

运动控制实用技术丛书

# 新型电气伺服控制技术 应用案例精选

黄志坚 赵旭东 编著

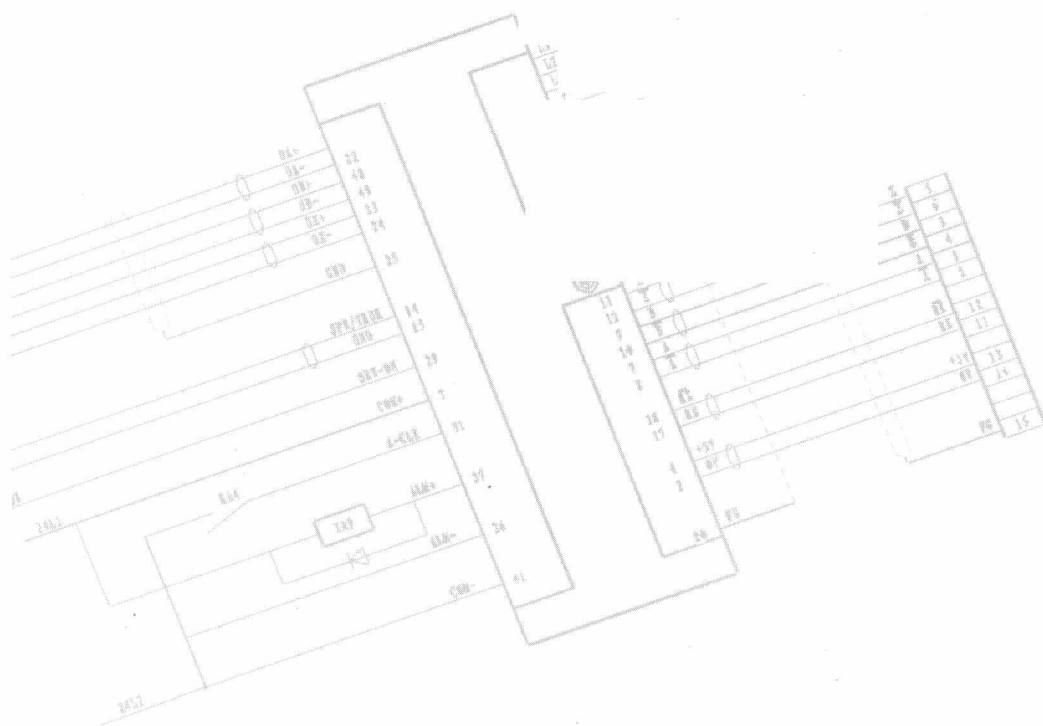


中国电力出版社  
www.cepp.com.cn

运动控制实用技术丛书

# 新型电气伺服控制技术 应用案例精选

黄志坚 赵旭东 编著



中国电力出版社  
www.cepp.com.cn

## 内容提要

本书结合大量典型实例，系统介绍了现代电气伺服控制系统原理，以及其设计计算、选型、试验、使用、安装调试、维护修理、技术改进理论与方法。全书共分4章，第1章是电气伺服控制概述，第2、3、4章分别介绍步进电动机、直流伺服电动机、交流伺服电动机及其控制系统的相关理论及应用。

本书取材新颖，力求简明实用，内容翔实具体，反映了本技术领域国内研究与应用的现状，实例涵盖多个工业门类，对广大读者有直接的参考借鉴作用。

本书可作为工矿企业机电专业工程技术人员的参考书，也可作为大专院校、高职相关专业学生的参考读物。

## 图书在版编目 ( CIP ) 数据

新型电气伺服控制技术应用案例精选 / 黄志坚, 赵旭东  
编著. —北京: 中国电力出版社, 2010.7

(运动控制实用技术丛书)

ISBN 978-7-5123-0417-8

I. ①新… II. ①黄… ②赵… III. ①电气控制系统: 伺服系统 IV. ①TM921.54

中国版本图书馆CIP数据核字 (2010) 第084000号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2010年8月第一版 2010年8月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 13.5印张 321千字

印数 0001—3000册 定价 28.00元

### 敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

# 前言

## PREFACE

伺服系统是自动控制系统的一个分支，伺服系统的性能是决定机构运动精度和生产效率的主要因素之一。电气伺服系统具有精度高、响应速度快、稳定性好、负载能力强和工作频率范围大等基本要求，同时还要求体积小、轻便、可靠性高和成本低等。电气伺服控制是集微控电动机、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。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。

本书结合大量典型实例，系统介绍了现代电气伺服控制系统原理，以及其设计计算、选型、试验、使用、安装调试、维护修理、技术改进理论与方法。全书共分4章，第1章是电气伺服控制概述，第2、3、4章分别介绍步进电动机、直流伺服电动机、交流伺服电动机及其控制系统的相关理论及应用。

本书取材新颖，力求简明实用。本书内容翔实具体，反映了本技术领域国内研究与应用的现状，实例涵盖多个工业门类，对广大读者有直接的参考借鉴作用。

本书由黄志坚与赵旭东编著，其中2.1、3.2、4.3由赵旭东编写，其余由黄志坚编写，何祥华、王海军、王星分别参与了第2、3、4章的资料整理与校对工作。

编者

2010.4

## 目 录

## CONTENTS

## 前言

<b>第 1 章 电气伺服控制概述</b> .....	1
1.1 电气伺服控制系统原理及组成 .....	1
1.2 电气伺服控制技术基本要求和特点 .....	1
1.2.1 电气伺服控制基本要求 .....	1
1.2.2 电气伺服控制执行元件主要性能特点 .....	3
1.3 伺服系统分类 .....	3
1.3.1 按被控量参数特性分类 .....	3
1.3.2 按驱动元件的类型分类 .....	4
1.3.3 按控制原理分类 .....	5
1.3.4 按反馈比较控制方式分类 .....	5
1.4 电气伺服控制技术发展趋势 .....	6
1.4.1 交流化 .....	6
1.4.2 全数字化 .....	6
1.4.3 采用新型电力电子半导体器件 .....	6
1.4.4 高度集成化 .....	6
1.4.5 智能化 .....	7
1.4.6 模块化和网络化 .....	7
1.5 本书基本框架与特点 .....	7
<b>第 2 章 步进电动机伺服控制技术及应用</b> .....	8
2.1 步进电动机概述 .....	8
2.1.1 步进电动机的分类 .....	8
2.1.2 步进电动机的工作原理 .....	9
2.1.3 步进电动机的运行特性 .....	11
2.2 步进电动机驱动技术及应用 .....	12
2.2.1 步进电动机驱动技术概述 .....	12
2.2.2 二相混合式步进电动机驱动器 .....	14
2.2.3 5相混合式步进电动机驱动器 .....	17
2.2.4 新型反应式步进电动机驱动器 .....	21
2.2.5 步进电动机可变细分驱动控制器 .....	27
2.3 步进电动机控制技术及应用 .....	33
2.3.1 步进电动机控制技术概述 .....	33
2.3.2 步进电动机加减速控制器 .....	34
2.3.3 数控步进电动机的正反转控制 .....	37
2.3.4 三相混合式步进电动机 SPWM 控制技术 .....	39

2.3.5	基于虚拟仪器的计算机控制步进电动机系统 .....	42
2.3.6	基于 DSP 的烟仓驱动步进电动机运动控制系统 .....	44
2.3.7	基于单片机的步进电动机控制系统 .....	47
2.3.8	基于 PLC 和触摸屏的步进电动机控制系统 .....	50
2.3.9	基于 CAN 总线的步进电动机控制系统 .....	54
2.3.10	基于 ARM7 的步进电动机升降速曲线控制系统 .....	58
2.4	步进电动机及伺服系统设计与计算 .....	63
2.4.1	步进电动机的选型与计算概述 .....	63
2.4.2	步进电动机主要技术参数 .....	68
2.4.3	升降台铣床数控改造设计及步进电动机的选择计算 .....	71
2.4.4	数控机床中步进电动机的选用 .....	74
2.5	步进电动机及控制系统的使用与维修 .....	76
2.5.1	步进电动机的故障分析 .....	76
2.5.2	CAK6150 数控车床驱动板的维修 .....	78
2.5.3	电火花线切割机步进电动机失步等故障的检修 .....	81
<b>第 3 章</b>	<b>直流伺服控制技术及应用 .....</b>	<b>85</b>
3.1	直流伺服电动机概述 .....	85
3.1.1	直流伺服电动机的特点 .....	85
3.1.2	直流伺服电动机的工作原理 .....	85
3.2	直流伺服电动机的驱动与控制 .....	88
3.2.1	直流伺服电动机驱动概述 .....	88
3.2.2	直流伺服电动机控制及其特性 .....	90
3.2.3	PWM 在直流伺服系统中的应用 .....	92
3.2.4	TMS320C2812 在直流伺服控制中的应用 .....	97
3.3	直流伺服电动机及系统的设计与应用 .....	99
3.3.1	直流伺服电动机应用与选择概述 .....	99
3.3.2	部分直流伺服电动机的主要技术数据 .....	101
3.3.3	SG1731D 在机床直流伺服随动系统中的应用 .....	104
3.3.4	基于 CAN 总线的小型飞行器伺服系统 .....	107
3.3.5	基于 PC+PCI 的直流伺服系统测试平台 .....	110
3.3.6	基于 DSP 的雕刻机用直流伺服控制器 .....	113
3.3.7	低成本直流伺服电动机调速系统 .....	116
3.4	直流伺服电动机及系统的使用与维修 .....	119
3.4.1	电动机发热故障分析及解决 .....	119
3.4.2	伺服系统中检测器件常见故障与维修 .....	121
<b>第 4 章</b>	<b>交流伺服控制技术及应用 .....</b>	<b>124</b>
4.1	交流伺服控制技术概述 .....	124
4.1.1	交流伺服电动机的发展 .....	124
4.1.2	同步电动机与异步电动机 .....	125

4.1.3	模拟式交流伺服系统与数字式交流伺服系统 .....	126
4.2	交流伺服电动机的驱动与控制技术 .....	128
4.2.1	交流伺服电动机驱动与控制概述 .....	128
4.2.2	基于 IRMCK201 芯片的新型交流伺服控制系统 .....	131
4.2.3	基于 PCI 总线的全闭环交流伺服控制系统 .....	135
4.2.4	大功率 PMSM 伺服系统 .....	138
4.2.5	基于 DSP 的全数字交流伺服驱动器 .....	142
4.2.6	基于 DSP 的交流伺服系统与 CAN 总线的通信 .....	147
4.2.7	基于 PLC 伺服驱动的位置控制系统 .....	150
4.2.8	触摸屏与 PLC 组成的伺服电动机控制系统 .....	153
4.2.9	基于 DeviceNet 协议的 CAN 总线交流伺服系统接口 .....	156
4.2.10	基于 PROFIBUS-DP 总线的交流伺服系统与变频系统 .....	160
4.3	交流伺服控制系统的设计与计算 .....	165
4.3.1	交流伺服电动机的设计计算及选择概述 .....	166
4.3.2	交流伺服电动机的主要技术参数 .....	167
4.3.3	旧机床数控化改造进给系统的设计及计算 .....	169
4.3.4	TH6363 卧式加工中心伺服进给系统设计与分析 .....	173
4.3.5	数控冲床送料机构交流伺服电动机设计与分析 .....	176
4.4	交流伺服控制应用典型实例 .....	179
4.4.1	用 PLC 伺服装置改造插齿机床控制系统 .....	179
4.4.2	FANUC 系统扭矩控制功能在数控曲轴磨床中的应用 .....	183
4.4.3	基于 PLC 控制的高精度交流伺服定剪系统 .....	186
4.4.4	地面雷达全数字模块化伺服系统 .....	189
4.4.5	织机电子送经与卷取伺服驱动技术系统 .....	194
4.5	交流伺服电动机及系统的使用与维修 .....	199
4.5.1	FANUC $\alpha$ i 系列主轴伺服驱动系统故障诊断与维修 .....	199
4.5.2	数控机床交流伺服系统参数不匹配故障及消除方法 .....	201
<b>参考文献</b> .....		204

## 第 1 章

## 电气伺服控制概述

## 1.1 电气伺服控制系统原理及组成

电气伺服控制系统是一种能够跟踪输入的指令信号进行动作,从而获得精确的位置、速度及动力输出的自动控制系统。如防空雷达控制就是一个典型的伺服控制过程,它是以空中的目标为输入指令要求,雷达天线要一直跟踪目标,为地面炮台提供目标方位;加工中心的机械制造过程也是伺服控制过程,位移传感器不断地将刀具进给的位移传送给计算机,通过与加工位置目标比较,计算机输出继续加工或停止加工的控制信号。绝大部分机电一体化系统都具有伺服功能,系统中的伺服控制是为执行机构按设计要求实现运动而提供控制和动力的重要环节。

伺服控制系统的结构、类型繁多,但从自动控制理论的角度来分析,伺服控制系统一般包括控制器、被控对象、执行环节、检测环节、比较环节五部分。如图 1-1 给出了伺服系统的组成原理框图。

(1) 比较环节,是将输入的指令信号与系统的反馈信号进行比较,以获得输出与输入间的偏差信号的环节,通常由专门的电路或计算机来实现。

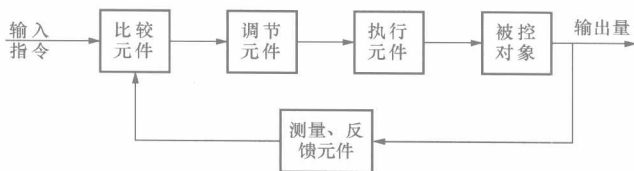


图 1-1 伺服系统组成原理框图

(2) 控制器,通常是计算机或

PID 控制电路,主要任务是对比较元件输出的偏差信号进行变换处理,以控制执行元件按要求动作。

(3) 执行元件,作用是按控制信号的要求,将输入的各种形式的能量转化成机械能,驱动被控对象工作。电气伺服系统中的执行元件一般指各种电动机。

(4) 被控对象,是指被控制的机构或装置,是直接完成系统目的的主体。一般包括传动系统、执行装置和负载。

(5) 检测环节,是指能够对输出进行测量,并转换成比较环节所需要的量纲的装置。一般包括传感器和转换电路。

在实际的伺服控制系统中,上述的每个环节在硬件特征上并不独立,可能几个环节在一个硬件中,如测速直流电动机既是执行元件又是检测元件。

## 1.2 电气伺服控制技术基本要求和特点

## 1.2.1 电气伺服控制基本要求

电气伺服系统具有精度高、响应速度快、稳定性好、负载能力强和工作频率范围大等基本要求,同时还要求体积小、轻便、可靠性高和成本低等。

### 1.2.1.1 高精度

伺服系统精度指的是输出量复现输入信号要求的精确程度，以误差的形式表现，即动态误差、稳态误差和静态误差。稳定的伺服系统对输入变化是以一种振荡衰减的形式反映出来的，振荡的幅度和过程产生了系统的动态误差；当系统振荡衰减到一定程度以后，就称其为稳态，此时的系统误差就是稳态误差；由设备自身零件精度和装配精度所决定的误差通常为静态误差。

由于执行机构的运动是由伺服电动机直接驱动的，为了保证移动部件的定位精度和零件轮廓的加工精度，要求伺服系统应具有足够高的定位精度和联动坐标的协调一致精度。一般的数控机床要求的定位精度为 $0.01\sim 0.001\text{mm}$ ，高档设备的定位精度要求达到 $0.1\ \mu\text{m}$ 以上。在速度控制中，要求高的调速精度和比较强的抗负载扰动能力，即伺服系统应具有比较好的动、静态精度。

### 1.2.1.2 良好的稳定性

伺服系统的稳定性是指当作用在系统上的干扰消失以后，系统能够恢复到原来稳定状态的能力；或者当给系统一个新的输入指令后，系统达到新的稳定运行状态的能力。如果系统能够进入稳定状态，且过程时间短，则系统稳定性好；否则，若系统振荡越来越强烈，或系统进入等幅振荡状态，则属于不稳定系统。

伺服系统通常要求较高的稳定性。以数控机床为例，稳定性直接影响数控加工的精度和表面粗糙度，为了保证切削加工的稳定均匀，数控机床的伺服系统应具有良好的抗干扰能力，以保证进给速度的均匀、平稳。

### 1.2.1.3 动态响应速度快

响应特性指的是输出量跟随输入指令变化的反应速度，决定了系统的工作效率。响应速度与许多因素有关，如计算机的运行速度、运动系统的阻尼、质量等。动态响应速度是伺服系统动态品质的重要指标，它反映了系统的跟踪精度。目前数控机床的插补时间一般在 $20\text{ms}$ 以下，在如此短的时间内伺服系统要快速跟踪指令信号，要求伺服电动机能够迅速加速、减速，以实现执行部件的加减速控制，并且要求很小的超调量。

### 1.2.1.4 调速范围要宽，低速时能输出大转矩

调速范围 $R_N$ 是指机器要求电动机能够提供的最高转速 $n_{\max}$ 和最低转速 $n_{\min}$ 之比，即

$$R_N = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \quad (1-1)$$

其中 $n_{\max}$ 和 $n_{\min}$ 一般是指额定负载时的电动机最高转速和最低转速，对于小负载的机械也可以是实际负载时最高转速和最低转速。例如，数控机床进给伺服系统的调速范围 $R_N$ 为 $1:24\ 000$ 就足够了，代表当前先进水平的速度控制单元的技术已可达到 $1:100\ 000$ 的调速范围；同时要求速度均匀、稳定、无爬行，且速降要小。在平均速度很低的情况下（ $1\text{mm}/\text{min}$ 以下）要求有一定瞬时速度。零速度时要求伺服电动机处于锁紧状态，以维持定位精度。

上述的四项特性是相互关联的，是系统动态特性的表现特征。利用自动控制理论来研究、分析所设计系统的频率特性，就可以确定系统的各项动态指标。系统设计时，在满足系统工作要求（包括工作频率）的前提下，首先要保证系统的稳定性和精度，并尽量提高系统的响应速度。

### 1.2.2 电气伺服控制执行元件主要性能特点

伺服系统要求执行元件具有转动惯量小、输出动力大、便于控制、可靠性高和安装维护简便等特点。对控制用电动机性能除要求稳速运转之外,还要求加速、减速性能和伺服性能,以及频繁使用时的适应性和便于维护性,具体是:

(1) 电动机从最低速到最高速的调速范围内能够平滑运转,转矩波动要小,尤其是在低速时要无爬行现象。

(2) 电动机应具有大的、长时间的过载能力,一般要求数分钟内过载4~6倍而不烧毁。

(3) 为了满足快速响应的要求,即随着控制信号的变化,电动机应能在较短的时间内达到规定的速度。

(4) 电动机应能承受频繁启动、制动和反转的要求。

## 1.3 伺服系统分类

伺服系统的分类方法很多,常见的分类方法有以下几种。

### 1.3.1 按被控量参数特性分类

按被控量不同,系统可分为位置、速度、力矩等各种伺服系统。其他系统还有温度、湿度、磁场、光等各种参数的伺服系统。

位置控制系统与速度控制系统的主要技术指标如下:

#### 1.3.1.1 位置控制系统的主要技术指标

(1) 系统静态误差。系统输入为常值时,输入与输出之间的误差,称为系统静态误差。位置控制系统一般要求是无静差系统。但由于测量元件的分辨率有限等实际因素均会造成系统静态误差。

(2) 速度误差 $e_v$ 和正弦跟踪误差 $e_{\sin}$ 。当位置控制系统处于等速跟踪状态时,系统输出轴与输入轴之间瞬时的位置误差(角度或角位移)称为速度误差 $e_v$ ;当系统正弦摆动跟踪时,输出轴与输入轴之间瞬时误差的振幅值称为正弦跟踪误差 $e_{\sin}$ 。

(3) 速度品质因数 $K_v$ 和加速度品质因数 $K_a$ 。速度品质因数 $K_v$ 指输入斜坡信号时,系统稳态输出角速度 $\omega_0$ 或线速度 $v_0$ 与速度误差 $e_v$ 的比值;加速度品质因数 $K_a$ 指输入等加速度信号时,系统输出稳态角加速度 $\epsilon$ 或线加速度 $a$ 与对应的系统误差 $e_a$ 之比。

(4) 速度指标。如最大跟踪角速度 $\omega_{\max}$ 或线速度 $v_{\max}$ 、最低平滑角速度 $\omega_{\min}$ 或线速度 $v_{\min}$ 、最大角加速度 $\epsilon_{\max}$ 或线加速度 $a_{\max}$ 。

(5) 振幅指标 $M$ 和频带宽度 $\omega_b$ 。位置控制系统闭环幅频特性 $A(\omega)$ 的最大值 $A(\omega_p)$ 与 $A(0)$ 的比值称为振幅指标 $M$ ;当闭环幅频特性 $A(\omega_b) = 0.707$ 时所对应的角频率 $\omega_b$ 称为系统的带宽。

(6) 系统对阶跃信号输入的响应特性。当系统处于静止协调状态(零初始状态)下,突加阶跃信号时,系统最大允许超调量 $\sigma\%$ 、过渡过程时间 $t_s$ 和振荡次数 $N$ 。

(7) 时间指标。等速跟踪状态下,负载扰动(阶跃或脉动扰动)所造成的瞬时误差和过渡过程时间。

(8) 可靠性指标。对系统工作制(长期运行、间歇循环运行或短时运行)、平均无故障工作时间MTBF、可靠性以及使用寿命的要求。

### 1.3.1.2 速度控制系统的主要技术要求

(1) 最高运行速度。如最高转速  $n_{\max}$ 、最高角速度  $\omega_{\max}$  或最高线速度  $v_{\max}$ 。

(2) 最低平滑速度。通常用最低转速  $n_{\min}$ 、最低角速度  $\omega_{\min}$  或最低线速度  $v_{\min}$  表示，也可用调速范围  $R_N$  表示。

(3) 速度调节的连续性和平滑性要求。在调速范围内是有级变速还是无级变速，是可逆还是不可逆。

(4) 静差率  $s$  或转速降  $\Delta n$  (或  $\Delta\omega$ 、 $\Delta v$ )。转速降  $\Delta n$  指控制信号一定的情况下，系统理想空载转速  $n_0$  与满载时转速  $n_e$  之差；静差率  $s$  则是控制信号一定的情况下，转速降与理想空载转速的百分比。

调速范围和静差率两项指标并不是彼此孤立的，只有对两者同时提出要求才有意义。一个系统的调速范围是指在最低速时还能满足静差率要求的转速可调范围。离开了静差率要求，任何调速系统都可以做到很高的调速范围；反之，脱离了调速范围，要满足给定的静差率也很容易。调速范围与静差率有如下关系

$$R_N = \frac{n_0 s}{\Delta n (1 - s)} \quad (1-2)$$

(5) 对阶跃信号输入下系统的响应特性。当系统处于稳态时，把阶跃信号作用下的最大超调量  $\sigma\%$  和响应时间  $t_s$  作为技术指标。

(6) 负载扰动下的系统响应特性。负载扰动对系统动态过程的影响是调速系统的重要技术指标之一。转速降和静差率只能反映系统的稳态特性，衡量抗扰动能力一般取最大转速降 (升)  $\Delta n_{\max}$  和响应时间  $t_{st}$  来度量。

(7) 可靠性指标。对系统工作制 (长期运行、间歇循环运行或短时运行)、平均无故障工作时间 MTBF、可靠性以及使用寿命的要求。

### 1.3.2 按驱动元件的类型分类

电气伺服系统全部采用电子元件和电动机部件，操作方便，可靠性高。

电气伺服系统根据电动机类型的不同可分为直流伺服系统、交流伺服系统和步进电动机控制伺服系统。

步进电动机伺服系统主要应用于开环位置控制中，该系统由环形分配器、步进电动机、驱动电源等部分组成。这种系统简单容易控制，维修方便且控制为全数字化，比较适应当前计算机技术发展的趋势。

直流伺服电动机在电枢控制时具有良好的机械特性和调节特性。机电时间常数小，启动电压低。其缺点是由于有电刷和换向器，造成的摩擦转矩比较大，有火花干扰及维护不便。

直流伺服电动机具有良好的调速性能，因此长期以来，在要求调速性能较高的场合，直流电动机调速系统一直占据主导地位。但由于电刷和换向器易磨损，需要经常维护；并且有时换向器换向时产生火花，电动机的最高速度受到限制；且直流伺服电动机结构复杂、制造困难，所用铜铁材料消耗大、成本高，因此在使用上受到一定的限制。

交流伺服电动机无电刷，结构简单，转子的转动惯量较直流电动机小，使得动态响应好，且输出功率较大 (较直流电动机提高 10%~70%)，因此在有些场合，交流伺服电动机已经取代了直流伺服电动机。交流伺服电动机分为交流永磁式伺服电动机和交流感应式伺服电动机。交流永磁式电动机相当于交流同步电动机，具有硬的机械特性及较宽的调速范围，常用于进给系统；感应式相当于交流感应异步电动机，它与同容量的直流电动机相比，重量



信号，与指令信号进行比较获得位置偏差信号构成闭环控制。

上述三种伺服系统中，相位比较伺服系统和幅值比较伺服系统的结构与安装都比较复杂，因此一般情况下选用脉冲、数字比较伺服系统，同时相位比较伺服系统较幅值比较伺服系统应用更广泛一些。

#### 1.3.4.4 全数字伺服系统

随着微电子技术、计算机技术和伺服控制技术的发展，伺服系统已开始采用高速、高精度的全数字伺服系统，使伺服控制技术从模拟方式、混合方式走向全数字方式。由位置、速度和电流构成的三环反馈全部数字化、软件处理数字 PID，柔性好，使用灵活。全数字控制使伺服系统的控制精度和控制品质大大提高。

## 1.4 电气伺服控制技术的发展趋势

伺服系统的发展趋势可以概括为以下几个方面：

### 1.4.1 交流化

伺服技术将继续迅速地由 DC 伺服系统转向 AC 伺服系统。从目前国际市场的情况看，几乎所有的新产品都是 AC 伺服系统。在工业发达国家，AC 伺服电动机的市场占有率已经超过 80%。在国内生产 AC 伺服电动机的厂家也越来越多，正在逐步地超过生产 DC 伺服电动机的厂家。可以预见，在不远的将来，除了在某些微型电动机领域之外，AC 伺服电动机将完全取代 DC 伺服电动机。

### 1.4.2 全数字化

采用新型高速微处理器和专用数字信号处理机（DSP）的伺服控制单元将全面代替以模拟电子器件为主的伺服控制单元，从而实现完全数字化的伺服系统。全数字化的实现，将原有的硬件伺服控制变成了软件伺服控制，从而使在伺服系统中应用现代控制理论的先进算法（如最优控制、人工智能、模糊控制、神经网络等）成为可能。

### 1.4.3 采用新型电力电子半导体器件

目前，伺服控制系统的输出器件越来越多地采用开关频率很高的新型功率半导体器件，主要有大功率晶体管（GTR）、功率场效应管（MOSFET）和绝缘门极晶体管（IGBT）等。这些先进器件的应用显著地降低了伺服单元输出回路的功耗，提高了系统的响应速度，降低了运行噪声。尤其值得一提的是，最新型的伺服控制系统已经开始使用一种把控制电路功能和大功率电子开关器件集成在一起的新型模块，称为智能控制功率模块（Intelligent Power Modules, IPM）。这种器件将输入隔离、能耗制动、过温、过压、过流保护及故障诊断等功能全部集成于一个不大的模块之中。其输入逻辑电平与 TTL 信号完全兼容，与微处理器的输出可以直接接口。它的应用显著地简化了伺服单元的设计，并实现了伺服系统的小型化和微型化。

### 1.4.4 高度集成化

新的伺服系统产品改变了将伺服系统划分为速度伺服单元与位置伺服单元两个模块的做法，代之以单一的、高度集成化、多功能的控制单元。同一个控制单元，只要通过软件设置系统参数，就可以改变其性能，既可以使用电动机本身配置的传感器构成半闭环调节系统，又可以通过接口与外部的的位置、速度或力矩传感器构成高精度的全闭环调节系统。高度的集

成化还显著地缩小了整个控制系统的体积,使伺服系统的安装与调试工作都得到了简化。

#### 1.4.5 智能化

智能化是当前一切工业控制设备的流行趋势,伺服驱动系统作为一种高级的工业控制装置当然也不例外。最新数字化的伺服控制单元通常都设计为智能型产品,它们的智能化特点表现在以下几个方面:首先它们都具有参数记忆功能,系统的所有运行参数都可以通过人机对话的方式由软件来设置,保存在伺服单元内部,通过通信接口,这些参数甚至可以在运行途中由上位计算机加以修改,应用起来十分方便;其次它们都具有故障自诊断与分析功能,无论什么时候,只要系统出现故障,就会将故障的类型以及可能引起故障的原因通过用户界面清楚地显示出来,这就简化了维修与调试的复杂性;除以上特点之外,有的伺服系统还具有参数自整定的功能。众所周知,闭环调节系统的参数整定是保证系统性能指标的重要环节,也是需要耗费较多时间与精力的工作。带有自整定功能的伺服单元可以通过几次试运行,自动将系统的参数整定出来,并自动实现其最优化。对于使用伺服单元的用户来说,这是新型伺服系统最具吸引力的特点之一。

#### 1.4.6 模块化和网络化

在国外,以工业局域网技术为基础的工厂自动化(Factory Automation, FA)工程技术在最近10年来得到了长足的发展,并显示出良好的发展势头。为适应这一发展趋势,最新的伺服系统都配置了标准的串行通信接口(如RS-232C或RS-422接口等)和专用的局域网接口。这些接口的设置,显著地增强了伺服单元与其他控制设备间的互联能力,从而与CNC系统间的连接也由此变得十分简单,只需要一根电缆或光缆,就可以将数台甚至数十台伺服单元与上位计算机连接成为整个数控系统;也可以通过串行接口,与可编程控制器(PLC)的数控模块相连。

### 1.5 本书基本框架与特点

本书分三章介绍步进电动机、直流伺服电动机、交流伺服电动机及其控制系统的相关理论与应用方法,侧重于介绍电气控制系统在不同环境和领域中的具体应用,力求反映电气控制技术最新应用成果与学科交叉情况是本书编著的指导思想。

在每一章里,首先介绍伺服电动机本身的技术内容,及电动机的驱动与控制,然后是电动机及系统的设计、计算与选型方法,同时也介绍电动机系统的典型应用;最后介绍电动机及系统的使用维修方法。

在每一节里,第一小节是基本理论与方法的介绍,后续的是相关实例,实例部分各小节是主题内容的具体应用,但实例相互之间联系并不紧密,并非前后相继的关系。

初级与入门阶段的读者可通过阅读每个章节的前部分,掌握本技术领域的基本理论与方法。在此基础上,读者可根据具体情况选读后续的内容,并从这些实例中获得有参考价值的信息和方法。

# 步进电动机伺服控制技术的应用

## 2.1 步进电动机概述

步进电动机是一种把开关激励的变化变换成精确的转子位置增量运动的执行机构，它将电脉冲转化为角位移。当步进驱动器接收到一个脉冲信号时，它就驱动步进电动机按设定的方向转动一个固定的角度（即步距角）。可以通过控制脉冲个数来控制角位移量，从而达到准确定位的目的。同时可以通过控制脉冲频率来控制电动机转动的速度和加速度，从而达到调速的目的。步进电动机转矩大、惯性小、响应频率高，因此具有瞬间起动与急速停止的优点。使用步进电动机的控制系统通常不需要反馈就能对位置或速度进行控制。

步进电动机的步距角有误差，转子转过一定的步数以后也会出现累积误差，但转子转过一周以后，其累积误差为“零”，故其位置误差不会积累，而且与数字设备兼容。控制系统结构简单，与数字设备兼容，价格便宜。

### 2.1.1 步进电动机的分类

步进电动机的品种规格很多，按照结构和工作原理不同可以划分为磁阻式（也称反应式或变磁阻式）电动机（Variable Reluctance, VR）（如图 2-1 所示）、永磁式电动机（Permanent Magnet, PM）（如图 2-2 所示）、混合式电动机（Hybrid HB）和特种电动机四种主要类型。

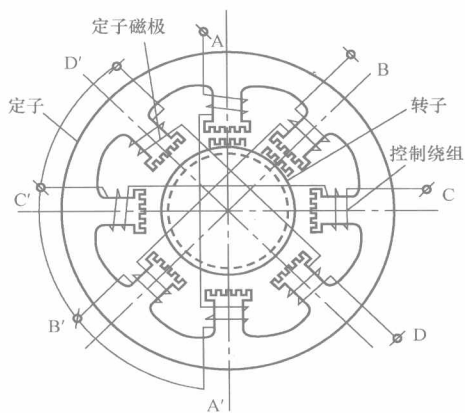


图 2-1 磁阻式步进电动机

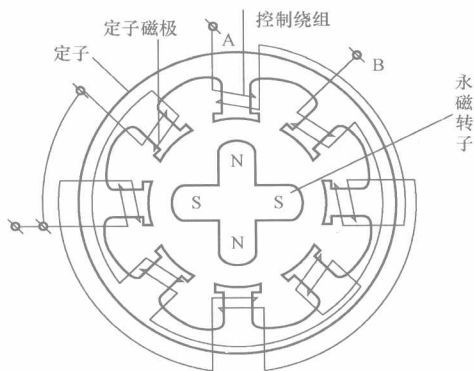


图 2-2 永磁式步进电动机

永磁式步进电动机一般为两相，转矩和体积较小，步距角一般为  $7.5^\circ$  或  $15^\circ$ ；磁阻式步进电动机一般为三相，可实现大转矩输出，步距角一般为  $1.5^\circ$ ，但噪声和振动都很大，在 20 世纪 80 年代已被欧美等发达国家淘汰，但在国内仍然被广泛地使用。

混合式步进电动机是指混合了永磁式和磁阻式优点的电动机。它又分为两相和五相，两相步距角一般为  $1.8^\circ$ ，五相步距角一般为  $0.72^\circ$ ，这种步进电动机的应用最为广泛。

直线步进电动机由导轨和滑块组成。运动前导轨和滑块间先通以几个大气压的气体使其间有几十个微米的气隙，滑块悬浮在导轨上方气隙高度上。运动时就如同磁悬浮列车，靠磁场的变化来使滑块运动。磁场不变化时没有运动，磁场快速变化时滑块也相应快速运动。

### 2.1.2 步进电动机的工作原理

图 2-3 所示为三相磁阻式步进电动机工作原理图。其定子有 6 个均匀分布的磁极，每两个相对磁极组成一相，即有 A-A'、B-B'、C-C' 三相，磁极上绕有励磁绕组。定子具有均匀分布的 4 个齿。当 A、B、C 三个磁极的绕组依次通电时，则 A、B、C 三对磁极依次产生磁场吸引转子转动。

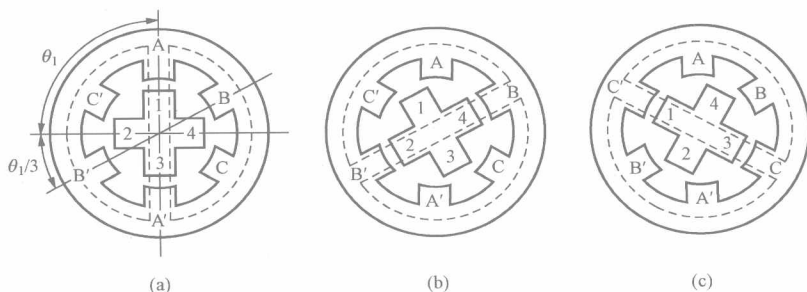


图 2-3 三相磁阻式步进电动机工作原理图

(a) 电脉冲加到 A 相励磁绕组；(b) 电脉冲加到 B 相励磁绕组；(c) 电脉冲加到 C 相励磁绕组

如图 2-3 (a) 所示，如果先将电脉冲加到 A 相励磁绕组，定子 A 相磁极就产生磁通，并对转子产生磁拉力，使转子的 1、3 两个齿与定子的 A 相磁极对齐。然后再将电脉冲通入 B 相励磁绕组，B 相磁极便产生磁通。如图 2-3 (b) 所示可以看出，这时转子 2、4 两个齿与 B 相磁极靠得最近，于是转子便沿着反时针方向转过  $30^\circ$ ，使转子 2、4 两个齿与定子 B 相磁极对齐。如果按照 A→B→C→A 的顺序通电，转子则沿反时针方向一步步地转动，每步转过  $30^\circ$ ，这个角度就叫步距角。显然，单位时间内通入的电脉冲数越多（即电脉冲频率越高），电动机转速越高。如果按 A→C→B→A 的顺序通电，步进电动机将沿顺时针方向一步步地转动。从一相通电换接到另一相通电称为一拍，每一拍转子转动一个步距角。像上述的步进电动机，三相励磁绕组依次单独通电运行，换接 3 次完成一个通电循环，称为三相单三拍通电方式。

如果使两相励磁绕组同时通电，即按 AB→BC→CA→AB 顺序通电，这种通电方式称为三相双三拍，其步距角仍为  $30^\circ$ 。

还有一种是按三相六拍通电方式工作的步进电动机，即按照 A→AB→B→BC→C→CA→A 顺序通电，换接 6 次完成一个通电循环。这种通电方式的步距角为  $15^\circ$ ，其工作过程如图 2-4 所示，若将电脉冲首先通入 A 相励磁绕组，转子齿 1、3 与 A 相磁极对齐，如图 2-4 (a) 所示。

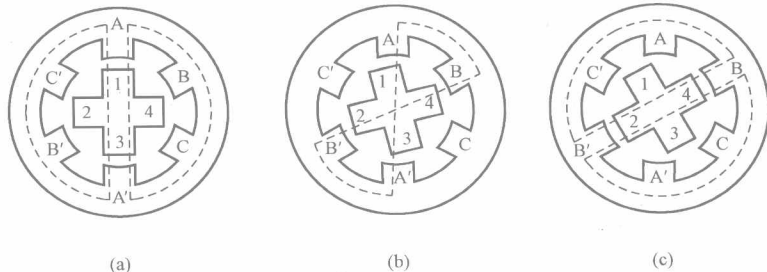


图 2-4 三相六拍磁阻式步进电动机工作原理图

(a) 电脉冲通入 A 相励磁绕组；(b) 电脉冲通入 A、B 相励磁绕组；(c) 电脉冲通入 B 相励磁绕组

然后再将电脉冲同时通入 A、B 相励磁绕组，这时 A 相磁极拉着 1、3 两个齿，B 相磁极拉着 2、4 两个齿，使转子沿着反时针方向旋转。转过  $15^\circ$  角时，A、B 两相的磁拉力正好平衡，转子静止于如图 2-4 (b) 所示的位置。如果继续按 B→BC→C→CA→A 的顺序通电，步进电动机就沿着反时针方向以  $15^\circ$  步距角一步步转动。

步进电动机的步距角越小，意味着它所能达到的位置精度越高。通常的步距角是  $1.5^\circ$  或  $0.75^\circ$ ，为此需要将转子做成多极式的，并在定子磁极上制成小齿。定子磁极上的小齿和转子磁极上的小齿大小一样，两种小齿的齿宽和齿距相等。当一相定子磁极的小齿与转子的齿对齐时，其他两相磁极的小齿都与转子的齿错过一个角度。按着相序，后一相比前一相错开的角度要大。例如转子上有 40 个齿，则相邻两个齿的齿距角是  $360^\circ/40=9^\circ$ 。若定子每个磁极上制成 5 个小齿，当转子齿和 A 相磁极小齿对齐时，B 相磁极小齿则沿反时针方向超前转子齿  $1/3$  齿距角，即超前  $3^\circ$ ，而 C 相磁极小齿则超前转子  $2/3$  齿距，即超前  $6^\circ$ 。按照此结构，当励磁绕组按 A→B→C 顺序进行三相三拍通电时，转子按反时针方向以  $3^\circ$  步距角转动；如果按照 A→AB→B→BC→C→CA→A 顺序以三相六拍通电时，步距角将减小一半，为  $1.5^\circ$ 。如通电顺序相反，则步进电动机将沿着顺时针方向转动。

从上述内容可知，步距角的大小与通电方式和转子齿数有关，其大小可按下式计算

$$\alpha = \frac{360^\circ}{zm} \quad (2-1)$$

式中： $z$  为转子齿数； $m$  为运行拍数，通常等于相数或相数的整数倍数。

若步进电动机通电的脉冲频率为  $f$  (脉冲数/秒)，则步进电动机转速为

$$n = \frac{60f}{mz} (\text{r/min}) \quad (2-2)$$

步进电动机也可以制成四相、五相、六相或更多的相数，以减小步距角来改善步进电动机的性能。为了减少制造电动机的困难，多相步进电动机常做成轴向多段式（又称顺轴式）。例如，五相步进电动机的定子沿轴向分为 A、B、C、D、E 5 段。每一段是一相，在此段内只有一对定子磁极。在磁极的表面上开有一定数量的小齿，各相磁极的小齿在圆周方向互相错开  $1/5$  齿距。转子也分为 5 段，每段转子具有与磁极同等数量的小齿，但它们在圆周方向并不错开。这样，定子的 5 段就是电动机的五相。

与三相步进电动机相同，五相步进电动机的通电方式也可以是五相五拍、五相十拍等。但是，为了提高电动机运行的平稳性，多采用五相十拍的通电方式。

归纳起来，步进电动机具有以下特点：

(1) 定子绕组的通电状态每改变一次，其转子便转过一定的角度，转子转过的总角度（角位移）严格与输入脉冲的数量成正比。

(2) 定子绕组通电状态改变速度越快，其转子旋转的速度就越快。即通电状态的变化频率越高，转子的转速就越高。

(3) 改变定子绕组的通电顺序，将导致其转子旋转方向的改变。

(4) 若维持定子绕组的通电状态，步进电动机便停留在某一位置固定不动，即步进电动机具有自锁能力，不需要机械制动。

(5) 步距角  $\alpha$  与定子绕组相数  $m$ 、转子齿数  $z$ 、通电方式  $k$  ( $k = \text{拍数}/\text{相数}$ 。拍数是指步进电动机旋转一圈，定子绕组的通电状态被切换的次数。相数是指步进电动机每个通电状