

伺服系统实用技术

肖英奎 尚 涛 陈殿生 编

化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

·北 京·

前 言

伺服系统是自动控制系统中的一类，它是伴随着电子技术的应用而发展起来的，最早出现于 20 世纪初。近几十年来在新技术革命的推动下，特别是伴随着微电子技术和计算机技术的飞速进步，伺服技术更是如虎添翼、突飞猛进。伺服系统的应用越来越广泛，大至控制上吨重的巨型雷达天线，可及时准确地跟踪人造卫星的发射，小至用音圈电机来控制电视摄像机的激光头，从国防、工业生产、交通运输到家庭生活，它的应用几乎遍及社会的各个领域。

随着我国现代化进程对机电系统的自动化程度的要求越来越高，工程技术人员对伺服系统技术等方面的知识需求也越来越迫切，希望有更多更好的通俗易懂的伺服系统技术工具参考书、教材出版。鉴于此，我们总结了几年来教学和科研的经验，在广泛收集文献资料的基础上编写了此书，希望它能够成为一本有益的书籍。在编写本书时我们力求做到重点突出、概念清晰、由浅入深、通俗易懂，既讲透基本原理和基本方法，又兼顾内容的系统性、实用性。

全书由肖英奎主编。参加本书编写工作的有：长春工业大学肖英奎（第 6，7 章）、陈殿生（第 1 章）、张邦成（第 4 章）；吉林大学尚涛（第 3 章）、王兆明（第 2 章）、王勋龙（第 5 章）、王志选（第 8 章）。

限于编者的水平，书中出现疏漏和不妥在所难免，希望广大读者批评指正，并提出宝贵的意见和建议。

编者

2003 年 11 月

内 容 简 介

本书从工程实践的角度出发,论述了伺服系统设计的理论与方法。

全书共分8章。前3章介绍了伺服系统基础知识,主要包括伺服系统的组成及元件的特点,系统建模的方法及在时域与频域内对系统静、动态特性的分析等;第4章讨论了系统性能改善的规律与实现方法;第5章简述了系统非线性特点与分析原理;第6章介绍了数字调节器的特点及设计分析;第7章介绍了微机控制系统的组成、特点 and 设计方法;第8章讨论了复合控制系统的基本特征和常用的分析方法。全书内容详略得当,注重理论与实践相结合,实用性强。

本书可作为从事机电产品设计与开发的工程技术人员的工具书,也可作为机电专业高年级本科生与研究生的教材或参考书。

目 录

第 1 章 伺服系统概论	1
1.1 伺服系统的发展及应用	1
1.2 伺服系统的基本概念	2
1.3 伺服系统的分类	2
1.4 伺服系统的组成	3
1.5 对伺服系统的基本要求	6
1.5.1 稳定性	7
1.5.2 动态特性	7
1.5.3 稳态特性	8
1.6 伺服系统元件	8
1.6.1 执行元件	9
1.6.2 测量元件	13
1.6.3 功率放大元件	19
1.7 伺服系统常用的典型测试信号	20
第 2 章 伺服系统建模原理	23
2.1 物理系统的微分方程	23
2.1.1 电学系统	24
2.1.2 力学系统	25
2.2 物理系统的传递函数	27
2.2.1 传递函数的定义	27
2.2.2 传递函数的性质	28
2.2.3 典型环节的传递函数及其暂态特性	29
2.3 系统动态结构图	36
2.3.1 结构图的建立	37
2.3.2 结构图的等效变换和简化	38
2.4 信号流图	41
2.4.1 信号流图中的术语	42
2.4.2 信号流图的绘制	42
2.4.3 梅逊增益公式	43
第 3 章 系统时域与频域分析及稳定判据	45
3.1 引言	45
3.2 控制系统的时域分析	45

3.2.1	系统的时域性能指标	45
3.2.2	一阶系统的动态分析	47
3.2.3	二阶系统的动态分析	49
3.2.4	高阶系统的单位阶跃响应	55
3.3	频率特性及其图示方法	56
3.3.1	频率特性的一般概念	56
3.3.2	频率特性的图示法——奈奎斯特图和伯德图	58
3.4	伺服系统的稳定性分析	62
3.4.1	稳定性的概念	62
3.4.2	代数稳定判据	63
3.4.3	频率稳定判据	65
3.4.4	对数频率特性稳定判据	69
3.5	伺服系统调整品质的评定	70
3.5.1	稳态特性	70
3.5.2	动态特性	74
3.6	频域特性与时域性能指标间的关系	76
3.7	实例分析	81
3.7.1	天线控制系统的构成	81
3.7.2	控制指标(性能指标)	83
3.7.3	速度控制系统分析	83
3.7.4	位移控制系统分析	85
第4章	伺服系统的性能改善	87
4.1	引言	87
4.2	伺服系统的基本控制规律	88
4.3	PID调节规律的实现	90
4.3.1	PD控制规律的实现	90
4.3.2	PI控制规律的实现	91
4.3.3	PID控制规律的实现	92
4.4	串联校正	93
4.4.1	超前校正	93
4.4.2	滞后校正	94
4.4.3	滞后-超前校正	95
4.5	反馈校正与复合校正	96
4.5.1	反馈校正	96
4.5.2	复合校正	98
4.6	实例分析	99
4.6.1	反馈补偿式步进电动机进给伺服系统方案阐述	99
4.6.2	实现原理	100

4.6.3 元器件的选择	101
第5章 伺服系统的非线性分析	103
5.1 概述	103
5.2 非线性系统的特征	105
5.3 典型非线性特性及其对系统性能的影响	109
5.3.1 饱和非线性特性	110
5.3.2 死区非线性特性	112
5.3.3 间隙非线性特性	114
5.3.4 继电器型非线性特性	115
5.4 描述函数法	116
5.4.1 描述函数的基本概念	116
5.4.2 描述函数法分析非线性系统的稳定性	117
5.5 李雅普诺夫稳定性分析	119
第6章 数字调节器的设计	124
6.1 引言	124
6.2 数字调节器的间接设计法	125
6.2.1 双线性变换	125
6.2.2 正反差分法	126
6.2.3 零极点匹配法	128
6.3 数字调节器的直接设计法	129
6.3.1 最少拍系统的设计	129
6.3.2 最少拍无波纹系统的设计	131
6.4 数字PID控制	133
6.4.1 数字PID算法	134
6.4.2 数字PID的改进算法	137
第7章 伺服系统的微机控制	143
7.1 微机控制系统的发展与分类	143
7.1.1 计算机控制系统的发展概况	143
7.1.2 微机控制系统的分类	145
7.1.3 微机控制系统的特点	146
7.1.4 微机控制系统的发展趋势	147
7.2 微机控制系统的基本要求和结构	147
7.2.1 基本要求	147
7.2.2 硬件结构特点	148
7.2.3 软件设计特点	150
7.3 微机控制系统的设计	150
7.4 微机控制应用	154
7.4.1 双闭环直流数字调速系统	154

7.4.2 渗碳炉微机控制系统	157
第8章 复合控制系统	164
8.1 系统的耦合	164
8.2 耦合系统的解耦方法	167
8.3 多变量系统前馈控制	170
8.3.1 前馈控制的概念	170
8.3.2 多变量前馈-反馈控制系统	173
8.4 多变量系统稳定性判据	174
8.4.1 奈奎斯特判据的一般形式	174
8.4.2 正奈奎斯特判据	175
8.4.3 逆奈奎斯特判据	178
8.4.4 Ostrowski 定理及其应用	180
参考文献	184

第 1 章 伺服系统概论

1.1 伺服系统的发展及应用

在现代化的工业生产和科学实验过程中,对诸如压力、流量、温度、液面高度、机器执行部件的位置与速度等物理参数的控制;在一些军用武器中,对诸如雷达天线、导弹发射架以及火炮的方位角与俯仰角等参数的控制;对空间飞行器的姿态以及轨道参数等的控制,所有这些都需要借助于自动控制系统来实现。因而,自动控制系统已经成为现代化工业生产、科学实验过程以及一些兵器中重要的,且往往是不可缺少的一部分。

伺服系统是自动控制系统的一个分支,它是伴随电的应用而发展起来的,最早出现于 20 世纪初。1934 年第一次提出了伺服机构 (servomechanism) 这个词,随着自动控制理论的发展,到 20 世纪中期,伺服系统的理论与实践均趋于成熟,并得到广泛应用。近几十年来在新技术革命的推动下,特别是伴随着微电子技术和计算机技术的飞速进步,伺服技术更是如虎添翼、突飞猛进。它的应用几乎遍及社会的各个领域,下面简单地列举几例。

伺服系统在机械制造行业中用得最多最广,各种机床运动部分的速度控制、运动轨迹控制、位置控制等,都是依靠各种伺服系统控制的。它们不仅能完成转动控制、直线运动控制,而且能依靠多套伺服系统的配合,完成复杂的空间曲线运动的控制,如仿型机床的控制、机器人手臂关节的运动控制等。它们可以完成的运动控制精度高,速度快,远非一般人工操作所能达到。

在冶金工业中,电弧炼钢炉、粉末冶金炉等的电极位置控制,水平连铸机的拉坯运动控制,轧钢机轧辊压下运动的位置控制等,都是依靠伺服系统来实现的,这些更是无法用人工操作来代替。

在运输行业中,电气机车的自动调速、高层建筑中电梯的升降控制、船舶的自动操舵、飞机的自动驾驶等,都由各种伺服系统为之效力,从而减缓操作人员的疲劳,同时也大大提高了工作效率。

在军事上,伺服系统用得更为普遍,如雷达天线的自动瞄准跟踪控制,高射炮、战术导弹发射架的瞄准运动控制,坦克炮塔的防摇稳定控制,防空导弹的制导控制,鱼雷的自动控制等。

在计算机外围设备中,也采用了不少伺服系统,如自动绘图仪的画笔控制系统、磁盘驱动系统等。如今,我国已成为世界上少有的几个能生产激光电视放像系统的国家,用激光将信息录制在光盘上。一圈信息在电视机上构成一幅画面,放像过程是用很细的激光束沿信息道读取信息,各信息道之间的间隔已达微米级,因此控制激光束的位置伺服系统也具有相应的控制精度,以保证获取清晰稳定的画面。这种具有高精度伺服系统的激光电视

放像机，已开始进入人们的家庭生活。

1.2 伺服系统的基本概念

关于系统及自动控制从不同的角度有不同的定义，就工业控制系统而言，常用的定义如下。

系统：由一些元部件按一定要求连接并具有某一特定功能的整体。

自动控制：在没有人直接干预的情况下，通过控制装置使被控对象或过程自动按照预定的规律运行，使之具有一定的状态和性能。

伺服系统（又称随动系统）：是构成自动化体系的基本环节，它是由若干元件和部件组成的、具有功率放大作用的一种自动控制系统，它的输出量总是相当精确地跟随输入量的变化而变化，或者说，它的输出量总是复现输入量。

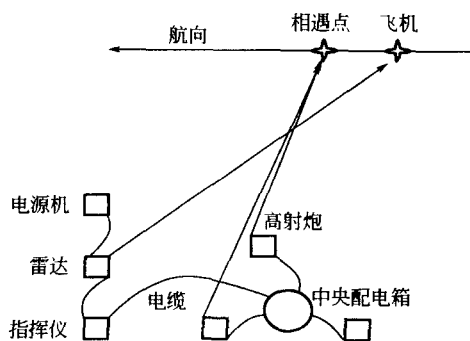


图 1-1 高射炮随动系统示意

随动系统的基本职能是对信号进行功率放大，保证有足够的能量推动负载（被控对象）按输入信号的规律运动（即输出），并使输入与输出之间的偏差不超出允许的误差范围。

另外，某些随动系统还必须完成一定距离的自动跟踪任务。例如，高射炮随动系统（见图 1-1）就是一例，系统的控制信号源在指挥仪

内，高射炮阵地的一台指挥仪要同时指挥 6 门（或 8 门）高射炮自动跟踪敌机，指挥仪与各门炮之间的距离有百米之远。

1.3 伺服系统的分类

随着科学技术的不断发展，组成伺服系统的新型元件不断出现，伺服系统的具体结构形式日益多种多样，伺服系统的类型也日益繁多。

按不同方法分类，则得到不同名称的伺服系统。常用的分类方法有以下几种。

（1）按系统控制方式分类

① 误差控制的伺服系统。它的特点是系统运动的快慢取决于误差信号的大小。当系统的误差信号为零时（即系统输出量与输入量完全相等），系统便处于静止。

② 复合控制系统，即按输入信号微分和系统误差综合控制的系统。它的特点是系统的运动取决于输入信号的变化率（包括输入速度和加速度）和系统误差信号的综合作用。

（2）按组成系统元件的物理性质分类

① 电气伺服系统。组成系统的元件除机械部件外，均是电磁或电子元件。根据执行元件所用电机种类的不同，又将电气伺服系统分为两类。

a. 直流伺服系统：系统的执行元件是直流伺服电机。

b. 交流伺服系统：系统的执行元件是交流伺服电机。

② 电气-液压伺服系统。系统的误差测量装置与前级放大部分是电气的，而系统的功率放大与执行元件则是液压的。

③ 电气-气动伺服系统。系统的误差测量与前级放大部分是电气的，而执行元件是气动的。

(3) 按系统信号特点分类

① 连续伺服系统。系统中传递的电信号都是时间的连续函数，而不是离散的，则称为连续系统。

② 数字伺服系统。系统中至少有一处传递的电信号是时间上断续的、离散的脉冲数字信号，则称为采样系统或离散系统。

当然，数字信号还得变成模拟信号去驱动执行元件，所以，这种系统中必须有模-数(A/D)和数-模(D/A)转换器。

③ 脉冲-相位伺服系统，又称锁相伺服系统。这种系统的特点是输入信号为指令方波脉冲，输出也转换成方波脉冲，按输入与输出方波脉冲之相位差来控制系统的运动。

(4) 按系统部件输入-输出特性的不同分类

① 线性伺服系统。系统各部件的输入-输出特性在正常工作范围内均是线性关系。描述这种系统运动的微分方程是线性微分方程。如方程的系数为常数，则称为定常线性自动控制系统；如系数不是常数而是时间 t 的函数，则称为变系数线性自动控制系统。线性系统的特点是可以应用叠加原理，因此数学上较容易处理。

② 非线性伺服系统。系统中含有输入-输出特性是非线性的部件。描述这种系统的微分方程是非线性微分方程。非线性系统一般不能应用叠加原理，因此数学上处理比较困难。

严格地讲，任何一个实际的伺服系统都是非线性的，不可能存在那种理想的线性系统，因为组成系统的某些元部件总是存在较小的不灵敏区（或称死区），并有饱和界限。

(5) 按执行元件功率大小分类

① 小功率系统：一般指执行元件输出功率在50W以下。

② 中功率系统：一般指执行元件输出功率在50~500W之间。

③ 大功率系统：一般指执行元件输出功率在500W以上。

伺服系统的类型很多，具体结构形式多种多样，组成系统的具体线路与元件千差万别。但就其基本特性来说，可以分为两大类，即一阶无静差系统与二阶无静差系统。

1.4 伺服系统的组成

按误差控制的伺服系统的基本结构形式可用图1-2来表示，从图中可以看出，整个系统由误差测量装置、信号放大装置、执行元件、校正装置等部分组成。

图中， Φ_r 为系统的输入信号（又称参考输入）； Φ_c 为系统的输出； θ 为系统的误差， $\theta = \Phi_r - \Phi_c$ 。

误差测量装置又称比较元件或敏感元件，它的作用是将系统的输入 Φ_r 与输出 Φ_c 之间

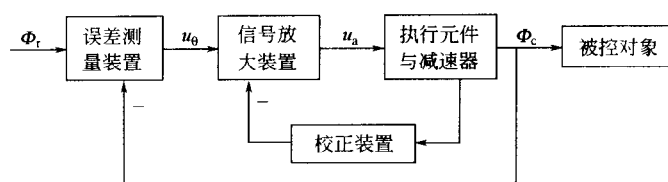


图 1-2 伺服系统结构

的差值 θ 随时测量出来，并将误差信号 θ 转换成电信号 u_θ 送入放大装置。由放大装置进行必要的变换与功率放大之后，驱动执行元件，使执行元件通过减速器（若执行元件用力矩电机，则可省去减速器）拖动被控对象，按照输入信号 Φ_r 的规律运动。校正装置的作用是补偿系统中存在的电磁与机电惯性所引起的滞后作用，使系统的输出信号 Φ_c 能瞬时跟随输入信号 Φ_r 的变化，以满足系统的动态品质要求。

图 1-3 所示是位置随动系统的工作原理。

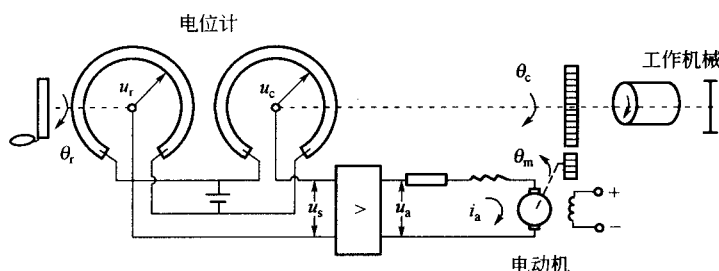


图 1-3 位置随动系统的工作原理

控制的任务是使工作机械跟随指令机构同步转动，即要求工作机械的角位置 θ_c 跟踪指令转角 θ_r ，亦即

$$\theta_c(t) = \theta_r(t)$$

首先明确如下问题：

- ① 受控对象——工作机械；
- ② 被控量——角位置 θ_c ；
- ③ 给定值——指令转角 θ_r ；
- ④ 测量元件——转角 θ_c 及 θ_r 通过两个相同的电位计，测量并转换为相应的电压 u_r 及 u_c ；

⑤ 计算比较——两个测量电位计的桥式连接，即完成了减法运算 $u_r - u_c$ ，两电刷之间的电压 u_s ，代表了被控量 θ_c 对给定量 θ_r 的误差；

⑥ 执行机构——电机减速装置。

系统的控制原理：如果工作机械转角 θ_c 等于指令转角 θ_r ，则经事先整定， $u_r = u_c$ ， $u_s = 0$ ，电机不动，系统处于平衡工作状态。

如果指令转角 θ_r 变化了，而工作机械仍处于原位，则 $\theta_c \neq \theta_r$ ， $u_r \neq u_c$ ， $u_s \neq 0$ ，从而使电机拖动工作机械朝 θ_r 所要求的方向快速偏转，直至 $\theta_c = \theta_r$ ，电机停转，系统在新的位置上又处于与指令同步的平衡工作状态，即完成了跟随的任务。

由此看出，系统通过测量 θ_c （对 θ_r 的偏差）来控制 θ_c ，所以仍是按偏差调节的伺服控制系统。

系统的功能方框图如图 1-4 所示，同样也存在着一个负反馈的闭合回路。

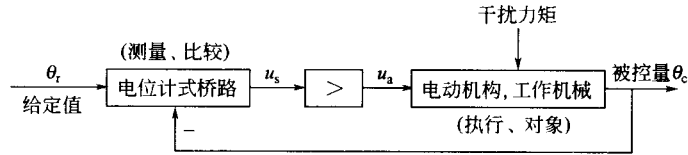


图 1-4 位置随动系统功能方框图

工程技术中，需要某个机构（如船闸、轧机、刀架、雷达天线、卡车前轮等）的位置能快速精确地跟随一个指令信号动作，这都可以仿照这种随动原理来实现。

这种系统的突出特点是：受控对象比较简单，只相当于执行机构直接拖动的一个纯机械载荷；指令信号根据工作需要经常变化，而且事先是无法完全确定的；可以用功率很小的指令信号操纵功率很大的工作机械（这只要选用大功率的功放装置和电机即可）；而且可以进行远距离控制（指令电位计的输入 u_r 和工作机械转角 θ_c 的测量电位计输出 u_c 只是电路上的连接关系，二者可以相隔甚远）。

按误差控制的伺服系统具有良好的抗干扰性能。当系统受到外部干扰，使输出量 Φ_c 偏离输入量 Φ_r 时，通过负反馈作用，使误差测量装置输出误差电压，执行元件推动被控对象回到与输入相对应的位置，即将系统输出量 Φ_c 自动调整到允许的误差范围之内。这是按误差控制（又称反馈控制）的极大优点。其缺点是负反馈削弱了系统的放大系数，降低了系统的快速性，且系统精度的进一步提高，受到这种结构形式的制约。因为提高精度需要增大系统开环放大系数和增加积分环节，这又危及了系统的稳定性。如果按系统误差及输入信号的一阶或二阶微分来控制，则可大大提高系统的精度与快速性，而又不影响系统的稳定性，保留了单纯按误差控制的全部优点。这种伺服系统称为复合控制系统，其结构如图 1-5 所示。

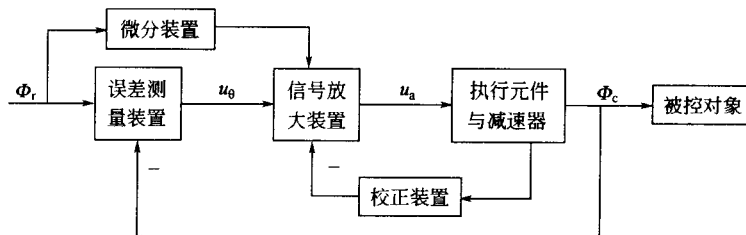


图 1-5 复合控制系统结构

反馈控制系统的组成如图 1-6 所示。

输入变换元件：用于产生参考输入信号，是进行物理量种类和大小变换的元件。例如，用电位器设定的滑臂位置来表示需要的温度。

反馈元件：是测量元件，用来测量被控制量的实际值，同时起着物理量种类和大小变换的作用。例如测速电机、热电偶等。

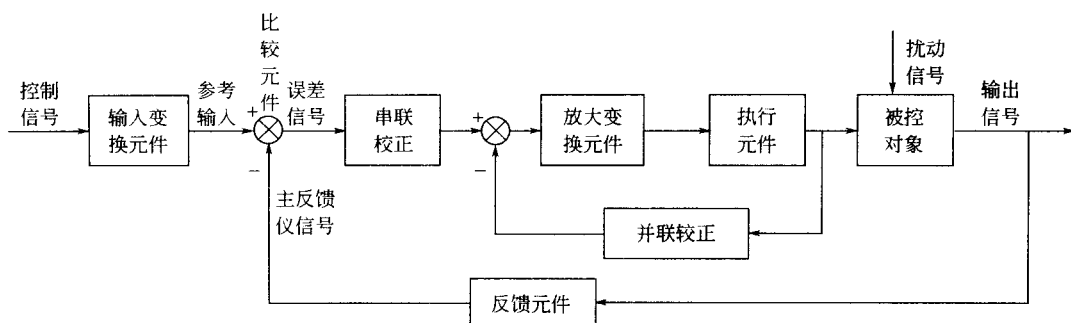


图 1-6 反馈控制系统的组成

比较元件：用来比较参考输入信号和主反馈信号，并产生反映两者差值信号的元件或电路。例如反馈电位器与适定电位器组成的电路等。

放大变换元件：把误差信号放大并进行能量形式转换，使之达到足够的幅值和功率的元件。例如电液伺服阀、发电机、功率放大器等。

执行元件：根据控制信号直接对控制对象进行操纵的元件。例如液压马达、电动机等。

被控对象：控制系统所要操纵的对象，其输出量即为系统的被控制量。例如恒温炉、直流电机、火炮炮管位置等。

校正元件：为改善系统的控制性能而加入系统的元件，可分为串联校正元件与并联校正元件。

串联校正元件：串接在系统的前向通路内的校正装置。

并联校正元件：与系统部分元件接成局部反馈形式的校正装置。

输入信号：包括控制信号（也称输入给定信号）和扰动信号。

输出信号：要控制其变化规律的信号。输出信号应与输入给定信号间保持一定的函数关系。

主反馈信号：由输出端反馈到输入端的信号。正反馈信号有利于加强输入信号的作用，负反馈信号抵消输入信号的部分作用。

在自动控制系统中通常为负反馈，正反馈往往会导致系统的不稳定。反馈信号可以是被控制量本身，也可以是它的函数。

误差信号：参考输入与主反馈信号之差。

1.5 对伺服系统的基本要求

不同的对象、不同的工作方式和任务，对控制系统的品质指标要求也往往不相同。按照偏差调节的方法设计的伺服控制系统不一定都能很好地工作，都能精确地保持被控量等于给定值。系统也可能不能正常工作，甚至会发生被控量的强烈振动，使被控对象遭到破坏。这将取决于被控对象和控制装置之间、各功能元件的特性参数之间是否匹配得当。

在理想情况下，伺服控制系统的被控量和给定值任何时候都相等，完全没有误差，而且不受干扰的影响，即

$$c(t) \equiv r(t)$$

然而在实际系统中, 由于机械部分质量、惯量的存在 (以及电路中电感、电容的存在) 及能源功率的限制, 使得运动部件的加速度不会很大, 速度和位移不会瞬间变化, 而要经历一段时间, 要有一个过程。通常把系统受到外加信号 (给定值或干扰) 作用后, 被控量随时间 t 变化的全过程称为系统的动态过程 (或过渡过程), 以 $c(t)$ 表示。则系统控制性能的优劣, 可以从动态过程 $c(t)$ 中较充分地显示出来。

控制精度是衡量系统技术水平的重要尺度。一个高质量的系统在整个运行过程中, 被控量对给定值的偏差应该是很小的。考虑到动态过程 $c(t)$ 在不同阶段中的特点, 工程上常常从稳定性、动态特性、稳态特性三个方面来评价自控系统的总体精度。

1.5.1 稳定性

稳定性是指动态过程的振荡倾向和系统重新恢复平衡工作能力的能力。一个处于静止或平衡工作状态的系统, 当受到任何输入的激励, 就可能偏离原平衡状态。当激励消失后, 经过一段暂态过程以后, 系统中的状态和输出都能恢复到原先的平衡状态, 则系统称为稳定的。

由于实际系统存在惯性、延迟, 所以当系统的各参数配合不当时, 将会使系统不稳定, 产生越来越大的输出, 引起系统中某些工作部件的损坏。因此一个控制系统要能工作, 它必须是稳定的, 而且必须具有一定的稳定裕量, 即当系统参数发生某些变化时, 也能够使系统保持稳定的工作状态。

如系统受扰后偏离了原工作状态, 而控制装置再也不能使系统恢复到原状态, 并且越偏越远, 如图 1-7 (b) 中过程③所示; 或当指令变化以后, 控制装置再也无法使被控对象跟随指令运行, 并且也是越差越大, 如图 1-7 (a) 中过程③所示。这样的系统称之为不稳定系统, 显然, 这是根本完不成控制任务的。

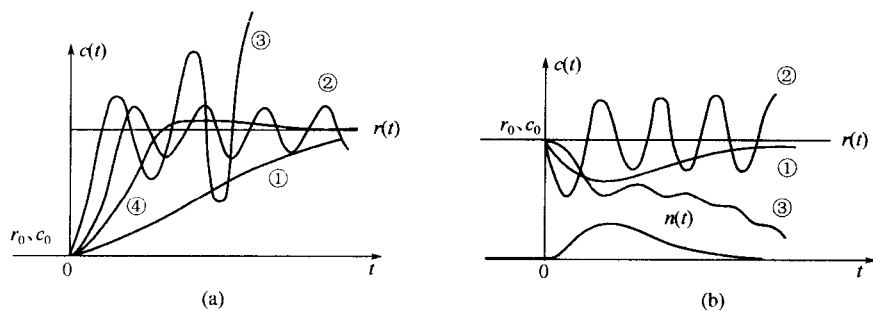


图 1-7 系统稳定性特征

在有可能达到平衡的条件下, 要求系统动态过程的振荡要小, 对被控量的振幅和频率应有所限制。过大的波动将使运动部件超载, 而导致松动和破坏。

1.5.2 动态特性

稳定的控制系统受到外加控制信号或扰动的作用后, 系统会恢复原状态或达到新的平

衡状态，但由于系统机械部分存在质量、惯量，电路中存在电感、电容，同时也由于能源、功率的限制，使得系统的各信号不能瞬时达到平衡，而要经历一个过程，即动态过程或过渡过程。动态特性即是反映在这一过程中，系统跟踪控制信号或抑制扰动的速度快慢、系统响应过程的振荡大小及平稳、均匀的程度。快速性就是指动态过程进行的时间长短。过程时间持续很长，将使系统长久地出现大偏差，同时也说明系统响应很迟钝，难以复现快速变化的指令信号，如图 1-7 (a) 中过程①所示。

稳定性和快速性反映了系统在控制过程中的性能。既快又稳，则过程中被控量偏离给定值小，偏离的时间很短，系统的动态精度高，如图 1-7 (a) 中过程④所示。

1.5.3 稳态特性

在过渡过程结束后，系统的误差值反映了系统控制的精确程度。差值越小，则说明系统控制的精度越高。

准确性就是指系统过渡过程结束过渡到新的平衡工作状态以后，或系统受扰重新恢复平衡之后，最终保持的精度，反映了动态过程后期的性能。这时系统的被控量对给定值的偏差，一般应该是很小的，如数控机床的加工误差小于 0.02mm，一般恒速、恒温控制系统的静态误差都在给定值的 1% 以内。

由于控制系统的控制目的、要求和对象的不同，因而各系统对动态特性、稳态特性的要求也不同。例如，随动系统对快速性要求高一些；电机调速系统则要求过渡过程平稳、均匀；而机器人控制系统则不允许系统产生振荡。对于同一个系统，体现稳定性、动态特性和稳态特性的稳、快、准这三个要求是互相制约的。提高过程快速性，则会使系统振荡性加强；改善系统相对稳定性，则又可能使控制过程时间延长，反应迟缓，甚至使最终精度也很差；提高系统控制的稳态精度，则会引起动态性能（过渡过程时间及振荡性）的变化。以下章节将主要讨论如何来分析和妥善处理这三者之间的矛盾。

1.6 伺服系统元件

下面以图 1-8 所示遥控导弹发射架自动定位系统示意方框图为例，说明控制系统的组成。

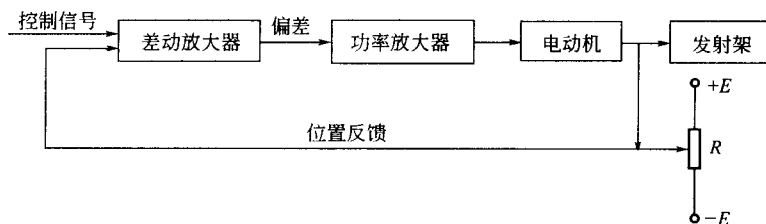


图 1-8 遥控导弹发射架自动定位系统

该系统的控制对象是导弹发射架，被控制的量是导弹发射架的转角位置，控制信号是电压信号，它代表导弹发射架应当转动的角位移，即期望位置。精密电位器的转轴和发射

架的轴相连接，它的输出电压代表发射架的实际位置。这个电压反馈到输入端，又称为反馈信号。反馈信号和控制信号一起加到差动放大器的输入端。如果发射架的实际位置和期望位置不一致，控制信号和反馈信号之间就有一个差值，这个差值反映了实际位置偏离期望位置的程 度，称为偏差信号。差动放大器将偏差信号放大，放大后的信号仍不足以拖动电动机转动，所以又经过功率放大器放大。功放输出的电压加到直流电动机的电枢绕组上，使电机转动，带动导弹发射架转动，转动方向是使偏差电压减小到零。当导弹发射架转动到期望位置时，偏差信号为零，电机电枢绕组两端电压也变为零，电机应停止转动并使发射架保持在期望位置。当控制信号改变时，发射架将随着信号转动。整个系统属于角位移跟踪伺服系统。为了提高系统的跟踪性能，实际系统中还要加入串联校正装置和并联（反馈）校正装置。

控制系统中的元件虽然是各种各样的，但根据它们在控制系统中的功能和作用可以分为以下四大类。

- ① 执行元件，它的职能是驱动控制对象，直接完成控制任务，如电机、变压器等。
- ② 测量元件，它的职能是将被测量检测出来并转换成另一种容易处理和使用的量（例如电压）。测量元件一般又称为传感器，如自整角机、测速发电机、阻容传感器等。
- ③ 放大元件，它的职能是将微弱信号放大，以便最后驱动执行元件，如线性放大器、PWM 功放、晶闸管变流器等。放大元件又可分为前置放大元件和功率放大元件两种。功率放大元件的输出信号具有较大的功率，可以直接驱动执行元件。
- ④ 校正元件，为了确保系统稳定并使系统达到规定的精度指标和其他性能指标，控制系统的设计者往往还要在系统中另外增加一些元件，这些元件就称为校正元件。校正元件的作用是改善系统的性能，使系统能正常可靠地工作并达到规定的性能指标。

在图 1-8 所示的自动定位系统中，执行元件是直流电动机，测量元件是精密电位器，前置放大元件是差动放大器，功率放大元件是直流功率放大器，校正元件在图中没有画出。

如果用一个一个方框表示系统中各元件的功能，而用方框图外边的箭头代表元件的输入和输出信号，就可以得到如图 1-9 所示的典型控制系统的职能方框图。

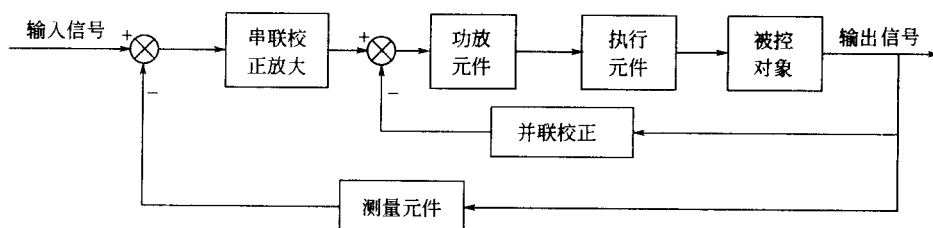


图 1-9 典型控制系统的职能方框图

1.6.1 执行元件

执行元件是控制系统最基本的组成部分。从广义上说，执行元件受放大后的信号驱动，直接带动控制对象完成控制任务。从狭义上说，执行元件的作用是将电信号、液压信号或气压信号转换成机械位移（线位移或角位移）或速度。

根据能源性质,执行元件可分为电气元件、液压元件和气动元件三大类。系统对执行元件的基本要求是:具有良好的静特性(调节特性和机械特性)和快速响应的动态特性。

常用的执行元件有电动机、液压马达和气动马达。其中应用最广的是电动机,包括直流电动机,异步电动机,步进电动机,小功率同步电动机等。

(1) 直流电动机

直流电动机把直流电能变为机械能,广泛地应用在调速性能要求高或者需要较大启动转矩的场所,如龙门刨床、电气铁道牵引、起重机械拖动等方面。特别是在自动控制领域,在高精度的伺服系统中,直流电动机占主导地位。直流电动机有以下几方面的优点。

- ① 调速范围广,且易于平滑调节。
- ② 过载、启动、制动转矩大。
- ③ 易于控制,可靠性高。
- ④ 调速时的能量损耗小。

直流电动机的主要缺点是有换向器。因此使直流电动机比交流电动机费用高,造价昂贵,运行时换向器需要经常维修,寿命也较短,换向条件又使直流电机的容量受到限制。

(2) 变压器

变压器是一种常用的电气设备,它是将一种等级的交流电压与电流变成同频率的另一等级的交流电压和电流,即把交变电压升高或降低,但不改变频率。

变压器的种类很多,根据用途可分为下列几种。

- ① 电力变压器 用于输电和配电系统。体积大,容量大,电压等级高,这些是电力变压器的特点。
- ② 供特殊用途的变压器 例如电炉变压器,各种电焊变压器(交流弧焊机)。
- ③ 调压变压器 用来调节电网电压。小容量调压器也应用在实验室中,例如自耦变压器。
- ④ 量测变压器 如电流互感器,电压互感器。
- ⑤ 试验用高压变压器 产生高电压,作高压试验用。
- ⑥ 电讯变压器和控制用变压器 用于各种电子产品和设备中的变压器统称为电讯变压器。它们都是单相小容量变压器,如小功率电源变压器;实现阻抗匹配、信号传递、信号合成的各种电讯变压器,如输入变压器、级间变压器、推动变压器、输出变压器、脉冲变压器等。

(3) 异步电动机

直接采用交流电驱动的电动机称为交流电动机。交流电动机又分为异步电动机(或称感应电动机)和同步电动机。在工业生产上使用的电动机主要是交流电动机中的三相异步电动机。在控制系统中应用的异步电动机主要包括交流伺服电动机和交流力矩电动机。其中交流伺服电动机以往主要指的是两相伺服电动机,其功率大部分为几瓦到几十瓦,它们主要用于小功率伺服系统和仪表记录装置中。交流力矩电动机的功率和力矩较大,可以驱动较大的设备和装置,如各种测试转台和高精度的伺服系统。随着功率半导体器件的发展和变频调速与矢量控制技术的应用,三相异步电动机和同步型交流伺服电动机的应用已发展到一个崭新的阶段,在控制精度、调速范围等各项技术性能方