

PMSM

伺服系统的非脆弱控制

金 锋 著



東北大學出版社
Northeastern University Press

PMSM 伺服系统的非脆弱控制

金 锋 著

东北大学出版社

© 金 锋 2013

图书在版编目 (CIP) 数据

PMSM 伺服系统的非脆弱控制 / 金锋著. —沈阳: 东北大学出版社, 2013. 6

ISBN 978 - 7 - 5517 - 0362 - 8

I. ①P… II. ①金… III. ①交流伺服电动机—伺服控制—高等学校—教学参考资料 IV. ①TM383. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 148738 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024 - 83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024 - 83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph@neupress.com

http: //www. neupress. com

印 刷 者: 沈阳中科印刷有限责任公司

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm × 240mm

印张: 10. 25

字数: 190 千字

出版时间: 2013 年 6 月第 1 版

印刷时间: 2013 年 6 月第 1 次印刷

策划编辑: 王兆元

责任编辑: 刘乃义

封面设计: 刘江旻

责任校对: 铁 力

责任出版: 唯 美

ISBN 978 - 7 - 5517 - 0362 - 8

定 价: 25. 00 元

前 言

随着现代电机技术、现代电力电子技术、微电子技术、自动控制技术及计算机技术的快速发展,交流伺服控制技术取得了很大进步,使得先前困扰着交流伺服系统的电机控制复杂、调速性能差等问题的解决取得了突破性的进展,交流伺服控制系统的性能逐步提高,价格趋于合理。特别是永磁材料的应用,使得永磁同步伺服电机(PMSM)驱动技术达到了很高的水平,高精度、高性能的伺服驱动技术成为现代伺服控制系统的一个发展趋势。

矢量控制亦称磁链定向控制(FOC),是当前高性能伺服控制系统的一种典型控制方案。矢量控制在结构上特别适合全数字化,但对数据处理的实时性和快速性要求很高。近年来,各种高性能器件的出现,如数字信号处理器(DSP)、智能功率模块(IPM)等,为矢量控制系统提供了硬件保障,从而使得复杂的控制规律和算法能够快速、高效地实现。

非脆弱性表征控制器承受自身参数不确定性的能力,即控制器在发生参数变动时,仍维持闭环系统稳定的能力。非脆弱性是控制器设计时经常需要考虑的一个因素,主要原因有两点:一是在线调整控制器参数时,脆弱的控制器将导致可调范围很小;二是控制算法实现的精确性,可能导致脆弱的系统失稳。线性矩阵不等式(LMI)方法把非脆弱控制问题转化为一个线性矩阵不等式系统的可行性问题,或是一个具有线性矩阵不等式约束的凸优化问题。综合矢量控制和非脆弱控制的特点,并将其应用到永磁同步伺服控制系统中,能够提高系统的静态、动态性能。

本书主要研究PMSM伺服系统的组成、通信与组态、数学模

型和控制策略等。

全书共分 5 章。第 1 章介绍伺服控制系统的组成、性能指标及现代伺服控制系统的特点；第 2 章介绍 Rockwell 实验室的 PMSM 伺服系统的控制单元、功率驱动单元、永磁同步伺服电动机 (PMSM)、位置反馈单元和运动控制网络等组成部分；第 3 章介绍 PMSM 伺服系统的通信与组态；第 4 章介绍 PMSM 的数学模型及矢量控制；第 5 章介绍 PMSM 伺服系统的非脆弱控制等。

本书的出版得到了 Rockwell 实验室同人们的支持，特别是车伟伟和董亮两位同志，在前期准备中做了大量工作，在此向他们表示衷心的感谢。同时，“大学生创新训练计划”项目组的学生参与了 PMSM 伺服系统的研究工作，在此也向他们表示感谢。

由于作者水平有限，书中缺点和不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

著 者

2013 年 3 月

目 录

第 1 章 伺服运动控制系统概述	1
1.1 伺服运动控制系统的组成	1
1.1.1 控制单元	3
1.1.2 功率驱动单元	3
1.1.3 永磁同步伺服电动机 (PMSM)	3
1.1.4 位置检测单元	3
1.2 伺服运动控制系统的控制要求	4
1.3 现代伺服运动控制系统的特点	5
第 2 章 Rockwell 实验室的 PMSM 伺服系统	8
2.1 ControlLogix 系统	9
2.1.1 控制器模块	10
2.1.2 输入/输出模块	12
2.1.3 通信接口模块	18
2.1.4 伺服接口模块	24
2.2 Ultra 3000 数字式伺服驱动器	25
2.2.1 数字式伺服驱动器的特点	26
2.2.2 数字式伺服驱动器的技术参数	27
2.2.3 数字式伺服驱动器的连接器数据	29
2.2.4 网络型伺服驱动器的初始化	31
2.3 永磁同步伺服电动机 (PMSM)	31
2.3.1 伺服电机的特点	33
2.3.2 伺服电机的技术参数	34
2.3.3 伺服驱动器与伺服电机的组合	34

2.4	光电编码器	35
2.4.1	编码器的技术参数	36
2.4.2	编码器的连接器数据	36
2.4.3	伺服驱动器与编码器的连接	38
2.5	SERCOS 总线接口	38
2.5.1	SERCOS 接口概况	38
2.5.2	SERCOS 接口的组成及原理	39
2.5.3	SERCOS 接口的通信协议	41
2.5.4	SERCOS 接口的驱动软件	42
2.5.5	SERCOS 接口的网络结构	42
2.6	运动平台	43
第3章	PMSM 伺服系统的通信与组态	45
3.1	Rockwell 自动化软件	45
3.1.1	RSLink 通信软件	45
3.1.2	RSNetWorx 网络配置及管理软件	56
3.1.3	RSLogix5000 编程软件	66
3.2	ControlLogix 系统的通信与组态	75
3.2.1	创建工程	75
3.2.2	组态 I/O 模块	77
3.2.3	选择通信格式	83
3.2.4	组织数据	84
3.2.5	配置通信连接	87
3.3	PMSM 伺服系统的通信	91
3.3.1	Ethernet/IP 网络的 IP 地址设置	91
3.3.2	ControlNet 网络的节点地址设置	92
3.3.3	SERCOS 网络的节点地址设置	93
3.4	PMSM 伺服系统的运动控制	93
3.4.1	创建项目	93
3.4.2	组态运动轴	102
3.4.3	驱动运动轴	109

3.4.4 应用程序设计	113
第4章 PMSM 的数学模型及矢量控制	117
4.1 PMSM 的结构	117
4.2 PMSM 的数学模型	118
4.2.1 坐标变换原理	118
4.2.2 PMSM 的数学模型	122
4.3 PMSM 的矢量控制	125
4.3.1 矢量控制原理	125
4.3.2 矢量控制 $i=0$ 方式的实施方案	126
4.3.3 电压空间矢量 PWM (SVPWM) 的实现	127
4.3.4 PMSM 矢量控制的运行分析	130
4.3.5 伺服驱动器的工作模式	133
第5章 PMSM 伺服系统的非脆弱控制	136
5.1 非脆弱控制理论	136
5.1.1 非脆弱控制问题	136
5.1.2 非脆弱 H_∞ 控制的描述	137
5.1.3 非脆弱 H_∞ 控制的方法	138
5.2 有区间型增益变量的非脆弱 H_∞ 控制	140
5.2.1 非脆弱 H_∞ 控制器设计	141
5.2.2 非脆弱 H_∞ 控制算法	143
5.2.3 系统仿真	144
5.3 具有稀疏结构的非脆弱 H 控制	146
5.3.1 非脆弱 H_∞ 控制器设计	147
5.3.2 非脆弱 H_∞ 控制算法	149
5.3.3 系统仿真	151
参考文献	154

第1章 伺服运动控制系统概述

作为基础技术行业，装备制造业的自动化水平在很大程度上决定了一个国家的工业化程度，并影响和制约着其他行业的发展。装备制造业中最典型的设备就是机床，可以说，当今世界上的一切制成品无一不是直接或间接地由机床制造的，而机床的现代化程度又集中体现在现代数控机床上。在数控机床中，最重要的是进给系统的控制，也就是伺服系统的控制。

伺服系统作为数控机床的重要组成部分，是一种高精密的位置跟踪与定位系统，其动态性能与定位精度是影响数控机床性能的主要因素。如果说数控系统决定了数控机床的功能和可靠性，那么，伺服系统则决定了数控机床的加工质量和加工速度。

一般地，对于数控系统，运动控制要求可以分为以下三类。

- (1) 点对点控制。对控制系统有较高的动态、静态性能要求。
- (2) 运动轨迹控制。要求运动路线与期望轨迹尽量保持一致，强调轨迹误差的控制。
- (3) 协调控制。协调控制是指各机构之间的协调控制，注重逻辑控制。

1.1 伺服运动控制系统的组成

在运动控制系统中，把输出量能够以一定准确度跟随输入量变化的系统称为随动系统，亦称为伺服系统。伺服系统一般包括多个控制环路，如电流环、速度环、位置环等。这些环路的动态响应不同，环路的作用也不同。因此，可以根据这些特点，将不同的环路在软硬件设计上进行分层处理，按照系统工程的思想，选择合理的硬件结构和相应的控制策略，使整个系统达到较高的性能/价格比。

伺服系统的闭环多回路控制结构如图 1-1 所示。伺服系统的分层式控制结构如图 1-2 所示，现代伺服系统的分层式控制接口如图 1-3 所示。

永磁同步伺服电动机交流伺服系统由控制单元、功率驱动单元、永磁同步伺服电动机（PMSM）和位置反馈单元等组成，通常采用闭环多回路控制结

构。这种控制结构，具有先天的解耦控制效果，可以分别完成伺服系统中所需要的位置、速度和电流控制。

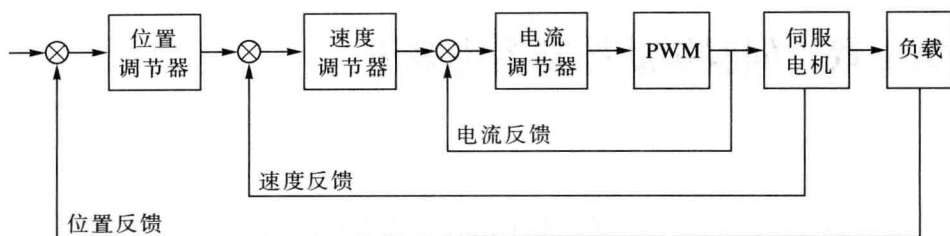


图 1-1 伺服系统的闭环多回路控制结构

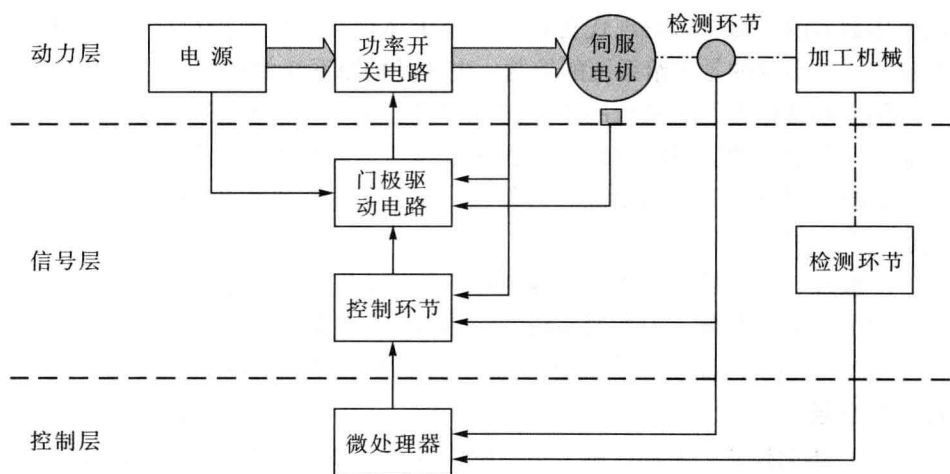


图 1-2 伺服系统的分层式控制结构

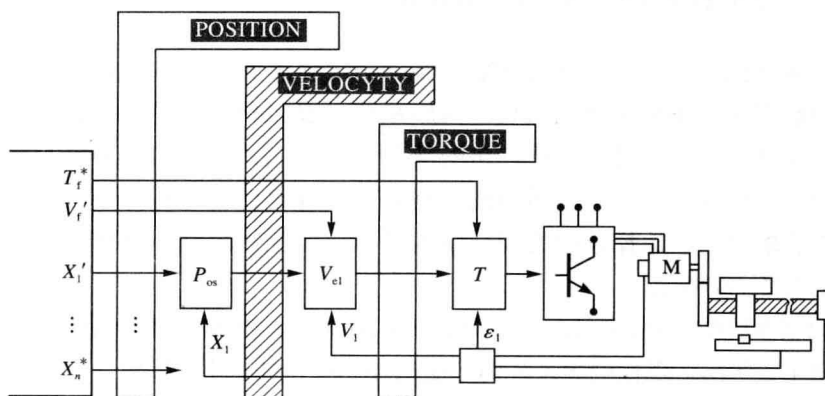


图 1-3 现代伺服系统的分层式控制接口

1.1.1 控制单元

控制单元是整个交流伺服系统的核心,实现系统的位置控制、速度控制、转矩/电流控制。数字信号处理器(DSP)被广泛应用于交流伺服系统,各大公司推出的面向电机控制的专用DSP芯片,除具有快速的数据处理能力外,还集成了丰富的用于电机控制的专用集成电路,如A/D转换器、PWM发生器、定时计数器电路、异步通信电路、CAN总线收发器以及高速的可编程静态RAM和大容量的程序存储器等。

1.1.2 功率驱动单元

功率驱动单元采用三相全桥不控整流以及三相正弦PWM电压型逆变器变频的AC-DC-AC结构。为避免上电时出现过大的瞬时电流以及电机制动时产生很高的泵升电压,设有软启动电路和能耗泄放电路。逆变部分采用集驱动电路、保护电路和功率开关于一体的智能功率模块(IPM),开关频率可达20kHz。

1.1.3 永磁同步伺服电动机(PMSM)

永磁同步伺服电动机是使用最多的伺服电机品种,这种电机具有结构简单、运行可靠、易维护或免维护、体积小、质量轻、损耗少、效率高等特点。现今的永磁同步电动机定子多采用三相正弦交流电驱动,转子一般由永磁体磁化为3~4对磁极,产生正弦磁动势。永磁同步电动机由电压型逆变器驱动,采用高分辨率的绝对式位置反馈装置。高性能的交流伺服系统要求永磁同步电动机尽量具有线性的数学模型,这就需要通过电机转子磁场进行优化设计,使转子产生正弦磁动势,并改进定子、转子结构,消除齿槽力矩,减小电磁转矩波动,通过对电机本体的设计来提高其控制特性。

1.1.4 位置检测单元

位置检测单元一般采用高分辨率的旋转变压器、光电编码器等元件。旋转变压器输出两相正交波形,能输出转子的绝对位置,但其解码电路复杂,价格昂贵。光电编码器分为增量式和绝对式两种,较其他检测元件有直接输出数字量信号、低惯量、低噪声、高精度、高分辨率、制作简便、成本低等优点。增量式编码器结构简单,制作容易,一般在码盘上刻A、B、Z三道均匀分布的刻线。由于其给出的位置信息是增量式的,因此用于伺服领域时需要初始定位。格雷码绝对式编码器一般做成循环二进制代码,码道的道数与二进制位数相同。这种编码器可直接输出转子的绝对位置,不需要测定初始位置,但其工艺复杂、成本高,实现高分辨率、高精度较为困难。通用的交

流伺服系统中采用的绝对式编码器精度一般在 12 ~ 20 位之间。

1.2 伺服运动控制系统的控制要求

在现代伺服运动控制系统的具体应用中,对其控制要求各不相同,差异很大。但从整体要求来看,一方面,在系统稳定的前提下,伺服系统对外施的指令信号要有很好的跟踪能力,尽量与指令信号保持一致,使之及时准确地复现指令信号;另一方面,在伺服系统的运行环境中一定会存在着不希望或避免不了的干扰,这些干扰可能会破坏系统的跟踪能力,以致增大系统的动态和稳态误差,这将使伺服系统偏离指令信号,因此,要求伺服系统具有很强的抑制干扰的能力,保证正常稳定运行,且性能基本不变,即系统对一切扰动要有充分的鲁棒性。这是两项最主要的基本要求。当然,每一伺服系统的服务对象不同,对伺服系统的要求有所侧重。有的强调跟踪性能,有的强调抗干扰性能,或对二者均有较高的要求,这就需要折中处理,要视具体对象的实际要求而定。

对于伺服系统的要求,通常可以用如下动态和静态指标来描述。

(1) 稳定性

所谓伺服系统的稳定性,是指在突变的指令信号或外来扰动作用下,伺服系统能够以最大允许速度达到新的平衡位置或恢复到原来的平衡位置的能力。在实际运行中,伺服系统经常要接受各种形式的指令信号,也必然要承受系统内部参数的摄动影响和来自外部的干扰。若系统没有较强的稳定性,则可能导致无法完成伺服驱动的任务,更谈不上有良好的动态、静态品质。所以,良好的稳定性和充分的稳定裕度是系统可靠运行的前提。

(2) 高精度

伺服系统驱动受控机械运动,要求受控机械严格按照指令信号所给定的规律进行运动,对其运动的速度和位置进行实时检测与控制,以便输出能够高精度地复现输入的指令信号。无论在动态还是静态中或受到干扰的情况下,都应该具有这种追踪指令、保证与指令高度一致的能力。

(3) 快速响应能力和抑制扰动能力

快速响应是伺服系统动态品质的一项十分重要的指标。它不但反映了系统对指令信号的跟踪速度,也反映了系统在受到扰动使原来运行状态遭到破坏后,如何快速抑制状态继续恶化并尽快恢复到原始状态的能力。总之,对指令的跟踪响应和对扰动的抑制,都要求伺服系统快速反应。实际上,静态是动态过程的一种特殊情况。从微观上看,被控量所谓处于静态,也不是绝

对静止不动的,而是在微观上的高速调节,才可能使被调量在宏观上保持相对静止。所以说,快速反应能力在系统的各项指标中最为重要。当然,快速性要服从系统的稳定性要求,对一个不稳定的系统,谈论它的快速性是毫无意义的。

1.3 现代伺服运动控制系统的特点

伺服系统通过伺服驱动装置将预定指令变成期望的机构运动,一般功率较小,并有定位要求和频繁启动、制动的特点。目前,在导航系统、雷达天线、精密数控机床、加工中心、机器人、打印机、复印机、磁记录仪、磁盘驱动器、自动洗衣、电梯等领域得到越来越广泛的应用。

20世纪80年代以来,随着现代电机技术、现代电力电子技术、微电子技术、控制技术及计算机技术的快速发展,交流伺服控制技术取得了极大进步,使得先前困扰着交流伺服系统的电机控制复杂、调速性能差等问题的解决取得了突破性的进展。交流伺服系统的性能日渐提高,价格趋于合理,使得交流伺服系统取代直流伺服系统,尤其是在高精度、高性能要求的伺服驱动领域,成为现代伺服驱动系统的一个发展趋势。归纳起来,先进伺服系统的发展趋势具有以下几个特点。

(1) 交流化

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

(2) 全数字化

采用新型高速微处理器和专用数字信号处理器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成为可能。

(3) 采用新型的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、功率场效应管和绝缘门极晶体管等。这些先进器件的应用显著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,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。这种器件将输入隔离,能耗制动,过温、过压、过流保护以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、高度集成化的、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。高度的集成化还大大地缩小了整个系统的体积,使得伺服系统的安装与调试工作得到了简化。

(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。新型的伺服控制单元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中由上位机加以修改,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,并实现其最优化。

(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工程技术在最近十年中得到了长足的发展,并显示出良好的发展势头。为适应这一发展趋势,新的伺服系统都配置了标准的串行通信接口和专用的局域网接口。这些接口的设置,明显地增强了伺服单元与其他控制设备间的互连能力,从而与数控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机连接成为完整的数控系统,也可以通过串行接口,

与可编程控制器的数控模块相连。

本书以 Rockwell 实验室的 PMSM 伺服系统为研究对象, 论述了伺服系统的组成、伺服系统的通信与组态、PMSM 的数学模型以及伺服系统的控制策略等。

沈阳大学的 Rockwell 实验室为辽宁省重点实验室, 实验室的伺服系统为三维高精密 PMSM 伺服系统 (如图 1-4 所示)。该系统为全数字化、智能化和网络化的交流伺服系统, 控制单元、功率驱动单元、永磁同步伺服电动机 (PMSM) 和位置检测单元均由 Rockwell 公司的运动控制组件来构建。

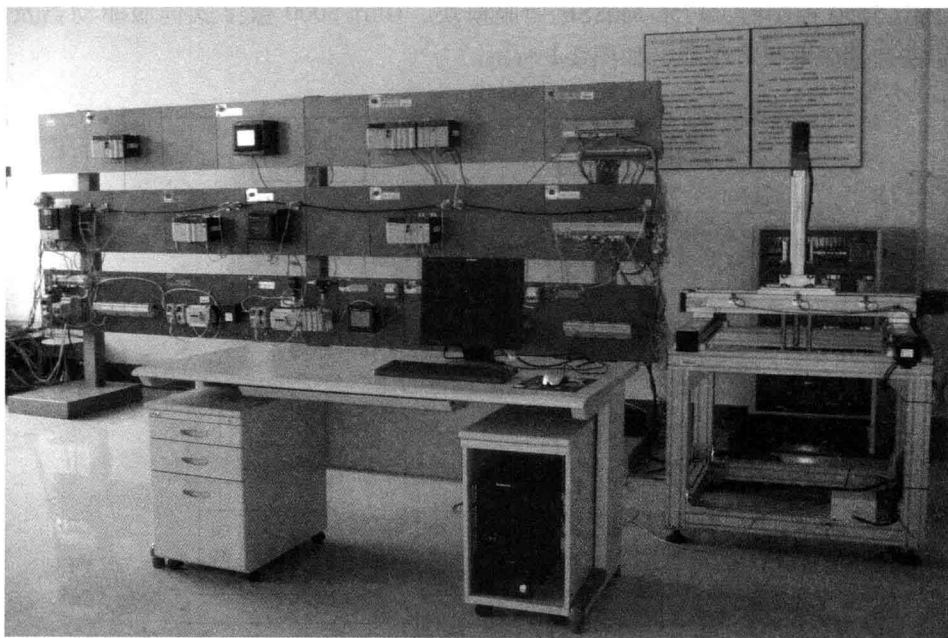


图 1-4 Rockwell 实验室的三维高精密 PMSM 伺服系统

第2章 Rockwell 实验室的 PMSM 伺服系统

Rockwell 实验室的伺服系统为三维高精度 PMSM 伺服系统，主要由 Logix 5550 控制器、1756-M08SE 伺服模块、Ultra 3000 数字式伺服驱动器及 Y-系列伺服电机等组成，如图 2-1 所示。

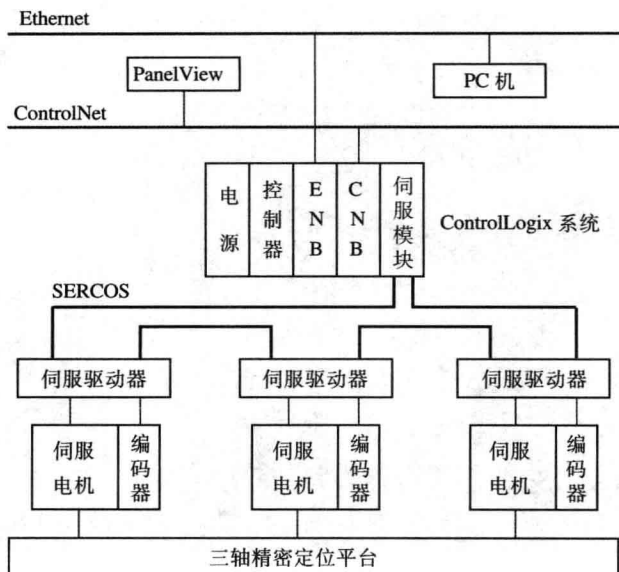


图 2-1 三维高精度 PMSM 伺服系统

系统中的 Logix 5550 控制器包含一个高速运动任务，该任务可执行运动指令并产生位置和速度分布信息，这些分布信息将发送给 1756-M08SE 伺服模块。

1756-M08SE 伺服模块是一种开放的控制器到数字式驱动器的接口，专门用于高速实时串行通信，构成高速位置环和速度环。通信采用光纤环网，每个轴的驱动器与伺服模块之间只需一根光纤连接。伺服模块从控制器接收轨迹信息，通过编码器输入位置反馈值，然后产生输出信号给驱动器。

Ultra 3000 驱动器可以驱动多种伺服电机，对于每一种应用都有最优的电机驱动组合，它支持多圈绝对值编码器，消除了代价高而耗时的机械回零周

期。Ultraware 软件提供了驱动器组态、监控、故障诊断及处理等功能,并且可以在离线状态下进行编程和试运行。

2.1 ControlLogix 系统

ControlLogix 系统看起来像一个可编程控制器,但是它又不仅仅是可编程控制器。传统的可编程序控制器只能完成单一的控制功能,ControlLogix 结构体系是一个技术先进的控制平台,它集成了顺序控制、运动控制、传动及过程控制等多种控制功能。

ControlLogix 系统能够把控制器、伺服模块和编程软件集中到一个运动应用中,如图 2-2 所示。运动指令已被嵌入到控制器模块内,运动控制与 ControlLogix 系统成为一体。Logix 5550 控制器模块可以实现全部的运动命令执行功能和运动轨迹规划功能。伺服模块已由最初的 2 轴模拟量伺服模块发展到现在的 16 轴带 SERCOS 接口的伺服模块。RSLogix 5000 编程软件可以为 ControlLogix 运动控制系统提供完善的编程及调试支持,同时还提供了轴组态向导,包括驱动器连接测试及自动调整。

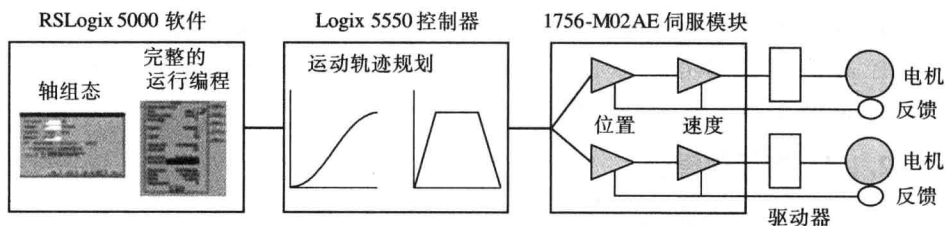


图 2-2 ControlLogix 运动控制系统

ControlLogix 系统是一种模块化系统,如图 2-3 所示。用户可以根据具体应用来选择任何数量的控制器模块、I/O 模块和通信模块。一个最小的 ControlLogix 系统可以只由一个控制器模块和一个 I/O 模块组成。ControlLogix 系统的通信模块不仅可以在 Ethernet、ControlNet 和 DeviceNet 之间进行桥接,还可以在已建立的网络如 DH+ 和通用 Remote I/O 之间实现桥接。

ControlLogix 系统具有以下特点。

(1) 无缝连接。不仅可以和所在网络上的设备进行信息交换,还可以与其他网络上的可编程控制器透明地收发信息。

(2) 快速。在背板上提供了高速数据传输总线,同时,控制器模块提供了高速传输的控制平台。

(3) 可组态。模块化结构使用户可以根据需要灵活地配置所需的控制器