

# 伺服系统原理与设计

胡祐德 曾乐生 马东升

北京理工大学出版社

TP273  
153

# 伺服系统原理与设计

胡祐德 曾乐生 马东升

北京理工大学出版社

(京) 新登字 149 号

### 内 容 简 介

本书密切联系工程实际, 介绍各类伺服系统的组成原理及其设计方法。包括伺服系统的测速、测角(位移), 各种信号转换线路, 提高系统品质的方法; 讨论了系统的稳态设计、数学模型的建立、及其动态设计方法; 分析了系统低速不平滑与机械谐振, 提供了改进的技术措施; 介绍了滑模控制, 多变量解耦控制以及重复控制技术的应用。

### 伺服系统原理与设计

胡祐德 曾乐生 马东升

北京理工大学出版社出版发行

各地新华书店经售

三河县潮河印刷厂印刷

850×1168毫米 32开本 11.375印张 300千字

1993年6月第一版 1993年6月第一次印刷

ISBN 7-81013-716-6/TP·79

印数: 1—3500 册 定价: 3.75 元

## 前 言

本书主要是为控制专业本科生专业课编写的教材，同时兼顾工程设计人员和研究人员的需要，用十章有限的篇幅，紧密结合工程实践，论述了各种电气伺服系统的构成原理和设计方法。

本书是以读者已熟知的控制理论、自动控制元件、电机与电力拖动基础、电子技术、变流技术等方面知识，运用于伺服系统的设计。在介绍各种伺服系统的原理、线路和特性的基础上，着重介绍了工程常用的行之有效的提高系统品质的技术措施，除讨论了各种线性补偿方法外，还讨论了非线性补偿、变结构控制、重复控制、解耦控制等技术。

因为主要是作教材，就必须考虑与相邻课程的分工。为此，本书主要阐述电气模拟式伺服系统的设计技术，但其基本思想和方法，也适用于电—液伺服系统、数字伺服系统。

本书的第一、二、三、五、六和第八章由胡祐德执笔，第七章由曾乐生执笔，第四章由曾乐生与胡祐德合写，第九、十章由马东升执笔，全书由胡祐德主编。北京计算机学院肖春林教授审稿。鉴于我们的水平和经验均有限，书中难免有错和欠妥之处，敬请大家批评指正。

编著者

1992年8月

# 目 录

## 第一章 概 论

- 1-1 发展简况 ..... 1
- 1-2 伺服系统的组成及其基本特征 ..... 2

## 第二章 伺服系统的测速与测角(位移)

- 2-1 概述 ..... 7
- 2-2 角速度的检测 ..... 7
  - 1. 测速发电机 ..... 8
  - 2. 测速电桥 ..... 10
  - 3. 光电测速盘 ..... 12
  - 4. 速率陀螺 ..... 13
- 2-3 用典型元件测角(位移) ..... 15
  - 1. 电位计 ..... 15
  - 2. 差动变压器和微同步器 ..... 16
  - 3. 自整角机与旋转变压器 ..... 19
  - 4. 感应同步器 ..... 20
  - 5. 三自由度陀螺 ..... 21
- 2-4 双通道测角线路 ..... 22
- 2-5 扫描测量 ..... 25
  - 1. 圆锥扫描 ..... 25
  - 2. 扇形扫描 ..... 29
- 2-6 脉冲比较测角(位移) ..... 32
- 习题 ..... 34

### 第三章 伺服系统的信号转换电路

3-1 伺服系统中常见的信号转换电路的类型	35
3-2 相敏整流线路	36
1. 开关式相敏整流线路	36
2. 差动式相敏解调线路	41
3. 用模拟乘法器作相敏解调	42
4. 采样保持式相敏整流线路	43
3-3 振幅调制线路	44
1. 开关式振幅调制线路	44
2. 差动式振幅调制线路	46
3. 模拟乘法器作振幅调制器	47
3-4 相位调制线路	47
3-5 脉冲宽度调制(PWM)线路	47
3-6 电压—频率转换(V/F)线路	50
3-7 频率—电压转换(F/V)线路	52
习题	56

### 第四章 伺服系统的特性及

#### 提高系统品质的方法

4-1 系统品质与系统特性	57
1. 系统特性与稳态精度的关系	58
2. 系统特性与其过渡过程品质的关系	60
4-2 串联补偿	63
1. 串联补偿的作用	63
2. 常用串联补偿电路	64
4-3 负反馈补偿	73
1. 用负反馈补偿重新配置极点	73
2. 负反馈补偿可以抑制干扰	74
3. 负反馈补偿可以降低系统对自身特性和参数变化的灵敏度	75
4-4 前馈补偿——复合控制系统	86

1. 复合控制与扰动补偿	86
2. 不变性原理	89
3. 复合控制双传动系统	91
4. 模型跟踪控制系统	92
4-5 顺馈补偿	93
4-6 选择性反馈或顺馈补偿	95
1. 反馈联接	95
2. 选择性顺馈联接	98
3. 中间联接	99
4-7 正反馈的应用	99
4-8 非线性补偿	100
1. 采用非线性速度阻尼的系统	100
2. 采用非线性积分器	103
3. 采用双模或多模控制技术	104
习题	105

## 第五章 系统的稳态设计

5-1 设计概述	108
5-2 负载的分析计算	111
1. 几种典型负载	111
2. 负载的折算	113
3. 负载的综合计算	116
5-3 执行元件的选择	122
1. 单轴传动的电机选择	122
2. 一般高速执行电机的选择	127
5-4 检测装置、信号转换线路、放大装置及电源线路等的设计与选择	135
1. 检测装置的选择与设计	136
2. 信号选择电路的设计	141
3. 放大装置的设计	147
4. 电源设备等装置的设计	144
5-5 利用铭牌数据和经验公式推导系统的传递函数	145

1. 直流随动系统的传递函数推导举例 .....	145
2. 用两相异步电机的交流随动系统的传递函数推导 .....	149
3. 直流调速系统传递函数推导 .....	152
习题 .....	154

## 第六章 设计补偿装置的对数频率法

6-1 引言 .....	155
6-2 希望特性的绘制 .....	156
6-3 补偿装置的设计 .....	163
1. 串联补偿装置的设计 .....	163
2. 负反馈补偿的设计 .....	165
6-4 考虑降低灵敏度的设计 .....	169
1. 系统灵敏度函数的频域表示 .....	170
2. 按灵敏度要求设计补偿装置 .....	172
3. 多反馈回路的设计 .....	173
6-5 前馈补偿和负载扰动补偿的设计 .....	177
1. 前馈补偿的设计 .....	177
2. 负载扰动补偿 .....	179
6-6 利用描述函数设计某些非线性系统 .....	182
习题 .....	186

## 第七章 交流载频系统的设计

7-1 交流载频系统概述 .....	188
7-2 零相角条件与等效传递函数 .....	190
1. 零相角条件的表达式 .....	191
2. 等效传递函数 .....	193
7-3 交流补偿装置的设计 .....	197
1. “谐振”补偿电路的设计计算 .....	197
2. “开关”补偿电路的设计计算 .....	214
3. 交流反馈补偿电路简介 .....	220
习题 .....	222



## 第八章 最优传递函数设计方法

8-1 引言 .....	223
8-2 最优传递函数 .....	224
1. 目标函数为 $J_1$ 时的最优传递函数 .....	224
2. ITAE最优传递函数 .....	232
8-3 状态反馈的设计 .....	235
1. 全状态反馈的设计 .....	235
2. I型系统的设计问题 .....	239
3. 部分状态反馈的设计 .....	243
8-4 输出反馈补偿设计及其它 .....	249
习题 .....	254

## 第九章 伺服系统中几个问题的分析

9-1 干摩擦造成的低速不平滑及其改善 .....	255
1. 干摩擦对伺服系统运动过程的影响 .....	255
2. 减小“跳动”的办法 .....	260
3. 用PWM放大器的动力润滑作用 .....	263
9-2 机械谐振的影响及其补偿 .....	268
1. 问题的提出 .....	268
2. 机械谐振的影响 .....	268
3. 消除或减小机械谐振的措施 .....	274
4. 克服机械谐振的状态反馈设计 .....	278
9-3 传动间隙的影响及其补偿 .....	290
1. 机械传动的间隙 .....	290
2. 传动间隙的影响 .....	291
3. 伺服系统中的电消除传动 .....	294

## 第十章 复杂伺服系统

10-1 滑模控制系统 .....	300
1. 滑模控制的基本概念 .....	300

2.	滑模控制系统的一般原理 .....	302
3.	单变量滑模控制系统设计 .....	307
4.	可变切换线的滑模控制直流伺服系统 .....	311
10-2	<b>多变量解耦控制系统</b> .....	318
1.	耦合程度的度量——相对增益 .....	318
2.	减少与解除耦合的途径 .....	323
3.	解耦控制原理 .....	324
4.	多变量解耦控制的综合方法 .....	327
5.	非完全解耦系统 .....	330
6.	状态反馈解耦 .....	332
10-3	<b>重复控制理论及其应用</b> .....	337
1.	重复控制原理 .....	337
2.	重复控制系统的稳定性 .....	343
3.	重复控制系统的设计方法 .....	345
	<b>附录 常用Laplace 变换表</b> .....	348
	<b>主要参考文献</b> .....	350

# 第一章 概 论

## 1-1 发展简况

伺服系统是自动控制系统中的一类，它是伴随电的应用而发展起来的，最早出现于本世纪初。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，到本世纪中期，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的突飞猛进。它的应用几乎遍及社会的各个领域。下面简单的列举几例，便可略窥一斑。

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，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等，都依靠伺服系统来实现，这些更是无法用人工操作所能代替的。

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……，都由各种伺服系统为之效力，从而减缓操作人员的疲劳，也大大提高了工作效率。

在军事上，伺服系统用得更为普遍，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、鱼雷的自动控制等等，真是不胜枚举。

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图像。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 $\mu\text{m}$ 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，已开始进入我国人民的家庭生活。

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放像机的激光头，从国防、工业生产、交通运输到家庭生活，而且必将发展应用到更新的领域。

## 1-2 伺服系统的组成及其基本特征

什么是伺服系统？伺服系统是用来控制被控对象的某种状态，使其能自动地、连续地、精确地复现输入信号的变化规律，通常是闭环控制系统。

伺服系统的种类很多，组成状况和工作状况也是多种多样，可简单的用图 1-1 方块图来表示它的组成。它有检测装置，用来检测输入信号和系统的输出，有放大装置和执行部件，为使各部件之间有效地组配和使系统具有良好的工作品质，一般还有信号转换线路和补偿装置。这仅指信息在系统中传递所必经的各个部分。此外，以上各部分都离不开相应的能源设备、相应的保护装置，控制设备和其它辅助设备。

伺服系统的输出可以是各种不同的物理量，本书将结合机械运动控制中的问题进行讨论，如速度（包括角速度）控制、位置

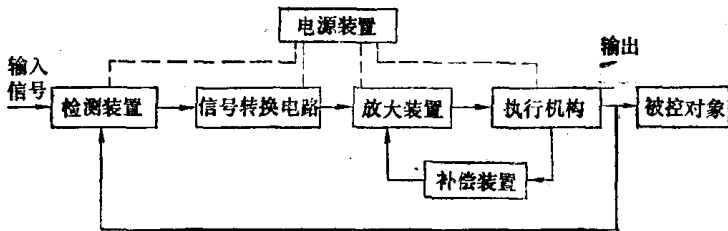


图1-1 伺服系统方块图

（包括转角）控制和运动轨迹控制，讨论各种速度伺服系统和位置伺服系统（亦称随动系统）的原理与设计问题。

从系统组成元件的性质看，有电气伺服系统，它的全部元器件由电气元件组成；有全部由液压元件组成的液压伺服系统；有不少两者相结合的电气—液压伺服系统、电气—气动伺服系统，因限于篇幅，本教材主要列举电气伺服系统的线路为例，但所讨论的原理和设计方法仍具有一般性。

从控制方式看，伺服系统不包括单纯的开环控制，而具有以下两种类型（见图1-2）：

第一种是按误差控制的系统（图1-2(a)），它由前向通道  $G(s)$  和负反馈通道  $F(s)$  构成，亦称闭环控制系统。系统的开环传递函数和闭环传递函数分别为

$$W(s) = G(s)F(s) \quad (1-1)$$

$$\phi(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)F(s)} \quad (1-2)$$

将系统输出速度  $V_o$ （或角速度  $\Omega_o$ ）转变成电压信号  $U_f$ ，反馈到系统输入端，用输入信号  $U_i$  与  $U_f$  的差

$$U_i - U_f = \Delta U \quad (1-3)$$

来控制系统，即构成速度伺服系统，通常系统主反馈通道的传递函数是个常系数，即

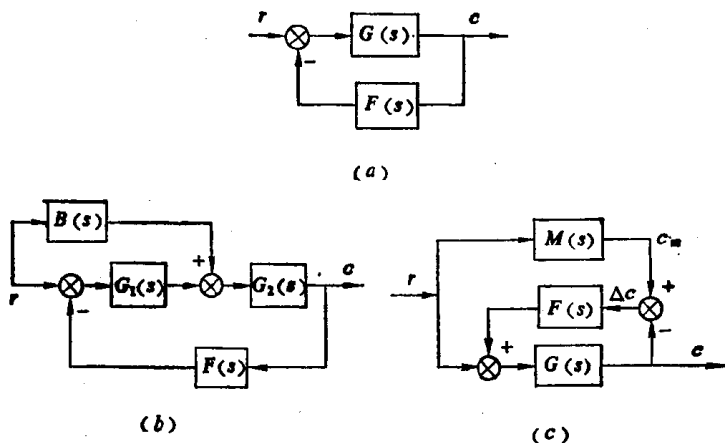


图1-2 伺服系统的基本控制方式举例

$$F(s) = f \quad (1-4)$$

根据系统的线路和它的工作特点，有单向调速系统、可逆（即双向）调速系统和稳速系统等区别。

将系统输出转角 $\varphi_o$ （或位移 $L_o$ ）反馈到系统主通道的输入端，同输入角 $\varphi_r$ （或位移 $L_r$ ）的差 $e$ 即

$$e = \varphi_r - \varphi_o \quad (1-5)$$

来控制系统，即构成位置伺服系统（随动系统）。它的主反馈通道传递函数通常是

$$F(s) = 1 \quad (1-6)$$

即所谓单位反馈，位置伺服系统通常都是可逆运转的。它的开环传递函数与闭环传递函数之间有以下简单关系

$$\phi(s) = \frac{W(s)}{1 + W(s)} \quad (1-7)$$

按误差控制的系统历史最长，应用也最广。要使系统输出精确地复现输入，系统的动态响应品质和系统稳态精度存在矛盾，这是设计这类系统需要认真解决的问题。

第二种是按误差和扰动复合控制的系统，采用负反馈与前馈

相结合的控制方式，亦称开环—闭环控制系统，见图1-2(b)所示形式。其系统传递函数为

$$\phi(s) = \frac{[B(s) + G_1(s)]G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)F(s)} \quad (1-8)$$

其中  $B(s)$  代表前馈通道的传递函数。

无论是速度伺服系统，还是位置伺服系统，都可以采用复合控制形式，它的最大优点是引入前馈  $B(s)$  后，能有效地提高系统的精度和快速响应，而不影响系统闭环部分的稳定性，详见本书第四章的讨论。

图1-2(c)表示的系统，称为模型跟踪控制系统，除具有前向主控制通道外，还有一条与它并行的模型通道  $M(s)$ ，它通常用电子线路（或用计算机软件）来实现，将两者输出的差

$$\Delta c = c_m - c$$

作为主反馈信号，通过  $F(s)$  反馈到主通道的输入端，要求系统的实际输出  $c$  跟随模型的输出  $c_m$ ，与复合控制系统类似，该系统（图1-2(c)）的传递函数可表示成

$$\phi(s) = \frac{[1 + M(s)F(s)]G(s)}{1 + G(s)F(s)} \quad (1-9)$$

适当选取模型通道的传递函数  $M(s)$  和反馈通道的传递函数  $F(s)$ ，可以使系统获得较高的精度和良好的动态品质。它可以看成是由复合控制演变而成的，故仍属于相同的一类。

模型跟踪控制用于速度伺服系统比较方便，在位置伺服系统中只宜于将它用于速度环的控制。

伺服系统的特性有线性的和非线性的，实际系统严格说都是非线性的，但不少系统可以建立近似的线性数学模型，用线性控制理论进行分析与设计，这是控制系统设计最基本的内容，为此，本书主要介绍线性系统的设计，对非线性系统的设计问题，只有很少的一点介绍。

本书是一门专业课程的教材，必须考虑相联系的有关课程之间的分工，不能重复，故有许多内容如伺服系统的数字控制技术在此没有涉及；同时又要考虑补上必不可少的遗漏，也用了一定的篇幅予以说明。工程设计是具体的，不容许含糊。在这有限的篇幅里，我们把伺服系统最基本的问题和设计方法均作出了说明。



## 第二章 伺服系统的测速 与测角(位移)

### 2-1 概 述

本书只介绍速度和位置伺服系统。系统的控制精度是最重要的技术指标之一，一套伺服系统的控制精度，受多方面因素的影响，但其中十分关键的是检测装置的精度（分辨率）。现代科学技术的发展，对高精度伺服系统的运用越来越多。例如高精度锁相调速系统，要求测速误差 $<10^{-6}$ ，而一般测速发电机测速误差却在 $2\% \sim 0.02\%$ 范围。用于跟踪卫星的雷达天线伺服系统，它的跟踪误差必须 $<1'$ 。观测天体的射电望远镜，要求伺服系统的误差 $<0.05$ 分。开始进入家庭的电视激光放象机，激光针头的径向运动要伺服系统来控制，该系统的位置误差 $\leq 0.001\text{mm}$ 。以上几例均说明伺服系统的精度是较高的，而它们所采用的检测装置的精度将更高。首先，系统中的检测装置对误差能分辨，并提供出有效的信号，然后才谈得上对系统进行控制。因此，检测装置的高精度，是实现高精度伺服系统的前提。

然而，各种用途的伺服系统是五花八门的，它们对精度的要求也很不一致，正因为如此，在伺服系统中采用的检测装置其类型十分繁杂，本章只就常见的模拟式测速和测角（位移）装置，作一简要说明。

### 2-2 角速度的检测

在速度伺服系统中，系统的输出就必需有检测角速度的装置，在位置伺服系统中，也常需要它获得速度阻尼信号。因此在伺服