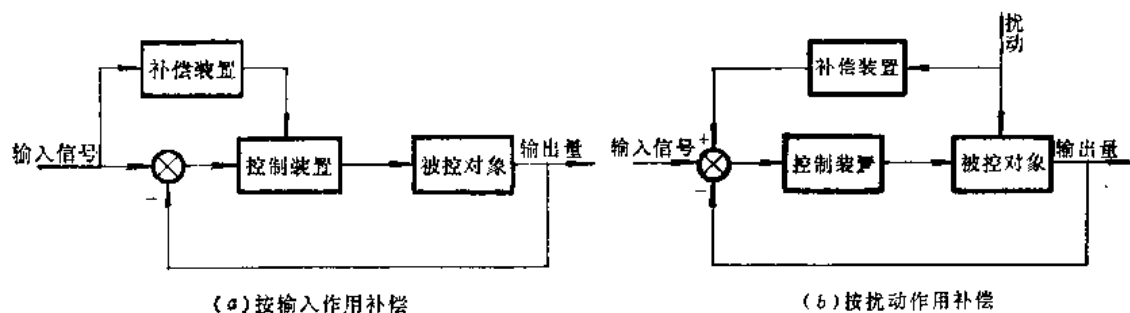


图1-7 复合控制方块图

复合控制与仅按偏差的控制相比, 有更高的精度和快速性, 而且结构简单、可靠, 因此获得了广泛应用。目前, 在许多平台随动系统、火炮随动系统、雷达站随动系统以及飞机自动驾驶仪系统中, 都广泛使用复合控制线路。

图 1-8 为火炮自动控制系统原理方块图, 它是按输入信号补偿的复合控制系统。高炮对空射击时, 要求炮身方位角 θ_r 与指挥仪给定的方位角 θ_c 一致。为了保证炮身能准确跟随高速飞行的目标, 提高跟踪精度, 从指挥仪中通过补偿装置引出方位角的速度信号 $\dot{\theta}_r$, 作为对输入方位角 θ_r 的补偿信号。由于方位角速度信号总要比方位角信号提前一些, 因此只要补偿装置的参数选择合适, 就能使炮身按照指挥仪的方位角信号以要求的角速度准确

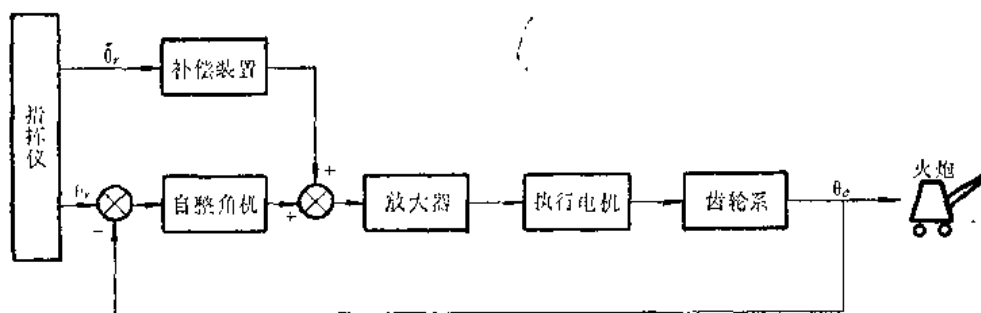


图1-8 火炮自动控制系统

跟踪。

图 1-9 为电动机速度控制系统原理示意图，它是按扰动补偿的复合控制系统。在一定负载力矩时，电位器电刷位置与电动机转速具有单值对应关系。测速发电机反馈一个与电动机转速成正比的电压信号，用以改善系统特性。如果电动机受到扰动作用（例如负载力矩增大），则电动机转速将下降而偏离希望值。这时，由于引入了与负载力矩有关的电枢电流正反馈补偿通路，增强了控制电压，从而使转速升高，补偿了扰动（负载力矩增大）引起的转速下降。

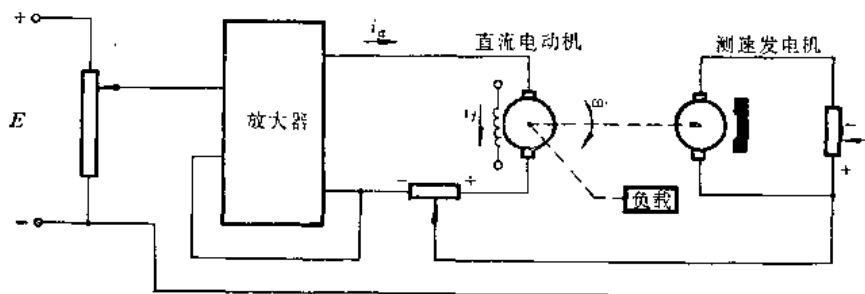


图 1-9 电动机速度控制系统

§ 1-3 闭环控制系统示例及其组成

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。

函数记录仪一般采用负反馈原理，其结构通常由衰减器、测量电路、放大装置、伺服电动机-测速机组、齿轮系及绳轮等组成，其原理示意图见图1-10。系统的输入信号是待记录电压，被控对象为记录笔，其位移即为被控制量。函数记录仪控制系统的任务是控制记录笔位移，使其在记录纸上描绘出待记录的电压曲线。

图 1-10 中，测量电路是由电位器 R_0 和 R_M 组成的桥式线路，记录笔就固定在电位器 R_M 的电刷上，因此测量电路的输出电压 u_p 与记录笔位移成正比。当存在输入信号 u_r 时，在放大装置输入端得到偏差电压 $\Delta u = u_r - u_p$ ，经放大后驱动伺服电动机，并通过齿轮系及绳轮而带动记录笔移动，使偏差电压减小。当偏差电压 $\Delta u = u_r - u_p = 0$ 时，电动机停止转动，记录笔也静止不动。此时， $u_p = u_r$ ，即记录笔位移与输入信号相对应。如果输入信号

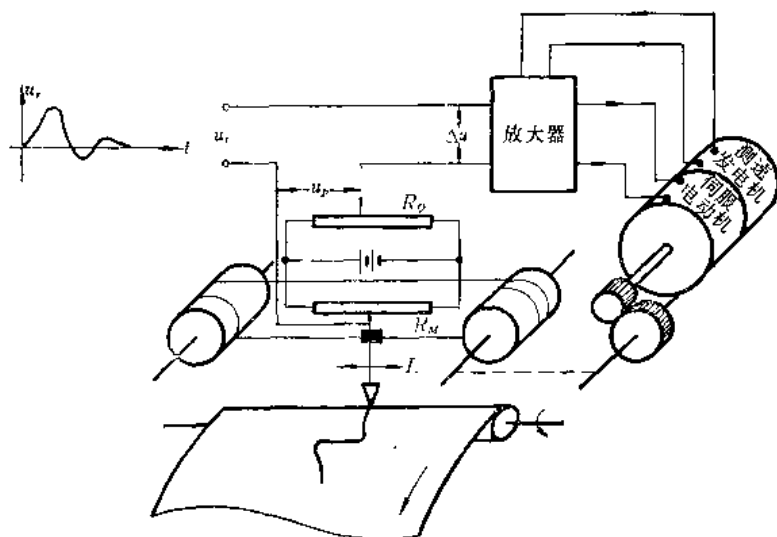


图1-10 函数记录仪原理示意图

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。

函数记录仪控制系统方块图如图 1-11 所示。图中，测速发电机反馈一个与电动机转速成正比的电压信号，以增大系统阻尼而达到改善系统性能的目的。

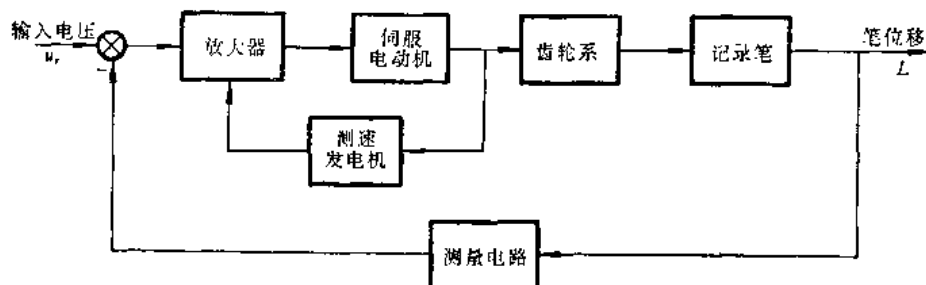


图1-11 函数记录仪系统方块图

函数记录仪输入信号（待记录电压）的变化规律，一般事先是不知道的，它可以是时间的任意函数，这种控制系统通常称为随动系统。

飞行模拟器的视景系统 飞行模拟器是一种能比较逼真地复现飞行器在空中飞行的状态和环境的设备。它通过模拟的方法，把驾驶员在操纵飞机时所能感觉到的飞机姿态、飞行运动；所能看到的各种仪表设备的指示、机外景物的形象以及所能听到的各种噪音逼真地反映出来，使驾驶员就象处在真实飞机驾驶舱中一样地操纵飞机。因此，用飞行模拟器培养飞行员，可以节约经费，缩短训练周期，而且不受场地和气象条件的限制。

飞行模拟器的视景系统的功能是采用闭路电视投影的方法向驾驶员提供外景的模拟。通常，先由视景系统的摄像机拍摄按一定比例制作的地景模型，然后投影到座舱前的电视屏幕上，给驾驶员显示出外景的真实形象。摄像机镜头相对于地景模型的运动即代表飞机的运动（更确切地说，是代表驾驶员眼睛相对地面的运动），它有六个自由度，分别模拟飞机沿 X （水平）、 Y （高度）、 Z （横向）三个方向的线运动和 θ （俯仰）、 γ （横滚）、 ψ （偏航）三个方向的角运动。摄像机在各个方向上的运动，分别由视景系统中相应的一套随动系统控制。下面以高度随动系统为例来说明其工作原理。

视景系统的各套随动系统都是数字计算机控制的系统，其中，高度随动系统的功用是控制摄影机镜头沿地景模型的垂直方向运动，以模拟飞机在飞行过程中的高度变化，其原理简图见图1-12。图中，摄影机镜头按装在由减速器和丝杆所带动的支架S上，可沿Y方向运动，其位置受视景系统程序计算机的控制指令控制，并通过位置参考电位器W将位置

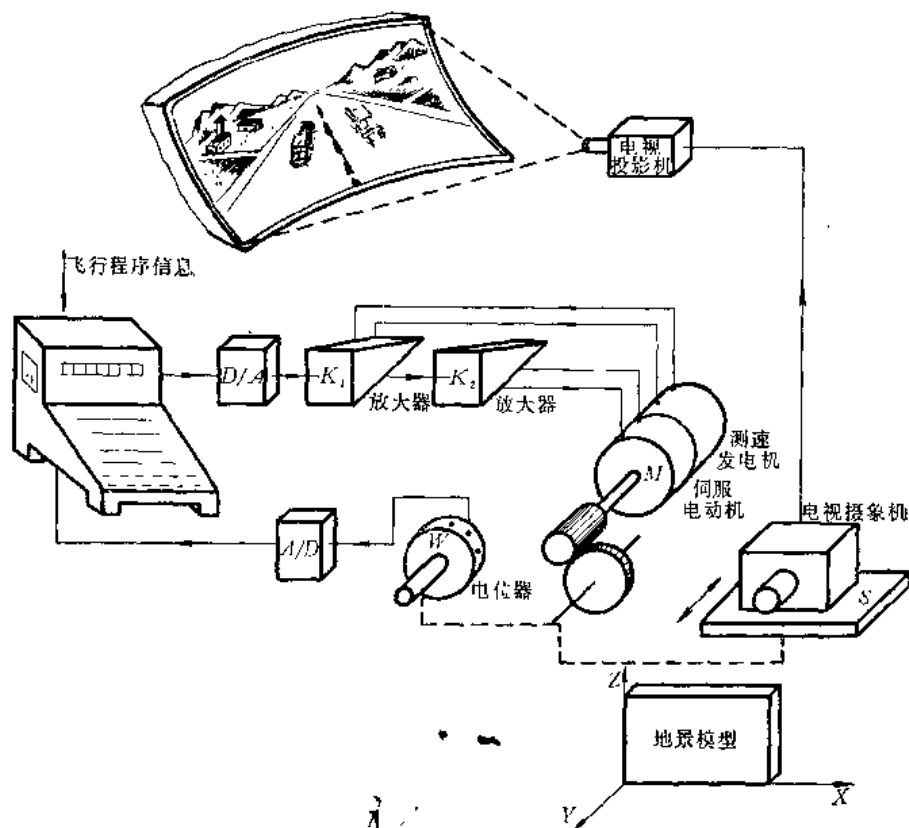


图1-12 视景系统的高度随动系统

信号反馈到计算机。视景系统程序计算机含有十二个子程序，高度随动系统控制指令的形成及位置反馈信号的处理，均在该计算机相应的子程序中进行。计算机给出的控制指令是飞行高度的变化速度，它是根据来自飞行程序的有关信息并经位置反馈信号修正后形成的。计算机输出的控制指令是不连续的数字信息，首先应通过数模转换器（即D/A）转换为连续的物理量。然后，经直流放大器放大，驱动直流伺服电动机M，并通过传动机构带动摄影机支架S按照控制指令运动，以模拟飞行高度的变化；同时，直流伺服电动机M还带动位置参考电位器W的电刷，输出位置反馈信号，然后通过模数转换器（即A/D）转换为不连续的数字信息，送到计算机中进行处理，用以修正控制指令，提高跟踪精度。

高度随动系统方块图如图1-13所示。系统的被控对象是摄影机镜头，其位置即为被控制量，它由来自计算机的控制指令进行控制。显然，视景系统程序计算机已成为控制系统的一个组成部分。测速发电机和放大器 K_1 为校正装置，用以改善系统性能。

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

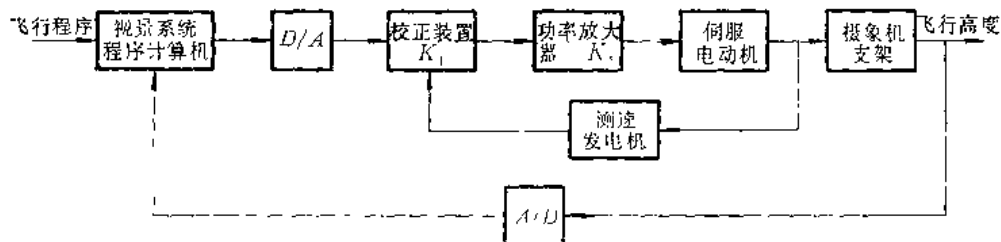


图1-13 高度随动系统方块图

驾驶员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，以形成围绕飞机重心的旋转力矩，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。

飞机的俯仰角用垂直陀螺仪测量。当飞机按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，使俯仰角向下偏离给定值，则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，一方面推动升降舵舵面向上偏转，产生使飞机抬头的力矩，减小俯仰角偏差；与此同时，带动反馈电位器电刷，产生与舵面偏转角成正比的信号并反馈到输入端，如图1-14所示。随着俯仰角偏差的减小，陀螺仪电位器输出信号越来越小，舵面的偏转角也随之逐渐减小，直到俯仰角恢复到给定值为止，这时，舵面也回到原来状态。

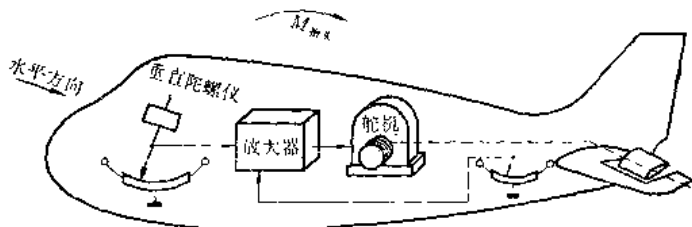


图1-14 飞机自动驾驶仪原理图

飞机自动驾驶仪稳定俯仰角的控制系统方块图如图1-15所示。系统中，被控对象是飞机，其俯仰角即是被控制量，自动驾驶仪则是控制装置。

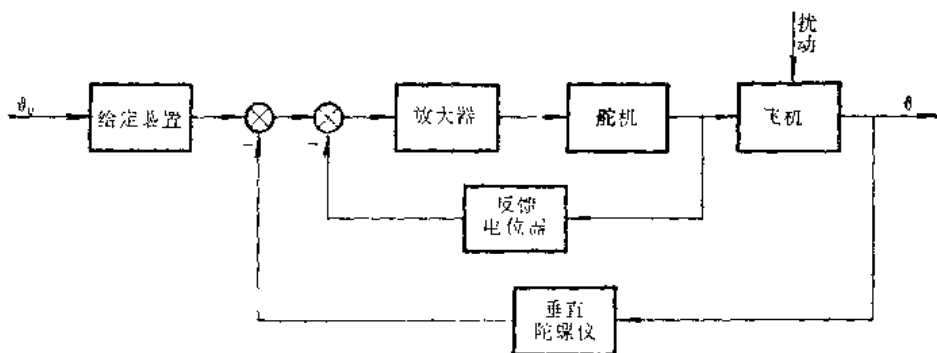


图1-15 俯仰角控制系统方块图

闭环控制系统的基本组成 从上述闭环控制系统示例我们看到，尽管控制系统由不同的元件组成，系统的功用也不一样，但它们都是采用了负反馈工作原理。相同的工作原理，决定了它们必然具有类似的结构。例如，它们都含有测量装置、比较装置、放大装置、执行机构。同时，我们还看到，在不同系统中，可以采用不同的元件去实现某一种功能。

如, 函数记录仪用电位器桥式线路作为测量装置, 以测量记录笔的位移; 飞机自动驾驶仪是用垂直陀螺仪作为测量装置, 用来测量飞机的俯仰角。

一般说来, 一个闭环控制系统均由以下基本元件(或装置)组成。

测量元件 对系统输出量进行测量, 也称敏感元件。

比较元件 对系统输出量与输入信号进行代数运算, 给出偏差(误差)信号, 起信号的综合作用。这个作用往往是由综合电路或由测量元件兼而完成的, 这时统称误差检测器。

放大元件 对微弱的偏差信号进行放大和变换, 输出足够功率和要求的物理量。

执行机构 根据放大后的偏差信号, 对被控对象执行控制任务, 使被控制量与希望值趋于一致。

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。被控对象内要求实现自动控制的物理量称为被控制量或系统输出量。

校正装置 参数或结构便于调整的元件, 用于改善系统性能。

一个典型的自动控制系统的基本组成, 可用图 1-16 方块图表示。图中, 系统的基本元件和被控对象都用方块表示; 信号的传输方向用箭头表示, 该传输方向是单向不可逆的, 这是由元件的物理特性所决定的; “-”号表示输入信号与反馈的信号相减, 即负反馈(“+”号则表示正反馈)。

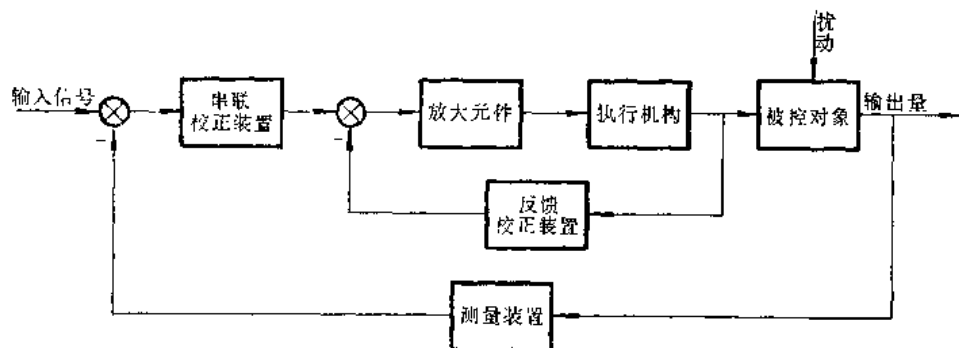


图1-16 自动控制系统基本组成

信号从输入端沿箭头方向到达输出端的传输通路称为前向通路; 系统输出量经由测量装置反馈到输入端的传输通路称为主反馈通路; 前向通路与主反馈通路一起, 构成主回路。此外, 还有局部反馈通路以及由它组成的内回路。只有一个反馈通路的系统称单回路系统, 有两个以上反馈通路的系统, 称为多回路系统。

一般, 控制系统受有两种外作用, 即有用信号和扰动, 它们都可作为系统的输入信号。系统的有用输入信号决定系统被控制量的变化规律, 而扰动是系统不希望的外作用, 它破坏有用信号对系统输出量的控制。在实际系统中, 扰动总是不可避免的, 它可以作用于系统中的任何部位。电源电压的波动, 环境温度、压力的变化, 飞行中气流的扰动以及负载的变化等, 都是现实中存在的扰动。通常所说的系统输入信号, 一般是指有用信号。

§ 1-4 对控制系统的性能要求

对控制系统的一般要求 为了实现自动控制的基本任务, 必须对系统在控制过程中表现出的性能提出要求。

一般, 在没有外作用时, 系统处于平衡状态, 系统的输出保持原来状态。当系统受到外作用时, 其输出量必将发生相应变化, 由于系统中总是包含具有惯性或贮能特性的元件, 因此输出量的变化不可能立即发生, 而是有一个过渡过程。例如水平飞行的飞机, 当受到垂直上升气流扰动后, 自动驾驶仪将控制舵而偏转直到飞机恢复原来姿态, 但由于飞机存在惯性, 因此这种恢复有一个过渡过程。在这个过程中, 如果飞机的摆动次数过多或摆动振幅过大, 都会给乘员以不适的感觉。因此, 过渡过程的性能是衡量自动控制系统质量的重要标志, 它反应了对系统性能的动态要求; 此外, 对系统还有一定的稳态要求, 分述如下。

首先, 要求自动控制系统必须是稳定的。当系统受到外作用时, 稳定的系统, 其输出量的过渡过程随时间而衰减, 输出量最终能与希望值一致; 不稳定的系统, 其输出量的过渡过程随时间而增长或表现为持续振荡。图 1-17 表示系统受到突变的常值外作用时, 输出量过渡过程的三种形式。要求系统稳定, 是保证控制系统能正常工作的必要条件。控制系统设计和调试时, 元件参数选择不当或主反馈极性误接为正, 都会导致系统不稳定。

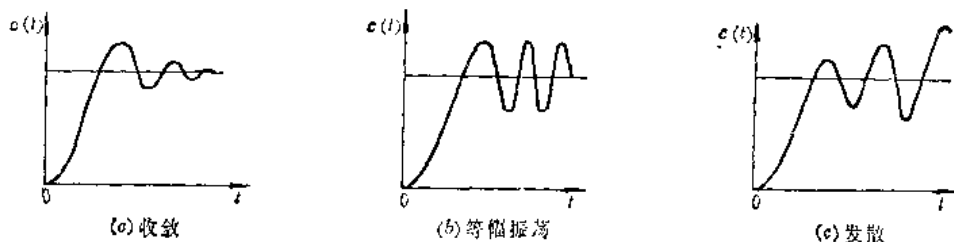


图1-17 输出量过渡过程的形式

其次, 要求自动控制系统的过渡过程应有较好的快速性和适当的衰减振荡特性, 其性能指标详见第三章。

最后, 当自动控制系统输出量的过渡过程结束后, 要求输出量最终应准确地到达希望值, 否则将产生稳态误差。系统的稳态误差应满足给定数值的要求, 这是衡量控制系统准确度的标志。

按照给定的控制任务, 设计一个既满足稳定性要求而同时又能满足稳态误差和过渡过程性能指标要求的控制系统, 是控制系统工程人员必须解决的课题, 也是自动控制原理这门学科的基本任务。

典型外作用 作用于自动控制系统的外作用, 其形式多种多样, 既有确定性外作用, 又有随机性外作用。对外作用, 系统有不同的输出特性, 一般称为响应特性。为了便于研究, 通常选用几种确定性函数作为典型外作用。选择为典型外作用的标准是:

1. 在现场或实验室中, 这种外作用容易产生;
2. 在典型外作用下, 系统的性能应反映出系统在实际工作条件下的性能;
3. 这种典型外作用的数学表达式简单, 便于理论计算。

目前, 在工程设计中常用的典型外作用函数有阶跃函数、斜坡函数、脉冲函数以及正弦函数等, 它们都是确定性函数。

阶跃函数 其数学表达式为

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ R & t \geq 0 \end{cases}$$

上式表示一个在 $t = 0$ 时出现的幅值为 R 的阶跃变化函数, 如图 1-18 所示。在实际系统中, 这意味着一个大小不变的作用, 在 $t = 0$ 时突然加到系统上。

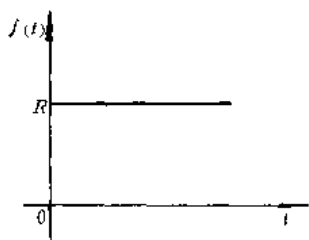


图1-18 阶跃函数

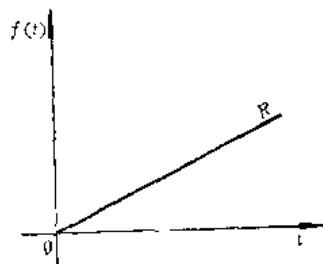


图1-19 斜坡函数

幅值 $R = 1$ 的阶跃函数, 叫做单位阶跃函数, 一般用 $1(t)$ 表示。于是, 幅值为 R 的阶跃函数 $f(t)$ 也可写为 $f(t) = R1(t)$ 。

$f(t-t_0)$ 表示在 $t=t_0$ 时刻出现的阶跃函数, 即

$$f(t-t_0) = \begin{cases} 0 & t < t_0 \\ R & t \geq t_0 \end{cases}$$

阶跃函数是自动控制系统在实际工作条件下经常遇到的一种外作用形式, 例如, 电源电压突然跳动, 负载突然增大或减小, 飞机在飞行中遇到的常值阵风扰动等, 都可近似视为阶跃函数形式。因此, 在控制系统的分析设计中, 阶跃函数是应用最多的一种评价系统动态性能的典型外作用。

斜坡函数 其数学表达式为

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ Rt & t \geq 0 \end{cases}$$

上式表示在 $t = 0$ 时刻开始, 随时间以恒定速率 R 变化的函数, 如图 1-19 所示。在实际系统中, 这意味着一个随时间以恒定速率增长的外作用。

$R = 1$ 的斜坡函数, 叫做单位斜坡函数。

脉冲函数 脉冲函数定义为

$$f(t) = \lim_{t_0 \rightarrow 0} \frac{A}{t_0} [1(t) - 1(t-t_0)]$$

式中, $(A/t_0)[1(t) - 1(t-t_0)] = f_1(t)$ 是由 $t = 0$ 时幅值为 A/t_0 的阶跃函数, 与 $t = t_0$ 时幅值为 A/t_0 的负阶跃函数叠加而成的矩形脉动函数, 如图 1-20 (a) 所示。矩形脉动函数的面积 $S = (A/t_0) t_0 = A$ 。因此, 脉冲函数是矩形脉动函数当其宽度 t_0 趋于零时的极限, 这是一个宽度为零、幅值为无穷大、面积为 A 的极限脉冲, 如图 1-20 (b) 所示。脉冲函数的强度通常用它的面积表示。

面积 $A = 1$ 的脉冲函数称为单位脉冲函数或 δ 函数。于是, 强度为 A 的脉冲函数

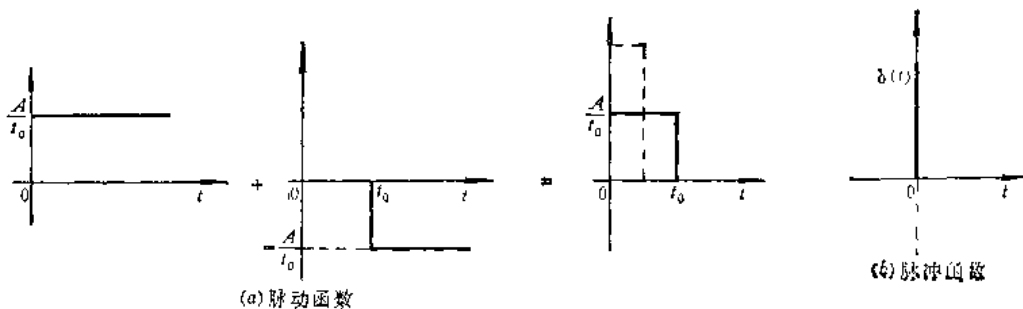


图1-20 脉冲函数和脉冲函数

$f(t)$ 可表示为 $f(t) = A\delta(t)$ 。

$\delta(t-t_0)$ 表示在 $t=t_0$ 时刻出现的单位脉冲函数，即

$$\delta(t-t_0) = \begin{cases} 0 & t \neq t_0 \\ \infty & t = t_0 \end{cases}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t-t_0) dt = 1$$

单位脉冲函数可看为单位阶跃函数的导数。由图 1-18 可见，单位阶跃函数 $1(t)$ 只在 $t=0$ 时有突跳，因此， $1(t)$ 在 $t=0$ 时的导数为无穷大，而在其它各处均为零，即 $\delta(t) = d1(t)/dt$ 。

必须指出，脉冲函数在现实中是不存在的，它只有数学上的意义，但它却是一个重要的很有用的数学工具。在自动控制系统的研究中，它 also 具有重要作用。这是因为控制系统对脉冲函数的响应特性很容易获得，而且，可以由此进一步了解系统对任意形式外作用的响应。

正弦函数 其数学表达式为

$$f(t) = A\sin(\omega t + \varphi)$$

式中， A 为正弦函数的振幅， $\omega = 2\pi f$ 为正弦函数的角频率， φ 为正弦函数的相角，如图 1-21 所示。

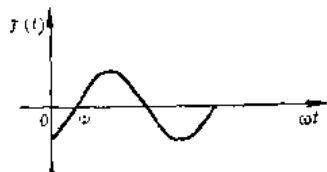


图1-21 正弦函数

正弦函数是常用的典型外作用形式，一方面是因为它容易得到，同时，如果求得了系统对所有频率的正弦函数的响应特性，就可以方便而准确地确定整个系统的特性，此外，借助于富里埃变换方法，还能了解系统对任意确定性外作用的响应。

§ 1-5 其他控制方式

目前，以反馈原理为基础的经典控制理论，已经形成完整的理论体系并有了工程实现的方法。随着空间技术的发展，特别是电子计算机已作为自动控制系统的一个重要组成部分，现代控制理论亦日益显示出其强大的生命力，并在实践中得到成功的应用。最优控制、自适应控制等现代高精度的自动控制系统，已在国防和工业生产中付诸实现。

最优控制 最优控制是要求控制系统实现对某种性能标准为最好的控制，这种性能标

准称为性能指标（也叫目标函数）。它通常要求优质、高产、低耗、高效率，一般是与时间、燃料消耗、能源供给等有关。例如，钢铁冶炼过程往往希望时间最短或燃料最省；远程飞机希望实现每单位体积燃料的最大飞行距离，以提高飞机的远航能力；人造卫星运载火箭希望实现燃料消耗最少等。其中最简单的一种是时间最优控制（即快速最优控制），它在自动化仪表、发电机电压控制及轧钢机控制中得到广泛应用。

最优控制的一般理论中包括极大（小）值原理和动态规划法。

最优控制可以采用开环控制和闭环控制两种方式，见图 1-22。两种控制方式在于最优控制方案 $u^*(t)$ 的组成形式不同。图 1-22 (a) 的开环控制， $u^*(t)$ 只与系统的输入信号 $r(t)$ 及初始状态 $c(0)$ 有关；而图 1-22 (b) 的闭环控制， $u^*(t)$ 与系统的输入信号 $r(t)$ 及实时状态 $c(t)$ 有关。因此，闭环控制可以在任何扰动情况下实现最优控制，而开环控制一旦出现扰动，最优控制便被破坏。

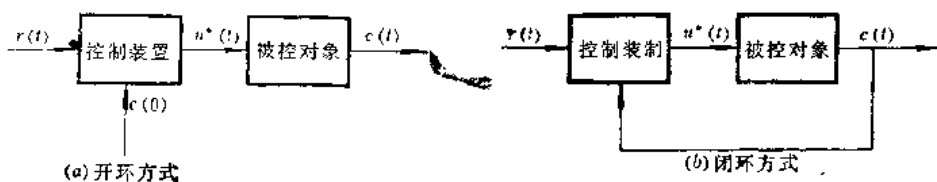


图1-22 最优控制

自适应控制 自适应控制，顾名思义，它有自动适应的能力，即当系统特性或元件参数变化或扰动作用很剧烈时，它能自动测量这些变化并自动改变系统结构与参数，使系统适应环境的变化并始终保持最优的性能指标。有不少被控对象的特性是随时间和环境而变化的，例如，飞机特性随飞行高度、速度而变化；导弹质量重心随燃料消耗而变化；化学反应器特性随触媒老化而变化等，这时，必须采用自适应控制才能保持最优性能。

自适应功能主要是自动辨识、自动判断和自动修正。按适应功能与系统结构特点的不同，可分为输入信号的自适应、参数与特性的自适应、最优自适应、自整定、自学习、自组织以及自修理等各类自适应系统。

一般情况下，若系统特性变化不显著或扰动作用不剧烈时，闭环最优控制便可以实现性能最优的控制，所以，最优控制实质上是自适应控制的一种特殊形式。

已用于飞机自动驾驶仪的一种模型参考自适应控制系统如图 1-23 所示，它是在通常的反馈系统上增加三个部件而组成的，它们是模型、比较器和参数调整装置。

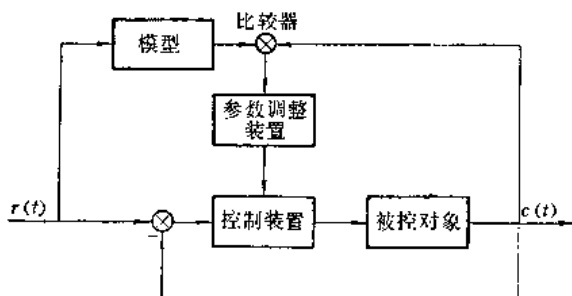


图1-23 模型参考自适应控制系统

输入信号 $r(t)$ 同时加到模型和反馈系统上，模型的输出即为希望的最优输出。如果系统的实际输出与最优输出不一致，则由比较器产生误差信号，经参数调整装置计算后调整控制装置的参数，实现最优控制。

自学习控制 自学习控制是一种较完善的自适应控制，它具有辨识、判断、积累经验