

11
高等学校教材

交流伺服运动控制系统

舒志兵 等 编著



清华大学出版社

高等学校教材

交流伺服运动控制系统

主编姓名：舒志兵 周玮 李运华 冬雷 车延博

工作单位：南京工业大学 东北大学 北京航空航天大学 北京理工大学 天津大学

副主编姓名：许宏 钱平 曲延滨

工作单位：中国计量学院 上海应用技术学院 哈尔滨工业大学

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书主要介绍全闭环交流伺服驱动技术、DSP 交流伺服系统技术、PLC 交流伺服系统技术、基于现场总线的运动控制技术和运动控制卡等几项具有代表性的新技术,重点分析了现代交流伺服运动控制系统的检测技术及检测元件、系统数学模型分析及仿真、专用数控系统,同时给出了大量生产实践中交流伺服运动控制系统的应用实例。

本书涉及伺服系统、运动控制、数控加工及现场总线等内容,适合作为高等院校机械设计制造及自动化、电气自动化等专业的专业基础课教材。本书注重精炼及概括原设置过窄的专业课,将原来数门课程教材的主要内容与基本概念、基本理论和基本方法重新组编,既对以往的教材有一定的继承性,又能适应先进制造技术和运动控制技术的发展和专业培养的要求。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

交流伺服运动控制系统/舒志兵等编著. —北京:清华大学出版社,2006.3

ISBN 7-302-12466-3

I. 交… II. 舒… III. 交流电机:伺服电机—运动控制—控制系统 IV. TM383.402

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 006283 号

出版者:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社总机:010-62770175

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客户服务:010-62776969

组稿编辑:王敏稚

文稿编辑:李玮琪

印刷者:北京国马印刷厂

装订者:三河市李旗庄少明装订厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印张:21.5 字数:506千字

版 次:2006年3月第1版 2006年3月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-12466-3/TM·75

印 数:1~3000

定 价:29.00元

前言

本书是根据第2届全国智能检测与运动控制技术研讨会暨全国高校运动控制及工程训练中心建设研讨会的精神及教学改革的要求,由全国40多所高校从事运动控制的专家执笔,按照机械设计制造及自动化、电气工程自动化等专业学生的培养目标和要求而编写的,可作为高等工科院校的专业教材。

本书主要研究现代交流伺服运动控制系统的检测技术及检测元件、系统数学模型分析及仿真、专用数控系统、基于PC运动控制板卡和DSP技术的伺服运动控制系统以及基于现场总线的现代交流伺服系统,同时给出了大量生产实践中交流伺服运动控制系统的应用实例。

本书对相关内容进行了必要的整合和梳理,尽量避免讲授内容的重复,考虑到学生后续选学模块不同,对涉及专业模块的基本知识,也做了简单的介绍。对于培养学生动手能力和培训工程技术人员也具有特别重要的意义。

与本书配套的实验装置是南京工业大学运动控制研究所研制的NUT型交流伺服运动控制系统,该系统包括基于PC运动控制板卡、基于CANbus现场总线、基于DSP技术的交流伺服运动控制系统的结构、参数调整、软硬件设计、运动控制系统专用语言及C语言编程、MATLAB/SIMULINK仿真等功能,本书还就交流伺服系统的动态特性、稳态特性及I/O口检测等功能进行了详细的设计分析,并配备了具体实验。

本书由南京工业大学舒志兵、东北大学周玮、北京航空航天大学李运华、北京理工大学冬雷、天津大学车延博、中国计量学院许宏、上海应用技术学院钱平、哈尔滨工业大学曲延滨等共同主编,清华大学自动化系杨耕教授、天津大学电气与自动化工程学院吴爱国教授对部分章节进行了审稿,参加编写的人员还有河海大学机械工程学院梅志千教授、天津大学电气与自动化工程学院夏超英教授、燕山大学电气与自动化工程学院刘福才教授、成都理工大学应用技术与自动化工程学院方教授、宁夏大学电气信息学院胡钢墩教授、南京工程学院工程中心郁汉琪主任、南通大学机械工程学院邱自学副教授等,他们为此书的出版付出了辛勤的劳动,合肥工业大学电气及自动化工程学院张晓江教授、东南大学机械工程系郁建平副教授、江苏大学机械工程学院殷苏民副教授对仿真和实验系统提出了宝

贵的修改建议,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,经验不足,对教材内容的取舍把握可能不够准确,书中缺点和错误在所难免,恳请广大师生、读者批评指正。

编者

2006年2月

目 录

| | |
|--------------------------------------|----|
| 第 1 章 交流伺服运动控制系统概论 | 1 |
| 1.1 机电一体化及机床电气控制技术的发展概况 | 1 |
| 1.2 伺服系统的作用及组成 | 2 |
| 1.3 伺服系统的基本要求和特点 | 2 |
| 1.4 伺服系统的分类 | 3 |
| 1.5 现代交流伺服运动控制技术 | 4 |
| 第 2 章 伺服运动控制系统检测技术及元件 | 12 |
| 2.1 检测系统 | 12 |
| 2.2 传感器技术 | 14 |
| 2.2.1 传感器分类 | 14 |
| 2.2.2 基础效应 | 15 |
| 2.2.3 新型敏感材料 | 17 |
| 2.2.4 新加工工艺 | 19 |
| 2.2.5 新型传感器件 | 20 |
| 2.3 现代检测技术 | 24 |
| 2.3.1 软测量技术 | 24 |
| 2.3.2 图像检测系统 | 25 |
| 2.3.3 智能检测 | 26 |
| 2.3.4 虚拟仪器检测技术 | 26 |
| 2.4 检测元件 | 27 |
| 2.4.1 旋转变压器 | 27 |
| 2.4.2 感应同步器 | 29 |
| 2.4.3 脉冲编码器 | 33 |
| 2.4.4 光栅 | 36 |
| 2.4.5 磁尺 | 39 |
| 习题 | 43 |
| 第 3 章 交流伺服运动控制系统模型及仿真分析 | 44 |
| 3.1 永磁同步电动机交流伺服运动控制系统 | 45 |

| | | |
|--------------|------------------------------|-----------|
| 3.1.1 | 永磁同步电动机交流伺服运动控制系统简介 | 45 |
| 3.1.2 | 永磁同步电动机交流伺服运动控制系统的组成 | 45 |
| 3.2 | PMSM 伺服系统的数学模型 | 56 |
| 3.2.1 | PMSM 的基本结构及种类 | 56 |
| 3.2.2 | PMSM 的数学模型 | 57 |
| 3.2.3 | PMSM 等效电路 | 59 |
| 3.2.4 | PMSM 的矢量控制原理 | 59 |
| 3.2.5 | PMSM 的矢量控制方式 | 61 |
| 3.2.6 | PMSM 解耦状态方程 | 62 |
| 3.3 | PMSM 伺服运动控制系统电流环设计 | 62 |
| 3.3.1 | 影响电流环性能的主要因素分析 | 62 |
| 3.3.2 | 电流环 PI 综合设计 | 64 |
| 3.4 | PMSM 伺服运动控制系统速度环设计 | 66 |
| 3.4.1 | 速度环 PI 综合设计 | 66 |
| 3.4.2 | 滑模变结构基本原理 | 67 |
| 3.4.3 | PMSM 伺服运动控制系统速度环的变结构设计 | 70 |
| 3.5 | PMSM 伺服运动控制系统位置环设计 | 71 |
| 3.5.1 | 变结构控制在伺服运动控制系统中的应用剖析 | 71 |
| 3.5.2 | PMSM 伺服运动控制系统位置环的变结构设计 | 71 |
| 3.6 | PMSM 伺服运动控制系统仿真分析 | 72 |
| 3.6.1 | 基于矢量控制的电流滞环仿真分析 | 72 |
| 3.6.2 | 伺服运动控制系统变结构仿真 | 76 |
| 第 4 章 | 数控交流伺服运动控制系统 | 79 |
| 4.1 | 数控机床结构 | 79 |
| 4.2 | 数控机床的工作原理 | 83 |
| 4.2.1 | 数控 CNC 控制机概述 | 83 |
| 4.2.2 | 数控加工过程 | 86 |
| 4.3 | 数控机床编程准备 | 88 |
| 4.4 | 数控机床插补算法及其实现 | 92 |
| 4.4.1 | 数控插补概述 | 92 |
| 4.4.2 | 逐点比较插补方法 | 93 |
| 4.5 | 数控机床编程基础 | 96 |
| 4.5.1 | 程序编制的内容和步骤 | 96 |
| 4.5.2 | 程序编制的方法 | 98 |
| 4.5.3 | NC 程序 | 98 |
| 4.5.4 | 数控指令执行过程 | 112 |
| 4.6 | 数控专用机床(PA 系统)参数设定 | 112 |

| | |
|--|-----|
| 第 5 章 基于 PC 运动控制板卡的交流伺服运动控制系统 | 121 |
| 5.1 预备知识 | 122 |
| 5.1.1 伺服运动控制系统的组成 | 122 |
| 5.1.2 操作系统 | 123 |
| 5.1.3 实时多任务操作系统(iRMX) | 123 |
| 5.1.4 操作系统对运动控制器的影响 | 128 |
| 5.1.5 伺服运动控制对控制系统的要求 | 130 |
| 5.2 PC 机与伺服运动控制器的信息交换 | 131 |
| 5.2.1 ISA 总线与 PCI 总线 | 131 |
| 5.2.2 双口 RAM | 134 |
| 5.2.3 IDT71321 应用举例 | 135 |
| 5.3 伺服运动控制系统的采样周期 | 137 |
| 5.3.1 信息变换原理 | 137 |
| 5.3.2 采样过程及采样函数的数学表示 | 138 |
| 5.3.3 采样函数的频谱分析及采样定理 | 139 |
| 5.3.4 采样周期对运动控制器的影响 | 141 |
| 5.4 基于 PC 与基于 PLC 运动控制器的比较 | 143 |
| 5.5 基于 PC 的伺服运动控制系统设计分析 | 144 |
| 5.6 基于 PC 的伺服运动控制系统举例 | 147 |
| 5.6.1 基于 PC ISA 的运动控制卡 | 147 |
| 5.6.2 基于 PC PCI 的运动控制卡 | 149 |
| 第 6 章 基于 CANbus 现场总线的交流伺服运动控制系统 | 152 |
| 6.1 现场总线的概述及 CAN 总线特点 | 152 |
| 6.1.1 现场总线的概述 | 152 |
| 6.1.2 现场总线的发展现状 | 154 |
| 6.1.3 现场总线控制系统 | 156 |
| 6.1.4 CAN 总线简介 | 156 |
| 6.1.5 CAN 总线的分层结构 | 159 |
| 6.2 CAN 总线交流伺服运动控制系统的硬件设计 | 162 |
| 6.2.1 CAN 总线控制系统的网络构建原理 | 163 |
| 6.2.2 基于 CAN 总线的分布式运动控制系统的设计标准 | 164 |
| 6.2.3 PCCAN 接口适配卡的多轴分布式运动控制系统 | 165 |
| 6.2.4 基于以太网和 CAN 总线的分布式运动控制系统 | 168 |
| 6.2.5 基于 CAN 总线的分布式跟随运动控制系统 | 170 |
| 6.3 CAN 总线交流伺服运动控制系统的软件设计 | 173 |
| 6.3.1 CAN 通信协议制定 | 173 |

| | | |
|--------------|--|------------|
| 6.3.2 | 基于 CAN 总线控制的软件设计 | 174 |
| 6.3.3 | 系统软件设计和数据分析 | 176 |
| 6.3.4 | 主机和多伺服控制器的控制软件介绍 | 177 |
| 6.4 | CAN 总线交流伺服运动控制系统的控制算法设计 | 182 |
| 6.4.1 | 总线伺服系统产品系列的特点 | 182 |
| 6.4.2 | 增益内模控制算法 | 184 |
| 6.4.3 | 电流环智能 PI 控制 | 186 |
| 6.4.4 | 位置环 PIP 控制 | 187 |
| 6.4.5 | 运动控制函数 | 191 |
| 第 7 章 | 基于 DSP 技术的交流伺服运动控制系统 | 195 |
| 7.1 | 运动控制系统常用 DSP 简介 | 195 |
| 7.2 | 基于 DSP 的伺服系统设计 | 203 |
| 7.2.1 | 基于 DSP 的伺服系统组成 | 203 |
| 7.2.2 | 伺服系统的基本要求 | 204 |
| 7.2.3 | 基于 DSP 的伺服系统的设计步骤 | 205 |
| 7.2.4 | 伺服系统初步设计 | 206 |
| 7.2.5 | 基于 DSP 的伺服系统的接口设计 | 208 |
| 7.3 | TMS320 LF2407A DSP 资源介绍 | 215 |
| 7.3.1 | 概览 | 215 |
| 7.3.2 | DSP 内核 | 218 |
| 7.3.3 | 存储器结构及 I/O 空间 | 221 |
| 7.3.4 | 系统及 I/O 端口的配置方法 | 222 |
| 7.3.5 | TMS320 LF2407A DSP 的指令系统 | 223 |
| 7.3.6 | TMS320 LF2407A DSP 的中断系统 | 225 |
| 7.4 | TMS320 LF2407A DSP 外设资源 | 231 |
| 7.4.1 | TMS320 LF2407A DSP 的事件管理器 | 231 |
| 7.4.2 | PWM 波形的生成方法 | 241 |
| 7.4.3 | TMS320 LF2407A DSP 的 A/D 转换器 | 247 |
| 7.4.4 | TMS320 LF2407A DSP 的 CAN\SCI\SPI 模块 | 252 |
| 7.5 | TMS320 LF2407-PMSM 交流伺服系统设计 | 253 |
| 7.5.1 | 硬件电路设计 | 253 |
| 7.5.2 | 软件设计 | 257 |
| 第 8 章 | 交流伺服运动控制系统的典型案例分析 | 263 |
| 8.1 | 基于 PLC 的运动控制系统 | 263 |
| 8.1.1 | 基于 FX _{1N} 系列 PLC 的位置伺服运动控制系统 | 264 |
| 8.1.2 | 基于 FX _{2N} 系列 PLC 的位置伺服运动控制系统 | 266 |

- 8.2 X-Y 二维坐标仪 268
 - 8.2.1 X-Y 二维坐标仪的硬件结构 269
 - 8.2.2 X-Y 二维坐标仪的实验分析 273
- 8.3 印制电路板制作系统 282
 - 8.3.1 电路板制作系统简介 282
 - 8.3.2 德国 LPKF 快速 PCB 制作系统的工作原理 283
- 8.4 交流伺服运动控制系统在汽车传动与操纵中的应用 287
 - 8.4.1 电动汽车简介 287
 - 8.4.2 电动汽车的驱动系统 289
 - 8.4.3 电动汽车的布置方式 294
 - 8.4.4 基于交流伺服控制的电动助力转向系统 296
- 8.5 直线飞剪与圆盘飞剪 299
- 8.6 工业机器人 310
 - 8.6.1 工业机器人控制系统体系结构 310
 - 8.6.2 基于干扰观测器的工业机器人的伺服运动控制算法 314
- 8.7 内衬层生产线连动控制 318
 - 8.7.1 轮胎内衬层生产线概述 318
 - 8.7.2 轮胎内衬层生产线控制系统数学模型及仿真分析 321
 - 8.7.3 轮胎内衬层生产线控制系统硬件组态 328
 - 8.7.4 轮胎内衬层生产线软件设计 329
- 参考文献 332

第 1 章

交流伺服运动控制系统概论

交流伺服运动控制系统对自动化、自动控制、电气技术、电力系统及自动化、机电一体化、电机电器与控制等专业既是一门基础技术,又是一门专业技术。它结合生产实际,解决各种复杂定位控制问题,如机器人轨迹控制、数控机床位置控制等。它是一门机械、电力电子、控制和信息技术相结合的交叉学科。

1.1 机电一体化及机床电气控制技术的发展概况

现代化生产的水平、产品的质量和经济效益等各项指标,在很大程度上取决于生产设备的先进性和电气自动化程度。机电一体化技术是随着科学技术的不断发展,生产工艺不断提出新的要求而迅速发展的。在控制方法上主要是从手动到自动;在控制功能上,是从简单到复杂;在操作上,是由笨重到轻巧。随着新的控制理论和新型电器及电子器件的出现,又为电气控制技术的发展开拓了新的途径。

传统的机床电气控制是继电器接触式控制系统,由继电器、接触器、按钮、行程开关等组成,实现对机床启动、停车、有极调速等的控制。继电器接触式控制系统的优点是结构简单、维护方便、抗干扰性强、价格低,因此广泛应用于各类机床和机械设备。目前,在我国继电器接触式控制仍然是机床和其他机械设备最基本的电气控制形式之一。

在实际生产中,由于大量存在用开关量控制的简单的程序控制过程,而实际生产工艺和流程又是经常变化的,因而传统的继电器接触式控制系统常不能满足这种要求,因此曾出现了继电器接触控制和电子技术相结合的控制装置,叫做顺序控制器。它能够根据生产的需要改变控制程序,而又远比电子计算机结构简单,价格低廉,通过组合逻辑元件插接或编程来实现继电器接触控制。但它的装置体积大,功能也受到一定限制。随着大规模集成电路和微处理机技术的发展及应用,上述控制技术也发生了根本性的变化,在 20 世纪 70 年代将计算机的存储技术引入顺序控制器,产生了新型工业控制器——可编程序控制器(programmable logic controller, PLC),它兼备了计算机控制和继电器控制系统

两方面的优点,故目前在世界各国已作为一种标准化通用装置普遍应用于工业控制。

为解决占机械总加工量 80% 左右的单件和小批量生产的自动化难题,20 世纪 50 年代出现了数控机床。它综合应用了电子技术、计算机技术、检测技术、自动控制和机床结构设计等各个技术领域的最新技术成就,是典型的机电一体化产品。数控机床经过 40 多年的发展,品种日益增多,性能不断完善,其中以轮廓控制的数控机床与带有自动换刀装置的工作台以及能自动转位的数控加工中心发展最为迅速。数控机床由控制介质、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率的主要因素之一。

1.2 伺服系统的作用及组成

在自动控制系统中,把输出量能够以一定准确度跟随输入量的变化而变化的系统称为随动系统,亦称伺服系统。例如,数控机床的伺服系统是指以机床移动部件的位置和速度作为控制量的自动控制系统,又称为随动系统。

伺服系统由伺服驱动装置和驱动元件(或称执行元件即伺服电机)组成,高性能的伺服系统还有检测装置,反馈实际的输出状态。

伺服系统的作用在于接受来自上位控制装置的指令信号,驱动被控对象跟随指令脉冲运动,并保证动作的快速和准确,这就要求高质量的速度和位置伺服。以上指的主要是进给伺服控制,另外还有对主运动的伺服控制,不过控制要求不如前者高。整个伺服运动控制系统的精度和速度等技术指标往往主要取决于伺服系统。

1.3 伺服系统的基本要求和特点

1. 对伺服系统的基本要求

(1) 稳定性好:稳定性是指系统在给定输入或外界干扰作用下,能在短暂的调节过程后到达新的或者回复到原有的平衡状态。

(2) 精度高:伺服系统的精度是指输出量能跟随输入量的精确程度。例如,作为精密加工的数控机床,要求的定位精度或轮廓加工精度通常都比较高,允许的偏差一般都在 $0.01\text{mm}\sim 0.001\text{mm}$ 之间。

(3) 快速响应性好:快速响应性是伺服系统动态品质的标志之一,即要求跟踪指令信号的响应要快,一方面要求过渡过程时间短,一般在 200ms 以内,甚至小于几十毫秒;另一方面,为了满足超调要求,要求过渡过程的前沿陡,即上升率要大。

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) 高性能的伺服电动机(简称伺服电机): 用于高效和复杂型面加工的数控机床, 伺服系统将经常处于频繁的启动和制动过程中。要求电机的输出力矩与转动惯量的比值大, 以产生足够大的加速或制动力矩。要求伺服电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(即速度伺服系统): 从系统的控制结构看, 数控机床的位置闭环系统可以看做是位置调节为外环、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机, 实现实际位移。数控机床的主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系统。

1.4 伺服系统的分类

伺服系统按其驱动元件划分, 有步进式伺服系统、直流电动机(简称直流电机)伺服系统、交流电动机(简称交流电机)伺服系统; 按控制方式划分, 有开环伺服系统、闭环伺服系统和半闭环伺服系统等。实际上数控系统也分成开环、闭环和半闭环 3 种类型, 就是与伺服系统这 3 种方式相关。

1. 开环系统

图 1-1 是开环系统构成图, 它主要由驱动电路, 执行元件和被控对象三大部分组成。常用的执行元件是步进电机, 通常称以步进电机作为执行元件的开环系统是步进式伺服系统, 在这种系统中, 如果是大功率驱动时, 用步进电机作为执行元件。驱动电路的主要任务是将指令脉冲转化为驱动执行元件所需的信号。

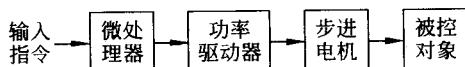


图 1-1 开环系统构成图

2. 闭环系统

闭环系统主要由执行元件、检测单元、比较环节、驱动电路和被控对象 5 部分组成。其构成框图如图 1-2 所示。在闭环系统中, 检测元件将被控对象移动部件的实际位置检测出来并转换成电信号反馈给比较环节。常见的检测元件有旋转变压器、感应同步器、光栅、磁栅和编码器等。通常把安装在电机轴端的检测元件组成的伺服系统称为半闭环系统; 把安装在被控对象上的检测元件组成的伺服系统称为闭环系统。由于电机轴端和被控对象之间传动误差的存在, 半闭环伺服系统的精度要比闭环伺服系统的精度低一些。

比较环节的作用是将指令信号和反馈信号进行比较, 两者的差值作为伺服系统的跟

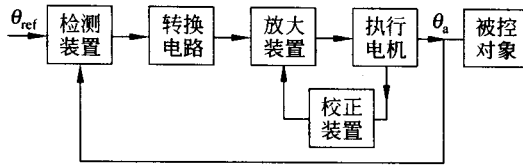


图 1-2 闭环系统结构图

随误差,经驱动电路,控制执行元件带动工作台继续移动,直到跟随误差为零。根据进入比较环节信号的形式以及反馈检测方式,闭环(半闭环)系统可分为脉冲比较伺服系统、相位比较伺服系统和幅值比较伺服系统三种。

由于比较环节输出的信号比较微弱,不足以驱动执行元件,故需对其进行放大,驱动电路正是为此而设置的。

执行元件的作用是根据控制信号,即来自比较环节的跟随误差信号,将表示位移量的电信号转化为机械位移。常用的执行元件有直流宽调速电动机、交流电动机等。执行元件是伺服系统中必不可少的一部分,驱动电路是随执行元件的不同而不同的。

1.5 现代交流伺服运动控制技术

随着生产力的不断发展,要求交流伺服运动控制系统向数字化、高精度、高速度、高性能方向发展。具体来说有以下几点:

(1) 充分利用迅速发展的电子和计算机技术,采用数字式伺服系统,利用微机实现调节控制,增强软件控制功能,排除模拟电路的非线性误差和调整误差以及温度漂移等因素的影响,这可大大提高伺服系统的性能,并为实现最优控制、自适应控制创造条件。

(2) 开发高精度、快速检测元件。

(3) 开发高性能的伺服电机(执行元件),目前交流伺服电机的变速比已达 1 : 10 000,使用日益增多。无刷电机因无电刷和换向片零部件,加速性能要比直流伺服电机高两倍,维护也较方便,常用于高速数控机床。

(4) 控制理论在伺服运动控制系统中的实现和应用,寻求更优良的控制策略对交流伺服系统进行控制是提高其性能的有效途径之一。每一次控制理论的突破与新型的控制理论的诞生都会使交流伺服系统的调速性能得到迅速提高。

在机电一体化技术迅速发展的同时,运动控制技术作为其关键组成部分,也得到前所未有的大发展,国内外各个厂家相继推出运动控制的新技术、新产品。主要有全闭环交流伺服驱动技术(full closed AC servo)、直线电机驱动技术(linear motor driving)、可编程计算机控制器(programmable computer controller, PCC)、网际开放式结构高性能 DSP 多轴运动控制系统技术(DSP AC servo system open network structure)、基于现场总线的运动控制技术(CANbus-based motion controller)和运动控制卡(motion controlling board)等几项具有代表性的新技术。

1. 全闭环交流伺服驱动技术

在一些定位精度或动态响应要求比较高的机电一体化产品中,交流伺服系统的应用越来越广泛,其中数字式交流伺服系统更符合数字化控制模式的潮流,而且调试、使用十分简单,因而倍受青睐。这种伺服系统的驱动器采用了先进的数字信号处理器(digital signal processor, DSP),可以对电机轴后端的光电编码器进行位置采样,在驱动器和电机之间构成位置和速度的闭环控制系统,并充分发挥 DSP 的高速运算能力,自动完成整个伺服系统的增益调节,甚至可以跟踪负载变化,实时调节系统增益;有的驱动器还具有快速傅里叶变换(FFT)的功能,测算出设备的机械共振点,并通过陷波滤波方式消除机械共振。

2. 直线电机驱动技术

直线电机在机床进给伺服系统中的应用,近几年来已在世界机床行业得到重视,并在西欧工业发达地区掀起“直线电机热”。

在机床进给系统中,采用直线电动机直接驱动与原旋转电机传动的最大区别是取消了从电机到工作台(拖板)之间的机械传动环节,把机床进给传动链的长度缩短为零,因而这种传动方式又被称为“零传动”。正是由于这种“零传动”方式,带来了原旋转电机驱动方式无法达到的性能指标和优点。

(1) 高速响应:由于系统中直接取消了一些响应时间常数较大的机械传动件(如丝杠等),使整个闭环控制系统动态响应性能大大提高,反应异常灵敏快捷。

(2) 精度:直线驱动系统取消了由于丝杠等机械结构产生的传动间隙和误差,减少了插补运动时因传动系统滞后带来的跟踪误差。通过直线位置检测反馈控制,即可大大提高机床的定位精度。

(3) 传动刚度高:由于“直接驱动”,避免了启动、变速和换向时因中间传动环节的弹性变形、摩擦磨损和反向间隙造成的运动滞后现象,同时也提高了其传动刚度。

(4) 速度快、加减速过程短:由于直线电动机最早主要用于磁悬浮列车(时速可达500km/h),所以用在机床进给驱动中,要满足其超高速切削的最大进给速度(要求达60m/min~100m/min或更高)当然是没有问题的。也由于上述“零传动”的高速响应性,使其加减速过程大大缩短。以实现启动时瞬间达到高速,高速运行时又能瞬间急停。可获得较高的加速度,一般可达 $2g\sim 10g(g=9.8\text{m/s}^2)$,而滚珠丝杠传动的最大加速度一般只有 $0.1g\sim 0.5g$ 。

(5) 行程长度不受限制:在导轨上通过串联直线电机,就可以无限延长其行程长度。

(6) 运动安静、噪声低:由于取消了传动丝杠等部件的机械摩擦,且导轨又可采用滚动导轨或磁垫悬浮导轨(无机械接触),其运动时噪声将大大降低。

(7) 效率高:由于无中间传动环节,消除了机械摩擦时的能量损耗,传动效率大大提高。

直线传动电机的发展也越来越快,在运动控制行业中倍受重视。在国外工业运动控制相对发达的国家已开始推广使用相应的产品,其中美国科尔摩根公司(Kollmorgen)的

PLATINNM DDL 系列直线电机和 SERVOSTAR CD 系列数字伺服放大器构成一种典型的直线永磁伺服系统,它能提供很高的动态响应速度和加速度、极高的刚度、较高的定位精度和平滑的无差运动;德国西门子公司、日本三井精机公司、中国台湾上银科技公司等也开始在其产品中应用直线电机。

3. 可编程计算机控制器技术

自 20 世纪 60 年代末美国第一台可编程序控制器(PLC)问世以来,PLC 控制技术已走过了 30 年的发展历程,尤其是随着近代计算机技术和微电子技术的发展,它已在软件技术方面远远走出了当初的“顺序控制”的雏形阶段。可编程计算机控制器(PCC)就是代表这一发展趋势的新一代可编程控制器。

与传统的 PLC 相比较,PCC 最大的特点在于它类似于大型计算机的分时多任务操作系统和多样化的应用软件的设计。传统的 PLC 大多采用单任务的时钟扫描或监控程序,来处理程序本身的逻辑运算指令和外部的 I/O 通道的状态采集与刷新。这样处理方式直接导致了 PLC 的“控制速度”依赖于应用程序的大小,这一结果无疑是同 I/O 通道中高实时性的控制要求相违背的。PCC 的系统软件完美地解决了这一问题,它采用分时多任务机制构筑其应用软件的运行平台,这样应用程序的运行周期则与程序长短无关,而是由操作系统的循环周期决定。由此,它将应用程序的扫描周期同外部的控制周期区别开来,满足了实时控制的要求。当然,这种控制周期可以在 CPU 运算能力允许的前提下,按照用户的实际要求,任意修改。

基于这样的操作系统,PCC 的应用程序由多任务模块构成,给工程项目应用软件开发带来很大的便利。因为这样可以方便地按照控制项目中各部分不同的功能要求,如运动控制、数据采集、报警、PID 调节运算、通信控制等,分别编制出控制程序模块(任务),这些模块既独立运行,数据间又保持一定的相互关联,这些模块经过分步骤的独立编制和调试之后,可一同下载至 PCC 的 CPU 中,在多任务操作系统的调度管理下并行运行,共同实现项目的控制要求。

PCC 在工业控制中强大的功能优势,体现了可编程控制器与工业控制计算机及 DCS(分布式工业控制系统)技术互相融合的发展潮流,虽然这还是一项较为年轻的技术,但在其越来越多的应用领域中,它正日益显示出不可低估的发展潜力。

4. 运动控制卡

运动控制卡是一种基于工业 PC 机、用于各种运动控制场合(包括位移、速度、加速度等)的上位控制单元。它的出现主要是因为:

- (1) 为了满足新型数控系统的标准化、柔性、开放性等要求;
- (2) 在各种工业设备(如包装机械、印刷机械等)、国防装备(如跟踪定位系统等)、智能医疗装置等设备的自动化控制系统研制和改造中,急需一个运动控制模块的硬件平台;
- (3) PC 机在各种工业现场的广泛应用,也促使配备相应的控制卡以充分发挥 PC 机的强大功能。

运动控制卡通常采用专业运动控制芯片或高速 DSP 作为运动控制核心,大多用于控

制步进电机或伺服电机。一般地,运动控制卡与PC机构成主从式控制结构:PC机负责人机交互界面的管理和控制系统的实时监控等方面的工作(例如键盘和鼠标的管理、系统状态的显示、运动轨迹规划、控制指令的发送、外部信号的监控等等);控制卡完成运动控制的所有细节(包括脉冲和方向信号的输出、自动升降速的处理、原点和限位等信号的检测等)。运动控制卡都配有开放的函数库供用户在DOS或Windows系统平台下自行开发、构造所需的控制系统。因而这种结构开放的运动控制卡能够广泛地应用于制造业中设备自动化的各个领域。这种运动控制模式在国外自动化设备的控制系统中比较流行,运动控制卡也形成了一个独立的专门行业,具有代表性的产品有美国的PMAC、PARKER、德国的MOVTEC等运动控制卡。

5. 网际开放式结构高性能DSP多轴运动控制系统技术

这些技术包括:

- 开放式结构控制技术(open architecture system control,OASC);
- DSP多轴同步控制技术(multi-axes synchronized control,MASC);
- 动态实时逻辑控制技术(dynamic real-time logical control,DRLC);
- 面向对象的系统重构技术(object-oriented system re-configuration,OOSR);
- 浮动网际在线控制技术(web-based mobile on-line control,WMOC);
- 面向对象的点对点安全通信协议(object-oriented point-to-point communication protocol,OOPTP)。

开放式结构控制技术(OASC)是在吸取计算机工业的开放式、积木式结构控制技术成功经验的基础之上,通过运用数字信号处理器(digital signal processor,DSP)控制技术和数据通信技术而发展起来的新技术。该技术利用DSP高速高精度特性,配以特有的通信内核模块(communication kernel chip,CKC)和基本输入输出系统(basic inputs and outputs system,BIOS),将多轴伺服单元、IO子系统以及中央处理系统高度集成为一个高性能多轴运动控制器。它彻底抛弃了传统的多片单片机并行结构。此时,由于下位机为一个独立的高性能多轴运动控制器,使得可以选用普通的PC机作为上位机,但并不降低系统的安全与可靠性。相反,PC机的采用使得整个运动控制系统的开放特性进一步得到升华。PC丰富的现有资源得到进一步的利用,这种开放式结构控制技术为用户提供多层次系统集成解决方案,具体说来,能够向程序员级的用户提供ISR级的编程环境;向一般技术操作员提供基于Windows的集成控制界面;向非技术人员提供基于网络浏览器的操作界面。

DSP多轴同步控制技术(MASC)是一种对多轴复杂连续轨迹运动精确定位控制技术。通过采用高精度的定时器和中断控制以及计算机的通信内核,可使系统的多轴控制指令集合在一个中断周期内完成,从根本上克服了传统的采用多片单片机的并行结构在本质上的同步控制瓶颈。

动态实时逻辑控制技术(DRLC)是为适应一些高技术层次用户的技术要求而发展的一种尖端技术。通过该技术,用户可以在Windows集成控制界面或基于浏览器的操作界面上在线定义控制变量或控制变量矩阵,进而通过通信内核将这些变量或变量矩阵与底