

DSP 应用技术丛书

谢宝昌 任永德 编著

电机的 DSP 控制技术 及其应用

 北京航空航天大学出版社

电机的 DSP 控制技术及其应用

谢宝昌 任永德 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书以 ADI 公司嵌入式 DSP 芯片为核心,深入浅出地介绍了直流电机、感应电机、无刷直流电机、永磁同步电机、变磁阻步进电机和开关磁阻电机的 DSP 控制原理,以及上述各种电机控制硬件线路模块、传感器接口和 DSP 软件设计方法,同时给出了大量的实例和 DSP 程序软件清单可供相关人员参考。书中所有程序都在设计的实验目标板上调试通过。

本书可作为高等院校电机与电器、电气工程、电力电子与电气传动、工业自动化、机电工程等专业的高年级学生和研究生教材,也可作为科研机构 and 工程技术人员研究开发电机 DSP 控制系统的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电机的 DSP 控制技术及其应用 / 谢宝昌等编著. — 北京:北京航空航天大学出版社, 2005. 3

ISBN 7-81077-548-0

I. 电… II. 谢… III. 数字信号—信号处理—应用—电机—控制 IV. TM301.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 016054 号

电机的 DSP 控制技术及其应用

谢宝昌 任永德 编著

责任编辑 王慕冰

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail:bhpress@263.net

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1 092 1/16 印张:25.75 字数:659 千字

2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月第 1 次印刷 印数:5 000 册

ISBN 7-81077-548-0 定价:39.00 元

前言

数字化电机控制技术的发展使得电机这一古老的机电能量转换装置得到新的发展和广泛应用,并极大地提高了工农业生产效率,改善了人们的生活质量。

传统的直流换向器电机调速技术,因其优良的调速性能不仅没有退出电机控制这一领域,而且还起着相当重要的作用。但是,随着新材料、新工艺和新技术的不断出现和发展,无换向器电机控制技术却日新月异地发展,尤其在恶劣环境中正不断地替代传统的直流换向器电机控制系统。交流感应电机变频调速、矢量变换控制、空间矢量调制和直接转矩控制等技术采用数字信号处理器的实现越来越普遍。稀土永磁材料的发展极大地推动了无刷直流电机和永磁同步电机等新颖电机的发展,并且这些高功率、密度新颖的永磁电机结合电力电子控制器具有更高的效率和优良的控制性能,不仅在调速系统而且在位置伺服系统也得到越来越多的应用。

数字信号处理器(DSP)的发展及其高速运算能力为电机控制复杂算法的高速实时实现提供了硬件保障。由于 DSP 芯片内部集成了模/数转换、数字输入/输出、串口通信、电机控制 PWM 信号输出等接口,因此使得电机控制系统硬件设计更加灵活、简易。数字化控制缩小了原来采用模拟器件的系统体积且提高了可靠性,随着控制系统的批量增大,软件成本低的优势越来越显著。

然而,电机控制原理和 DSP 技术两方面相结合的书籍市场上很少,为满足社会对这两方面知识的需要,作者查阅了大量的国内外资料并撰写了这本书。

本书的任务是,一方面介绍 DSP 芯片的结构、功能和接口原理,深入浅出地阐述电机控制的各种基本原理和方法,以及电机控制所必需的常用信号检测元件,使读者对电机及其数字控制有较为系统的了解,以便为进一步解决实际问题打下理论基础;另一方面较为系统地介绍电机控制系统的硬件和软件设计方法,并提供大量的范例给读者参考,有助于读者快速地了解整个电机的 DSP 控制系统的框架、需要设计的重点及难点。

全书共分 6 章和 2 个附录。绪论概述了电机控制系统的发展、现状和类型,以及电机 DSP 控制系统的特点和开发工具。第 1 章系统地介绍了电机的 DSP 控制基础,包括 DSP 芯片,三闭环控制系统一般问题,常用信号检测与转换方法,数字控制器的 z 域分析、设计与实现,电机标幺值数学模型和数据定标问题等,为后续章节做铺垫。由于 DSP 芯片的指令集和寄存器内容十分重要但过于繁杂,因此由附录 A 和 B 列出。第 2 章介绍直流电机四象限 DSP 调速原理。第 3 章介绍感应电机控制原理。首先介绍变频调速原理,SPWM 波形的生成方法,开环和闭环变频调速系统;其次给出矢量的定义,并从最简单的电路出发建立绕组的矢量电压和磁

链方程,以此利用坐标变换推导出感应电机动态数学模型,获得各种形式的感应电机矢量变换控制模型,并给出转子磁场定向控制系统的 DSP 实现;接着介绍感应电机空间矢量调制原理,详细分析这种系统的 DSP 实现;最后介绍感应电机直接转矩控制原理及 DSP 实现方法。第 4 章介绍无刷直流电机工作原理、数学模型、位置信号检测、转速计算、电流调节器设计和调速系统的 DSP 实现。第 5 章介绍永磁同步电机位置伺服控制原理、基于矢量控制的闭环位置伺服控制系统、转子位置检测方法、速度观测器设计方法、无位置传感器控制方法和闭环位置伺服系统的 DSP 实现。第 6 章介绍变磁阻步进电机和开关磁阻电机的工作原理和 DSP 控制方法。虽然电机的种类和控制方法千差万别,但是本质上都是为了获得控制电力电子器件导通与关断的 PWM 波形,使电机按照指令要求运行。

本书第 6 章由任永德撰写,我负责其余各章撰写并统一定稿,全书由李仁定教授审阅。本书在选题和出版过程中得到 ADI 公司和北京航空航天大学出版社的大力支持,在此表示衷心的感谢。另外,还要感谢我的妻儿,如果没有他们的关爱、鼓励和支持,是难以完成这一任务的。

由于作者水平有限,加上时间紧迫,书中难免会有错误和不足之处,恳请读者批评指正。

谢宝昌
于上海交通大学
2004 年 4 月

目 录

第0章 绪 论

0.1 电机控制系统的发展和现状	1
0.2 电机控制系统的类型	4
0.3 电机 DSP 控制系统的特点	8
0.4 电机 DSP 控制系统的开发	9

第1章 DSP 控制基础

1.1 DSP 概述	11
1.1.1 芯片结构模块	14
1.1.2 系统及外设接口	16
1.1.3 DSP 性能比较	17
1.1.4 指令特点	19
1.1.5 开发工具	19
1.2 电机 DSP 控制系统的一般问题	20
1.2.1 三闭环控制系统结构	21
1.2.2 软硬件功能设计	23
1.3 DSP 控制的硬件基础	24
1.3.1 信号检测与转换	24
1.3.2 系统接口	34
1.3.3 模/数转换接口	35
1.3.4 三相 PWM 控制器	42
1.3.5 辅助 PWM 控制器	51
1.3.6 可编程数字 PIO 接口	52
1.3.7 串行口	54
1.4 DSP 控制的软件基础	58
1.4.1 软件设计思想	58
1.4.2 中断控制	65
1.4.3 DSP 控制的 z 域分析	67
1.4.4 电机的标幺值数学模型	92
1.4.5 数据格式及定标	95

第2章 直流电机 DSP 调速控制

2.1 直流电机四象限运行控制电路	97
-------------------------	----

2.1.1 直流电机动态数学模型	97
2.1.2 直流电机的调速原理	101
2.2 直流斩波调速控制原理	103
2.2.1 直流电机的调速控制主电路	103
2.2.2 直流电机的调压调速控制策略	108
2.3 DSP 控制软件设计	111

第3章 感应电机 DSP 控制系统

3.1 感应电机变压变频调速系统	123
3.1.1 变频调速原理	123
3.1.2 变频曲线选择	129
3.1.3 开环 PWM 调速控制系统	130
3.1.4 恒频 SPWM 波形的产生	132
3.1.5 变频 SPWM 波形的产生	135
3.1.6 闭环变频调速系统	143
3.2 感应电机数学模型	147
3.2.1 坐标系统及其变换	148
3.2.2 感应电机数学模型	155
3.3 感应电机矢量变换控制原理	160
3.3.1 矢量的定义	161
3.3.2 定向磁场和磁场定向控制	162
3.3.3 磁链发生器	168
3.3.4 磁链观测器	169
3.3.5 转子磁场定向控制系统的 DSP 实现	177
3.4 感应电机空间矢量调制技术	193
3.4.1 空间矢量调制原理	193
3.4.2 空间矢量调制系统的 DSP 实现	202
3.5 感应电机直接转矩控制	212
3.5.1 直接转矩控制的原理	212
3.5.2 转矩计算	222
3.5.3 开关状态选择	222
3.5.4 直接转矩控制系统的 DSP 实现	229

第4章 无刷直流电机 DSP 控制

4.1 无刷直流电机工作原理	249
4.1.1 无刷直流电机结构与控制线路	249
4.1.2 无刷直流电机数学模型	260
4.2 位置信号检测 DSP 接口	269
4.2.1 位置传感器检测信号接口	269

4.2.2 无位置传感器检测信号接口	271
4.3 转速计算	275
4.4 电流调节器设计	276
4.5 无刷直流电机调速系统的 DSP 实现	278

第 5 章 永磁同步电机位置伺服控制

5.1 永磁同步电机	296
5.2 位置伺服系统控制原理	300
5.2.1 同步电机矢量控制	301
5.2.2 闭环位置伺服控制系统的工作原理	327
5.2.3 转子位置检测	330
5.3 闭环位置伺服系统软件设计	341
5.3.1 位置检测和速度计算	341
5.3.2 电流调节器设计	345
5.3.3 闭环位置伺服系统的 DSP 实现	346

第 6 章 变磁阻电机 DSP 控制

6.1 步进电机的 DSP 控制	358
6.1.1 步进电机的工作原理	358
6.1.2 步进电机的开环控制	361
6.2 开关磁阻电机的 DSP 控制	367
6.2.1 SRM 的工作原理	368
6.2.2 SRM 的控制方式	375

附录 A ADSP-21xx 系统指令集

A.1 算术逻辑单元指令集	379
A.2 乘累加 MAC 指令集	380
A.3 移位指令集	380
A.4 数据移动指令集	381
A.5 复合函数指令集	382
A.6 程序流程控制指令集	384
A.7 其他指令集	384

附录 B ADSP-21xx 寄存器

B.1 DSP 内核非存储器地址映射的控制和状态寄存器	386
B.2 DSP 内核存储器地址映射的控制和状态寄存器	388
B.3 DSP 外设接口的存储器地址映射的控制和状态寄存器	395

参考文献

第 0 章

绪 论

0.1 电机控制系统的发展和现状

电机控制系统的发展从主传动机电能量转换角度来说,由机械控制系统(如齿轮箱变速)、机械和电气联合控制系统(如感应电机电磁离合器调速)发展到全电气控制系统(基于电力电子电源变换器的电机控制系统);从控制电路来说,由模拟电路、数字和模拟混合电路发展到全数字电路控制系统;从控制策略来说,最初是低效有级控制(如直流电机电枢回路串分级电阻调速、绕线式感应电机转子回路串电阻与鼠笼式感应电机变极调速),接着是低效率无级控制(如感应电机改变转差率调速),后来又改进成高效率无级控制(如直流电机斩波调压调速、交流电机变频调速、交流电机矢量控制与直接转矩控制系统),现在发展到高性能智能型控制系统(如自适应系统参数辨识与自校正控制、神经元或神经网络控制、模糊逻辑控制、模糊神经网络控制等电机控制系统);从电力电子控制器结构来说,由体积庞大的电子管控制系统、小功率晶体管控制系统、大功率无自关断能力的晶闸管控制系统发展到全控型电力电子器件(包括 GTO、MOSFET、IGBT 和 IGCT 等)构成的控制系统,仅用于电机控制系统的各种电源变换器就有 AC/DC 可控整流器、DC/DC 斩波器、DC/AC 逆变器、AC/DC/AC 交直交变换器、AC/AC 循环变换器和矩阵变换器等。

电机控制系统分发电机和电动机两个方面,就电动机的控制目标来说,主要有速度控制和位置控制两大类。电机的速度控制系统也称为电机调速系统,它广泛地应用于机械、冶金、化工、造纸、纺织、矿山和交通等工业部门。电机的位置控制系统或位置伺服系统也称为电机的运动控制(Motion Control)系统。电机的运动控制系统是通过电机伺服驱动装置将给定的位置指令变成期望的机构运动,一般系统功率不大,但有定位精度要求,并具有频繁启动和制动的特点,在雷达、导航、数控机床、机器人、打印机、复印机、扫描仪、磁记录仪、磁盘驱动器和自动洗衣机等领域得到广泛应用。

自 1831 年法拉第发现电磁感应原理以来,直流电机和交流电机相继问世,以后各种特殊用途的电机类型不断出现,极大地推动了电力工业和电气传动技术的发展。但是绝大部分电能是由三相交流同步发电机提供,而大部分交流电又由交流电机使用,特别是感应电机。直流

电机由于控制简单、调速平滑、性能良好,在电机控制领域一直占据主导地位。然而,直流电机结构上存在的机械换向器和电刷,使它具有难以克服的固有缺点,如造价高,维护难,寿命短,存在换向火花和电磁干扰,电机最高转速、单机容量和最高电压都受到一定限制等。

1973 年开始爆发的全球石油危机,使工业发达国家开始意识到新能源和能源高效利用的重要性,并投入大量人力、物力和财力研究节能措施,开发新能源。在将其他形式的能源转换成电能的过程中,一方面要高效利用原能源,另一方面要高效率地发出高质量的电能。在新能源开发方面,除了核电以外主要有风能、太阳能、生物质能、地热能和潮汐能等。如风力发电,通过风力发电机的叶片最大限度地捕获风能,再经主轴和升速齿轮箱变速,最后由感应发电机发电。由于风能的随机性和叶片转速变化范围很大,感应发电机必须在很宽的转子转速范围内发出高质量的电能,而普通感应发电机随着转差率的增大效率下降,因此采用双馈感应发电机,通过调节转子绕组的电压、频率和相位控制感应发电机输出电压和频率稳定且功率因数高的高品质电能。随着新能源的发展,电动机的供电电源也发生了变化,比如蓄电池供电,而蓄电池的能源除了常规和新能源充电产生的以外,还有各种以电化学反应为主生产的电能,如铅酸电池、镍氢电池、锌空电池、锂电池和燃料电池(如氢气和氧气通过质子交换膜进行电化学反应等),这些新型动力电源已应用于电动车辆的电机驱动。

在节能方面,人们发现使用极其广泛的交流感应电机带动的负载是风机或泵类等变转矩负载,以前调节负载依靠的是阀门和挡板来调节流量或压力,而电机一般工作在恒速状态,而造成大量电能的浪费。采用经济节能型变频调速装置控制交流感应电机将成为这类变转矩负载拖动的重要节能手段。

随着电力电子技术、微电子技术和稀土永磁材料的飞速发展,高性能电机控制系统技术不断地更新,成本不断地降低,新型电机不断地出现,交流电机驱动系统正不断地取代直流电机控制系统。提高电机控制系统性能的研究工作主要有以下几个方面。

1. 新型功率控制器件和 PWM 技术应用

可控型功率控制器件的不断进步为电机控制系统的完善提供了硬件保证,尤其是新的可关断器件,如门极可关断器件(GTO)、大功率晶体管(GTR)、双极结型晶体管(BJT)、金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)、绝缘栅可换向晶闸管(IGCT)等的实用化,使得高频、高压、大功率 PWM 控制技术成为可能。电机控制的基本手段就是如何控制 PWM 波形使得功率控制器件输出的电压和电流波形能满足电机高性能运行的要求。

目前电力电子技术正朝着高频、高压、大功率、多电平和智能化方向发展。例如,直接与高压电网连接的高压感应电机调速控制目前采用耐压等级高的 GTO 构成多电平交直交变换器,其开关频率低且输出电压和频率调节范围宽。低压交流电机控制采用集成的智能功率模块,控制系统中各种芯片需要的低压稳压电源采用高频功率变换电路,以及机器人各关节驱动电机的协调控制等都离不开功率控制器件。如果说人是依靠大脑来控制肢体运动的,那么电机控制系统是依靠计算机或信号处理芯片来控制电力电子器件驱动电机运动的。现代电机控制系统都是依靠电力电子器件构成变流装置的,即采用以强电为动力,以弱电控制强电,强弱电结合这一关键技术。典型的功率控制器有直流斩波器、交直交电流型或电压型变换器、交交循环变换器和矩阵变换器等。直流斩波器主要优点是可将直流电压升高或降低,它广泛应

用于开关电源。交直交电流型变换器的优点在于可实现自然换相,并且容量可以做得很大,但平波电抗器比较笨重,当电源存在干扰时会造成换相失败。对于绝大多数中小型电机来说,主要采用交直交电压型变换器。目前已有采用 MOSFET 和 IGBT 器件的变频器产品,开关频率可达到 20 kHz,实现无噪声驱动。值得注意的是,国外正在加紧研制新型变频器,如矩阵变换器,高功率因数可控补偿变换器,中性点钳位、级联式和飞跨电容式多电平变换器,电机控制系统将得到新的发展。

2. 矢量变换控制技术与现代控制理论的应用

感应电机是一种多变量、强耦合、非线性的机电一体化执行元件,传统的电压与频率之比恒定的控制策略是以电机本身稳态运行为立足点,即从电机机械特性出发分析研究电机的运行状态和特性,其动态控制效果不够理想。20 世纪 70 年代初德国学者在前人提出的坐标变换基础上提出了感应电机矢量变换控制方法。该方法的基本思想是,将感应电机的定转子绕组分别经过坐标变换后等效成两相正交的绕组,并从转子磁场的角度观测实现了感应电机电气变量的解耦控制。矢量变换控制主要研究感应电机动态控制过程,不但控制电流和磁通等变量的幅值,同时控制这些变量的相位,并利用现代线性系统控制中状态重构和估计的概念,巧妙地实现了感应电机磁通和转矩在等效两相正交绕组状态下的重构和解耦控制,从而促进了感应电机矢量控制系统的实用化。矢量变换控制方法已经从最初的感应电机推广到了同步电机的控制,并出现了基于矢量变换的各种控制形式。目前国外变频器驱动感应电机均采用矢量变换控制技术,并用于钢厂轧机主轴传动、电力机车牵引系统和数控机床中。此外,为了解决矢量变换控制系统的复杂性和控制精度问题,到 20 世纪 80 年代中期又相继提出了新的控制方法,如直接转矩控制、空间矢量调制技术和定子磁场定向控制等。尤其是利用微处理器实时控制,使得现代控制理论中各种控制方法得到应用,如最优控制、滑模变结构控制、模型参考自适应控制、状态观测器、扩展卡尔曼滤波器和智能控制等,提高了控制过程的动态性能,增强了系统的鲁棒性等。

3. 微机、微处理器和数字信号处理器(DSP)的应用

随着微电子技术的发展,微机和数字控制处理芯片的运算能力和可靠性得到很大提高,以单片机为控制核心的全数字化控制系统不断地取代传统的模拟器件控制系统。但是单片机只能处理信息量不大的简单系统,对于交流电机这样复杂的控制系统,要求存储多种数据并具有快速、实时处理能力,可采用微机、微处理器或 DSP 芯片的嵌入式解决方案。这样可以将系统控制、故障监视、诊断和保护、人机交互接口等功能集成一体,实现高性能复杂算法的控制系统。此外,可编程逻辑控制器(PLC)、现场总线系统(FBS)、现场可编程门阵列(FPGA)和控制局域网(CAN)与微机相结合在电机控制系统中的应用也不断深入。

4. 新型电机和无传感器控制技术研究

各种电机控制系统的发展对电机本身也提出了更高的要求,需要研究新型电机设计、动态建模和控制策略,如直接联网高压电机设计、永磁电机设计、超声波电机设计、交流励磁发电机转子交流励磁控制、双馈感应电机设计和控制、磁悬浮直线电机设计、电子线路板元器件布置平面电机设计、开关磁阻电机设计与驱动控制、电机阻尼绕组的合理设计、感应电机转子鼠笼导条的故障诊断以及三维物理场的计算等问题。

随着人们生活水平的提高、生命质量的改善和环境保护意识的增强,绿色环保电动车辆用高功率密度电机、人工器官和辅助装置驱动的微电机、机器人及运动控制系统中得到重视和广泛应用的稀土永磁材料研制的高速永磁电机以及转子无绕组的开关磁阻电机等都有迅猛发展。开关磁阻电机与反应式步进电机类似,但开关磁阻电机利用转子位置传感器可有效地控制失步问题。永磁电机由于转子采用永磁材料没有励磁绕组和励磁损耗,电机功率密度和效率更高,但是为了防止失步也需要转子位置传感器。

高性能的控制系统利用位置传感器或速度传感器检测转子位置或速度,而这类机械传感器使系统体积增大,可靠性降低,成本提高,而且易受环境的影响。为此,研究无传感器的控制系统成为研究的新热点。无传感器的电机控制方法是利用检测到的电机状态信号(如电压和电流信号),通过基于电机控制数学模型而设计的位置或速度观测器实时计算出电机转子位置或速度。由于算法复杂,计算量大,需要采用具有高速计算能力的 DSP 芯片,因此研究 DSP 芯片硬件和软件,实现电机控制复杂的算法成为无传感器电机控制系统的关键。

0.2 电机控制系统的类型

电气传动系统和位置伺服系统中,采用各种各样的驱动电机,如直流电机、感应电机、电励磁同步电机、永磁无刷直流电机、永磁同步电机、开关磁阻电机和步进电机等,如图 0-1 所示。这些驱动电机根据运动机构的运动方式可以是盘式或圆柱式旋转电机,也可以是直线电机、平面电机或三维运动电机。旋转电机的气隙主磁场方向可以是径向磁场、轴向磁场或横向磁场,而且气隙的数量可以是单个、两个或多个等,定转子结构位置可以是内转子、外转子、双转子或双定子等形式。电机控制系统根据不同的电机类型可以分为以下几种。

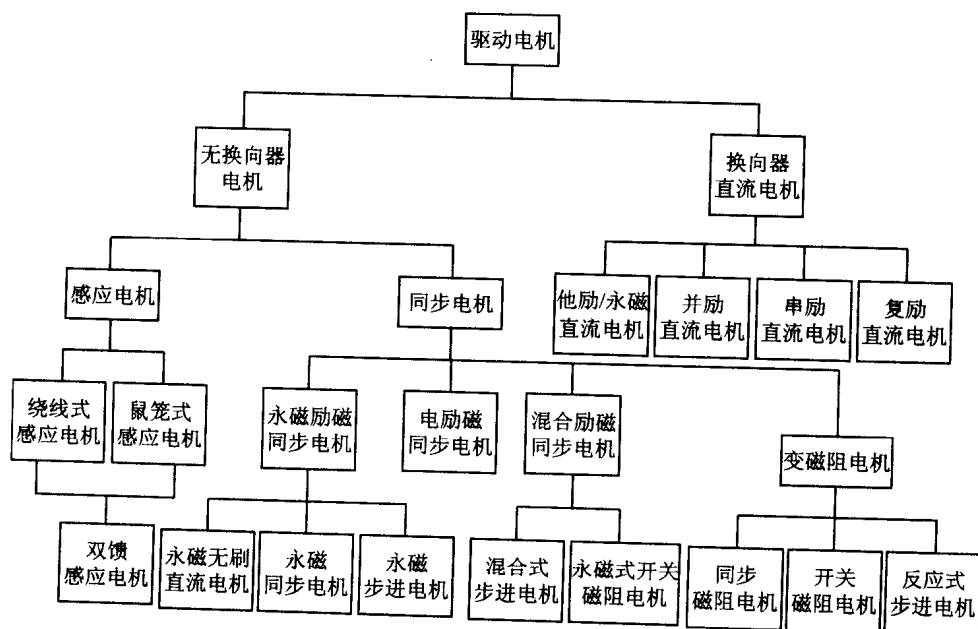


图 0-1 驱动电机分类

1. 直流电机控制系统

直流电机由于励磁磁场和电枢磁场完全解耦,可以独立控制,因此具备良好的调速性能,出力大、调速范围宽和易于控制,广泛应用于电力拖动系统中,如车辆牵引直流电动机、轧钢用直流电动机、港口起重用直流电动机、小功率直流位置伺服系统用直流伺服电动机等。传统的调速方法主要是电枢回路串电阻调速、调压调速和改变励磁磁通调速等,20世纪70年代以前直流电机控制系统在电机控制系统中占有绝对主导地位,现在除了老的直流电机控制设备以外,在某些场合仍然采用直流电机控制系统。

2. 感应电机控制系统

感应电机定子一般为对称多相绕组,转子可以是绕线式,也可以是鼠笼式绕组。由于转子结构的不同就有不同的控制策略,如绕线式感应电机可以实现转子串电阻调速、串级调速和变频双馈调速控制等,而鼠笼式感应电机可以实现定子变频、变极调速和变极变频平滑控制等。现代交流感应电机控制主要有以下几种:

(1) 矢量变换控制系统

矢量变换控制(Transvector Control)也称为磁场定向控制(Field-Oriented Control)。所谓矢量变换控制,就是经过一系列矢量变换(对电压、电流、磁链等物理量),将感应电机数学模型变换至正交的旋转坐标系中,并对各物理量的幅值和相位实现解耦控制。在1971年德国学者F. Blaschke提出的矢量变换控制方法中,正交旋转坐标系统的直轴为励磁轴与转子磁场重合,交轴为转矩轴,转子磁场的交轴分量为零,电磁转矩方程得到简化,即在磁场恒定的情况下,电磁转矩与交轴电流分量成正比,因此,感应电机的机械特性与他励直流电机的机械特性完全一样,实现磁场与转矩的解耦控制。由于直轴与转子磁场重合,因此也称为转子磁场定向控制。为了保持转子磁场恒定的控制,必须观测转子磁场实现反馈控制,因此利用转子电压方程构成磁通观测器,但由于转子参数(特别是电阻)受环境温度的影响较大,在一定程度上影响了系统的控制性能。目前有很多转子参数辨识的方法,实现实时补偿,提高系统动态性能。除了转子磁场定向控制外,还有气隙磁场定向和定子磁场定向控制。

(2) 转差频率矢量控制系统

感应电机稳态运行时存在转差率,而转差率对感应电机的性能有很大影响,转差率越小效率越高,控制感应电机转差率或转子的转差频率就能高效率地控制感应电机。转差频率矢量控制系统是对传统矢量控制系统的简化,人们采用忽略转子磁链幅值的动态变化,认为转子磁链是稳定的,这样在转子磁场定向坐标系统中,定子电流的直轴分量可以确定,而交轴分量可以由电磁转矩表达式确定。因为当转差率很小时,电磁转矩与转差率成正比关系。当感应电机进行调速控制时,利用给定速度信号与实际速度值的差,由速度调节器确定感应电机的电磁转矩及相应的转差率,进一步可知转差频率的大小,只要控制转差频率就可以很好地控制感应电机调速。这类简单、高效的调速系统在节能型风机、泵类负载中的应用相当广泛。

(3) 直接转矩控制系统

直接转矩控制(Direct Torque Control)是在20世纪80年代中期提出的新的交流电机控制理论。直接转矩控制是在定子坐标系统中计算磁通和电磁转矩的大小和位置角,通过磁通幅值和转矩的直接跟踪来实现高性能动态控制。由于磁链的幅值限制在较小的误差范围内,对转矩控制性能不会有大的影响,因此直接转矩控制方法对电机参数变化不敏感,与转子参数

无关;同时,由于对电压空间矢量的优化控制,降低了逆变器的开关频率和开关损耗,提高了控制系统的效率。

(4) 空间矢量调制控制系统

空间矢量调制(Space Vector Modulation)控制技术是为了提高气隙磁场稳定性,减少谐波,优化功率控制器开关模式,降低开关损耗,根据定子磁场的运动规律,选择合适的基本电压空间矢量进行合成以产生其他所需要的电压空间矢量。这种空间矢量调制方法产生的基波电压幅值要高于基于三角载波与正弦波比较实现的正弦脉宽调制(Sinusoidal Pulse Width Modulation,简称 SPWM)产生的基波电压幅值,提高了电源电压的利用率。

(5) 智能控制系统

智能控制(Intelligent Control)系统主要根据人工智能理论,如模拟人脑物理模型的人工神经网络(Artificial Neural Network)、模拟人脑不确定思维或推理过程的模糊逻辑理论(Fuzzy Logic Theory)等,更精确地模拟电机的非线性性,以此确定智能控制模型的输出量大小,进而确定功率控制器开关模式。电机的智能控制系统算法极其复杂,需要具有高速、实时计算能力的微机或 DSP 芯片来实现,目前仍处于实验室研究阶段,但是智能控制系统将是电机控制的发展方向。

3. 同步电机控制系统

(1) 电励磁同步电机控制系统

普通电励磁同步电机采用交直交电流型逆变器供电,整流和逆变电路均采用晶闸管,利用同步电机电流可以超前电压的特点,使逆变器的晶闸管工作在自然换流状态,同时检测转子磁极位置,用来确定逆变器晶闸管的导通与关断,使电机工作在自同步状态。这种控制系统也称为自控式同步电机控制系统。这种系统的特点是容量大且转速高,技术比较成熟;缺点是三相正弦分布绕组由电流源逆变器供电,电机低速运行时转矩波动大。此外,电励磁同步电机也可以采用交交变频器供电驱动。

(2) 永磁无刷直流电机控制系统

最早将永磁用于电机励磁系统的历史可以追溯到 1831 年,J. Henry 等采用钨钢制成的硬性永磁材料,但永磁性能很差。到 1932 年铝镍钴(AlNiCo)永磁材料的发现,使永磁励磁得到了新生,但应用仍局限于小功率直流换向器电机。过去的数十年是永磁材料飞速发展的时期,永磁电机,特别是稀土永磁(如钕铁硼 NbFeB、钐钴 SmCo 等)同步电机在电动驱动系统中越来越受到重视和青睐,而且我国的稀土资源十分丰富,具有明显的优势发展稀土永磁电机,虽然价格比较昂贵,但永磁电机具有明显的优点。例如,没有电励磁绕组,无励磁损耗,效率高;单位体积转矩和输出功率更高,相同功率电机可以显著地减小电机的体积和重量;气隙磁通密度高,动态性能好;无励磁绕组,结构和维护简单。随着永磁材料价格的下降,成本也会相应地下降。

永磁交流电机根据驱动电源波形分为方波和正弦波,前者称为直流无刷永磁电机或永磁无刷直流电机,而后者称为永磁同步电机。方波驱动永磁无刷直流电机控制系统,转子采用永磁材料,定子为集中绕组,这样气隙磁场和定子绕组中的反电动势是梯形波,当定子绕组通过方波电流,且电流与反电动势同相位时,理论上可以产生恒定的电磁转矩。但是由于定转子齿槽效应,电枢电流存在换流,因此转矩是脉动的。永磁无刷直流电机的主要特点是磁极位置检

测与无换向器电机一样非常简单,通常为磁敏式霍尔位置传感器,驱动控制易于实现,主要用于恒速驱动、调速驱动系统和精度要求不高的位置伺服系统。其缺点是定子绕组存在电感,电流不可能是方波,在换相时刻的电流变化会造成转矩脉动,对系统低速性能有一定影响。

(3) 永磁同步电机控制系统

正弦波驱动永磁同步电机控制系统,电机转子采用永磁材料,定子绕组与普通同步电机一样为对称多相正弦分布绕组。如果通以对称的多相交流电,会产生恒定的旋转磁场和平稳的电磁转矩。采用矢量控制技术可以使直轴电枢电流等于零,达到直接控制交轴电枢电流与电磁转矩的目的。系统控制性能好;也可以利用单位电流电磁转矩最大方式控制,增大出力;对于气隙较小的永磁同步电机,可以采用直轴电枢电流为负值实现弱磁控制,扩大调速范围,主要用于恒速驱动、调速驱动系统和高精度位置伺服系统,如计算机外设、办公设备、医药仪器、测量仪表、轿车、机器人和其他加工系统。缺点是需要价格昂贵的永磁材料、转子位置传感器,如绝对式位置编码器、增量式位置编码器或旋转变压器等。目前研究的重点主要是削弱齿谐波、转矩脉动和消除位置传感器技术。

4. 变磁阻电机控制系统

变磁阻电机(Variable Reluctance Machine)的定子有多个磁极,磁极上有集中绕组,一旦通以电流就产生励磁磁场,而转子无励磁绕组或永磁体只有齿槽结构。变磁阻电机转子运动时,气隙磁阻是不断变化的。其工作原理是利用气隙磁场总是使得转子齿与定子磁场磁极位置对齐、磁阻最小或磁场最强的方式运行。由于转子是磁阻性质的结构,因此工作电流的方向与运行状态无关。变磁阻电机主要有同步磁阻电机、反应式步进电机和开关磁阻电机等。

(1) 步进电机控制系统

步进电机是一种电磁式增量运动执行元件,它将输入的电脉冲信号转换成机械角位移或线位移信号,因其输入是脉冲信号,执行机构运动是断续的,故又称为脉冲电动机。

步进电机种类很多,其结构和原理也不尽相同。根据结构可以分为3类:反应式步进电机、永磁式步进电机和混合式步进电机。永磁式步进电机与永磁无刷直流电机类似,转子永磁定子集中绕组。反应式步进电机定子磁极表面开有齿距与转子齿距相同的小齿槽,根据步进电机的相数确定导通方式,如三相单拍、单双拍,五相双三拍等。混合式步进电机转子既有永磁又有齿槽。由于步进电动机的步距不受外加电压波动、负载变化、环境条件变化的影响,其启动、停止或反转都是由脉冲信号控制的,因此在不丢步的情况下,其运行的角位移或线位移误差不会长期积累。这也是步进电动机特别适合简单、可靠的开环数字控制系统应用的原因,如数控机床、机器人、磁盘驱动器、打印机、复印机等应用的驱动步进电机。

(2) 开关磁阻电机控制系统

开关磁阻电机雏形在19世纪40年代就已问世,但直到20世纪60年代大功率晶闸管应用开关磁阻电机才得以深入研究。1967年英国里兹(Leeds)大学对开关磁阻电机的研究表明开关磁阻电机可以实现四象限运行,性能成本可以与同容量异步电机媲美。1975年英国诺丁汉(Nottingham)大学和英国里兹大学的两个研究小组联合参加了Chlorida Technical有限公司的研究项目,研制成功50 kW开关磁阻电机驱动系统并用于蓄电池供电的电动车辆,研究成果表明开关磁阻电机具有宽范围的调速性能和宽范围、高效率曲线,性能要优于同类异步电机驱动系统。1980年英国里兹大学P. J. Lawrenson教授领导的研究小组,系统地总结了开

关磁阻电机的研究成果,在国际著名的学术期刊 IEE Proceedings Part B 上发表的论文 *Variable-speed Switched Reluctance Motors* 标志着开关磁阻电机的研究进入了新的阶段。

开关磁阻电机的结构与反应式步进电机相似,但在结构上开关磁阻电机的定转子齿数较少,而且定子齿数与转子齿数一般不相同,如 6/4、8/6、12/8 等组合。定子磁极上有集中绕组,通以励磁电流产生转矩,转子存在齿槽,无绕组和永磁励磁,结构简单可靠。在控制方法上,开关磁阻电机根据转子位置反馈信息进行电流换相控制。在运行性能方面,开关磁阻电机由于转子坚固可以高速运行,且适当控制导通角和关断角就可以使其运行在电动机状态或发电机状态,因此广泛用于高速航空发动机、电动车辆驱动等领域。开关磁阻电机的绕组电流只需要单方向控制,而且相数少,因此控制系统主电路拓扑结构简单。开关磁阻电机主要存在转矩脉动、振动和噪声,以及需要转子位置传感器实现闭环控制等问题。

0.3 电机 DSP 控制系统的特点

电机的 DSP 控制系统大都是由数字部件和模拟部件组成的混合系统,而全数字控制系统则是当前发展的方向。在电机的 DSP 控制系统中,通常存在模拟信号和数字信号,既有连续信号,又有离散信号。例如,电机的电流和电压为连续模拟信号,它们经过采样保持后成为离散模拟信号;利用键盘输入的给定信号是数字信号,绝对编码器检测的位置信号也是数字信号。虽然 DSP 有模/数转换接口,但是模/数转换需要花费芯片计算时间,而且 DSP 操作运算时只能识别和处理数字量,只能依次处理,所以 DSP 与外界信息传递和处理总是一个采样过程,电机的 DSP 控制系统也必然是一种离散系统。

传统的数字控制系统通常以单片机或微机为核心,而 DSP 构成的电机控制系统相对于单片机或微机具有更高的精度和速度,而且存储量大,具有逻辑控制功能和各种中断处理能力,丰富的数字输入输出、通信口、专用电机控制 PWM 输出,各种控制硬件集成在同一芯片中。随着大规模与超大规模集成电路技术的发展,DSP 芯片的功能将会越来越强大。

电机的 DSP 控制系统有如下特点:

- 采用哈佛结构或改进的哈佛结构,使数据与程序相互独立的总线结构提高了计算能力;具有丰富的逻辑判断功能和大容量的存储单元,因此可以实现复杂的控制规律,如参数辨识、优化控制、智能控制等现代控制理论和算法的应用。
- 简化电机控制器的硬件设计,体积小,重量轻,能耗低也是 DSP 芯片的优点。
- 系统可靠性高。由于芯片设计保证内部元器件在额定工作状态下平均无故障时间远远超过分立元件构成的模拟电路。
- 数字电路不存在温漂问题,不存在参数变化的影响。被控量可以很大也可以很小,内部计算精确度都很高,但由于字长受硬件限制而存在量化误差。因此,采用适当的定标可以避免数据溢出,并保证计算精度。
- 硬件的统一性与软件的灵活性有机结合,DSP 电机控制电路硬件可以统一,如 DSP 控制三相逆变器驱动相应的感应电机、无刷直流电机、永磁同步电机,其硬件结构基本统一,但软件可以根据具体电机的控制规律进行设计和编写,而且可以根据电机不同的工作状况,选择最有利的参数、控制系统结构、控制策略等,使系统具有很强的灵活性。

- 可以实现复杂的数字控制计算,除了指令、信号反馈、加减乘除和逻辑运算外,还可以实现诸如状态估计、数字滤波、监控、报警、故障诊断和保护等功能。

0.4 电机 DSP 控制系统的开发

1. 开发步骤

电机的 DSP 控制系统的开发过程包括任务确定、总体设计、硬件和软件设计、硬件和软件分别调试、硬件和软件联合调试、现场调试、工业试验、系统性能评估、文件编制等步骤。

确定设计任务之前,要进行详细的调查研究,做可行性分析。通过查阅国内外同类产品或相关产品的信息资料,筛选出有用信息,经过分析研究后确定设计任务的可行性。同时要确定电机 DSP 控制系统的各项功能,即输入/输出信号的类型(速度、位置等)和相应的控制策略。功能中还应包含各项技术指标,如控制范围和精度、动态响应速度、稳定性、可靠性、可维护性、性能价格比,甚至振动和噪声、电磁兼容性等。技术指标的确定要在可行的基础上达到先进性,有些指标可能无法精确预计,要在系统的研制过程中不断调整和修改。

确定设计任务以后进行总体设计。首先是选择 DSP 芯片。芯片只要能满足设计任务要求,外部引脚尽可能少,且市场价格低廉。其次确定总体硬件布置方案和软件设计框架。硬件布置以功能模块为主,DSP 控制部分是弱电部分,电源管理(如多路独立电压源产生与滤波)、键盘与显示、功率驱动部分、传感器信号检测和变换部分以及强弱电隔离和外部接线端等均宜采用模块化设计。软件设计主要考虑控制策略、算法流程、中断处理优先级和处理方式。由于硬件和软件不是绝对割裂的,有的硬件功能可以由软件取代,而有的软件功能也可以由硬件完成。因此,总体设计时,硬件与软件的分工应明确,同时兼顾硬件成本和软件开发工作量,因为对于每一个产品,硬件成本不因产品批量大小而变化,但是软件开发成本是一次性的,它随着产品批量的增大而减小。

硬件和软件设计。在模块化硬件设计中,每个模块元器件的选择很重要,既要考虑价格因素,又要注意系统的可靠性。尤其是在分立元件与集成电路模块两者方案的选择上往往举棋不定,一般采用集成电路模块有利于提高系统的性能。有的硬件模块可以单独设计制板,这样测试和检修方便。印刷电路板的布线密度尽可能均匀,要注意强弱电大小及其隔离、数字地与模拟地隔离、寄生电容与寄生电感等抗电磁干扰问题。软件设计结构要简单,一般由一个主程序、若干个子程序以及中断处理程序构成。为了提高系统的实时性,中断处理程序要尽可能简短,它只完成一些基本的必不可少的工作,如输入或输出一个信号以及完成必须立即处理的运算操作等。软件设计要具有通用性和易读性,便于修改和移植。

硬件和软件分别调试。硬件调试主要分析电源是否正常供电,即电压大小是否符合要求,如 DSP 芯片的电压极性、大小和稳定性,其他集成电路芯片、运算放大器、传感器的电压极性、大小和驱动能力等,检测线路是否存在不正常的焊点,判断驱动逻辑是否正常,判断接口功能与逻辑是否正确,判断故障显示与保护功能是否正确等。软件调试通常在开发工具支持的软件环境下进行,主要检查程序语句的语法是否正确、通过数据或程序存储单元等判断逻辑与数据传送、计算结果等是否正确,使用看门狗定时器监控程序工作是否正常等。

硬件和软件联合调试。硬件和软件在联合调试过程中还会出错,一旦出错就要认真分析