

自动控制原理

上册

李友善 主编



国防工业出版社

73.822
251

自动控制原理

上册

李友善 主编



国防工业出版社

1109710

内 容 简 介

《自动控制原理》一书分上、下两册。本书为上册，其内容包括控制系统的一般概念、控制系统的传递函数、控制系统的过渡过程、控制系统的误差分析、根轨迹法、频率特性法、控制系统的综合与校正。每章均附有例题和习题。

本书是高等院校自动控制与导航专业的教材，并可供计算机控制、工业自动化、测量仪表、热工仪表、液压控制等专业师生和有关的科技人员参考。

0579/28

自 动 控 制 原 理

(上 册)

李 友 善 主 编

*

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31 726千字

1980年6月第一版 1981年8月第二次印刷 印数：14,001—24,000册

统一书号：15034·2051 定价：3.15元

前 言

本书系根据一九七八年至一九八〇年全国造船专业教材会议通过的《自动控制原理》大纲编写的。

本书以古典控制理论为重点,同时对现代控制理论的基本内容也做了较为详尽的介绍,以期读者既了解控制理论过去的发展成果,又能对掌握现代控制理论打下较好的基础。

本书在介绍古典控制理论时,以频率特性法为重点。对这种方法的理论基础、计算方法,以及各种图表、曲线都做了全面的介绍。对根轨迹法也做了基本的阐述,以使读者能对控制系统进行比较直观的定性分析和基本的定量计算。

为了适应分析与设计数字系统及计算机控制系统的需要,本书对有关离散系统分析与设计的内容给予足够的重视。在这方面不仅通过古典控制理论——Z变换法,同时也通过现代控制理论的状态空间法得到了加强。

为了帮助读者掌握和运用学到的基本理论、基本概念和分析与综合控制系统的基本方法,本书在每章后选录了适量的例题和习题。在书后还编入了有关数学基础及数学模拟等方面的附录。

本书讲授总时数约为150~200,其中古典控制理论的线性部分约占60%(连续控制理论占48%,离散系统理论占12%),非线性部分约占15%,现代控制理论约占25%。

参加本书编写工作的有哈尔滨工业大学控制理论教研室李友善、强文义同志。李友善副教授任主编。由哈尔滨船舶工程学院朱克定同志主审。参加审稿的还有哈尔滨船舶工程学院李文秀、高淑玲同志。审稿同志认真审阅了原稿,并提出了宝贵的意见,对此我们表示衷心感谢。

在完稿过程中,教研室全体同志给予了全力支持,使本书能早日与读者见面,在此一并感谢。

限于编者水平,同时编写时间较为仓促,因而书中一定存在不妥之处,恳切希望广大读者提出批评和指正。

编 者

目 录

第一章 控制系统的一般概念	1
§1 引言	1
§2 开环控制与闭环控制	1
§3 控制系统举例	5
§4 控制系统的组成与对控制系统的基本要求	10
习题	13
第二章 控制系统的传递函数	14
§1 控制系统的运动方程式列写	14
§2 非线性运动方程的线性化	24
§3 传递函数	30
§4 控制系统的传递函数	34
§5 控制系统的方块图及其简化	37
§6 信号流图	44
§7 脉冲过渡函数	53
§8 例题	56
习题	62
第三章 控制系统的过渡过程	67
§1 典型输入信号	67
§2 一阶系统的过渡过程	69
§3 二阶系统的过渡过程	73
§4 高阶系统的过渡过程	92
§5 控制系统的稳定问题与线性系统的稳定性	101
§6 劳斯稳定判据	107
习题	115
第四章 控制系统的误差分析	118
§1 稳态误差	118
§2 误差系数	125
§3 无差度	130
§4 反馈控制的误差分析	134
§5 误差准则	143
§6 例题	152
习题	158
第五章 根轨迹法	160
§1 控制系统的根轨迹	160
§2 绘制根轨迹的基本规则	162
§3 按根轨迹分析控制系统	179
§4 附加零点的作用	196

§ 5 闭环极点、零点分布与控制系统性能指标间的关系·····	199
§ 6 例题·····	205
习题·····	211
第六章 频率特性法 ·····	213
§ 1 频率特性·····	213
§ 2 典型环节的频率特性·····	220
§ 3 对数频率特性及其绘制·····	229
§ 4 奈魁斯特稳定判据·····	247
§ 5 控制系统的相对稳定性·····	264
§ 6 闭环频率特性·····	270
§ 7 频域性能指标与时域性能指标间的关系·····	280
§ 8 开环频率特性与控制系统性能间的关系·····	289
§ 9 例题·····	297
习题·····	304
第七章 控制系统的综合与校正 ·····	307
§ 1 引言·····	307
§ 2 输入信号和控制系统的带宽·····	309
§ 3 基本控制规律分析·····	314
§ 4 超前校正参数的确定·····	325
§ 5 迟后校正参数的确定·····	340
§ 6 迟后-超前校正参数的确定 ·····	350
§ 7 反馈校正及其参数的确定·····	362
§ 8 随动系统的设计举例·····	379
习题·····	419
附录一 拉氏变换 ·····	420
附录二 控制系统的数学模拟 ·····	428

第一章 控制系统的一般概念

§1 引言

二十世纪中叶以来,在工程和科学发展中,自动控制技术的发展起着极为重要的作用。所谓自动控制就是在没有人直接参与的情况下,通过控制器使被控制对象或过程自动地按照预定的规律运行。导弹能够正确的命中目标,人造卫星能按预定的轨道运行并返回地面,宇宙飞船能准确地月球着陆,并重返地球,都是由于自动控制技术高速发展的结果。

在工业生产过程中,诸如对压力、温度、湿度、流量、频率以及原料、燃料成分比例等方面的控制,也都是自动控制技术的重要组成部分。

由于自动控制技术各个领域中的广泛应用,不仅提高了劳动生产率和产品质量,改善了劳动条件,而且在人类征服自然、探索新能源、发展空间技术和改善人民物质生活等方面都起着极为重要的作用。

《自动控制原理》是自动控制技术的基础理论,是一门理论性较强的工程科学。根据自动控制技术发展的不同阶段,自动控制理论目前一般可分为“古典控制理论”和“现代控制理论”两大部分。

“古典控制理论”,它的内容主要以传递函数为基础,研究单输入、单输出一类自动控制系统的分析和设计问题。这些理论由于其发展较早,现已臻成熟。在工程上,也比较成功地解决了诸如伺服系统自动控制的实践问题。

“现代控制理论”,是六十年代在“古典控制理论”的基础上,随着科学技术发展和工程实践的需要而迅速发展起来的。它无论在数学工具、理论基础,还是在研究方法上都不是古典理论的简单延伸和推广,而是认识上的一次飞跃。

“现代控制理论”主要以状态空间法为基础,研究多输入、多输出、变参数、非线性、高精度、高效能等控制系统的分析和设计问题。最优控制、最佳滤波、系统识别、自适应控制等理论都是这一领域研究的主要课题。特别是近年来由于电子计算机技术和现代应用数学研究的迅速发展,使现代控制理论又在研究庞大的系统工程的大系统理论和模仿人类智能活动的智能控制等方面有了重大发展。目前,现代控制理论正随着现代科学技术的发展日新月异地向前发展着。

§2 开环控制与闭环控制

首先,通过举例来简要分析有关自动控制的含义。

设有一个直流电动机 D ,用它来带动一个需要以恒速转动的负载,它的电枢上加有由可控硅功率放大器供给的整流电压,而可控硅功率放大器输出的整流电压的大小,由电位器 R_w 的给定电压 U ,来调节。其原理示意图见图1-1。

1109710

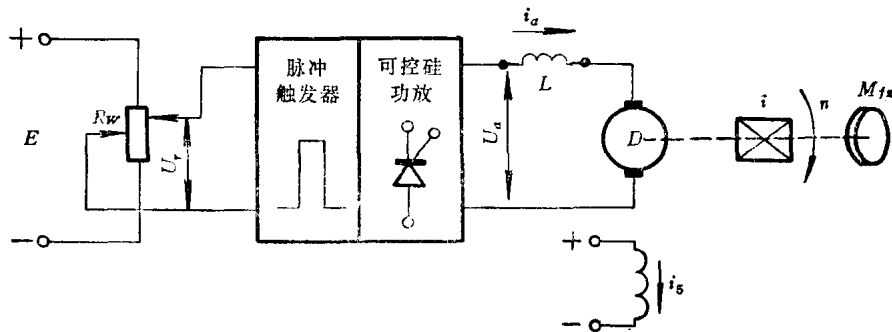


图1-1 电动机的开环控制

M_{fz} —负载力矩； n —负载转速； i_a —电动机电枢电流； U_a —电动机电枢电压； i_f —电动机励磁电流； U_r —电位器给定电压； i —代表减速器，其值为减速器的速比； L —电抗器。

在图 1-1 中，电动机 D 的工作原理是当电位器 R_w 给出一定电压 U_r 后，可控硅功率放大器的触发电路便产生一串与电压 U_r 相对应的、具有一定相位的触发脉冲去控制可控硅的导通角，从而控制可控硅功率放大器的输出电压 U_a 。由于电动机 D 的励磁绕组中加的是恒定励磁电流 i_f ，因此随着电枢电压 U_a 的变化，电动机便以不同的速度 n 带动负载运转。如果要求负载以某一恒定速度运转，则只要给定一个相应的恒定电压 U_r 即可。

这里，我们定义，用以完成一定任务的一些部件（或称元件）的组合为系统。在上例控制电机转速的系统中，定义用以控制电动机 D 转速 n 的给定电压 U_r 为系统的控制量或输入量。而负载的转速 n 定义为系统的被控制量或输出量。对任何一个控制系统来说，被控制量是一个极为重要的物理量，它的变化规律在控制过程中要求加以严格的控制。

可以看出，上述控制系统只是根据给定的控制量进行控制，而被控制量在整个控制过程中对控制量不产生任何影响。因

而对于被控制量相对于其预期值可能出现的偏差，上述系统不具备修正的能力。这种被控制量只能受控于控制量，而对控制量不能反施任



图1-2 开环控制系统的职能方块图

何影响的系统称为开环控制系统。在开环控制系统中，就控制需要来说，输出量无需反馈到输入端与输入量进行比较。开环控制系统的职能方块图如图 1-2 所示。

从图 1-2 看到对于一个确定的输入量来说，总存在一个与之对应的、描述确定工作状态的输出量。因此，系统的控制精度将取决于控制器及被控对象的参数稳定性。也就是说，欲使开环控制系统具有要求的控制精度，系统各部分的参数值，在工作过程中，都必须严格保持在事先校准的量值上。

根据开环控制原理，就上面的示例来说，为了保持带载的电动机 D 以某一恒定速度转动，仅通过具有相应常值的控制电压 U_r 是达不到目的的。这是因为在电动机运行过程中，有很多因素要引起转速的变化，诸如负载力矩 M_{fz} 的变化，电源电压的波动，系统中各元件参数的变化等等，都将在被控量 n 和由控制量 U_r 决定的预期值之间引起偏差。我们定义，所有妨碍控制量对被控制量按要求进行正常控制的因素叫做扰动量。在上例中，当扰动量存在时，如果想保持转速不变或几乎不变，就必须采取一定的措施来抵消或削弱这些

扰动因素的影响。这种消除扰动因素影响从而保持被控制量按预期要求变化的过程称为控制过程。在开环控制的基础上,上述控制过程可以通过人的参与来完成。譬如在上例中,可以在电动机输出轴上装一个测量转速的转速表,人通过转速表可以监视转速的变化。若发现转速 n 偏离其预期值而增大,则可以通过电位器 R_w 来调整控制电压 U_r 的量值,如降低 U_r 值便可使转速 n 降下来。如果由于扰动因素的存在,而使转速 n 低于其预期值,则可以调电位器 R_w 使控制电压 U_r 上升,从而控制转速 n 上升,直到转速 n 恢复到预期值时为止。在上述控制过程中,人起到了将系统输出端的被控制量反馈到输入端,并以适当的方式影响控制量的控制作用,也就是通过人眼睛观察到转速 n 的变化,并通过大脑思考,然后按正确方向调 R_w ,使电动机转速 n 恢复到预期值上。这样通过人的控制作用,把开环系统输出端的被控制量及其输入端的控制量联系起来,从而便有可能消除由于各种扰动因素在输出端造成的使被控制量偏离预期值的偏差。

随着生产的发展,需要进行控制的系统和过程越来越多,而且对控制质量的要求也越来越高。因此,如果都要由人们直接参与去完成这些控制任务,那将是无法适应的。这就要求制造各种精密仪器和设备去代替人的工作。而现代技术的发展已经完全适应了这种替代的可能。

现在仍以上面列举过的电机转速控制系统为例来说明如何用仪器设备来代替人完成上述控制任务的。

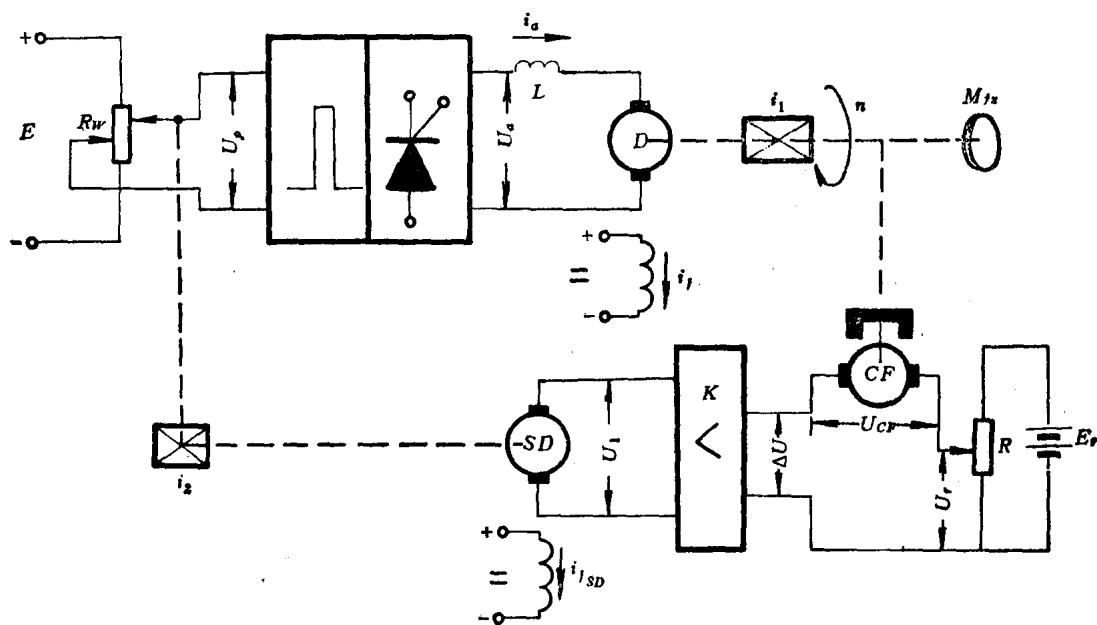


图1-3 电动机转速的自动控制

图 1-3 为在无人参与下自动控制电动机的转速,并使其保持恒定的控制系统的原理图。

图 1-3 中 CF 为测速发电机,其输出电压正比于负载的转速 n ,即 $U_{cf} = K_c \cdot n$ 。测速发电机完成了测量转速并把转速变换为相应电压的任务,称为测量转换元件。

电压 U_r 为给定的基准电压, 其设置值与电动机转速的预期值相对应。因此把 U_{CF} 反馈到系统的输入端并和 U_r 进行比较即代替了人去观察负载转速并判断其是否与其预期值发生偏差这一过程。在这里, 电压 U_r 是系统的控制量 (或控制信号), 电压 U_{CF} 则是与被控制量 n 成比例的反馈量 (或反馈信号)。

反馈量 U_{CF} 和控制量 U_r 比较后得到的电压差 $\Delta U = U_r - U_{CF}$ 叫做偏差量 (或偏差信号)。如果发现偏差信号不为零, 即 $\Delta U \neq 0$, 便意味着电动机转速在扰动作用下偏离了它的预期值。

图 1-3 中, K 为放大环节。它的作用是将偏差信号进行放大, 从而去控制伺服电机 SD 。这是因为一般偏差 ΔU 很小, 所以需要放大, 放大后的信号才能驱动 SD 。因 SD 转动而产生的角位移, 通过减速装置 i_1 移动电位器 R_w 的滑臂, 从而改变电压 U_p 的量值, 进而控制可控硅功率放大器的输出电压 U_a 的大小和极性, 使电动机 D 的转速得到控制。上述调节过程直到消除 ΔU , 使转速 n 的预期值得到恢复为止。

我们看到, 这里对电动机转速的控制, 完全是在没有人参与的情况下自动进行的。因此, 把这种不需要人直接参与, 而使被控制量自动地按预定规律变化的控制过程叫做自动控制。

图 1-3 中, 伺服电机 SD 起着执行控制任务的作用, 因此把它叫做执行元件。而带载的电动机 D 则是系统的被控制对象。

从上例的分析中我们可以看出, 为了对电动机转速通过反馈形式进行自动控制, 需要对控制系统提出下列要求:

(1) 必须对被控制量进行测量并将它反馈到系统的输入端与控制量相减 (即负反馈), 得到偏差信号。

(2) 必须对偏差信号进行适当的变换和放大, 从而产生对被控制对象的控制作用。

(3) 上述控制作用应使被控制量作消除偏差, 保持预期值的相应变化。

这种利用负反馈得到的偏差产生的控制作用, 又去消除偏差的控制原理叫做反馈控制原理。就整个系统来说, 控制量通过控制器去控制被控制量, 而被控制量又被反馈到输入端和控制量进行相减运算的比较 (即形成负反馈), 比较后产生偏差, 偏差再经过控制器的适当变换去控制被控制量。这样, 整个控制系统便形成了一个闭合的环路, 我们把这种输出与输入间存在负反馈的系统叫做闭环控制系统或反馈控制系统。

作为反馈控制系统一例的电动机转速控制系统的职能方块图示于图 1-4。

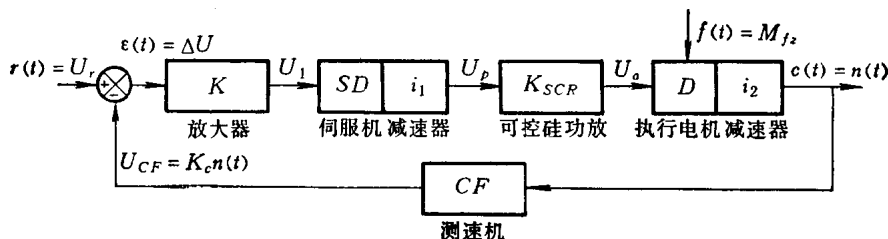


图1-4 反馈控制系统的职能方块图

在本书中, 控制量用 $r(t)$ 来表示; 被控制量用 $c(t)$ 来表示; 偏差量用 $\varepsilon(t)$ 来

表示；扰动量用 $f(t)$ 来表示。

图 1-4 中的符号 $\otimes$ 表示比较元件，其中的负号表示负反馈。图中箭头指示的方向表示信号流的方向。同时也说明了构成控制系统的各元件作用的单向性。

由于电动机转速控制系统具有能源，所以图 1-4 表示的反馈控制系统是一个有源闭环控制系统。

根据上述分析我们看出，反馈控制系统的一个突出优点就是不管什么原因引起被控制量偏离其预期值，而产生偏差时，就一定会有相应的控制作用产生，而这个控制作用将去消除偏差，使被控制量重新恢复到预期值上。因此，从原理上说，反馈控制系统具有抑制内部和外部各种干扰对系统输出的影响的能力。

通过以上的论述，建立起有关开环控制和闭环控制的基本概念之后，可以将开环控制与闭环控制做如下简要的比较。

在闭环控制系统中，由于采用了负反馈，因而被控制量对于外部和内部的干扰都不甚敏感。因此，有可能采用不太精密和成本低廉的元件来构成控制质量较高系统。而对开环控制系统来说，由于在被控制量和控制量之间没有任何联系，所以对于干扰造成的误差，系统不具备修正的能力。于是这种系统的控制精度便完全由采用高精度元件和采取有效的抗干扰措施来保证。但开环控制系统容易建造，它不必对被控制量进行测量和反馈，因而结构简单。从系统的稳定性来考虑，开环控制系统在这个问题上容易解决，因而不是十分重要的问题。但对闭环控制系统来说，稳定性始终是一个十分重要的问题。

一般说来，当系统控制量的变化规律能预先确知，并且对系统中可能出现的干扰，可以做到有效的抑制时，采用开环控制系统是有其优越性的，特别是被控制量很难进行测量时更是如此。只有当系统的控制量和扰动量均无法事先预计的情况下，闭环控制系统才有其明显的优越性。

还应指出，并不是一说到开环控制，其控制质量就一定不高。实际上，依据开环控制原理设计的程序控制设备，如图 1-5 所示的程序控制机床，如果能设法使它既不丢失控制脉冲，也不受干扰脉冲的影响，同时采用精密的传动，实践证明，整个设备可以达到不低于闭环控制系统所具有的较高的控制精度。

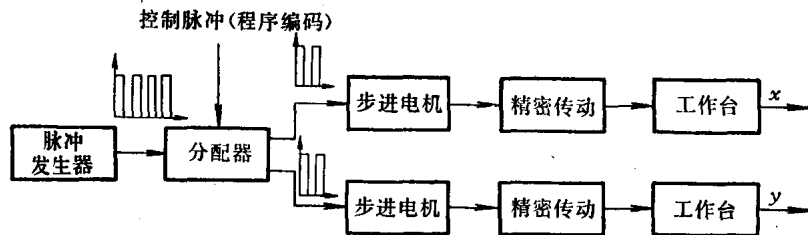


图1-5 程序控制机床职能方块图

§ 3 控制系统举例

一、随动系统

就反馈控制系统来说，如果其控制信号 $r(t)$ 为一任意的时间函数，其变化规律无法预先予以确定，且当控制信号作用于系统之后，要求系统准确复现上述控制信号时，我们

将承受这类控制信号的反馈控制系统叫做随动系统。随动系统在工业生产和国防建设中有极为广泛的应用。如火炮控制系统，雷达导引系统，舰船操舵系统等等都是典型的随动系统。

图 1-6 为一典型随动系统的职能方块图。

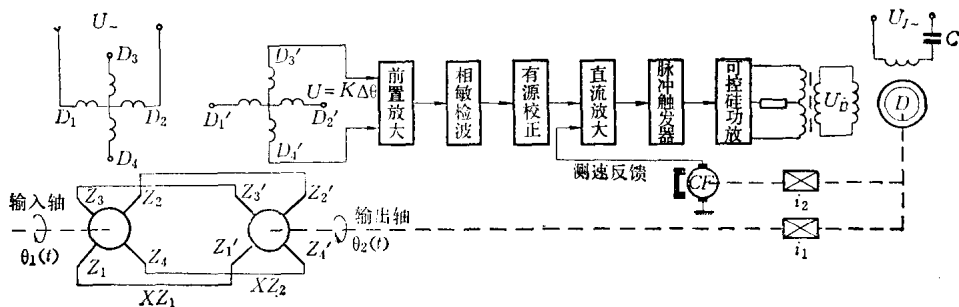


图1-6 随动系统职能方块图

从图 1-6 我们看到由两个旋转变压器 XZ_1 、 XZ_2 组成测角线路，其中 XZ_1 叫做发送器，它的转子轴和系统输入轴相固联， XZ_2 叫做接受器，它的转子轴和系统的输出轴相固联。系统的执行元件为一交流伺服电机，由可控硅功率放大器输出的交流电压来控制，伺服电机的输出轴经减速器驱动被控制对象。 XZ_1 转子轴的转角随系统输入轴以任意的时间函数 $\theta_1(t)$ 变化，当系统的输出轴转角 $\theta_2(t)$ 的变化如果与输入轴 $\theta_1(t)$ 的变化不一致时，在 XZ_2 的定子绕组 $D_3'D_4'$ 中便产生一个正比于角差信号 $\Delta\theta = \theta_1(t) - \theta_2(t)$ 的电压 U ，即 $U = K_1[\theta_1(t) - \theta_2(t)]$ 。电压 U 经过前置放大，相敏检波、直流放大后，产生正比于角差信号的触发脉冲去控制可控硅功率放大器的输出电压，而具有恒定交流激磁电压的交流伺服电动机，将随着可控硅功率放大器输出电压的变化以不同的速度旋转。交流伺服电机通过减速器带动 XZ_2 的转子轴转动。根据反馈控制原理不难看出，系统输出量 $\theta_2(t)$ 最终将跟踪其输入量 $\theta_1(t)$ 的变化。

二、稳定系统

如果反馈控制系统的控制信号 $r(t)$ 为恒定的常量，即 $r(t) = r_0 = \text{常量}$ （特殊情况下为 $r(t) = 0$ ），而要求被控制信号也保持在相应的常量上时，则将这类反馈控制系统叫做稳定系统。

舰船导航和武器装备控制用的稳定平台上的稳定回路就是这一类的典型系统。

舰船在海上航行，由于在海浪的冲击下，经常处于摇摆状态，特别是风浪大时，摇摆更为严重，而舰船上的一些导航和武器装备，为了能正确工作都需要测出舰船的运动姿态，并把这些数据分别送到有关解算装置中去。为此在舰船上需要提供一个人工基准水平面，而对船体相对该水平面两轴的运动参数（即船体运动姿态）进行测量。陀螺稳定平台就是提供这样一个基准水平面的仪器。陀螺稳定平台的原理示意图示于图 1-7。

图 1-7 仅表示出稳定平台一个轴的稳定回路的原理图，而稳定一个基准水平面，还需要根据同样原理用完全相同的设备去稳定另外一个垂直轴。在图 1-7 中，未画出旨在跟踪地球自转用以修正基准水平面的修正回路。

稳定系统的工作原理如下：

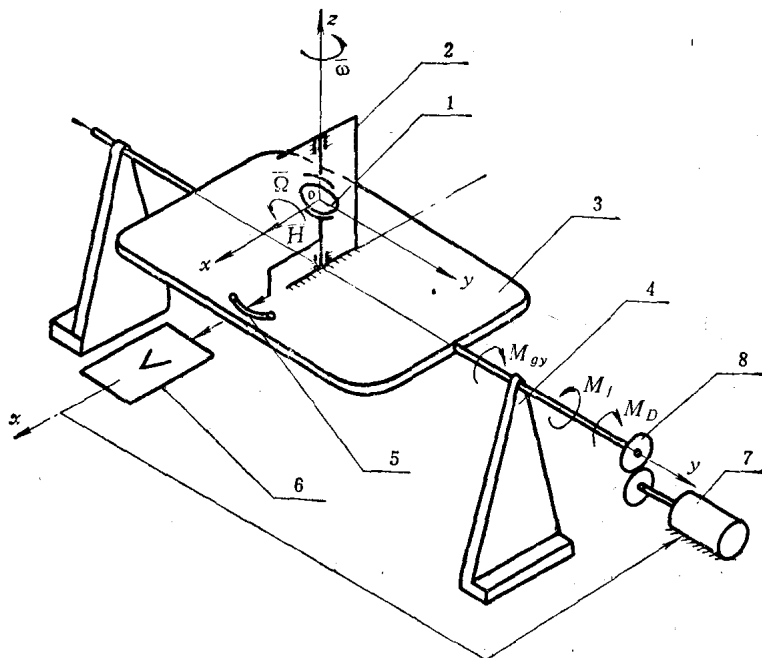


图1-7 陀螺稳定平台原理示意图

1—陀螺转子；2—陀螺内环（或称内框架）；3—陀螺外环（或称外框架）；4—陀螺仪支架，它和船体相固联；5—角度传感器，其动片和进动轴固联，定片和外框架相固联；6—稳定放大器；7—稳定伺服电机；8—减速器；

x 轴—陀螺自转轴，它的正方向表示角动量 $\vec{H}$ 的方向； z 轴—陀螺内环轴，也叫进动轴； y 轴—陀螺外环轴，也叫稳定轴。

陀螺仪的转子是一个高速旋转的回转体，同时具有较大的转动惯量 J ，因此其角动量 $\vec{H} = J \cdot \vec{\Omega}$ 很大。致使陀螺仪在惯性空间里不管其位置如何变化，只要没有外力矩作用，角动量 $\vec{H}$ 在惯性空间的指向将保持不变。这就是陀螺仪三特性之一的定轴性。如果在陀螺仪的外框架（或外环轴）上作用一个外力矩 M_I ，则陀螺仪外框架并不随外力矩方向一起转动，而是引起内框架绕内环轴（或进动轴）转动。同样，如果在陀螺仪内框架（或内环轴）作用一个外力矩，内框架并不随外力矩作用方向一起转动，而是引起外框架绕外环轴（或稳定轴）转动。这便是陀螺仪的另一个重要的特性——进动性。进动角速度 $\vec{\omega}$ 的方向按右手定则确定（见图 1-8）。其大小为 $\omega = \frac{M_I}{H}$ 。

陀螺仪除上述两个重要特性外，还有一个重要特性，这就是当陀螺仪在外力矩 M_I 作用下，引起进动角速度 $\vec{\omega}$ 的同时，将产生陀螺力矩 M_g 。根据作用与反作用原理，陀螺力矩 M_g 将和外力矩 M_I 相平衡。也就是说，陀螺力矩 M_g 大小和外力矩 M_I 相等，方向和外力矩 M_I 的方向相反。这

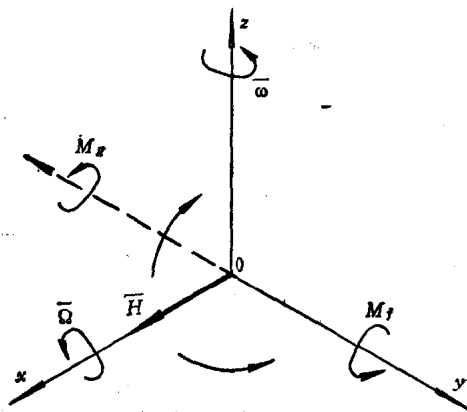


图1-8 陀螺仪的进动特性与反作用现象示意图

这就是当陀螺仪在外力矩 M_I 作用下，引起进动角速度 $\vec{\omega}$ 的同时，将产生陀螺力矩 M_g 。根据作用与反作用原理，陀螺力矩 M_g 将和外力矩 M_I 相平衡。也就是说，陀螺力矩 M_g 大小和外力矩 M_I 相等，方向和外力矩 M_I 的方向相反。这

便是陀螺仪的第三个特性，即陀螺仪的反作用现象及陀螺力矩。上述特性示于图 1-8。

基于上述关于陀螺仪三特性的基本概念，分析由陀螺仪组成的稳定平台的基本工作原理如下。

在图 1-7 中，由于支架 4 与船体相固联，因此当船体在海上摇摆时，支架便和船体一起摇摆。在摇摆过程中，支架与轴承间将产生作用于稳定轴 y 上的摩擦力矩 M_f ，力矩 M_f 试图驱动 y 轴旋转，但根据陀螺仪特性，当 M_f 作用于 y 轴时， y 轴并不随之转动，而将引起内环轴 z 进动，并产生进动角速度 $\omega = \frac{M_f}{H}$ 。由于陀螺进动的结果陀螺仪将在 y 轴上产生陀螺力矩 $\bar{M}_g = \bar{H} \times \bar{\omega}$ ， M_g 与外力矩 M_f 相平衡。又因为进动角速度 $\bar{\omega}$ 的出现，便使 z 轴产生了进动角 $\beta = \int_0^t \omega dt$ ，而角度传感器 5，则产生一个正比于进动角 β 的电压 $U = K_1 \beta$ 。电压 U 经稳定放大器 6 放大与校正，加到稳定伺服电机 7，伺服电机通过减速器 8 作用到稳定轴 y 上的力矩为 M_D ，其方向和外力矩 M_f 的方向相反，而和陀螺力矩 M_g 同向，其大小正比于进动角 β 。当作用于稳定轴 y 的电机力矩 M_D 和外力矩 M_f 相平衡时，陀螺仪内环轴即停止进动。因此，当在 y 轴上出现外力矩 M_f ，开始时有陀螺力矩 M_g 与其平衡，之后增加了与 M_g 同向的稳定电机力矩 M_D ，而当 $M_D = M_f$ ，即偏差 $M_f - M_D = 0$ 时陀螺仪便停止进动，从而陀螺力矩 M_g 消失。可见，陀螺力矩及电机力矩的相继产生，将使 y 轴不因外力矩 M_f 的作用而转动，从而达到了稳定 y 轴的目的。根据同一原理，应用另一套相同的设备，还可以稳定构成水平面的另外一根 x 轴。这样，利用两套相同的设备便可获得一个不随船体摇摆的基准水平面 xoy 。

从对稳定系统的分析我们看到，稳定系统的控制信号 $r(t) = 0$ ，而外力矩 M_f 则是扰动信号。根据稳定平台的工作性质，要求上述稳定系统应具有不反应扰动信号的性能。

如欲获取船体的运动姿态（纵摆角、横摆角），则只需将角度测量元件的定子和转子，分别与稳定轴 y 和支架 4 相固联即可。因为稳定轴 y 已被稳定在基准水平面内，而支架和船体一起摇摆，因此测量元件定子与转子间的相对运动便反应了船体相对基准水平面的运动，从而得到船体的运动姿态。取到反应纵横摆角度的电压信号后，便可将其输至武备系统的解算装置中去。

三、数字控制系统——锁相伺服系统

作为数字控制系统实例之一的锁相伺服系统，由于其控制精度高，目前已越来越普遍的应用于电机转速控制系统中。

图 1-9 表示锁相伺服系统的职能方块图。

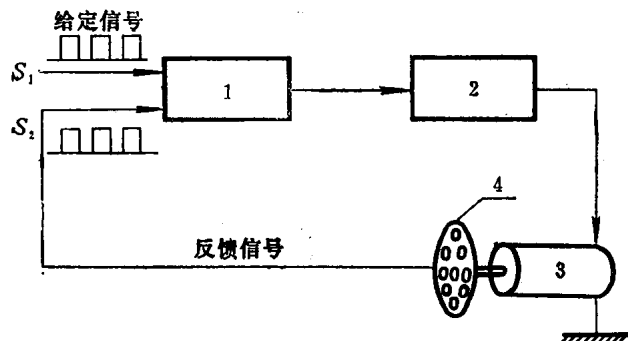


图 1-9 锁相伺服系统的职能方块图

1—鉴相鉴频器；2—带有滤波器的放大器；3—伺服电机；4—光学编码器。

光学编码器是一个光电器件, 电机轴每转一转, 该器件就发出 n 个脉冲, 因此编码器输出信号的频率比例于电机的转速。

鉴相鉴频器是一个数字电路, 它在系统中实际上是一个比较环节, 通过它将控制信号 S_1 脉冲序列和反馈信号 S_2 脉冲序列进行相位和频率比较, 并输出比例于相位差和频率差的偏差电压信号给滤波器。

鉴相鉴频器具有锁定和有频差两种工作状态。

在锁定工作状态下, 即当 S_1 的频率 f_1 与 S_2 的频率 f_2 相同, 且相位差 $\Delta\theta$ 为恒值时, 鉴相鉴频器将输出固定的平均电压 U_{sc} 。由于输出脉冲的宽度比例于相位差 $\Delta\theta$, 因此平均输出电压 U_{sc} 与相位差 $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$ 成比例。 θ_1 、 θ_2 分别为 S_1 和 S_2 的相角。锁定状态下的平均输出特性示于图 1-10(a)。

在有频差状态时, 即当 $f_1 > f_2$ 时, 鉴相鉴频器的输出 U_{sc} 在 0 和 $+U_s$ 之间切换。当两个频率接近相同时, 输出停留在“0”和“ $+U_s$ ”两种状态的时间相等, 导致输出电压为 $U_s/2$ 。如 f_1 增加, 则停留在“ $+U_s$ ”状态的时间大于停留在“0”状态的时间, 结果使平均输出 U_{sc} 增加。因此, 平均输出电压 U_{sc} 随着频率差的增加而增加。此电压经滤波、放大、校正后去控制电动机, 使电动机的转速增加, 调整 f_2 , 最后使 $f_2 = f_1$ 。此刻系统进入锁定状态。有频差时平均输出特性示于图 1-10(b)。电动机转速高于给定值, 即当 f_2 大于 f_1 时, 其控制过程与上面讨论的 f_2 小于 f_1 时的过程相似, 见图 1-10(b) 中 $f_1 - f_2 < 0$ 时的特性曲线。

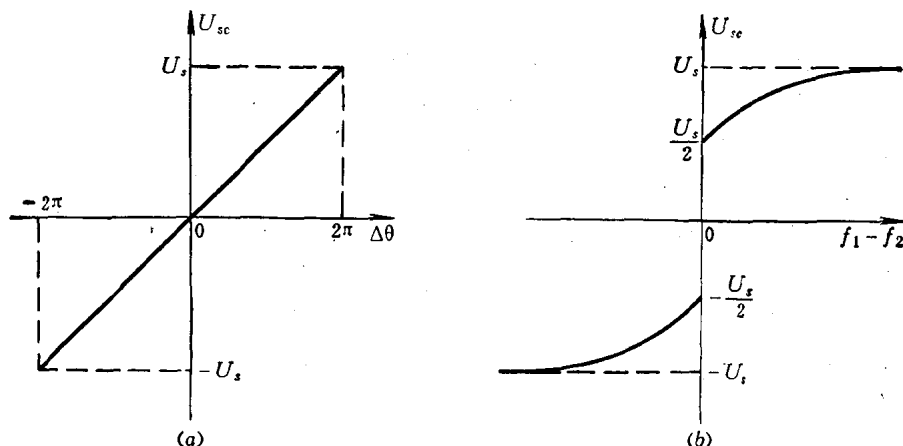


图 1-10

(a) 锁相状态下的平均输出特性; (b) 有频差状态下的平均输出特性。

图1-9所示锁相伺服系统的工作原理如下: 根据要求的电机转速 n , 设置相应频率的控制信号 S_1 脉冲序列, 并将此 S_1 送至鉴相鉴频器1。鉴相鉴频器将来自光学编码器4的比例于实际的电机转速 n 的反馈信号 S_2 脉冲序列与 S_1 进行相位和频率比较, 并产生比例于相位差与频率差的偏差信号电压。此偏差电压经滤波、放大和校正送到电机控制绕组去控制电机转速, 实现反馈信号与控制信号间的同步。系统一般首先工作于有频差状态, 进行频率牵行, 然后转入锁定状态。当控制信号与反馈信号同步时, 则它们的频率相同, 相位差为恒值。在上述两信号同步时, 电机以极高的精度按要求的转速 n_0 旋转。这时转速将不因温度的变化和部件的磨损而漂移。这便是用锁相伺服系统进行调速的一个明显优点。

上面介绍的锁相式电机转速控制系统和在本章 §2 中谈到的电机转速控制系统的不同之处在于, 锁相系统是一个数字式离散型控制系统, 而在本章 §2 中介绍的则是连续型控制系统。在连续型控制系统中, 信息的传递到处都是以连续的时间函数形式进行的。而在离散型控制系统中, 在信息传递通道的全部或局部上, 信息是以离散形式(或数字形式)传递的。随着控制工程实践对系统控制精度要求的不断提高, 特别是电子计算机做为控制器在控制系统中的出现, 目前数字控制系统在国防尖端科学, 以及国民经济的各个领域, 应用得越来越广泛。于是, 为了适应分析与设计数字控制系统、计算机控制系统的需要, 离散控制理论也就越来越显得重要了。

§ 4 控制系统的组成与对控制系统的基本要求

从以上各节的分析我们知道，为了组成一个自动控制系统，必须包含以下各类基本元件。

首先，为了测量被控制量及控制量，系统需要有测量元件。因为测量元件的精度直接影响控制系统的精度，所以应尽可能采用精度高的测量元件和合理的测量线路。

其次，为了完成对被控制量和控制量进行比较，以便产生偏差信号，因此系统必须有比较元件。比较元件在多数控制系统中常常是和测量元件或线路结合在一起的。

再次，由于偏差信号一般都比较微弱，需要进行变换放大，使它具有足够的幅值和功率，因此系统还必须具有放大元件。

最后，需要根据偏差信号产生的控制作用，使被控制对象按照控制信号的变化规律动作，这就要求系统具有执行元件。

需要指出，实践证明，按反馈原理由上述基本元件简单组合起来的控制系统往往是不能完成既定任务的。这是因为系统内部既有控制作用的因素，同时也存在反控制作用的因素。例如，在系统中由于有摩擦死区及惯性等因素的存在，所以当输入信号作用到系统之后，在系统的输出端并不能马上得到反应，而只有当偏差信号大到一定时系统方才有输出。又由于惯性的作用，系统在反应控制信号过程中还有可能产生振荡，严重时甚至会使系统的正常工作遭到破坏。因此，为了使系统正常工作，还需要在系统中加进能消除或减弱上述振荡从而可望提高系统控制性能的一些元件，我们把这类元件叫做校正元件。校正元件可以加在由偏差信号至被控制信号间的通道内，该通道称为前向通道；也可以加在由偏差信号至反馈信号间的通道内，该通道称为反馈通道。前者称为串联校正，后者称为反馈校正。在有些情况下，为了提高系统控制性能的需要，可以同时应用串联校正及反馈校正。

由上述各基本元件组成的反馈控制系统的职能方块图如图 1-11 所示。

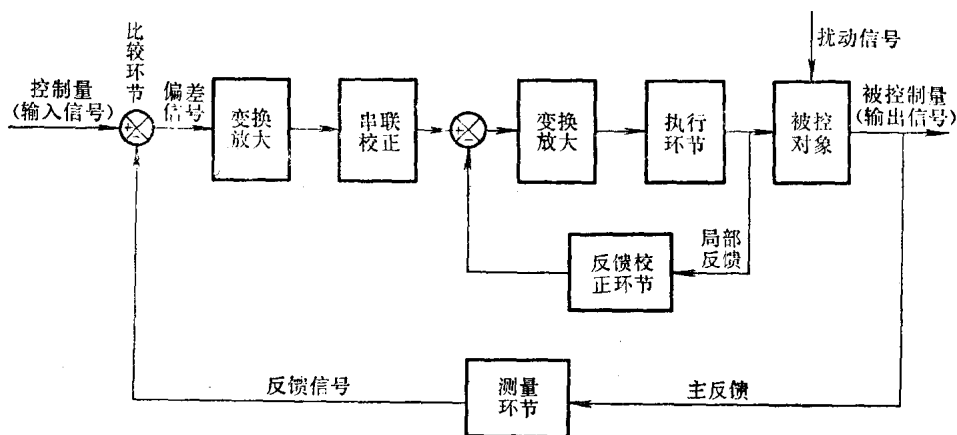


图1-11 反馈控制系统的职能方块图

一般说来，尽管反馈控制系统的控制任务各不相同，以及使用元件的结构和能源形式均有所不同，但就其信号的传递、变换的职能来说，都可抽象成图 1-11 的职能方块图。

上面概述了控制系统的基本组成。下面进一步阐述对控制系统的基本要求。

任何一个反馈控制系统的工作必须是稳定的,这是对反馈控制系统提出的最基本的要求。除此之外,它还需在阻尼程度、反应输入信号的速度及控制精度等方面满足一定的要求。对控制系统的基本要求,通常是通过系统反应特定输入信号(或叫试验信号)的过渡过程及稳态的一些特征值来表征。

过渡过程是指反馈控制系统的被控制量 $c(t)$, 在受到控制量或扰动量作用下, 由原来的平衡状态(或叫稳态)变化到新的平衡状态时的过程来说的。例如, 在电动机转速控制系统中, 设电动机以恒定转速 n_0 转动, 此时系统处于平衡状态。假若要求电动机以不同于 n_0 的新转速运转, 可通过改变电动机的控制电压来实现, 此时系统将从原有平衡状态(n_0) 在偏差信号作用下逐渐过渡到新的平衡状态(n_1)。这个从 n_0 到 n_1 的变化过程就是转速控制的过渡过程。

反馈控制系统反应单位阶跃输入信号(见图 1-12)时的过渡过程的一般形式示于图 1-13。

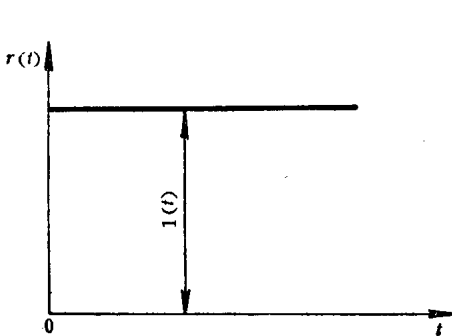


图1-12 单位阶跃信号

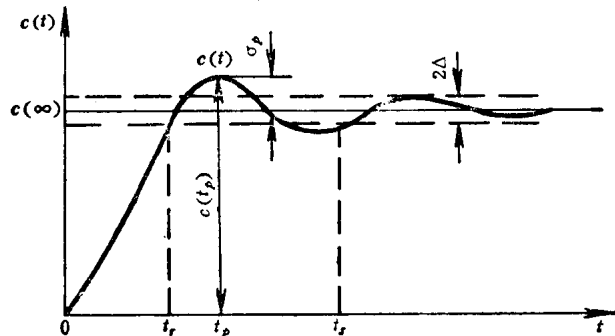


图1-13 单位阶跃信号作用下控制系统的过渡过程

$c(t)$ —系统的输出(被控制)信号;

$c(\infty)$ —系统输出达到新的平衡状态时的稳态值。

当 $t \geq t_s$ 时, 若有 $|c(t) - c(\infty)| = \Delta c(\infty)$, 则定义 t_s 为系统的过渡过程时间。其中 Δ 为给定的微量, 一般取 $\Delta = 0.02$ 或 0.05 。

如果在过渡过程中, 出现 $c(t) > |c(\infty)|$ 的情况, 则表示系统产生了超调现象。超调信号的严重程度用超调量 σ_p 来描述。超调量 σ_p 的定义是

$$\sigma_p = \frac{c_{\max} - |c(\infty)|}{|c(\infty)|}$$

式中

$$c_{\max} = \sup |c(t)|, \quad 0 \leq t < \infty$$

其中 $\sup |c(t)|$ 表示 $c(t)$ 在 $0 \leq t < \infty$ 区间的上确界。一般 $c_{\max}$ 取 $c(t)$ 第一个极值的数值。

系统的过渡过程时间 t_s 和超调量 σ_p 是描述控制系统过渡过程的两个重要性能指标。 t_s 越小, 说明系统从一个稳态过渡到另一个稳态所需要的时间越短, 反之则越长。因此, t_s 是表征系统反应输入信号速度的一项性能指标。至于 σ_p 越小, 则说明系统的过渡过程进行得越平稳。值得注意的是超调现象严重的系统, 不仅使组成系统的各个元件处于恶劣的工作条件下, 而且过渡过程在长时间内不能结束, 致使系统的误差不能很快地减小到允许范围之内。