

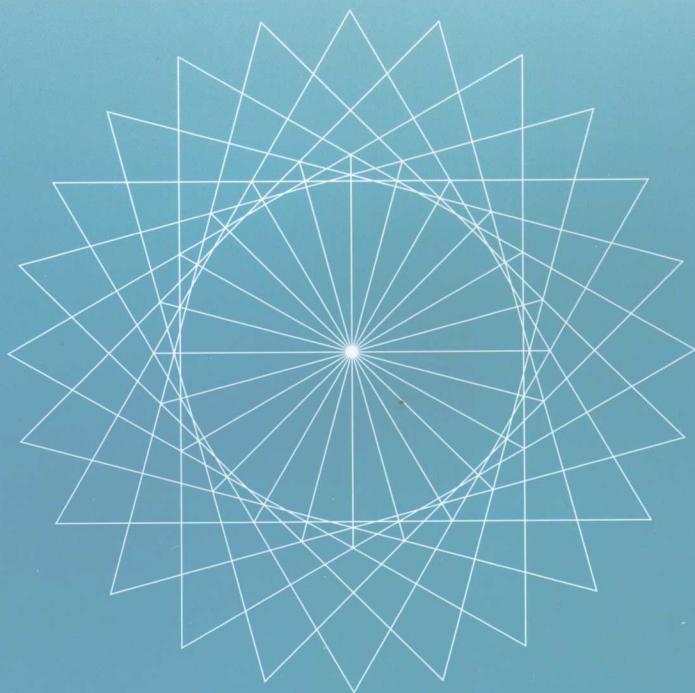
丛书主编 杨黎明

副主编 杨志勤 厉虹

机电一体化设计系列丛书

# 伺服技术

◎ 厉虹 杨黎明 艾红 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

## 内容简介

本书主要介绍了机电一体化设计的基本概念、设计方法和设计步骤。全书共分五章。第一章介绍机电一体化的概念、组成、应用和发展；第二章介绍机电一体化设计的基本概念、设计方法和设计步骤；第三章介绍机电一体化设计中的机械部分；第四章介绍机电一体化设计中的电气部分；第五章介绍机电一体化设计中的控制部分。本书可作为高等院校机电一体化专业及相关专业的教材，也可供从事机电一体化工作的工程技术人员参考。

丛书主编 杨黎明  
 副主编 厉虹 杨志勤 房虹

机电一体化设计系列丛书

厉虹 杨黎明 艾红 编著

# 伺服技术

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第023789号

机械工业出版社

北京市机械工业出版社发行部 邮编 100044

北京市机械工业出版社

北京市机械工业出版社

开本 787×1092 1/16 印张 33.4 字数 250千字

2002年8月第1次印刷 印数 1—4000册 定价 45.00元

(封面设计: 房虹)

北京航空航天大学出版社

<http://www.ndip.cn>

丛  
书  
主  
编

## 内 容 简 介

本书共分为2篇17章,简要论述了伺服系统的基本概念和控制性能,对伺服系统中常用传感器的工作原理、结构、特性等作了阐述,对典型的电气伺服系统和液压伺服系统的工作原理、控制方式进行了分析,对数字信号处理器在交流伺服系统中的应用作了概要介绍,并阐述了数控机床和液压伺服系统的设计方法。

本书的读者对象主要是中小企业从事机电一体化工作的工程技术人员。也可供大专院校、高职机械类专业学生参考。

丛  
书

### 图书在版编目(CIP)数据

伺服技术/厉虹,杨黎明,艾红编著. —北京:国防工业出版社,2008.8

(机电一体化设计系列丛书/杨黎明主编)

ISBN 978-7-118-05671-6

I.伺... II.①厉...②杨...③艾... III.伺服系统 IV.TP275

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 052786 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100044)

涿中印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 23½ 字数 520 千字

2008年8月第1版第1次印刷 印数1—4000册 定价42.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

# 序 言

“机电一体化”是指在机械的主功能、动力功能、信息处理功能和控制功能等方面引入电子技术,并将机械装置、电力电子设备及相关技术设备组成的有机整体——机械电子产品或系统的总称。

机电一体化技术发展的状况标志着一个国家机械电子科学技术的发展水平,因此,发展机电一体化技术是发展我国机械电子科学技术的必由之路,也是振兴我国机械电子工业的主攻方向。目前,发达国家机电一体化技术已经很普及,国内一些工厂、企业、科研院所及大专院校在各领域已经开展机电一体化工作,并取得了一定成绩,但开展力度不大,不普遍。

为了促进我国机电一体化技术的发展,国防工业出版社特组织专家、教授和工程技术人员编写出版这套《机电一体化设计系列丛书》包括:

- 《机构选型与运动设计》
- 《机械零部件选用与设计》
- 《机械优化设计》
- 《机械可靠性工程》
- 《转子现场动平衡技术》
- 《机电传动控制技术》
- 《伺服技术》
- 《传感器检测技术》
- 《精密机械元器件与电子元器件》
- 《机电一体化实例应用集锦》

编写这套丛书时,着重突出以下特点:

(1) 系统性。这套丛书涉及的内容基本覆盖机电一体化技术的相关学科,便于读者系统、深入地学习和应用机电一体化技术。

(2) 实用性。这套丛书从实用出发,本着“必需、够用、实际”的原则精选内容,在简要论述原理、方法、结构、标准的基础上,列举了大量的理论联系实际的例题,有较强的设计示范作用。

(3) 针对性。这套丛书主要是为中小工厂、企业从事机电一体化技术的人员学习和应用编写的,读者在机电一体化技术相关学科都有一定的理论基础和实践经验。因此,策划丛书书目时,基本是按一门学科或一个子系统一本书的原则划分的,丛书内容专、篇幅小,便于读者根据需要选购。

(4) 适用性。这套丛书还可以作为大专院校和职业学校学习机电一体化技术的参考书或教材。因此,这套丛书对促进机电一体化技术的发展具有普及性和适用性。

希望读者喜爱这套丛书,并提出宝贵意见。

杨黎明

2006年9月

# 前 言

伺服系统是自动控制系统的一个分支,其应用几乎遍及社会各个领域,尤其是在机械制造行业,伺服系统应用得最多、最广泛。其中伺服系统的性能是决定数控机床加工精度和生产效率的主要因素之一。

伺服控制技术是集微控电机、传感器与测控、自动化、机械工程、电子学和电力电子技术为一体的综合技术。随着现代科学技术的发展,特别是微电子技术、计算机技术的飞速发展,对伺服控制提出了更高、更新的要求。本书遵循简明、实用、新颖的编写原则,力求理论联系实际,简要论述了伺服控制技术的基础理论,对典型的电气和液压伺服系统的工作原理、结构、特性等方面作了系统阐述,通过实例对 DSP 在交流调速系统中的应用作了概要介绍,并阐述了数控机床和液压伺服系统的设计方法。

本书可作为中、小工厂和企业从事机电一体化工作的工程技术人员的参考书,也适合作为大专院校、高职、业大相关专业学生的参考教材。

全书共分 2 篇 17 章,由厉虹任主编,其中第 1 篇第 1 章到第 8 章由厉虹编写,第 9 章由艾红编写,第 10 章由杨黎明编写;第 2 篇第 11 章到第 17 章由杨黎明编写。

本书在编写过程中查阅了大量文献和资料,在此对有关作者表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限,书中一定会有不足、欠妥和错误之处,敬请读者不吝赐教。

编 者

2008 年 2 月

附 录

2008 年 2 月

# 目 录

## 第 1 篇 电气伺服系统

### 第 1 章 伺服系统概述/1

#### 1.1 伺服系统的概念及分类/1

##### 1.1.1 伺服系统的概念/1

##### 1.1.2 伺服系统的分类/2

#### 1.2 伺服系统的组成及特点/4

##### 1.2.1 伺服系统的组成/4

##### 1.2.2 伺服系统的主要特点/5

#### 1.3 伺服系统的基本要求/5

### 第 2 章 位置和速度传感器/7

#### 2.1 概述/7

##### 2.1.1 传感器的作用和定义 /7

##### 2.1.2 传感器的组成/7

##### 2.1.3 传感器的分类 /8

#### 2.2 旋转变压器/8

##### 2.2.1 旋转变压器的基本类型/8

##### 2.2.2 旋转变压器的基本工作原理/9

##### 2.2.3 旋转变压器的基本参数和性能指标 /12

#### 2.3 感应同步器/13

##### 2.3.1 感应同步器的基本类型和特点/13

##### 2.3.2 感应同步器的工作原理/14

##### 2.3.3 感应同步器的工作方式/15

##### 2.3.4 感应同步器鉴相系统 /16

##### 2.3.5 感应同步器鉴幅系统/17

##### 2.3.6 感应同步器的电气参数

##### 和技术参数/17

#### 2.4 光电编码器/18

##### 2.4.1 增量式光电编码器/19

##### 2.4.2 绝对式光电编码器/21

##### 2.4.3 多转绝对式光电编

##### 码器/22

##### 2.4.4 混合式光电编码器/23

##### 2.4.5 数字测速方法 /24

#### 2.5 光栅/27

##### 2.5.1 光栅的分类/27

##### 2.5.2 直线式透射光栅/28

##### 2.5.3 莫尔条纹式光栅/29

##### 2.5.4 光栅检测装置/30

#### 2.6 速度传感器/32

##### 2.6.1 测速发电机的工作原理、类型和特点/32

##### 2.6.2 桥式速度传感器和测速电路/34

##### 2.6.3 数字式速度传感器/35

##### 2.6.4 速度传感器的功能、特性/35

### 第 3 章 步进伺服系统/38

#### 3.1 步进电动机的工作原理/38

##### 3.1.1 步进电动机的基本结构及工作原理/39

##### 3.1.2 步进电动机的分类及型号命名/40

##### 3.1.3 步进电动机的主要特性/41

##### 3.1.4 步进电动机的主要技术参数/43

#### 3.2 步进电动机驱动与控制系统/47

##### 3.2.1 步进电动机驱动电路的组成/47

##### 3.2.2 步进电动机典型驱动方式/47

##### 3.2.3 步进电动机驱动/控制集成电路/51

#### 3.3 步进电动机计算机控制系统/59

3.3.1	步进电动机的开环控制/59
3.3.2	专用大规模集成电路与计算机组合控制系统/64
<b>第4章</b>	<b>无刷直流电动机控制系统/69</b>
4.1	无刷直流电动机原理/69
4.1.1	无刷直流电动机的基本结构及工作原理/69
4.1.2	无刷直流电动机的基本方程式/74
4.1.3	无刷直流电动机的运行特性/76
4.2	无刷直流电动机驱动控制/77
4.2.1	开环型无刷直流电动机驱动器/78
4.2.2	速度闭环型无刷直流电动机驱动器/79
4.2.3	速度电流双闭环型无刷直流电动机控制系统/79
4.2.4	单片机控制的无刷直流电动机控制系统/80
4.2.5	无位置传感器控制系统/80
4.3	无刷直流电动机驱动控制专用芯片/81
<b>第5章</b>	<b>交流伺服系统/84</b>
5.1	交流伺服电动机/84
5.1.1	分类及产品名称代号/84
5.1.2	结构与特点/85
5.1.3	基本工作原理/85
5.1.4	控制方式/86
5.1.5	性能特点与运行特点/87
5.1.6	绕组参数和工艺缺陷对性能的影响/90
5.1.7	交流伺服电动机的应用及选择/90
5.1.8	交流伺服电动机的主要技术参数/92
5.2	数控机床中的主轴驱动系统/94
5.2.1	数控机床对主轴驱动和主轴电动机的要求/94

5.2.2	直流主轴驱动系统/96
5.2.3	交流主轴驱动系统/99
5.2.4	主轴定向控制/104
<b>第6章</b>	<b>直流伺服系统/106</b>
6.1	直流伺服电动机/106
6.1.1	分类及产品名称代号/106
6.1.2	结构与特点/107
6.1.3	工作原理/108
6.1.4	主要特性/109
6.1.5	交直流伺服电动机的比较/110
6.1.6	应用与选择/111
6.1.7	部分直流伺服电动机的主要技术数据/113
6.2	直流伺服电动机控制技术/116
6.2.1	直流伺服电动机的数学模型/116
6.2.2	直流伺服电动机开环驱动的稳态和动态特性/117
6.2.3	直流伺服电动机速度闭环控制的动态特性/118
6.2.4	直流伺服电动机速度控制/119
6.3	PWM 直流伺服控制系统/121
6.3.1	PWM 直流伺服驱动装置的工作原理和特点/122
6.3.2	PWM 直流伺服驱动系统典型实例/125
6.4	单片机控制直流伺服电动机/127
6.4.1	单片机与 PWM 功率器的接口/128
6.4.2	直流伺服系统中的反馈电路及接口/129
6.4.3	单片机控制直流伺服电动机实例/132
<b>第7章</b>	<b>三相交流永磁同步电动机伺服系统/133</b>
7.1	交流永磁同步伺服系统原理/133
7.1.1	永磁同步伺服电动机结构/133
7.1.2	永磁同步伺服电动机

- 工作原理/133
- 7.1.3 永磁同步伺服电动机的启动/134
  - 7.1.4 交流永磁同步伺服系统的组成/135
  - 7.1.5 交流永磁同步伺服电动机的主要参数/135
  - 7.1.6 交流永磁同步伺服系统工作原理/136
- 7.2 交流永磁同步伺服系统的控制实现/136
  - 7.2.1 转子磁极位置的检测/137
  - 7.2.2 正弦波产生电路/137
  - 7.2.3 DC→SIN 变换电路/138
  - 7.2.4 位置和速度检测/138
  - 7.2.5 电流检测/140
- 第 8 章 伺服系统控制性能/141**
  - 8.1 伺服控制系统数学模型/141
    - 8.1.1 控制系统的几种典型环节/141
    - 8.1.2 伺服系统的数学模型/142
  - 8.2 伺服控制系统性能分析/146
    - 8.2.1 伺服系统动态性能指标/146
    - 8.2.2 系统的稳定性/148
    - 8.2.3 系统的稳态性能/149
    - 8.2.4 系统动态过程分析/151
  - 8.3 伺服控制系统性能的改善/152
    - 8.3.1 伺服系统的基本控制规律——PID 控制/152
    - 8.3.2 控制系统设计与校正/156
    - 8.3.3 相位超前校正/157
    - 8.3.4 相位滞后校正/160
    - 8.3.5 串联滞后—超前校正/162
    - 8.3.6 反馈校正/164
- 第 9 章 基于 DSP 芯片核心的伺服系统/166**
  - 9.1 TMS320 系列 DSP 概述/166
  - 9.2 DSP 的主要技术指标、基本结构及主要特征/166
    - 9.2.1 主要技术指标/166
    - 9.2.2 基本结构/167
    - 9.2.3 地址总线和数据总线/167
  - 9.3 TMS320F2812 DSP 芯片功能与资源/168
    - 9.3.1 TMS320F2812 特征参数/168
    - 9.3.2 TMS320F2812 引脚功能/170
    - 9.3.3 TMS320F281x 外设/170
    - 9.3.4 外部中断接口/170
    - 9.3.5 定时器结构和工作原理/173
    - 9.3.6 数字 I/O 模块/174
  - 9.4 事件管理器 EV 模块/174
    - 9.4.1 事件管理器概述与结构框图/175
    - 9.4.2 通用定时器/177
    - 9.4.3 比较单元/182
    - 9.4.4 捕获单元与正交编码脉冲电路/187
    - 9.4.5 事件管理器模块的中断/190
  - 9.5 ADC 模块结构和功能/192
    - 9.5.1 自动转换排序器/192
    - 9.5.2 选择序列/194
    - 9.5.3 最大转换通道/194
    - 9.5.4 A/D 转换程序/195
  - 9.6 基于 DSP 的程序结构与集成开发环境 CCS /197
    - 9.6.1 几个基本文件和一个库函数/197
    - 9.6.2 MEMORY 和 SECTIONS 伪指令/197
    - 9.6.3 DSP 集成开发环境 CCS 简介 /200
    - 9.6.4 CCS 的主要功能/200
  - 9.7 基于 TMS320F2812 的交流电动机调速系统/201
    - 9.7.1 基于 TMS320F2812 的交流电动机调速系统组成/201



- 9.7.2 交流电动机调速系统的硬件组成/203
- 9.7.3 电源电路设计/203
- 9.7.4 PWM 功能电路设计/203
- 9.7.5 光电编码器接口电路设计/204
- 9.7.6 继电器输出电路设计/204
- 9.7.7 软件设计/205

## 第 10 章 数控机床伺服系统/206

- 10.1 数控机床的控制方式/206
  - 10.1.1 对数控机床伺服系统的技术要求/206
  - 10.1.2 数控系统的控制方式/207
- 10.2 开环控制系统设计/208
  - 10.2.1 开环控制系统的结构和工作原理/209
  - 10.2.2 开环控制系统的硬件设计/209
  - 10.2.3 提高开环控制系统精度的措施/209
- 10.3 闭环控制系统设计/210
  - 10.3.1 脉冲比较伺服系统的结构和工作原理/210
  - 10.3.2 相位比较伺服系统的结构和工作原理/212
  - 10.3.3 幅值比较伺服系统的结构和工作原理/213
  - 10.3.4 闭环控制系统的硬件设计/214
- 10.4 位置检测元件的选择/215
  - 10.4.1 对检测元件的技术要求/215
  - 10.4.2 位置检测元件的选择/215
- 10.5 放大元件的选择/218
- 10.6 伺服电动机的选择/220
  - 10.6.1 典型负载的分析与

- 计算/220
- 10.6.2 转动惯量计算/221
- 10.6.3 等效转动惯量的测定/226
- 10.6.4 负载的综合特性/227
- 10.6.5 伺服电动机的选择/228
- 10.6.6 齿轮传动总传动比和传动级数的选择及传动比分配原则/230
- 10.6.7 PWM 驱动系统动力学计算/237
- 10.6.8 选择电动机的步骤/239
- 10.6.9 伺服系统设计选择电动机示例/239
- 10.7 伺服系统的机械传动系统设计/246
  - 10.7.1 滚珠丝杠传动/246
  - 10.7.2 伺服刚度/248
  - 10.7.3 伺服刚度和机械刚度的失动量/249
  - 10.7.4 移动部件的导轨面/249
  - 10.7.5 控制装置与机械系统的匹配/250
  - 10.7.6 硬伺服和软伺服/251
  - 10.7.7 伺服系统的重复定位误差/252
- 10.8 消除齿轮传动系统机械间隙的措施/257
- 10.9 提高丝杠及其支承的刚度/259
- 10.10 弹性环连接/262
  - 10.10.1 弹性环连接的工作原理/262
  - 10.10.2 弹性环连接的特点/262
  - 10.10.3 弹性环连接的结构形式/262
  - 10.10.4 弹性环的技术要求/263
  - 10.10.5 弹性环连接的受力分析/263

## 第 2 篇 液压伺服系统

### 第 11 章 概述/264

- 11.1 液压伺服系统的工作原理/264

- 11.2 液压伺服系统的组成/266
- 11.3 液压伺服系统的类型/267

- 11.4 液压伺服系统的特点/267
- 第 12 章 液压泵与液压马达/269**
  - 12.1 液压泵与液压马达的工作原理/269
  - 12.2 液压泵与液压马达的分类/270
  - 12.3 液压泵与液压马达的性能参数/271
  - 12.4 变量泵与变量马达的变量方式/274
  - 12.5 液压泵与液压马达的性能比较和选用原则/274
  - 12.6 液压泵与液压马达的参数计算/277
- 第 13 章 液压缸/280**
  - 13.1 液压缸的分类和工作原理/280
  - 13.2 组合液压缸/284
  - 13.3 液压缸的结构/286
  - 13.4 液压油缸的设计计算/290
- 第 14 章 液压控制元件/293**
  - 14.1 力矩马达和力马达/293
  - 14.2 液压控制阀/294
  - 14.3 伺服阀/299
- 第 15 章 液压驱动机构/305**
  - 15.1 阀控缸驱动机构/306
    - 15.1.1 阀控缸驱动机构的静态特性/306
    - 15.1.2 阀控缸驱动机构的传递函数/308
    - 15.1.3 电液伺服阀控缸驱动机构/312
    - 15.1.4 阀控缸驱动机构的主要性能参数/313
  - 15.2 阀控马达驱动机构/314
    - 15.2.1 阀控马达驱动机构的静态特性/314
    - 15.2.2 阀控马达驱动机构的主要性能参数/315
    - 15.2.3 同时带有惯性负载和弹性负载的情况/317
    - 15.2.4 电液伺服阀控马达驱动机构/318
  - 15.3 泵控马达驱动机构/318
    - 15.3.1 泵控马达驱动机构的工作原理/318
    - 15.3.2 泵控马达驱动机构的静态特性/319
    - 15.3.3 泵控马达驱动机构的动态特性/322
- 第 16 章 液压伺服系统/325**
  - 16.1 位置伺服系统/325
    - 16.1.1 位置伺服系统的组成与工作原理/325
    - 16.1.2 位置伺服系统的动态分析/327
    - 16.1.3 位置伺服系统的校正/334
  - 16.2 位置伺服系统的应用/336
    - 16.2.1 矿热电炉电极升降伺服系统/336
    - 16.2.2 机械手伸缩运动伺服系统/337
  - 16.3 钢带液压张力伺服系统/338
  - 16.4 速度伺服系统/339
  - 16.5 速度伺服系统的应用/340
    - 16.5.1 抛光机的伺服系统/341
    - 16.5.2 车床液压仿形刀架/341
  - 16.6 力和压力伺服系统/342
- 第 17 章 液压伺服系统设计/346**
  - 17.1 设计要求和设计程序/346
  - 17.2 选择执行元件/346
  - 17.3 负载特性和选择伺服阀或变量泵/347
  - 17.4 选择传感器/348
  - 17.5 确定伺服放大器和整个开环的增益/349
  - 17.6 校验系统所达到的精度/350
  - 17.7 液压伺服系统设计实例/350
    - 17.7.1 位置伺服系统设计/350
    - 17.7.2 速度伺服系统设计/356
    - 17.7.3 力伺服系统设计/362
- 参考文献/364**

# 第 1 篇 电气伺服系统

## 第 1 章 伺服系统概述

伺服系统是自动控制系统的一个分支,它是伴随自动控制理论、微电子技术、电力电子技术和计算机技术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,随着控制理论的发展,到 20 世纪中期,伺服系统的理论与实质均趋于成熟,并得到广泛应用。

近几十年来,新技术革命,特别是微电子技术和计算机技术的飞速进步,使伺服技术的发展突飞猛进,其应用几乎遍及各个领域。在军事上,雷达天线的自动瞄准跟踪控制,火炮、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等;冶金行业中,电弧炼钢炉、粉末冶金炉等的电极位置控制,水平压铸机的拉坯运动控制,轧钢机轧辊压下运动的位置控制等。这些人工操作无法实现的控制都是依靠伺服系统来实现。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是由各种伺服系统完成的,伺服控制技术的广泛应用减轻了操作人员的劳动强度,也大大提高了工作效率。在计算机外围设备中,磁盘、光盘驱动系统、绘图仪的画笔控制系统等都少不了伺服系统。在办公自动化设备中,打印机、传真机、复印机等大量应用。另外,工业机器人、塑料机械、印刷机械、纺织机械、工业缝纫机、绣花机、绕线机也都是伺服驱动。此外,随着音响设备、洗衣机、空调、DVD 机等在家庭中的普及,伺服系统也进入千家万户的日常生活中。

在机械制造行业,伺服系统应用得最多、最广泛,各种高性能机床运动部件的速度控制、运动轨迹控制,都是依靠各种伺服系统完成的。20 世纪 50 年代出现的数控机床是由控制介质、数控装置、伺服系统和机床本体等部分组成,其中伺服系统的性能是决定数控机床加工精度和生产效率的主要因素之一。

### 1.1 伺服系统的概念及分类

#### 1.1.1 伺服系统的概念

伺服系统就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,亦称随动系统。要求系统精确地跟踪控制指令、实现理想运动控制的过程一般称为“伺服控制技术”。其中,“伺服”一词来源于英语单词 servo 的音译,几乎所有机械运动都可用伺服的概念来进行解释。例如,人手的拣物动作,其输入是人脑通过神经的思维信息,输出则是肌肉的收缩及骨骼的运动,检测与控制则靠眼睛与神经系统的密切配合。又如,用机床的丝杠—螺母机构推动工作台

在导轨的引导下前进时,人手的力矩使丝杠旋转作为输入,而输出是丝杠的转角,肉眼对安装在丝杠上刻度盘的刻度读数进行检测,控制也依靠人的视觉和神经系统。

随着现代科学技术的飞速发展,伺服控制已经发展成一门综合性、多学科的交叉技术,微电子与计算机技术也渗透到伺服控制系统的各个环节,成为控制技术的核心。根据预定控制方案和面对复杂环境实现各类运动,并使之达到规定的技术性能指标,将计算机的决策、指令变为所期望的机械运动,则是所有现代机电伺服系统必不可少的任务。

### 1.1.2 伺服系统的分类

伺服系统的种类很多,按照构成伺服系统的主要元件的种类、特征,可划分出各种各样的伺服系统。

#### 1. 按执行元件分类

按执行元件分类,有电气伺服系统、液压伺服系统、电液伺服系统、气压伺服系统。其中电气伺服系统按所使用的电动机类型又可分为以下几种。

##### 1) 步进伺服系统

步进伺服系统如图 1-1 所示。步进伺服系统又称开环位置伺服系统,其驱动元件为步进电动机。步进电动机控制系统的结构最简单、控制最容易、维修最方便。控制为全数字化(即数字化的输入指令脉冲对应着数字化的位置输出),符合数字化控制技术的要求。数控系统与步进电动机的驱动控制电路结合为一体。随着计算机技术的发展,除功率驱动电路之外,其他硬件电路均可由软件实现,从而简化了系统结构,降低了成本,提高了系统的可靠性。

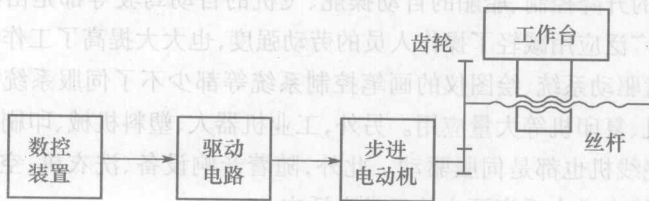


图 1-1 步进伺服系统

##### 2) 直流伺服系统

直流伺服系统常用的伺服电动机有小惯量直流伺服电动机和永磁直流伺服电动机(也称为大惯量宽调速直流伺服电动机)。小惯量伺服电动机最大限度地减少了电枢的转动惯量,所以能获得最好的快速性,在早期的数控机床上应用较多,现在也有应用。小惯量伺服电动机一般都设计成具有较高的额定转速和较低的惯量,所以应用时要经过中间机械传动(如减速器)才能与丝杠相连接。目前,许多数控机床上仍使用这种电动机驱动的直流伺服系统。永磁直流伺服电动机的缺点是有电刷,限制了转速的提高,而且结构复杂、价格较贵。

##### 3) 交流伺服系统

交流伺服系统使用交流异步伺服电动机(一般用于主轴伺服电动机)和永磁同步伺服电动机(一般用于进给伺服电动机)。由于直流伺服电动机存在着有电刷等一些固有缺点,其应用环境受到限制。交流伺服电动机没有这些缺点,且转子惯量较直流电动机小,使其动态响应好。另外,在同样体积下,交流电动机的输出功率可比直流电动机提高 10%~70%。同时交流电动机的容量可以比直流电动机造得大,达到更高的电压和转速。因此,交流伺服系统得到了迅速发展,已经形成伺服系统的主流。从 20 世纪 80 年代后期开始,大量使用交流伺服系统,有些国家

的厂家已全部使用了交流伺服系统。

## 2. 按控制方式分类

### 1) 开环伺服系统

图 1-1 所示为开环系统组成原理图,它主要由数控装置、驱动电路、执行元件和机床部件组成。常用的执行元件是步进电动机,如果是大功率,常用电液脉冲马达作为执行元件。这类系统不带检测装置,没有来自位置传感器的反馈信号,系统信息流是单向的,实际值不再反馈回来,因此称为开环系统,而开环系统存在稳定性问题。

### 2) 半闭环伺服系统

半闭环伺服系统的角位移测量元件一般安装在数控机床的进给丝杠或电动机轴端,用测量丝杠或电动机轴旋转角位移来代替测量工作台直线位移。由于这种系统未将丝杠螺母副、齿轮传动副等传动装置包含在闭环反馈系统中,因而称为半闭环控制系统。这种系统不能补偿位置闭环系统外的传动装置的传动误差,但可以获得稳定的控制特性。半闭环控制系统如图 1-2 所示。

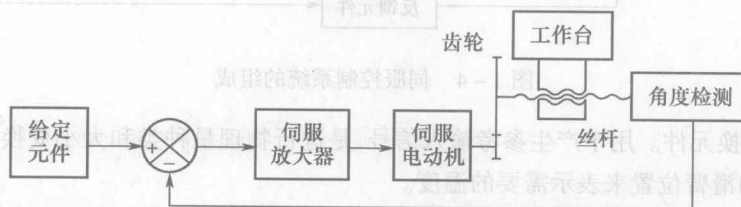


图 1-2 半闭环系统原理图

### 3) 闭环伺服系统

闭环伺服系统带有检测装置,可以直接对工作台的位移量进行检测,如图 1-3 所示。与半闭环相比,其反馈点取自输出量,避免了半闭环系统自反馈信号取出点至输出量间各元件引出的误差。该类系统适用于对精度要求很高的数控机床,如镗铣床、超精车床、超精铣床等。

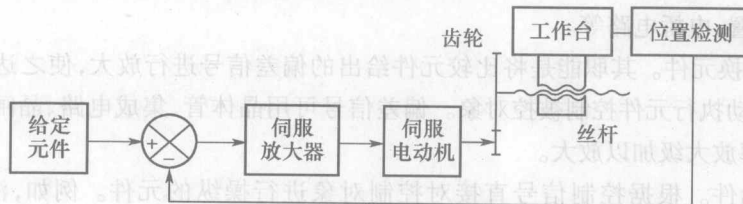


图 1-3 闭环系统原理图

## 3. 按进给驱动和主轴驱动分类

(1) 进给伺服系统包括速度控制环和位置控制环。进给伺服系统完成各坐标轴的进给运动,具有定位和轮廓跟踪功能,是数控机床中要求最高的伺服控制系统。

(2) 主轴伺服系统。机床的主轴驱动和进给驱动有很大的区别。一般来说,主轴驱动是速度控制系统,实现主轴的旋转运动,提供切削过程中的转矩和功率,且保证任意转速的调节,完成在转速范围内的无级变速,无需丝杠或其他直线运动的装置。

此外,数控车床刀库的位置控制是为了在刀库的不同位置选择刀具,与进给坐标轴的位置控制相比,性能要低得多,故称为简易位置伺服系统。

## 1.2 伺服系统的组成及特点

### 1.2.1 伺服系统的组成

伺服系统的基本结构形式可用图 1-4 表示,从图中可以看出,高性能的伺服系统就是一个反馈控制系统。

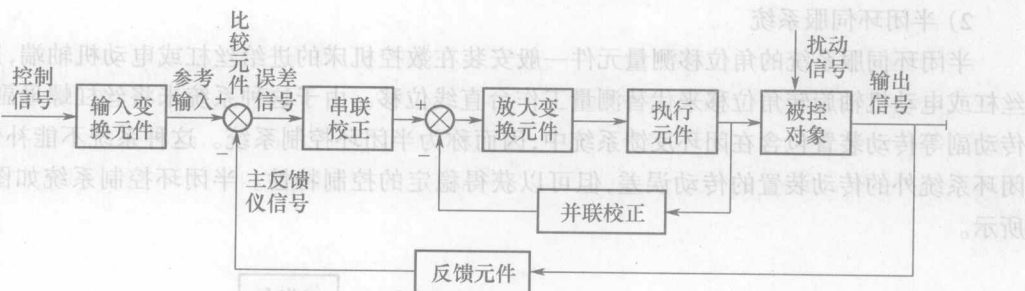


图 1-4 伺服控制系统的组成

(1) 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。

(2) 反馈元件。用来测量被控制量的实际值,主要是测量元件,其职能是检测被控制的物理量,在随动系统中被测量是角度或位移,而在速度控制系统中被测量是转速或角速度。如果被测量是非电量参数,一般必须转换为电量。常见的测量元件有电位计、测速发电机、测速桥、自整角机或旋转变压器。对于要求更高的测量精度,可以用数字测速元件——光电脉冲测速机来测速或用数字式轴角编码器测量角位移。

(3) 比较元件。其职能是把测量元件检测的被控量实际值与给定元件给出的参考量进行比较,求出它们之间的偏差,并产生反映两者差值信号的元件或电路。常用的比较元件有差动放大器、机械差动装置、电桥电路等。

(4) 放大变换元件。其职能是将比较元件给出的偏差信号进行放大,使之达到足够的幅值和功率,用来推动执行元件控制被控对象。偏差信号可用晶体管、集成电路、晶闸管等组成的电压放大级和功率放大级加以放大。

(5) 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。

(6) 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。

(7) 校正元件。为改善系统的控制性能而加入系统的元件。又叫补偿元件,其结构或参数便于调整,用串联或反馈的方式连接在系统中,以改善系统的动态性能,减小或消除系统的稳态误差。最简单的校正元件是由电阻、电容组成的无源或有源网络,复杂的则用计算机。

(8) 输入信号。包括控制信号(也称输入给定信号)和扰动信号。

(9) 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。

(10) 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。

用,负反馈信号抵消输入信号的部分作用。

(11) 误差信号。参考输入与主反馈信号之差。

## 1.2.2 伺服系统的主要特点

(1) 精确的检测装置,以组成速度和位置闭环控制。

(2) 有多种反馈比较原理与方法。根据检测装置实现信息反馈的原理不同,伺服系统反馈比较的方法也不相同。目前常用的有脉冲比较、相位比较和幅值比较三种。

(3) 高性能伺服电动机。用于高效和复杂型面加工的数控机床,由于伺服系统经常处于频繁地启动和制动过程中,因此要求电动机的输出力矩与转动惯量的比值要大,以产生足够大的加速或制动力矩。电动机应具有耐受  $4000\text{rad/s}^2$  以上角加速度的能力,才能保证其在  $0.2\text{s}$  以内从静止启动到额定转速。要求伺服电动机在低速时有足够大的输出力矩且运转平稳,以便在与机械运动部分连接中尽量减少中间环节。

(4) 宽调速范围的速度调节系统。从系统的控制结构看,数控机床的位置闭环系统可以看作是位置调节为外环、速度调节为内环的双闭环自动控制系统,其内部的实际工作过程是把位置控制输入转换成相应的速度给定信号后,再通过调速系统驱动伺服电动机,实现实际位移。数控机床的主轴运动要求调速性能也比较高,因此要求伺服系统为高性能的宽调速。

## 1.3 伺服系统的基本要求

理想情况下,伺服控制系统的被控量和给定值任何时候都应该相等,完全没有误差,而且不受干扰的影响。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、电容的存在和能源功率的限制,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。通常把系统受到外加信号(给定值或干扰)作用后,被控量随时间变化的全过程称为系统的动态过程(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。高质量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控制系统的总体精度。

### 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。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。因此一个控制系统能正常工作,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。

### 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,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。

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。

### 3. 稳态特性

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,它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,则会引启动态性能(过渡过程时间及振荡性)的变化。如何分析和妥善处理这三者之间的矛盾,是伺服控制系统要解决重要问题。



