

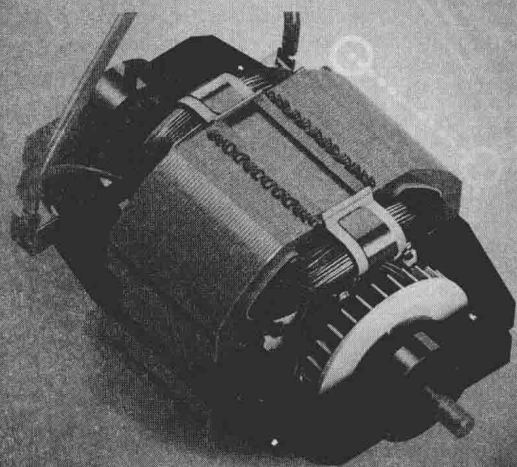
本书结合大量典型实例，系统介绍电气伺服控制系统结构原理，以及设计计算、选型、试验、使用、安装调试、维护修理、技术改进的理论与方法。

电气伺服控制 技术及应用

DIANQI SIFU KONGZHI JISHU JI YINGYONG

黄志坚 编著

TN/9/15
113



电气伺服控制 技术及应用

DIANQI SIFU KONGZHI JISHU JI YINGYONG

黄志坚 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

伺服系统是自动控制系统的一个分支,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优点。伺服技术的发展方向是数字化、高集成化、智能化,以及模块化和网络化。目前,电气伺服控制技术在工业、交通、国防以及人们日常工作与生活众多领域得到广泛应用,发挥重要作用。本书结合大量典型实例,系统介绍现代电气伺服控制系统结构原理,以及设计计算、选型、试验、使用、安装调试、维护修理、技术改进的理论与方法。本书力求简明实用,能够反映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。

本书可作为机电专业工程技术人员参考书,也可作为普通高等院校、高职高专相关专业学生的参考读物。

图书在版编目(CIP)数据

电气伺服控制技术及应用/黄志坚编著. —北京:中国电力出版社,2016.7

ISBN 978-7-5123-9264-9

I. ①电… II. ①黄… III. ①电气控制-伺服控制
IV. ①TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第087963号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

2016年7月第一版 2016年7月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 18.625印张 453千字
印数0001—2000册 定价49.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
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

“伺服”一词来自英文单词 Servo 的音译，是指运动系统按照人们的外部指令要求进行运动。目前，电气伺服控制技术在工业、交通、国防以及人们日常工作与生活众多领域得到了广泛应用，发挥了重要作用。电气伺服系统主要由伺服电机、反馈和控制装置组成。其中伺服电机是运动的主要执行部件。伺服系统的主要作用是闭环控制，包括力矩、速度（转速）和位置等。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、质量轻、可靠性高和成本低等。电气伺服控制技术是集微控电动机、传感器与测控、自动化、机械工程、电子工程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。伺服技术的发展方向是数字化、高集成化、智能化以及模块化和网络化。

本书结合大量典型实例，系统介绍现代电气伺服控制系统结构原理，以及设计计算、选型、试验、使用、安装调试、维护修理、技术改进的理论与方法。本书共分 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，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。

限于作者水平，加之时间仓促，书中难免有不当及欠缺之处，恳请读者批评指正。

作者
2016.5

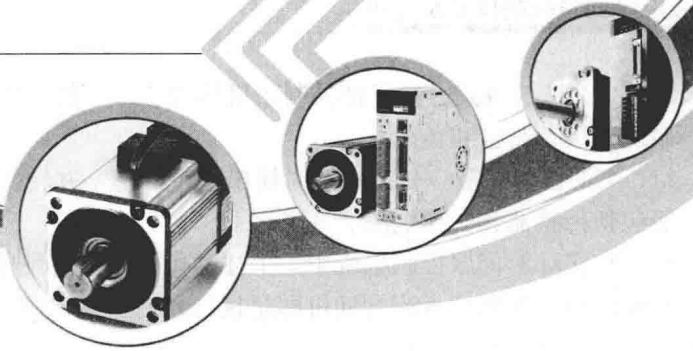
前言

1 电气伺服控制技术概述	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	2
1.2.1 电气伺服控制基本要求	2
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	6
1.4 电气伺服控制技术的发展趋势	6
2 步进电动机伺服控制技术的应用	8
2.1 步进电动机及伺服控制技术概述	8
2.1.1 步进电动机的工作原理	8
2.1.2 步进电动机的分类及型号命名	10
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	13
2.2.1 步进电动机驱动技术概述	13
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	18
2.2.4 反应式步进电动机驱动器	22
2.2.5 步进电动机可变细分驱动控制器	29
2.3 步进电动机控制技术及应用	34
2.3.1 步进电动机控制技术概述	34
2.3.2 步进电动机加减速控制器	35
2.3.3 数控步进电动机的正反转控制	38
2.3.4 三相混合式步进电动机 SPWM 控制技术	40
2.3.5 基于虚拟仪器的步进电动机控制系统	44
2.3.6 基于 DSP 的步进电动机控制系统	46

2.3.7	基于单片机的步进电动机控制系统	50
2.3.8	基于 PLC 和触摸屏的步进电动机控制系统	53
2.3.9	基于 CAN 总线的步进电动机控制系统	56
2.3.10	基于 ARM7 的步进电动机升降速曲线控制系统	60
2.3.11	基于 FPGA 的步进电动机多轴联动控制系统	66
2.4	步进电动机及伺服系统设计与计算	71
2.4.1	步进电动机的选型与计算概述	71
2.4.2	步进电动机主要技术参数	76
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	80
2.4.4	数控机床中步进电动机的选用	83
2.4.5	基于 STM32F103 的贴片机控制系统的设计	85
2.5	步进电动机及控制系统的使用与维修	91
2.5.1	步进电动机的故障分析	91
2.5.2	CAK6150 数控车床驱动板的维修	94
2.5.3	电火花线切割机步进电动机失步等故障的检修	97
3	直流伺服控制技术及应用	101
3.1	直流伺服电动机概述	101
3.1.1	直流伺服电动机的特点	101
3.1.2	直流伺服电动机的工作原理	101
3.2	直流伺服电动机的驱动与控制	105
3.2.1	直流伺服电动机驱动概述	105
3.2.2	直流伺服电动机控制及其特性	106
3.2.3	PWM 在直流伺服系统中的应用	109
3.2.4	运用 PWM 技术控制直流电动机转速	114
3.2.5	TMS320C2812 在直流伺服控制中的应用	118
3.3	直流伺服电动机及系统的设计与应用	121
3.3.1	直流伺服电动机应用与选择概述	121
3.3.2	部分直流伺服电动机的主要技术数据	123
3.3.3	SG1731D 在机床直流伺服随动系统中的应用	126
3.3.4	基于 PC+PCI 的直流伺服系统测试平台	129
3.3.5	基于 DSP 的雕刻机用直流伺服控制器	132
3.3.6	低成本直流伺服电动机调速系统	135
3.3.7	大功率直流电动机速度伺服系统的设计	138
3.4	直流伺服电动机及系统的使用与维修	143
3.4.1	电动机发热故障分析及解决	143
3.4.2	伺服系统中检测器件常见故障与维修	144
3.5	无刷直流电动机控制系统及应用	147
3.5.1	永磁无刷直流电动机的结构及工作原理	147
3.5.2	无刷直流电动机的运行特性	152

3.5.3	无刷直流电动机驱动控制	153
3.5.4	三相无刷直流伺服电动机控制系统在石油钻井的应用	156
3.5.5	空心绕组无刷直流电动机在精密定位控制系统中的应用	158
3.5.6	高压断路器永磁无刷直流电动机机构伺服控制系统	160
3.5.7	基于CAN总线的小型飞行器伺服系统	165
4	交流伺服控制技术及应用	169
4.1	交流伺服控制技术概述	169
4.1.1	交流伺服电动机及控制技术的发展	169
4.1.2	同步电动机与异步电动机	171
4.1.3	模拟式交流伺服系统与数字式交流伺服系统	171
4.2	交流异步伺服电动机	173
4.2.1	交流异步伺服电动机基本结构	174
4.2.2	交流异步伺服电动机工作原理	175
4.2.3	两相绕组产生的圆形旋转磁场	177
4.2.4	椭圆形旋转磁场	181
4.2.5	控制方式	183
4.2.6	稳态特性	184
4.3	交流同步伺服电动机	187
4.3.1	永磁同步电动机的结构与工作原理	187
4.3.2	磁阻式同步电动机的结构与工作原理	192
4.3.3	磁滞同步电动机的结构与工作原理	193
4.4	交流伺服电动机的驱动与控制技术应用	195
4.4.1	基于IRMCK201芯片的交流伺服控制系统	195
4.4.2	基于PCI总线的全闭环交流伺服控制系统	200
4.4.3	大功率PMSM伺服系统	203
4.4.4	基于DSP的全数字交流伺服驱动器	208
4.4.5	基于DSP的交流伺服系统与CAN总线的通信	212
4.4.6	基于PLC-伺服驱动的位置控制系统	216
4.4.7	触摸屏与PLC组成的伺服电动机控制系统	219
4.4.8	基于DeviceNet协议的CAN总线交流伺服系统接口	221
4.4.9	基于PROFIBUS-DP总线的交流伺服与变频系统	226
4.5	交流伺服控制系统的设计与计算	231
4.5.1	交流伺服电动机的设计计算及选择概述	231
4.5.2	交流伺服电动机的主要技术参数	233
4.5.3	机床进给系统数控化改造的设计及计算	235
4.5.4	TH6363卧式加工中心伺服进给系统设计与分析	239
4.5.5	数控冲床送料机构交流伺服电动机设计与分析	243
4.5.6	交流伺服同步驱动拉床控制系统的设计	247
4.6	交流伺服控制应用典型实例	252

4.6.1	用 PLC 伺服装置改造插齿机床控制系统	252
4.6.2	FANUC 系统扭矩控制功能在数控曲轴磨床中的应用	256
4.6.3	基于 PLC 控制的高精度交流伺服定剪系统	260
4.6.4	织机电送经与卷取伺服驱动技术系统	263
4.6.5	地面雷达全数字模块化伺服系统	268
4.6.6	CINRAD/SA 型天气雷达数字交流伺服系统及调试和维修	272
4.7	交流伺服电动机及系统的使用与维修	279
4.7.1	FANUC α i 系列主轴伺服驱动系统故障诊断与维修	279
4.7.2	数控机床交流伺服系统参数不匹配故障及消除方法	282
4.7.3	交流伺服电动机振动故障分析与解决	284
4.7.4	三菱交流伺服主轴电动机飞车故障的维修	286
参考文献		288



电气伺服控制技术概述

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。

电气伺服系统的主要作用是伺服系统的闭环控制，包括力矩、速度和位置等。

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。图 1-1 给出了系统组成原理框图。

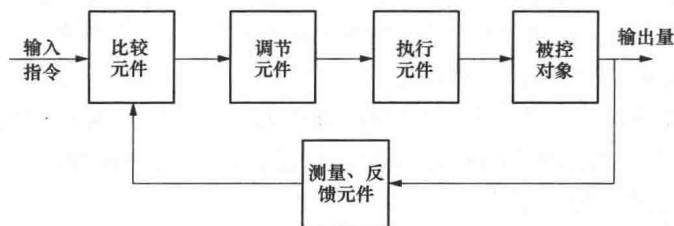


图 1-1 伺服系统组成原理框图

(1) 比较环节。它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。

(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，如测速直流电动机即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、质量轻、可靠性高和成本低等。

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，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，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指静态误差。

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。

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。

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 20ms 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。

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

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

式中： 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(1mm/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，具体要求如下：

(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、长时间的过负荷能力，一般要求数分钟内过负荷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

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. 位置控制系统的主要技术指标

(1) 系统静态误差。指系统输入为常值时，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 ω_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 ϵ 或线加速度 a 与对应的系统误差 e_a 之比。

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

(5) 振幅指标 M 和频带宽度 ω_b 。位置控制系统闭环幅频特性 $A(\omega)$ 的最大值 $A(\omega_p)$ 与 $A(0)$ 的比值称为振荡指标 M ; 当闭环幅频特性 $A(\omega_b) = 0.707$ 时所对应的角频率 ω_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)、MTBF、可靠性以及使用寿命的要求。

2. 速度控制系统的主要技术要求

(1) 最高运行速度。被控对象的最高运行速度: 如最高转速 n_{\max} 、最高角速度 ω_{\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 ω_{\min} 或最低线速度 v_{\min} 来表示, 也可用调速范围 R_N 来表示。

(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 Δn (或 $\Delta\omega$ 、 Δv)。转速降 Δn 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_c 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。

转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能有意义。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, 即

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

(5) 对阶跃信号输入系统的响应特性。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) Δn_{\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等要求。

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，所以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，其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，质量可轻 1/2，价格仅为直流电动机的 1/3，常用于主轴伺服系统。

1.3.3 按控制原理分类

按自动控制原理，伺服系统又可分为开环控制伺服系统、闭环控制伺服系统和半闭环控制伺服系统。

开环控制伺服系统结构简单、成本低廉、易于维护，但由于没有检测环节，系统精度低、抗干扰能力差。开环系统通常主要以步进电动机作为控制对象。在开环系统中只有前向通路，无反馈回路，CNC 装置生成的插补脉冲经功率放大后直接控制步进电动机的转动；脉冲频率决定了步进电动机的转速，进而控制工作台的运动速度；输出脉冲的数量控制工作台的位移，在步进电动机轴上或工作台上无速度或位置反馈信号。

闭环控制伺服系统能及时对输出进行检测，并根据输出与输入的偏差，实时调整执行过程，因此系统精度高，但成本也大幅提高。数控机床闭环伺服系统的典型结构如图 1-2 所示。这是一个双闭环系统，内环是速度环，外环是位置环。速度环由速度调节器、电流调节器及功率驱动放大器等部分组成，利用测速发电机、脉冲编码器等速度传感元件，作为速度反馈的测量装置。位置环是由 CNC 装置中位置控制、速度控制、位置检测与反馈控制等环节组成，用以完成对数控机床运动坐标轴的控制。数控机床运动坐标轴的控制不仅要完成

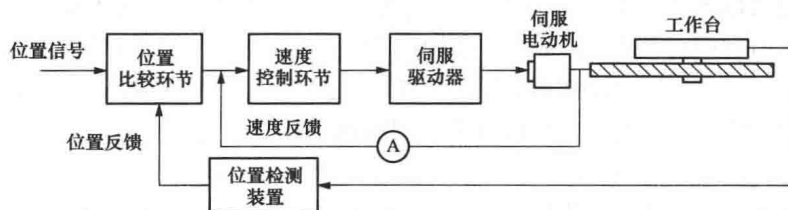


图 1-2 数控机床闭环伺服系统的典型结构

单个轴的速度位置控制，而且在多轴联动时，要求各移动轴具有良好的动态配合精度，这样才能保证加工精度、表面粗糙度和加工效率。

半闭环控制伺服系统的检测反馈环节位于执行机构的中间输出上，因此一定程度上提高了系统的性能。如位移控制伺服系统中，为了提高系统的动态性能，增设的电动机速度检测和控制就属于半闭环控制环节。

1.3.4 按反馈比较控制方式分类

1. 脉冲、数字比较伺服系统

该系统是闭环伺服系统中的一种控制方式，它是将数控装置发出的数字（或脉冲）指令信号与检测装置测得的数字（或脉冲）形式的反馈信号直接进行比较，以产生位置误差，实现闭环控制。该系统机构简单，容易实现，整机工作稳定，因此得到广泛的应用。

2. 相位比较伺服系统

该系统中位置检测元件采用相位工作方式，指令信号与反馈信号都变成某个载波的相位，通过相位比较来获得实际位置与指令位置的偏差，实现闭环控制。

该系统适应于感应式检测元件（如旋转变压器、感应同步器）的工作状态，同时由于载波频率高、响应快，抗干扰能力强，因此特别适合于连续控制的伺服系统。

3. 幅值比较伺服系统

该系统是以位置检测信号的幅值大小来反映机械位移的数值，并以此信号作为位置反馈信号，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得广泛一些。

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. 交流化

从国际市场的情况看，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。

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。

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、过电压、过电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。

4. 高度集成化

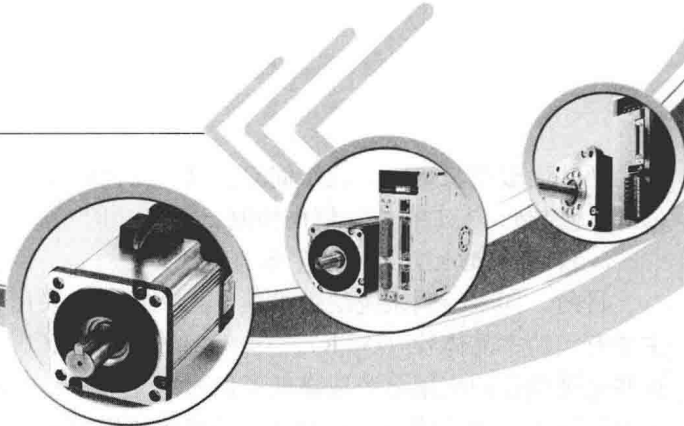
新的伺服系统产品改变了将伺服系统划分为速度伺服单元与位置伺服单元两个模块的做法，代之以单一的、高度集成化、多功能的控制单元。同一个控制单元，只要通过软件设置系统参数，就可以改变其性能，既可以使用电动机本身配置的传感器构成半闭环调节系统，又可以通过接口与外部的的位置或速度传感器、力矩传感器构成高精度的全闭环调节系统。高度的集成化还显著地缩小了整个控制系统的体积，使得伺服系统的安装与调试工作都得到了简化。

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，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，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，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。

6. 模块化和网络化

以工业局域网技术为基础的工厂自动化（Factory Automation, FA）工程技术在最近十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。



步进电动机伺服控制技术的应用

2.1 步进电动机及伺服控制技术概述

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。步进电动机具有转矩大、惯性小、响应频率高等优点，因此具有瞬间启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后也会出现累积误差，但转子转过一周后其累积误差为“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，价格便宜。

2.1.1 步进电动机的工作原理

图 2-1 所示为三相反应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。转子具有均匀分布的 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。

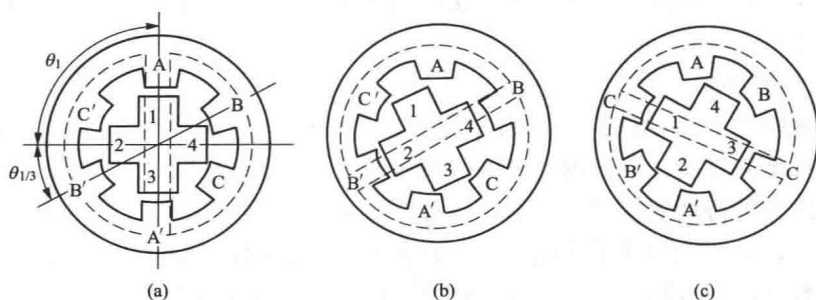


图 2-1 三相反应式步进电动机工作原理图

(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 2-1 (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 2-1 (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, 于是转子便沿着逆时针方向转过 30° 角, 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, 转子则沿逆时针方向一步步地转动, 每步转过 30° 角。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° 。

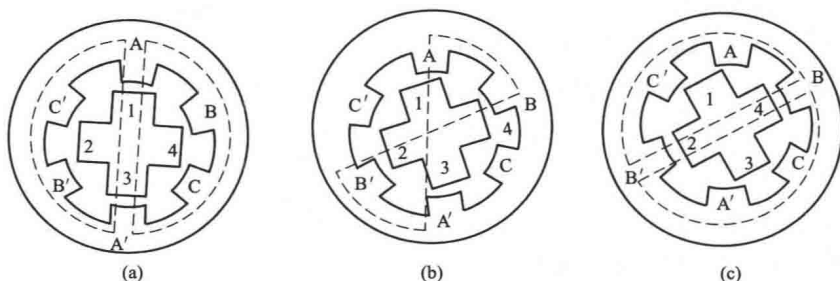


图 2-2 三相六拍反应式步进电动机工作原理图

(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

还有一种是按三相六拍通电方式工作的反应式步进电动机, 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° , 其工作原理图如图 2-2 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 2-2 (a) 所示。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, 使转子沿着逆时针方向旋转。转过 15° 角时, A、B 两相的磁拉力正好平衡, 转子静止于如图 2-2 (b) 所示的位置。如果继续按 B→BC→C→CA→A 的顺序通电, 步进电动机就沿着逆时针方向以 15° 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° 或 0.75° , 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。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 相磁极小齿则沿逆时针方向超前转子齿 $1/3$ 齿距角, 即超前 3° , 而 C 相磁极小齿则超前转子 $2/3$ 齿距, 即超前 6° 。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, 转子按逆时针方向以 3° 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° 。若通电顺序相反, 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, 其大小为