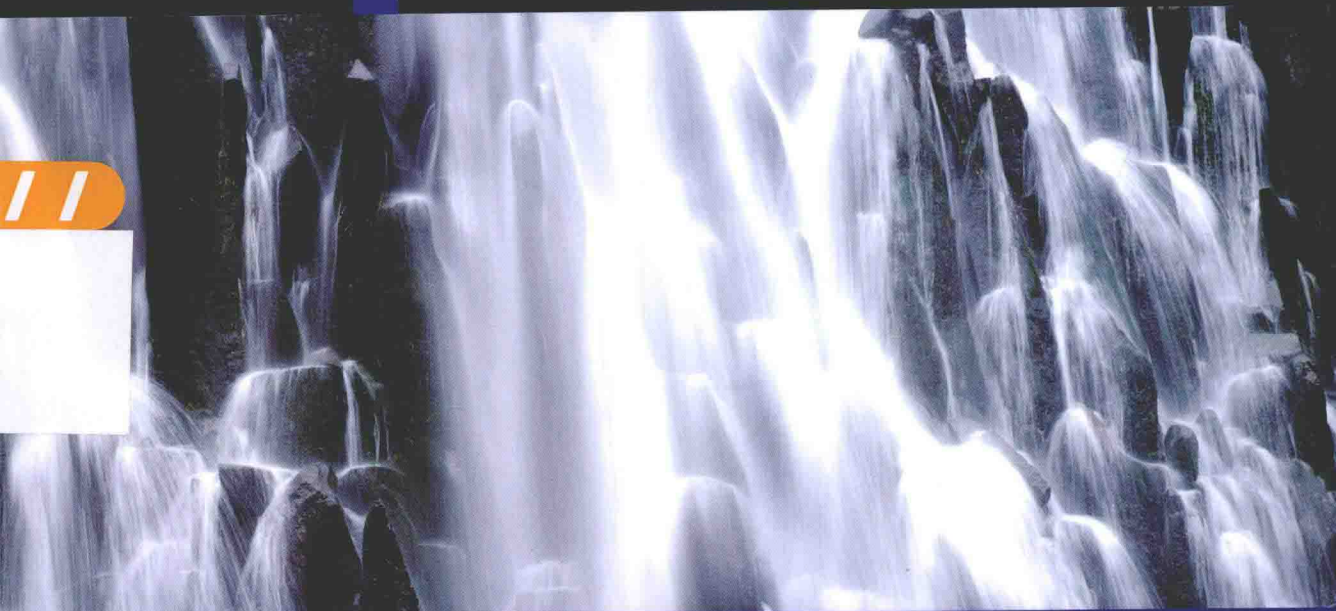




Advanced Motion Control System and
Its Application

高级运动控制系统 及其应用研究

舒志兵 主编



清华大学出版社

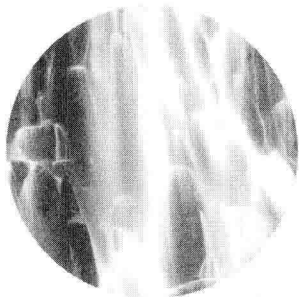




Advanced Motion Control System and
Its Application

高级运动控制系统 及其应用研究

舒志兵 主编



清华大学出版社

内 容 简 介

在机电一体化技术迅速发展的同时,高级伺服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。本书主要研究了全闭环交流伺服驱动技术(Full Closed AC Servo)、DSP 交流伺服系统技术(DSP AC Servo System)、PLC 交流伺服系统技术(PLC AC Servo System)、基于现场总线的运动控制技术(CANbus-based motion controller)、机器人技术和运动控制卡(Motion Controlling Board)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、机器人及现场总线等内容,是机械设计制造及自动化、电气自动化及自动化专业的专业基础课教材。本书编写过程中,注重精炼、概括原设置过窄的专业课,将原来数门课程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,又体现先进制造技术及运动控制技术的发展和专业培养的要求。

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。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

高级运动控制系统及其应用研究/舒志兵主编.--北京:清华大学出版社,2015

信息、控制与系统技术丛书

ISBN 978-7-302-40090-5

I. ①高… II. ①舒… III. ①运动控制—控制系统—高等学校—教材 IV. ①TP24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 089648 号

责任编辑:文 怡

封面设计:李召霞

责任校对:李建庄

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:20

字 数:496 千字

版 次:2015 年 9 月第 1 版

印 次:2015 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.00 元

产品编号:054904-01

前 言

本书是根据第6届和第7届中国人工智能学会智能检测与运动控制技术研讨会的内容及教学改革的要求,听取了全国多所高校从事运动控制的专家的建议并兼顾了国内外一流运动控制企业对人才、技术和市场的需求,按照机械设计制造及自动化、电气工程自动化及自动化专业学生的培养目标和要求编写的,可作为高等工科院校的专业教材。

本书涉及伺服系统、运动控制、数控加工及现场总线等内容,是机械设计制造及自动化、电气自动化及自动化专业的专业基础课。教材编写过程中,注重精炼、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,又体现先进制造技术和运动控制技术的发展和培养的要求。

本书主要研究现代交流伺服运动控制系统的检测技术及元件、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,也作了简单的介绍。对于培养学生动手能力和工程技术人员的培训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,该系统对基于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仿真进行了研究,同时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。

最近几年,学会为相关企业编写了大量机电一体化应用案例教材和书籍,由专业出版社出版发行,尤其是清华大学出版社出版的《交流伺服运动控制系统》教材,已经被评为国家级十一五规划教材,2011年9月已进行第4次印刷。学会已经成为国内该领域产学研交流的重要平台,我们将更加努力为大家服务,力争把这一中国智能检测与运动控制领域的产学研交流平台做大做强。

本书由中国人工智能学会智能检测与运动控制技术专业委员会秘书长、南京工业大学运动控制研究所舒志兵所长主编,东北大学周玮、北京理工大学冬雷、中国计量学院许宏、哈尔滨工业大学曲延滨、上海应用技术学院钱平、北京航空航天大学李运华教授提供了部分素材,国内外运动控制知名品牌企业如Rockwell、B&R、LUST、Trio、LPK、Contec、HIWIN、Lenze、AMK、Rexroth、KEB、CT、ABB、Danaher、Baldor、Parker、FANUC、SIEMENS、Beckhoff、施迈茨、艾默生、CT、瑞诺、沈阳莱茵、罗升、南京机床、广州数控、华兴数控、和利时、埃斯顿、研华、丹佛斯、欧姆龙、三菱、安川、松下、富士、山洋、富士、欧姆龙、日立、日机、多摩川、华北工控、中达电通、南京合展、埃德夫、北京集科、慧摩森、众为兴、上海维宏、台

达、隆创日盛、德国 3s 软件公司、研祥集团、美国国家仪器、PCM 集团等提供了应用技术与支持,由南京工业大学运动控制研究所负责统稿,最后由天津大学电气与自动化工程学院吴爱国教授等人对本书进行了审稿,他们为此书的出版付出了辛勤的劳动,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,书中缺点和不足在所难免,恳请师生、读者批评指正,以求改进。

编 者

2015 年 6 月

目 录

第 1 章 高级运动控制系统概论	1
1.1 引言	1
1.2 全数字高精智能型伺服系统驱动技术发展方向	6
1.3 运动控制系统的发展历程	11
1.4 目前伺服运动控制产品的主要应用行业分析	15
习题	19
第 2 章 伺服运动控制系统检测技术及元件	20
2.1 检测系统	20
2.2 传感器技术	21
2.2.1 传感器分类	21
2.2.2 基础效应	23
2.2.3 新型敏感材料	25
2.2.4 新加工工艺	26
2.2.5 新型传感器件	27
2.3 现代检测技术	31
2.3.1 软测量技术	31
2.3.2 图像检测系统	31
2.3.3 智能检测	32
2.3.4 虚拟仪器检测技术	33
2.4 检测元件	33
2.4.1 旋转变压器	33
2.4.2 感应同步器	35
2.4.3 脉冲编码器	39
2.4.4 光栅	42
2.4.5 磁尺	44
习题	48
第 3 章 交流伺服运动控制系统模型及仿真分析	49
3.1 永磁同步电动机交流伺服运动控制系统	49
3.1.1 永磁同步电动机交流伺服运动控制系统简介	49
3.1.2 永磁同步电动机交流伺服运动控制系统的组成	50

3.2	PMSM 伺服系统的数学模型	60
3.2.1	PMSM 的基本结构及种类	60
3.2.2	PMSM 的数学模型	61
3.2.3	PMSM 等效电路	63
3.2.4	PMSM 的矢量控制原理	64
3.2.5	PMSM 的 $i_d=0$ 矢量控制方式	65
3.2.6	PMSM 解耦状态方程	66
3.3	PMSM 伺服运动控制系统电流环设计	66
3.3.1	影响电流环性能的主要因素分析	66
3.3.2	电流环 PI 综合设计	68
3.4	PMSM 伺服运动控制系统速度环设计	70
3.4.1	速度环 PI 综合设计	70
3.4.2	滑模变结构基本原理	71
3.4.3	PMSM 伺服运动控制系统速度环的变结构设计	73
3.5	PMSM 伺服运动控制系统位置环设计	74
3.5.1	变结构控制在伺服运动控制系统中的应用剖析	74
3.5.2	PMSM 伺服运动控制系统位置环的变结构设计	75
3.6	PMSM 伺服运动控制系统仿真分析	76
3.6.1	基于矢量控制的电流滞环仿真分析	76
3.6.2	伺服运动控制系统变结构仿真	80
	习题	82
第 4 章	基于 DSP、FPGA 和 ARM 的运动控制系统	83
4.1	嵌入式运动控制系统的发展现状及发展方向	83
4.1.1	何谓嵌入式系统	83
4.1.2	嵌入式运动控制系统简介	83
4.1.3	嵌入式系统的优势	83
4.1.4	嵌入式系统的发展现状及趋势	84
4.2	基于 DSP 的交流伺服系统的设计	85
4.2.1	DSP 技术的简介与发展概况	85
4.2.2	基于 DSP 控制系统的总体结构	85
4.2.3	基于 DSP 控制系统的硬件设计	86
4.2.4	基于 DSP 控制系统的软件设计	91
4.2.5	基于 DSP 控制系统的测试	94
4.3	基于 FPGA 的 PMSM 控制系统设计	94
4.3.1	FPGA 技术的简介与发展概况	94
4.3.2	基于 FPGA 控制系统的硬件设计	96
4.3.3	PMSM 的智能 PID 控制器的 FPGA 实现	105
4.3.4	基于 FPGA 控制系统的测试	108

4.4 基于 ARM 的运动控制系统设计与分析	113
4.4.1 ARM 技术的简介与发展概况	113
4.4.2 基于 ARM 的运动控制系统总体设计	114
4.4.3 基于 ARM 的运动控制系统硬件设计	116
4.4.4 基于 ARM 的运动控制系统软件设计	120
4.4.5 基于 ARM 的运动控制系统的性能测试与结果分析	125
习题	129
第 5 章 基于 PC 运动控制板卡的交流伺服运动控制系统	130
5.1 预备知识	130
5.1.1 伺服运动控制系统的组成	130
5.1.2 操作系统	131
5.1.3 实时多任务操作系统(iRMX)	132
5.1.4 操作系统对运动控制器的影响	136
5.1.5 伺服运动控制对控制系统的要求	139
5.2 PC 与伺服运动控制器的信息交换	139
5.2.1 ISA 总线与 PCI 总线	139
5.2.2 双口 RAM	142
5.2.3 IDT71321 应用举例	143
5.2.4 基于 PC ISA 的运动控制板卡	145
5.2.5 基于 PC PCI 的运动控制卡	147
5.3 伺服运动控制系统的采样周期	149
5.3.1 信息变换原理	149
5.3.2 采样过程及采样函数的数学表示	150
5.3.3 采样函数的频谱分析及采样定理	151
5.3.4 采样周期 T 对运动控制器的影响	154
5.4 基于 PC 与基于 PLC 运动控制器的比较	155
5.5 基于 PC 的伺服运动控制系统设计分析	156
5.5.1 上位计算机的选择	156
5.5.2 运动控制器板卡的设计分析	157
5.5.3 驱动器、反馈元件的设计分析	158
5.5.4 伺服电机的设计分析	158
5.6 基于 PC 的伺服运动控制系统举例	159
5.6.1 PAMC 开放式运动控制卡在数控系统中的应用	159
5.6.2 TRIO 运动控制卡	162
5.6.3 PCIMC-3A 及 PCIMC-3B 三轴雕刻机控制卡	167
习题	172

第 6 章 基于现场总线的高级运动控制系统	173
6.1 基于 CANbus 总线的交流伺服运动控制系统	173
6.1.1 CAN 总线的概述	173
6.1.2 CAN 总线的分层结构	174
6.1.3 基于 CAN 总线高级运动控制系统的硬件设计	177
6.1.4 基于 CAN 总线高级运动控制系统的软件设计	184
6.1.5 基于 POWERLINK 总线的高级运动控制系统应用案例	187
6.2 基于 POWERLINK 总线的高级运动控制系统	193
6.2.1 POWERLINK 总线的概述	193
6.2.2 POWERLINK 总线的协议概述	196
6.2.3 基于 POWERLINK 总线参考模型	198
6.2.4 POWERLINK 功能及技术实现	204
6.2.5 基于 POWERLINK 总线的高级运动控制系统应用案例	209
6.3 基于 PROFIBUS 总线的高级运动控制系统	212
6.3.1 PROFIBUS 总线的概述	212
6.3.2 PROFIBUS 总线通信协议	213
6.3.3 基于 PROFIBUS 总线高级运动控制系统的硬件设计	220
6.3.4 基于 PROFIBUS 总线高级运动控制系统的软件设计	222
6.3.5 基于 PROFIBUS 总线的高级运动控制系统应用案例	228
6.4 基于 MECHATROLINK 总线的高级运动控制系统	230
6.4.1 MECHATROLINK-II 总线的概述	230
6.4.2 MECHATROLINK 总线的通信协议	231
6.4.3 基于 MECHATROLINK 总线的高级运动控制系统应用案例	234
6.5 基于 CoDeSys 编程开发平台	237
6.5.1 CoDeSys 的分层架构	237
6.5.2 CoDeSys 自动化开发平台中间件	239
6.5.3 CoDeSys 的运动控制模块	241
6.5.4 CoDeSys 项目应用案例	242
习题	249
第 7 章 工业机器人运动控制系统	250
7.1 工业机器人概述	250
7.1.1 工业机器人的定义与发展状况	250
7.1.2 工业机器人的基本组成	252
7.1.3 工业机器人的应用与技术要求	254
7.1.4 工业机器人轨迹规划及其研究现状	257
7.2 机器人的运动学和动力学模型	259
7.2.1 机器人的运动学模型	259

7.2.2 机器人的动力学模型	266
7.3 机器人运动轨迹规划	271
7.3.1 机器人轨迹规划的一般形式与常用方法	271
7.3.2 基于自适应神经模糊推理系统的机器人轨迹规划	272
7.3.3 基于势场法的机器人避障运动轨迹规划研究	277
7.4 工业机器人的典型案例分析	286
7.4.1 KUKA 机器人在汽车焊接中的应用	286
7.4.2 ABB 机器人激光切割系统应用	290
7.4.3 FANUC 焊接机器人控制系统应用分析	294
7.4.4 安川 Motoman-HP20D 机器人在施釉系统中的应用	296
7.4.5 悬臂式磁瓦机械手控制系统的设计与实现	300
习题	305
参考文献	306

第1章 高级运动控制系统概论

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。它是一门以机械、电力电子、控制和信息技术相结合的交叉学科。

1.1 引言

运动控制是由电力拖动发展而来的,电力拖动或电气传动是以电动机为对象的控制系统通称。随着电力电子、微电子技术的迅猛发展,原有的电气传动控制概念已经不能充分地概括现代自动化系统中全部的控制设备,因此 20 世纪 80 年代后期,国际上开始出现运动控制系统这一术语。

运动控制(MC)——通过对电动机电压、电流、频率等输入电量的控制,来改变工作机械的转矩、速度、位移等机械量,使各种工作机械按人们期望的要求运行,以满足生产工艺及其他应用的需要。工业生产和科学技术的发展对运动控制系统提出了日益复杂的要求,同时也为研制和生产各类新型的控制装置提供了可能。现代运动控制已成为电机学、电力电子技术、微电子技术、计算机控制技术、控制理论、信号检测与处理技术等多门学科相互交叉的综合性学科。

1. 交流伺服概念引入

伺服来自英文单词 Servo,指系统跟随外部指令进行人们所期望的运动,运动要素包括位置、速度和力矩。

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,也称伺服系统。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。

进给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。此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进给伺服系统。

伺服系统的发展经历了从液压、气动到电气的过程,而电气伺服系统包括伺服电机、反馈装置和控制器。在 20 世纪 60 年代,最早是直流电机作为主要执行部件,在 70 年代以后,交流伺服电机的性价比不断提高,逐渐取代直流电机成为伺服系统的主导执行电机。控制器的功能是完成伺服系统的闭环控制,包括力矩、速度和位置等。我们通常说的伺服驱动器

已经包括了控制器的基本功能和功率放大部分。虽然采用功率步进电机直接驱动的开环伺服系统曾经在 20 世纪 90 年代的所谓经济型数控领域获得广泛使用,但是迅速被交流伺服所取代。进入 21 世纪,交流伺服系统越来越成熟,市场呈现快速多元化发展,国内外众多品牌进入市场竞争。目前交流伺服技术已成为工业自动化的支撑性技术之一。

2. 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状态或者恢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 $0.01\sim 0.001\text{mm}$ 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。

3. 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 3 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。在交流伺服系统中,电动机的类型有永磁同步交流伺服电机(PMSM)和感应异步交流伺服电机(IM),其中,永磁同步电机具备十分优良的低速性能、可以实现弱磁高速控制,调速范围宽广、动态特性和效率都很高,已经成为伺服系统的主流之选。而异步伺服电机虽然结构坚固、制造简单、价格低廉,但是在特性上和效率上存在差距,只在大功率场合得到重视。本书重点将放在永磁同步交流伺服系统上。

交流伺服系统的性能指标可以从调速范围、定位精度、稳速精度、动态响应和运行稳定性等方面来衡量。低档的伺服系统调速范围在 $1:1000$ 以上,一般为 $1:5000\sim 1:10\,000$,高性能的可以达到 $1:100\,000$ 以上;定位精度一般都要达到 ± 1 个脉冲,稳速精度,尤其是低速下的稳速精度比如给定 1rpm 时,一般在 $\pm 0.1\text{rpm}$ 以内,高性能的可以达到 $\pm 0.01\text{rpm}$ 以内;动态响应方面,通常衡量的指标是系统最高响应频率,即给定最高频率的正弦速度指令,系统输出速度波形的相位滞后不超过 90° 或者幅值不小于 50% 。例如进口三菱伺服电机 MR-J3 系列的响应频率高达 900Hz ,而国内主流产品的频率在 $200\sim 500\text{Hz}$ 。运行稳定性方面,主要是指系统在电压波动、负载波动、电机参数变化、上位控制器输出特性变化、电磁干扰,以及其他特殊运行条件下,维持稳定运行并保证一定的性能指标的能力。

在控制策略上,基于电机稳态数学模型的电压频率控制方法和开环磁通轨迹控制方法都难以达到良好的伺服特性,目前普遍应用的是基于永磁电机动态解耦数学模型的矢量控制方法,这是现代伺服系统的核心控制方法。虽然人们为了进一步提高控制特性和稳定性,

提出了反馈线性化控制、滑模变结构控制、自适应控制等理论,还有不依赖数学模型的模糊控制和神经网络控制方法,但是大多在矢量控制的基础上附加应用这些控制方法。还有,高性能伺服控制必须依赖高精度的转子位置反馈,人们一直希望取消这个环节,发展了无位置传感器技术(Sensorless Control)。至今,在商品化的产品中,采用无位置传感器技术只能达到大约 1:100 的调速比,可以用在一些低档的对位置和速度精度要求不高的伺服控制场合中,比如单纯追求快速起停和制动的缝纫机伺服控制,这个技术的高性能化还有很长的路要走。

4. 伺服系统分类

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)伺服系统等;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。

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 3 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为步进式伺服系统,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。

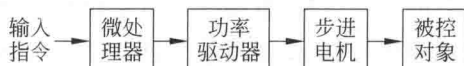


图 1-1 开环系统构成图

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。

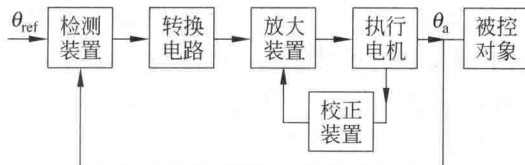


图 1-2 闭环系统结构图

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 3 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。

5. 交流伺服在我国的发展历史

我国从 20 世纪 70 年代开始跟踪开发交流伺服技术,主要研究力量集中在高等院校和科研单位,以军工、宇航卫星为主要应用方向,不考虑成本因素。主要研究机构是北京机床所、西安微电机研究所、中科院沈阳自动化所等。20 世纪 80 年代之后开始进入工业领域,直到 2000 年,国产伺服停留在小批量、高价格、应用面狭窄的状态,技术水平和可靠性难以满足工业需要。2000 年之后,随着中国变成世界工厂、制造业的快速发展为交流伺服提供了越来越大的市场空间,国内几家单位开始推出自己品牌的交流伺服产品。目前国内主要的伺服品牌或厂家有台达、埃斯顿、珠海运控、星辰伺服、步科电气、时光、和利时、浙江卧龙、兰州电机、雷赛机电、宁波甬科、固高科技、大连普传、武汉登奇、贝能科技、鄂尔多斯、北京宝伦、南京晨光、北京首钢凯奇、西安微电机、南京高士达、中国电子集团 21 所等。其中华中数控、广数等主要集中在数控机床领域。

6. 国内外交流伺服产品的水平

交流伺服系统的相关技术,一直随着用户的需求而不断发展。电动机、驱动、传感和控制技术等关联技术的不断变化,造就了各种各样的配置。就电动机而言,可以采用盘式电机、无铁芯电机、直线电机、外转子电机等,驱动器可以采用各种功率电子元件,传感和反馈装置可以是不同精度、性能的编码器、旋变和霍尔元件甚至是无传感器技术,控制技术从采用单片机开始,一直到采用高性能 DSP 和各种可编程模块,以及现代控制理论的实用化等。近几年上海工业博览会上可以看到世界范围内电气驱动、运动控制和相关软件的最新情况,其中交流伺服产品的亮点很多,代表了当前的国际水平。这里仅仅摘录几条,相对应的,国内厂商的研发动向也进行说明。

(1) 路斯特传动系统(上海)有限公司(LTi)于 2014 年 11 月 5 日发布了其全新产品多轴运动控制系统 ServoOne CM。此款产品具备 5 大特点:结构紧凑,节省了最多 75% 的安装空间,运动控制器、安全 PLC、多轴控制器及其开关电源均被集成到一个模块内;易于安装,所需组件少且能够简单、省时地进行系统连接;符合国际标准,采用了全级安全 PLC,实现高度经济的安全解决方案;广泛的应用平台,提供了可配置的运算能力(1.3~2.2 GHz),同时适用于简单到复杂的控制应用;快速响应,结合了其功能和特性,旨在提高机器的动态性能和精度,多轴控制器的每个轴模块均集成 ASIC 和 32 位浮点处理器,保证每根轴均可达到与单轴控制器相同的运算能力。

(2) 2014 年 11 月 10 日领先的工业自动化厂商科瑞集团携其业界领先 LinMot 管式直线伺服电机产品亮相第 16 届中国国际工业博览会(简称工博会)。科瑞集团着眼工业 4.0 的发展未来,以前瞻性的眼光带来全新的运动控制产品,在上海新国际博览中心的 W2 馆工业自动化展区全方位地展示了科瑞 LinMot 工业直线电机产品。科瑞 LinMot 管式直线伺服电机创新地采用直接的电磁驱动技术,电机的直线运动无须齿轮、传动机构,无任何磨损,从而可达到 6m/s 的超高运行速度,是传统丝杠的 3 倍。相比传统设计方式,外形仅由滑杆和定子两部分组成,简单紧凑,采用合金材质,使体积和重量都大幅减少 50%,更可降低运行时的能耗。此外,产品还具备全程自由精准定位、使用寿命长、免维护、卫生设计用于食品医药行业、EN1.4404/AISI 316 不锈钢外壳、IP69K 防护等级等特点。出色的技术性能和显著的产品优势,使产品可应用于各类严格苛刻的工业环境中,更为替代传统复杂伺服和简单

气动提供了可能。

(3) 武汉迈信电气 EP3E 系列 POWERLINK 伺服驱动器集体积小、高性能、多功能、操作简单等特性于一身,接口及安装尺寸完全兼容 EP3 系列。它具有自动振动抑制功能,能够使机械在运行过程中更加平稳和顺畅,减少机械及工件的损耗。EP3E 系列伺服驱动器,可以达到 100Mbps 的通信速率,结点传输距离为 100m,伺服刷新速度最快为 $100\mu\text{s}$ 循环周期,使伺服驱动器具备高速的实时响应能力;伺服驱动器配套 17bit 单圈或者多圈编码器(也可以选配 20bit 单圈或者多圈编码器),可以从容应对高速高精度定位,无轴同步传动,电子齿轮,电子凸轮等应用。

(4) 2014 年中国国际工业博览会清能德创携 CoolDrive 系列伺服产品隆重亮相 N1 机器人展馆,吸引了业内媒体及用户的广泛关注。CoolDrive A8 是清能德创推出的国内首款模块化网络化伺服驱动产品,融合了 EtherCAT 通信、共直流母线、能效管理、功能安全等多项创新技术,在多轴同步控制、动态响应、能源效率等方面均达到国际领先水平。凭借其出色的性能指标,CoolDrive A8 已成功应用于工业机器人领域,并在使用过程中得到了客户的高度认可与评价。展会期间,清能德创全新打造的工业机器人专用一体化网络化伺服驱动器 CoolDrive R6 惊艳亮相,更是引起业内人士的极大兴趣,并表示对此款产品充满了期待。CoolDrive R6 是清能德创在进行大量工业机器人市场及客户的需求调研后,为其量身打造的一款专用伺服产品。CoolDrive R6 采用 ALL IN ONE 设计,在紧凑的机身内集成了 6 个伺服轴,更加节省空间、便于安装;同时加入了定位抖动消除、惯量前馈等功能,减少机器人本体高速运行时的振动现象;此外,CoolDrive R6 还增加了电机弱磁控制技术以实现机器人的轻载高速运行,增加编码器信号修正技术以提高机器人的稳定性和降低运行中的噪音等。

(5) 艾尔默(Elmo)公司展出了一系列伺服驱动器与控制器,包括最新的微型数字伺服驱动器 Whistle。这些火柴盒大小的驱动器尺寸虽仅为: $5 \times 4.6 \times 1.5\text{cm}$,但却能提供 0.5kW 的连续功率(或 1kW 的峰值功率),为当今市场上最高功率密度与智能的伺服驱动器。相对应的,国内只有和利时电机公司推出了类似的智能数字伺服控制器——蜂鸟系列,该驱动器接受 24~48VDC 输入,可以提供 250W 的连续功率和 500W 的峰值功率,尺寸为 $10 \times 8 \times 2\text{cm}$,功率密度和 Whistle 相比有差距。但是集成了高性能 32 位 RISC 芯片,提供 RS232、485 串行通信控制功能和 32 条运动指令,包括高级的圆弧插补指令,采用 14 位绝对值磁性编码器。2017 年预计推出带 16 位绝对编码器的无刷伺服电机和带 CAN 通信的驱动模块。

(6) 艾默生控制技术(Emerson Control Techniques)公司展出了 Unidrive 及其他交、直流驱动器产品。Unidrive 驱动器覆盖功率范围从 0.55~675kW,变换不同的控制软件可以驱动异步电机、永磁同步伺服电机和无刷直流电机。额定输出功率为 0.25~11kW 的 Varmeca 型集成可变速度电机与可变速度驱动器(VSD),具有闭环矢量与分布式(Proxdrive)两个版本。值得注意的是适合在潜在爆燃性气体中工作的 VSD 系统(ATEX)。而额定输出功率为 0.55~400kW 的 FLSD 驱动器,据称能在 IIB 类或 IIC 区 1-2 类气体中工作。相对应的,国内伺服驱动器厂商的产品功率范围多在 10kW 以下,而且没有特殊防护等级的商品化产品面世,这方面国内外的差距很大,也是未来国内伺服厂商差异化竞争的方向。

(7) Rockwell Automation 公司展出了 PowerFlex 驱动技术。PowerFlex 的发展路线图显示,2006—2007 年出现的“公共工业协议(CIP)运动应用协议”,有望无缝同步在同一系统中运行的多轴伺服与变频驱动器中。在适合运动控制的工业协议方面,还有 Beckhoff 的 EtherCAT, B&R 的 PowerLink, Danaher 下面的 MEI 开发的 SynqNet, Siemens 的 ProfiNet, 还有久负盛名的 Sercos 已经发展到 Sercos III。这些通信协议都为多轴实时同步控制提供了可能性,也被一些高端伺服驱动器集成进去。在国内,甚至 CAN 这样的中低端总线也没有变成伺服驱动器的标准配置,采用高性能实时现场总线的商品化驱动器还没有出现。这一方面是因为我们的伺服基本性能还没有达到相应的水准,另一方面也是因为市场还没有发育到这个程度。可喜的是,已经有一些单位进行了有益的研发实践,一方面消化国外的先进技术,另一方面尝试推出自己的总线标准。和利时电机预计在下一代伺服产品中集成多种可选的通信模块,其中包括 CAN、USB、Fireware 和 Sercos,此外和利时电机和北航联合开发的 CANsmc(用于多轴同步运动控制的总线),基于蓝牙无线通信的模块也在研发中。中科院沈阳高档数控研发中心等单位也研发了自己的运动控制总线协议。

(8) 施耐德电气(Schneider Electric)这次展出的 Lexium 05 型伺服控制器具有和 VFD 变频器一样的外形,目标是低成本应用。实际上,利用变频器的批量生产能力推出低端伺服,已经成为一些厂商的竞争手段。该公司旗下的 Berger Lahr 品牌在其展台上随处可见。其智能、集成电机与控制器产品(Icla)主要有以下 3 个电机版本:步进电机、交流伺服电机与三相无刷直流电机。Icla(来源于“集成、闭环、执行器”的首字母缩写)将电机、位置控制、功率放大与反馈集成在一个紧凑单元中。这种一体化设计的思路在美国的 Animatics 等公司中也体现得很明显,来自德国的 AMK 公司也有类似的产品。这是真正的机电一体化产品,为设计者带来了一系列的工程挑战,包括电磁兼容、热控制、元器件小型化、特殊的结构设计等。在国内,没有见到有厂商推出相关的自主知识产权的产品。

(9) 包米勒(Baumuller)公司提供的带集成行星齿轮传动系的高性能伺服电机,拥有高达 98% 的效率和很低的噪音;直接驱动型高力矩伺服电机,可以在 100~300rpm 范围内输出 13 500Nm。在国内,和利时电机公司在其海豚系列低压无刷伺服电机系列中提供了类似的带集成行星齿轮减速器的产品,深圳步进也宣称可以提供带减速器的步进伺服电机。在直接驱动力矩电机市场,成都精密电机厂可以提供定制化的电机组件,但是需要客户另外加装反馈装置和第三方驱动器。

(10) 安川电机欧洲公司(Yaskawa Electric Europe, YEE)展出了其广受欢迎的通用 Sigma II 型伺服电机。YEE 的其他进展包括正在开发中的额定功率 0.5~5kW 防爆及遵循 ATEX 标准的交流伺服电机。安川公司的另一项开发成果是输出功率高达 500kW 的高功率伺服电机。该项目的商品化已于 2007 年完成。综上可知国际大厂正向专用化、大型化伺服发展。

1.2 全数字高精智能型伺服系统驱动技术发展方向

1. 驱动技术的全数字化

全数字高精智能型伺服总控系统伺服驱动的所有控制运算都是由内部的数字信号处理器 DSP 完成的,如果把 DSP 和微处理器结合起来,用单一芯片的处理器实现这两种功能,

将加速个人通信机、智能电话、无线网络产品的开发,同时简化设计,减小 PCB 体积,降低功耗和整个系统的成本。例如,有多个处理器的 Motorola 公司的 DSP5665x,有协处理器功能的 Massan 公司 FILU-200,把 MCU 功能扩展成 DSP 和 MCU 功能的 TI 公司的 TMS320C27xx 以及 Hitachi 公司的 SH-DSP,都是 DSP 和 MCU 融合在一起的产品。互联网和多媒体的应用需要将进一步加速这一融合过程,其实时运行速度可达每秒数以千万条复杂指令程序,是数字化电子世界中日益重要的计算机芯片。伺服驱动器内部的三环控制在内部高速 DSP 控制下,充分体现了伺服环路高响应、高性能和高可靠性以及高速实时控制的要求。

德州仪器(TI)宣布,其最新的 TMS320C66x 数字信号处理器(DSP)产品系列性能超过业界所有其他 DSP 内核。在独立第三方分析公司伯克莱设计技术公司(Berkley Design Technology, Inc)(BDTI)进行的基准测试中,其定点与浮点性能均获得最高评分。技术分析权威公司 BDTI 在其《Inside DSP》新闻报中指出:“C66x 的浮点性能 BDTImark 2000 测试评分达 10 720,远远超过了前代浮点 DSP 的性能。这将有助于应用开发人员:先采用浮点数开发初始应用实施方案,而后再决定根据性能需要是否采用定点数来处理,从而提高性能。实践证明,可在同一芯片上同时提供这两种功能是一大优势,而 TI 则是唯一一家可提供能同时支持浮点与定点功能的高性能、多内核 DSP 芯片的供应商。”

TI C66x DSP 芯片作为整合浮点与定点功能,能以两种处理模式逐条执行指令的 DSP 内核,可在每段代码都能以原生处理模式执行的应用中实现甚至更高的性能。在 C66x DSP 内核中整合浮点与定点功能,不但可取消从浮点到定点转换的高成本算法,而且还可帮助开发人员创建在高性能器件上运行的高精度代码。TI 还推出了最新 TMS320C66x DSP 系列器件,包括双核、四核及八核引脚兼容型 DSP(TMS320C6672、TMS320C6674 与 TMS320C6678)以及一款四核通信片上系统(SoC) TMS320C6670。此外, TI 还针对无线基站应用推出了一款同样采用 C66x DSP 内核的全新 SoC TMS320TCI6616,其可实现比该市场领域任何 3G/4G SoC 都高出 2 倍的性能。

2014 年 10 月 16 日,致力于亚太地区市场的领先电子元器件分销商——大联大投资控股股份有限公司宣布,其旗下世平推出基于 ADI ADSP-CM40x 和 TI C2000 InstaSPIN 的高精度运动控制解决方案。处理器 ADSP-CM40x 的性能如下:

- 集成了精度高达 13 位的行业唯一一款嵌入式双通道 16 位模数转换器,拥有高达 380ns 的转换速度;
- 处理器搭载了一枚 240MHz 浮点 ARM® Cortex™-M4 处理器内核;
- 处理器内嵌许多电机控制专用外设,像高精度的 ADC、SINC 滤波器、编码器输入、可驱动多个电机的 PWM 输出单元及丰富的通信接口;
- 采用片内 sinc 滤波器可以节省以 FPGA 实现同一功能所需要的成本和工程资源;
- 高精度电流和电压检测,可提高速度和扭矩控制性能;
- 高性能位置检测性能,使用光学编码器和旋转变压器作为位置传感器;
- 优先考虑安全和保护的角度,信号采样和功率器件驱动应采用隔离技术;
- ADI 公司的 iCoupler 数字隔离器产品可满足高压安全隔离要求;
- 使用 DSP 高性能处理器,实现矢量控制和无传感器控制;
- 提供更高效率和更灵活的算法。