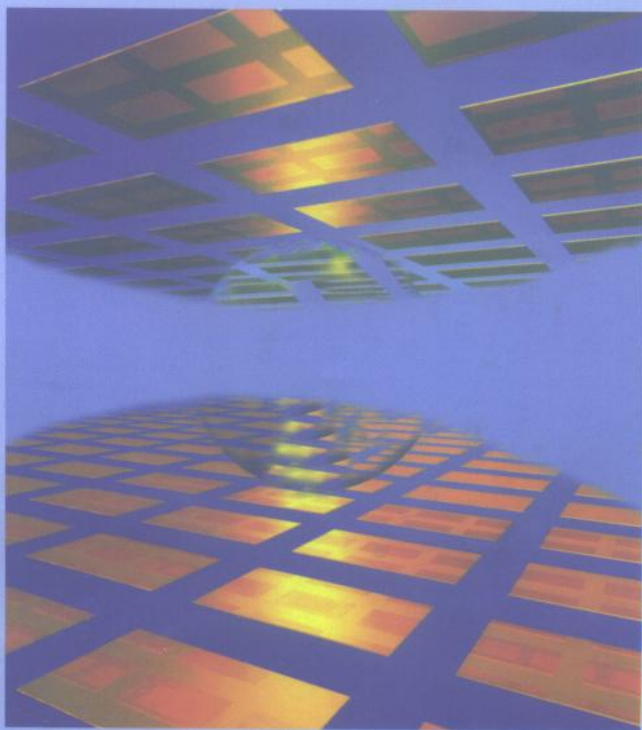


# 伺服系统原理与设计

(修订版)

胡祐德 马东升 张莉松 编著



北京理工大学出版社

# 伺服系统原理与设计

(修订版)

胡祐德 马东升 张莉松 编著

北京理工大学出版社

## 内 容 简 介

本书密切联系工程实际,系统地介绍了各类伺服系统的组成原理和设计方法。该书内容包括伺服系统的测速、测角(位移)、各种信号转换线路,同时修订版增加了SDC、DSC等方面内容和提高系统品质的方法;分析了系统低速不平滑与机械谐振及传动间隙对系统的影响,提供了改进的技术措施;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,介绍了最优传递函数设计方法,以及滑模控制、重复控制技术的应用。

该书适用于自动控制专业本科生、研究生学习。内容叙述力求理论联系实际,深入浅出,各章又配有习题,便于自学。本书对从事自动控制专业的科研和工程技术人员也有参考使用价值。

## 图书在版编目(CIP)数据

伺服系统原理与设计/胡祐德等著. —北京:北京理工大学出版社, 1999. 7

ISBN 7-81013-716-6

I. 伺… II. 胡… III. 伺服系统 IV. TP275

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 24121 号

责任印制: 王 军 责任校对: 陈玉梅

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路 7 号)

邮政编码 100081 电话(010)68912824

各地新华书店经售

北京国马印刷厂印刷

\*

850 毫米×1168 毫米 32 开本 10.875 印张 270 千字

1999 年 7 月第 2 版 1999 年 7 月第 2 次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 15.50 元

---

※图书印装有误,可随时与我社退换※

## 修订版说明

《伺服系统原理与设计》是为自动控制专业本科生专业课编著的教材。原书由胡祐德、曾乐生、马东升共同编著，北京工业大学副校长肖春林教授主审，于1993年北京理工大学出版社正式出版，并获第三届全国工科电子类专业优秀教材二等奖。

经过几年教学实践和兄弟院校使用证明：此书对培养学生综合运用控制理论、自动控制元件、电机及电力拖动、电子技术等基础知识；熟练掌握伺服系统的原理及应用；掌握伺服系统设计技术和设计方法，均取得较好的教学效果。

因教学用书需要再版，在广泛听取使用者意见的基础上，考虑到与相邻课程的分工、配合，为适应新的伺服技术的发展，由胡祐德、马东升、张莉松对原书进行修订，保留了原教材最基本的内容，作了部分删节，补充了新的内容。例如增添了伺服系统应用实例一章，适当补充了伺服系统中常见的模拟与数字信号间的转换技术，改写了第四章、第六章和变结构控制等内容，以适应新的教学需要，将全书重新编排成现在的九章。

限于我们的水平与经验的局限，难免还有错误和欠妥之处，敬请大家批评指正。值此修订版出版之际，感谢肖春林教授再次为我们审稿并提出宝贵意见，感谢北京理工大学自动控制系统教研室同志们的支持帮助。

编者

1998年8月

# 目 录

## 第一章 概 论

- 1-1 发展简况 ..... ( 1 )
- 1-2 伺服系统的组成原理及其基本特征 ..... ( 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) ..... ( 14 )
  - 1. 电位计 ..... ( 14 )
  - 2. 差动变压器和微同步器 ..... ( 16 )
  - 3. 自整角机与旋转变压器 ..... ( 17 )
  - 4. 感应同步器 ..... ( 19 )
  - 5. 三自由度陀螺 ..... ( 20 )
- 2-4 双通道测角线路 ..... ( 21 )
- 2-5 扫描测量 ..... ( 24 )
  - 1. 圆锥扫描 ..... ( 24 )
  - 2. 扇形扫描 ..... ( 28 )
- 2-6 脉冲比较测角 (位移) ..... ( 30 )
- 习 题 ..... ( 33 )

## 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	( 37 )
2.	用模拟乘法器作相敏解调器	( 41 )
3.	相敏整流集成芯片	( 41 )
3-3	振幅调制线路	( 43 )
1.	开关式振幅调制线路	( 43 )
2.	用模拟乘法器作振幅调制器	( 45 )
3.	振幅调制集成芯片	( 45 )
3-4	相位调制线路	( 46 )
3-5	脉冲宽度调制(PWM)线路	( 46 )
3-6	电压—频率转换( $V/F$ )电路	( 49 )
3-7	频率—电压转换( $F/V$ )电路	( 50 )
3-8	数字—自整角机/旋转变压器转换(DSC/DRC)	( 54 )
1.	数字—自整角机转换器	( 54 )
2.	数字—旋转变压器转换器	( 57 )
3-9	自整角机/旋转变压器—数字转换器(SDC-RDC)	( 58 )
1.	自整角机—数字转换器	( 58 )
2.	旋转变压器—数字转换器	( 63 )
习 题		( 64 )

#### 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	( 65 )
1.	系统特性与稳态精度的关系	( 66 )
2.	系统特性与其过渡过程品质的关系	( 68 )
4-2	常用的线性补偿	( 71 )
1.	串联补偿	( 71 )
2.	顺馈补偿	( 74 )
3.	负反馈补偿	( 76 )
4.	正反馈补偿的应用	( 83 )
4-3	复合控制与扰动间接测量补偿技术	( 84 )
1.	扰动补偿的不变性原理	( 84 )
2.	复合控制伺服系统	( 89 )
3.	复合控制双传动伺服系统	( 92 )

4.	模型跟踪控制系统	( 95 )
5.	扰动的间接测量补偿技术	( 97 )
4-4	非线性补偿技术在伺服系统中的应用	(102)
1.	采用非线性速度阻尼的系统	(102)
2.	采用非线性积分器和非线性 PI 调节器	(105)
3.	采用双模或多模控制技术	(106)
4-5	干摩擦对系统的影响及其改善	(107)
1.	干摩擦造成系统低速不平滑	(108)
2.	减小低速“跳动”的措施	(111)
4-6	机械谐振对系统的影响及其补偿	(116)
1.	传动轴弹性变形造成的机械谐振	(117)
2.	消除或补偿机械谐振影响的措施	(120)
4-7	传动间隙对系统的影响及其补偿	(124)
1.	传动间隙对系统性能的影响	(126)
2.	消除或补偿传动间隙对系统的影响	(127)
习 题		(132)

## 第五章 系统的稳态设计

5-1	设计概述	(135)
5-2	负载的分析计算	(138)
1.	几种典型负载	(138)
2.	负载的折算	(140)
3.	负载的综合计算	(143)
5-3	执行元件的选择	(148)
1.	单轴传动的电机选择	(148)
2.	一般高速执行电机的选择	(153)
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	(161)
1.	检测装置的选择与设计	(161)
2.	信号选择电路的设计	(166)
3.	放大装置的设计	(168)
4.	电源设备等装置的设计	(169)

5-5 信号转换及相关接口的设计 .....	(170)
1. RDC 相关接口电路设计 .....	(170)
2. DRC 相关接口电路设计 .....	(178)
5-6 利用铭牌数据和经验公式推导系统的传递函数 .....	(179)
1. 直流随动系统的传递函数推导 .....	(179)
2. 采用两相异步机的交流随动系统传递函数推导 .....	(184)
3. 采用三相电动机的交流随动系统传递函数的推导 .....	(186)
习 题 .....	(188)

## 第六章 设计补偿装置的对数频率法

6-1 引 言 .....	(190)
6-2 希望特性的绘制 .....	(191)
6-3 补偿装置的设计 .....	(198)
1. 串联补偿装置的设计 .....	(198)
2. 负反馈补偿的设计 .....	(200)
6-4 考虑降低灵敏度的设计 .....	(204)
6-5 复合控制系统的设计 .....	(208)
1. 利用串入 PI 调节器的设计 .....	(211)
2. 利用间接测量输入的补偿设计 .....	(213)
6-6 交流载频系统中对信号传递的要求 .....	(214)
1. 零相角条件的表达式 .....	(216)
2. 等效传递函数 .....	(219)
6-7 交流载频系统补偿装置的设计 .....	(223)
1. “谐振”补偿电路的设计计算 .....	(223)
2. “开关”补偿电路的设计 .....	(234)
习 题 .....	(236)

## 第七章 最优传递函数设计方法

7-1 引 言 .....	(239)
7-2 最优传递函数 .....	(240)
1. 目标函数为 $J_1$ 时的最优传递函数 .....	(240)



2. ITAE 最优传递函数 .....	(248)
7-3 状态反馈的设计 .....	(251)
1. 全状态反馈的设计 .....	(251)
2. I 型系统的设计问题 .....	(254)
3. 部分状态反馈的设计 .....	(258)
7-4 输出反馈补偿设计及其它 .....	(264)
习 题 .....	(269)

## 第八章 伺服系统举例

8-1 火炮方位伺服系统 .....	(270)
8-2 锁相可逆调速系统 .....	(275)
8-3 VCD 放像机的伺服系统 .....	(282)
1. 主轴伺服系统与切向伺服系统 .....	(284)
2. 高低伺服系统与聚焦伺服系统 .....	(287)
3. 进给伺服系统与循迹伺服系统 .....	(288)
4. 倾斜伺服系统 .....	(290)
8-4 应用于飞行试验仿真系统中的交流伺服系统 .....	(293)
1. 伺服电机、驱动装置及位置检测 .....	(294)
2. 数字控制器及相关电路 .....	(296)
3. 伺服系统的控制程序 .....	(304)
4. 伺服系统的保护 .....	(306)

## 第九章 滑模控制与重复控制在伺服系统中的应用

9-1 伺服系统的滑模控制 .....	(307)
1. 二阶系统开关控制举例 .....	(307)
2. 滑动模态 .....	(310)
3. 伺服系统滑模控制设计 .....	(313)
9-2 重复控制原理及其应用 .....	(319)
1. 重复控制原理 .....	(319)
2. 重复控制系统的稳定性 .....	(324)
3. 重复控制系统的设计方法 .....	(326)

主要参考文献 .....	(329)
附录一 常用补偿电路及其特性 .....	(332)
附录二 常用有源补偿电路及其特性 .....	(334)
附录三 常用 Laplace 变换表 .....	(337)

# 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  $\mu\text{m}$  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 伺服系统的组成原理及其基本特征

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。

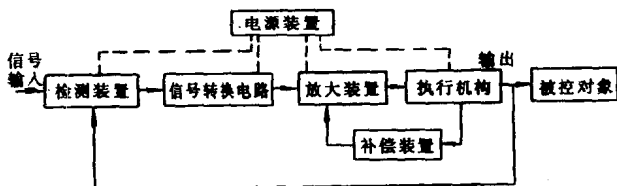


图 1-1 伺服系统方块图

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(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)：

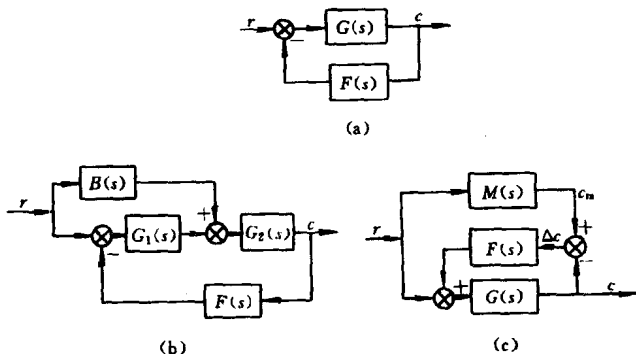


图 1-2 伺服系统的基本控制方式举例

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  $V_c$  (或角速度  $\Omega_c$ ) 转变成电压信号  $U_f$  反馈到系统输入端, 用输入信号  $U_r$  与  $U_f$  的差

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

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

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

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  $\varphi_c$  (或位移  $L_c$ ) 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

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

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

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

式中  $B(s)$  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，必须考虑相关课程之间的分工

与联系，没有过多重复，如伺服系统的计算机控制技术，留给“计算机控制系统”课介绍；工程设计是具体的，不允许含糊，因此用了一定的篇幅补上必不可少的遗漏。在这有限的篇幅里，把伺服系统最基本的问题和设计方法均作了阐明。



## 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 $<0.05'$ 。开始进入家庭的电视激光放像机，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 $\leq 1 \mu\text{m}$ 。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，系统的输出端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。因此在伺服系统中被广泛采用。用得最多的是各种测速发电机，比较简易的