

数字伺服控制 系统与 设计



*Digital Servo Control
System & Design*

卢志刚 吴杰 吴潮 编著

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



数字伺服控制系统与设计

卢志刚 吴杰 吴潮 编著



机械工业出版社

本书从控制工程角度出发,围绕数字控制及现代伺服控制技术,系统详尽地介绍了数字伺服控制系统的设计与分析方法。本书内容包括:数字伺服控制技术的发展、组成、设计思路及各部分的选型和应用,数字伺服控制系统的非线性及误差分析、建模方法、稳态设计及动态综合,数字伺服控制系统的抗干扰设计,最后给出了数字伺服控制系统的设计与实现。

本书强调了实际系统中非线性及干扰问题的解决,内容丰富新颖,实用性强,可作为从事机电产品设计与开发以及控制类的工程技术人员的参考书,也可作为自动化、测量与控制、机电等专业高校师生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

数字伺服控制系统与设计/卢志刚,吴杰,吴潮编著.

—北京:机械工业出版社,2007.6

ISBN 978-7-111-21609-4

I. 数… II. ①卢 ②吴 ③吴 · III. 伺服系统:数字系统—系统设计 IV. TP275

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第082970号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:张俊红 版式设计:冉晓华 责任校对:姚培新

封面设计:陈沛 责任印制:洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2007年7月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·25.5印张·630千字

0 001—4 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-21609-4

定价:46.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)88379768

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着计算机控制技术的进步,以计算机作为控制器,用现代控制理论进行分析和设计,已成为伺服系统技术进一步发展的必然趋势。近年来,计算机控制系统、数字控制系统和伺服系统等书籍已出版了多种,它们大多详细地叙述了离散控制原理和模拟伺服系统的分析和设计,而对数字伺服控制系统的分析和设计讨论甚少。

本书是将控制理论、信号处理与先进的数字信号处理器(DSP)软硬件、专用的数控芯片、驱动线路紧密结合起来数字伺服控制系统与设计著作。从理论和工程实践的角度出发,本书论述了数字伺服控制系统的设计理论与方法,内容包括:伺服系统数字控制技术的发展、组成、各部件的选择及设计思路,伺服系统的建模方法、非线性和误差分析以及控制方法的设计,并给出了数字伺服控制系统的调试与测试过程,列举了典型数字伺服控制系统的设计。书中详细分析了伺服系统的非线性和干扰对伺服系统的影响,以及降低干扰和噪声影响所做的控制设计方法。全书内容详略得当,注重理论与实践相结合,实用性强。通过对本书的学习,读者能从软硬件两个方面掌握数字伺服控制系统的设计原理,并能实际地设计和装调出符合工程要求的数字伺服控制系统。

考虑到内容的先进性、广泛性、系统性与可读性,本书的最后一章分析了几种典型的例子来说明问题。在设计数字伺服控制系统的过程中,系统的建模、驱动电机的选择、对于读者不易得到的传感器资料,以及轴角编码装置所用的模块、DSP芯片、控制系统的设计和分析等内容,都将做详细的介绍。尤其是数字伺服控制系统设计过程的非线性和误差这一特殊性和难以解决的问题,在本书中得到了较充分的体现。

本书针对实用数字伺服控制器设计,解决数字伺服控制系统中的特殊问题,例如轴角编码、轴角—数字转换、数模和数字—轴角转换等,对采样周期选择、控制律选择、控制软件设计等问题进行了详尽的分析和说明。数字信号处理控制器继承了数字信号处理器的核心,并将接口集成于单一器件之内,具有应用方便、造价低廉等优点,成为当今数控系统设计应用芯片的主流。本书第5章介绍了数字伺服控制系统的核心——各类稳定可靠的高速DSP芯片,充分利用了DSP周边接口丰富、运算速度快的特点,来设计伺服系统数字控制器。利用其周围丰富的外围接口电路简化了伺服系统控制器的结构,并根据它们自身的特点,提出了合适的外围电路以及计算方法。应用优良的器件、先进的控制算法,精心设计出高性能的伺服控制系统是数字伺服控制系统的最理想目的。

本书由卢志刚教授、吴杰高级工程师和吴潮博士执笔编写,书稿经由王易教授仔细审阅,提出了许多宝贵意见。同时,姜钊、李军政、于慧、高静云、耿雨秋、于美卿、戴臣远参加了书稿的整理和审校工作,董先敏、李先根、王乐虹、李建明、曹彬彬负责全书图表的修订,陈祥、董先顺、王鹏、贾斌、封伟辰、李兵、程响、贾维红、郭俊堂、钟山、包煊、夏晴佳、张峰、金庆海进行了书内的仿真。在此向参加本书编写工作的全体人员表示衷心的感谢,并向所有给予关心和支持的同志表示感谢。

本书可作为从事机电产品设计与开发的工程技术人员的参考书,也可作为机电、自动化、

测控技术及仪器、制导与控制技术等专业师生的参考教材。

本书是作者在教学和科研实践的基础上,根据教学与科研中遇到和解决的问题编写的,同时也是诸作者多年来科学研究工作的总结与提高。由于控制理论、计算机技术以及 DSP 的发展迅速,数字伺服控制系统的涉及面又十分广泛,加之受作者学术水平的限制,书中存在的问题肯定不少,恳请读者批评指正。

作 者

目 录

前言

第1章 概述	1
1.1 数字伺服控制系统的发展及应用	1
1.1.1 控制系统的发展及应用	1
1.1.2 伺服系统的发展及应用	2
1.1.3 数字伺服控制技术的发展及应用	4
1.2 数字伺服控制系统的基本概念	6
1.3 数字伺服控制系统的特点	12
1.4 数字伺服控制系统的结构和分类	12
1.5 数字伺服控制系统设计指标的提出	22
1.6 数字伺服控制系统的设计内容与步骤	24
1.7 数字伺服控制系统的工作原理	27
1.8 本章小结	31
第2章 预备知识	32
2.1 数字伺服控制系统的时域分析	32
2.2 数字伺服控制系统的频域特性与分析	38
2.2.1 数字伺服控制系统的频率特性	38
2.2.2 数字伺服控制系统的频域分析	44
2.3 数字伺服控制系统的状态空间描述	47
2.4 数字伺服控制系统的稳定性分析	53
2.4.1 稳定性概念	53
2.4.2 根轨迹分析	62
2.4.3 频域稳定性判据	63
2.4.4 李雅普诺夫稳定性分析	64
2.5 本章小结	67
第3章 数字伺服控制系统的伺服电动机	68
3.1 伺服电动机的特征、分类与发展	69
3.1.1 伺服电动机的特征及分类	69
3.1.2 伺服电动机的发展趋势	75
3.2 伺服电动机的工作原理及组成结构	78
3.2.1 直流伺服电动机的工作原理及组成结构	78
3.2.2 无刷直流伺服电动机的工作原理及组成结构	79
3.2.3 交流伺服电动机的工作原理及组成结构	80
3.2.4 步进电动机的工作原理及组成结构	81
3.2.5 大惯量直流伺服电动机的工作原理及组成结构	82

3.3 伺服电动机的使用	83
3.3.1 直流伺服电动机的使用	83
3.3.2 交流伺服电动机的使用	87
3.3.3 步进电动机的使用	90
3.4 伺服电动机的选择	92
3.4.1 直流伺服电动机的选择	93
3.4.2 交流伺服电动机的选择	95
3.4.3 力矩电动机的选择	98
3.4.4 步进电动机的选择	100
3.4.5 步进电动机与交流伺服电动机的性能比较	103
3.5 本章小结	104
第4章 数字伺服控制系统的传感器	105
4.1 概述	105
4.1.1 数字伺服控制系统传感器的作用和意义	105
4.1.2 数字伺服控制系统传感器的分类	106
4.1.3 数字伺服控制系统传感器的性能指标	110
4.1.4 数字伺服控制系统中轴角的表示	112
4.2 数字轴角编码装置	117
4.2.1 自整角机的数字轴角编码装置	117
4.2.2 旋转变压器的数字轴角编码装置	119
4.2.3 自整角机/旋转变压器的跟踪式和逐次逼近式数字轴角编码装置	122
4.3 光电编码器在数字伺服控制系统中的应用	123
4.3.1 光电编码器的特点及分类	123
4.3.2 光电编码器的应用分析	128
4.4 自整角机/旋转变压器在数字伺服控制系统中的应用	132
4.4.1 自整角机测角的工作原理及应用	133
4.4.2 旋转变压器的结构、工作原理及应用	135
4.4.3 多极旋转变压器的粗、精组合和误差计算分析	138
4.5 感应同步器在数字伺服控制系统中的应用	142
4.6 本章小结	145
第5章 数字伺服控制系统的DSP单元	146
5.1 数字伺服控制器的实现及构成	146
5.1.1 数字伺服控制器的实现	146
5.1.2 基于DSP的数字伺服控制系统的构成	148
5.2 概述	149
5.2.1 DSP的发展	150
5.2.2 DSP的特点	151
5.3 DSP系统的设计及开发	153
5.3.1 DSP系统的总体方案设计	153
5.3.2 DSP的软件设计及开发	154
5.3.3 DSP的硬件设计及开发	156

5.3.4 DSP 芯片的选择	156
5.3.5 DSP 外围元器件的选择	157
5.4 DSP 的内部结构	158
5.4.1 TMS320F281xDSP 的性能	158
5.4.2 TMS320F281xDSP 的结构	160
5.5 DSP 的接口电路设计与集成	165
5.5.1 DSP 与 JTAG 接口设计	165
5.5.2 DSP 的电源设计	166
5.5.3 DSP 的电平转换接口	169
5.5.4 DSP 的晶振及复位电路	170
5.5.5 DSP 的模式选择与串口通信	171
5.5.6 DSP 的模拟接口	173
5.5.7 DSP 与 SRAM 接口	177
5.5.8 DSP 的集成开发环境	178
5.6 数字控制器的硬件调试	180
5.7 本章小结	181
第 6 章 数字伺服控制系统的建模	182
6.1 数字伺服控制系统的建模方法	184
6.2 数字伺服控制系统的机理建模	186
6.2.1 直流伺服电动机的数学模型	187
6.2.2 无刷直流伺服电动机的数学模型	189
6.2.3 永磁式交流伺服电动机的数学模型	190
6.2.4 异步伺服电动机的数学模型	191
6.2.5 感应伺服电动机的数学模型	193
6.3 数字伺服控制系统的时域法建模	196
6.3.1 低阶参数的时间估计	196
6.3.2 辨识差分方程模型阶次和参数的方法	201
6.4 数字伺服控制系统的频域建模法	203
6.5 数字伺服控制系统的非线性模型中的参数估计	204
6.5.1 高斯—牛顿法的原理	204
6.5.2 一阶系统的参数估计	206
6.5.3 二阶系统的参数估计	207
6.6 神经网络算法对数字伺服控制系统的建模	210
6.6.1 NARMA 神经网络算法对数字伺服控制系统的建模	210
6.6.2 BP 网络算法对数字伺服控制系统的建模	213
6.7 模糊算法对数字伺服控制系统的建模	216
6.7.1 模糊算法建模的基本原理	217
6.7.2 基于 T-S 模糊模型的建模	219
6.7.3 广义 T-S 模糊模型对非线性数字伺服控制系统的建模	219
6.8 模糊神经网络融合算法对数字伺服控制系统的建模	221
6.8.1 神经网络—模糊算法对系统的建模	221

6.8.2 自学习、自组织神经模糊算法建模	222
6.9 本章小结	223
第7章 数字伺服控制系统的非线性分析	224
7.1 非线性系统的特征	224
7.2 典型的非线性特性及其对系统性能的影响	227
7.2.1 饱和非线性特性	227
7.2.2 死区非线性特性	233
7.2.3 间隙非线性特性	234
7.3 数字伺服控制系统的干扰非线性分析	235
7.3.1 数字伺服控制系统的摩擦力矩非线性分析	235
7.3.2 数字伺服控制系统的干扰力矩非线性分析	238
7.3.3 数字伺服控制系统的电动机纹波转矩脉动非线性分析	240
7.3.4 数字伺服控制系统的电动机齿槽转矩非线性分析	246
7.4 数字伺服控制系统其他因素的非线性分析	252
7.5 本章小结	257
第8章 数字伺服控制系统的误差分析	258
8.1 概述	258
8.2 数字伺服控制系统的元件误差	260
8.2.1 传感器测量误差的定义及分析方法	260
8.2.2 数字伺服控制系统中传感器的误差	264
8.2.3 数字伺服控制系统中传感器提高精度的方法	265
8.3 数字伺服控制系统的量化误差	266
8.3.1 模拟信号采样过程的量化误差分析	266
8.3.2 系统量化误差及其对系统性能的影响	268
8.3.3 乘法运算结果的量化误差分析	268
8.3.4 两种常用量化过程的误差分析	272
8.3.5 输出量化噪声误差	276
8.4 数字伺服控制系统的动态误差分析	277
8.5 数字伺服控制系统的稳态误差分析	282
8.6 数字伺服控制系统的随机误差分析	288
8.7 本章小结	292
第9章 数字伺服控制系统的控制设计综合	293
9.1 数字伺服控制系统的性能要求	293
9.2 数字伺服控制系统的传统控制方案	296
9.2.1 根轨迹法设计	296
9.2.2 频域法设计	298
9.3 数字伺服控制系统的数字控制器设计	301
9.3.1 数字调节器的间接设计法	302
9.3.2 数字调节器的直接设计法	305
9.3.3 数字PID改进算法	308
9.3.4 滞后—超前校正的数字控制器设计	319

9.3.5 基于数值积分法的数字控制器设计	323
9.3.6 基于状态方程方法的数字控制器设计	325
9.4 数字伺服控制系统的复合控制方案	334
9.5 数字伺服控制系统的最优控制方案	335
9.6 步进电动机的精度控制	340
9.7 本章小结	343
第10章 数字伺服控制系统的抗干扰设计	344
10.1 概述	344
10.2 数字伺服控制系统的主要干扰因素分析	345
10.2.1 数字伺服控制系统的干扰源	345
10.2.2 数字伺服控制系统干扰的传输方式	347
10.3 数字伺服控制系统干扰的抑制	347
10.4 本章小结	351
第11章 数字伺服控制系统的调试与测试	352
11.1 概述	352
11.2 数字伺服控制系统的静态调试	353
11.3 数字伺服控制系统的动态调试	355
11.3.1 元器件动态参数的测试	355
11.3.2 数字伺服控制系统的频率特性测试	358
11.3.3 数字伺服控制系统的动态特性调试	360
11.3.4 数字伺服控制系统的动态特性指标的计算	362
11.4 数字伺服控制系统的性能测试	365
11.5 本章小结	366
第12章 典型的数字伺服控制系统的设计举例	367
12.1 直流数字伺服控制系统设计	367
12.1.1 DSP 的主要功能结构	367
12.1.2 硬件设计	368
12.1.3 数字伺服控制系统的控制策略	369
12.1.4 数字伺服控制系统的试验验证	371
12.2 交流数字伺服控制系统设计	371
12.2.1 应用 TMS320 F2812 DSP 实现交流数字伺服控制系统	372
12.2.2 应用 TMS320 F24 DSP 实现交流永磁同步电动机伺服系统数字控制	377
12.2.3 应用 TMS320 F247 DSP 实现角位置伺服控制系统	380
12.3 步进电动机数字伺服控制系统设计	383
12.4 角位置数字伺服控制系统	385
12.5 本章小结	393
参考文献	394

第 1 章 概 述

1.1 数字伺服控制系统的发展及应用

1.1.1 控制系统的发展及应用

从 20 世纪初开始,控制技术得到了迅速发展。控制技术极大地提高了劳动生产率和产品质量,推动了现代工农业的巨大进步。例如,数控车床按照预定程序自动地切削工件;化学反应炉的温度或压力自动地维持恒定;雷达和计算机组成的导弹发射和制导系统,自动地将导弹引导到敌方目标;无人驾驶飞机按照预定航迹自动升降和飞行;人造卫星准确地进入预定轨道运行并回收等,这一切都是以高水平的控制技术为前提的。此外,对执行机构诸如压力、流量、温度、液面高度、机器执行部件的位置与速度等物理参数的控制;在一些军用武器中,对诸如雷达天线、导弹发射架以及火炮的方位角与俯仰角等参数的控制;对空间飞行器的姿态以及轨道参数等的控制,所有这些执行部件的任务完成也都需要借助于控制技术。

在国民经济各部门中,由于广泛应用了控制技术,改善了劳动条件,从而极大地提高了产品质量和劳动生产率。近几十年来,随着电子计算机技术的发展和运用,在宇宙航行、导弹制导以及核动力等高新技术领域中,控制技术更具有特别重要的作用。不仅如此,控制技术的应用范围现已扩展到生物、医学、环境、经济管理和其他许多领域中,控制技术已成为现代社会活动中不可缺少的重要组成部分。

在军事上,控制技术有效地提高了武器的精确度和威力。以雷达高射炮为例,在敌方飞行器飞行时,雷达天线必须时刻旋转,随时自动保持指向敌方飞行器。雷达测出的敌方飞行器方位和仰角数据经过计算机加工并计入射击提前量后,又用来控制高射炮炮身的转动,使高射炮时刻保持瞄准敌方飞行器,随时准备开火,而瞄准的角度误差只有几分。如果不用控制技术,这些显然是做不到的。现代军用飞行器速度很快,炮身又沉重,用人力直接转动炮身是完全不能适应战争需要的。

在航天、制导、核能等方面,控制技术更是不可缺少。比如,要把重达数吨的人造卫星准确地送入位于数百公里高空的预先计算好的轨道和指定的位置,并一直保持它的姿态正确,使它的太阳能电池一直朝向太阳,无线电天线一直指向地球,还要保持卫星内的环境条件正常,使它所携带的各种仪器自动准确地工作等,所有这一切都是以高水平的控制技术为前提的。

控制科学和控制技术还处在继续发展的过程中。由于计算机的诞生和迅速发展,由于现代(时间域的和频率域的)控制理论的出现,控制技术一方面不断提高水平,以适应日益复杂、日益精密、难度越来越大的控制要求;另一方面又不断扩大应用到国民经济和社会生活的各个部门、各个方面。

控制理论是研究控制技术共同规律的技术科学。它的发展初期,是以反馈理论为基础的自动调节原理,并主要用于工业控制。第二次世界大战期间,为了设计和制造飞机及船用自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达跟踪系统以及其他基于反馈原理的军用装备,进一步促进并完善了控制理论的发展。到战后,已形成完整的控制理论体系,这就是以传递函数为基础的经典控制理论,它主要研究单输入/单输出、线性定常系统的分析和设计问题。

20 世纪 60 年代初期,随着现代应用数学新成果的推出和电子计算机技术的应用,为适应宇航技术的发展,控制理论跨入了一个新阶段——现代控制理论。它主要研究具有高性能、高精度的多变量变参数系统的最优控制问题,采用的方法是以状态为基础的时域法。目前,自动控制理论还在继续发展,并且已跨越学科界限,正向以控制论、信息论、仿生学为基础的智能控制理论深入。

1.1.2 伺服系统的发展及应用

伺服系统 (Servo-System) 也称随动系统,属于自动控制系统中的一种。它用来控制被控对象的转角 (或位移),使其能自动地、连续地、精确地复现输入指令的变化规律。它通常是具有负反馈的闭环控制系统,有的场合也可以用开环控制系统来实现其功能。伺服系统在机电设备中具有重要的地位,高性能的伺服系统可以提供灵活、方便、准确、快速的驱动。

伺服系统服务的对象种类繁多,如机器人手臂各关节的运动控制,仿型铣床中铣刀与被加工工件之间相对运动轨迹的控制,电弧炼钢炉中电极的位置控制,跟踪雷达天线俯仰角、方位角的自动控制,电动控制阀阀门的位置控制,计算机的磁盘、光盘的驱动控制等,都需要伺服系统。随着市场竞争的日趋激烈,用户对所需产品提出了更高的技术要求和更合理的性能价格比。伺服系统以其出色的性能满足了各种产品制造厂家近乎苛刻的要求,从而能够对产品的加工过程、加工工艺和综合性能进行改造。在机电一体化设备上,伺服系统的使用更加广泛,几乎工业生产的所有领域都成为伺服系统的应用对象。表 1-1 列出了伺服系统的主要应用领域。伺服系统能够成为所服务对象的有机组成部分,尽管各对象的机械结构、传动形式多种多样,对伺服系统的要求也有差别,但共同的一点是带动对象按需要的规律作机械运动。随着技术的进步和整个工业的不断发展,伺服驱动技术也取得了极大的进步,伺服系统已进入全数字化和交流化的时代。

表 1-1 伺服系统的主要应用领域

加工机械	FA 机械	医疗机械	机器人	自动组装机	半导体制造	部件组装	纺织机械
加工中心	食品加工	CT 设备	弧焊机器人	卷线机	晶片机械	芯片安装	编织机
铣床	食品包装	人造器官	点焊机器人	自动生产线	清洗设备	插装机	纺织设备
车床	自动仓库		搬运机器人		CVI (化学	焊接机	
磨床	搬运机械		喷涂机器人		气相沉积)		
数控机床	印刷机械				设备		
	挤压成形机						

伺服系统的发展经历了由液压到电气的过程。电气伺服系统根据所驱动的电动机类型分为直流 (DC) 伺服系统和交流 (AC) 伺服系统。20 世纪 50 年代,无刷电动机和直流电动机实现了产品化,并在计算机外围设备和机械设备上获得了广泛的应用。20 世纪 70 年代则

是直流伺服电动机应用最为广泛的年代。

从20世纪70年代后期到80年代初期,随着微处理器技术、大功率高性能半导体功率器件技术和电动机永磁材料制造工艺的发展及其性能价格比的日益提高,交流伺服技术——交流伺服电动机和交流伺服控制系统逐渐成为主导产品。交流伺服驱动技术已经成为工业领域实现自动化的基础技术之一,并将逐渐取代直流伺服系统。

交流伺服系统按其采用的驱动电动机的类型来分,主要有两大类:永磁同步(SM型)电动机交流伺服系统和感应式异步(IM型)电动机交流伺服系统。其中,永磁同步电动机交流伺服系统在技术上已趋于完全成熟,具备了十分优良的低速性能,并可实现弱磁高速控制,拓宽了系统的调速范围,适应了高性能伺服驱动的要求。并且随着永磁材料性能的大幅度提高和价格的降低,其在工业生产自动化领域中的应用将越来越广泛,目前已成为交流伺服系统的主流。感应式异步电动机交流伺服系统由于感应式异步电动机结构坚固,制造容易,价格低廉,因而具有很好的发展前景,代表了未来伺服技术的发展方向。但由于该系统采用矢量转换控制,相对永磁同步电动机伺服系统来说控制比较复杂,而且电动机低速运行时还存在着效率低、发热严重等有待克服的技术问题,目前并未得到普遍应用。

伺服控制技术是自动化学科中与产业部门联系最紧密、服务最广泛的一个分支。它是伴随电的应用而发展起来的,最早出现于20世纪初。1934年,第一次提出了伺服机构(Servomechanism)这个词。世界上第一个伺服系统由美国麻省理工学院辐射实验室(林肯实验室的前身)于1944年研制成功,这就是火炮自动跟踪目标的伺服系统。随着自动控制理论的发展,到20世纪中期,伺服系统理论与实践均趋于成熟,并得到广泛应用。近年来,在新技术革命的推动下,特别是伴随着微电子技术和计算机技术的飞速进步,伺服技术更是如虎添翼、突飞猛进,它的应用几乎遍及社会的各个领域。随着控制技术的发展,对伺服系统的性能不断提出新的要求。近年来,数字技术的飞速发展,将计算机与伺服控制系统相结合,使计算机成为伺服系统中的一个环节已成为现实。在直流伺服系统中,利用计算机来完成系统的校正,改变伺服系统的增益、带宽、完成系统的管理、监视等任务,使系统向智能化发展。

伺服控制技术在机械制造行业中用得最多也最广,各种机床运动部分的速度控制、运动轨迹控制、位置控制等,都是依靠各种伺服系统控制的。它们不仅能完成转动控制、直线运动控制,而且能依靠多套伺服系统的配合,完成复杂的空间曲线运动的控制,如仿型机床的控制、机器人手臂关节的运动控制等。它们可以完成的运动控制精度高、速度快,远非一般工人操作所能达到。

在冶金工业中,电弧炼钢炉、粉末冶金炉等的电极位置控制,水平连铸机的拉坯运动控制,轧钢机轧辊压下运动位置的控制等,都是依靠伺服控制技术来实现的,这些更是无法用人工操作来代替。

在运输行业中,电气机车的自动调速、高层建筑中电梯的升降控制、船舶的自动操舵、飞机的自动驾驶等,都是由各种伺服系统为之效力,从而减缓操作人员的疲劳,同时也大大提高了工作效率。

在军事上,伺服控制技术用得更为普遍,如雷达天线的自动瞄准跟踪控制,高射炮、战术导弹发射架的瞄准运动控制,坦克炮塔的防摇稳定控制,防空导弹的制导控制,鱼雷的自动控制等。

1.1.3 数字伺服控制技术的发展及应用

半导体技术的发展使伺服驱动技术进入了全数字化时期, 伺服控制器的小型化指标取得了很大的进步。LSI (大规模集成电路) 的精细加工技术以及开关特性的改善, 使高速开关器件的应用成为主流。IGBT (绝缘栅双极晶体管) 已经发展到了第 4 代产品。微处理器 (CPU) 性能的大幅度增强也使伺服控制器的复杂运算速度和多功能处理能力得以提高, 同时也为产品的小型化创造了条件。同时, 交流伺服控制器硬件环境的改善以及交流伺服电动机的结构和制造材料的改进, 为更加快速、准确、稳定地控制机械设备创造了很好的条件。

数字伺服控制系统是一种以数字微处理器或计算机为控制器, 去控制具有连续工作状态的被控对象的闭环控制系统。因此, 数字伺服控制系统包括工作于离散状态下的数字计算机和工作于连续状态下的被控对象两大部分。由于数字控制系统具有一系列的优越性, 所以在军事、航空及工业过程控制中得到了广泛的应用。

自动控制理论和计算机技术是数字伺服控制技术的两个主要依托。自动控制理论的高速发展, 为数字伺服控制系统研制者提供了不少新的控制律以及相应的分析和综合方法; 计算机技术的飞速发展, 为数字伺服控制系统研制者提供了实现这些控制律的可能性。以计算机作为控制器、基于现代控制理论的伺服系统, 其品质指标无论是稳态进度还是动态响应, 都达到了前所未有的水平, 比模拟式伺服系统高得多。在全数字控制方式下, 伺服控制器实现了伺服控制的软件化。现在很多新型的伺服控制器都采用了多种新算法, 目前比较常用的算法主要有 PID/IPD (比例微分/积分) 控制切换、前馈控制、速度实时监控、共振抑制控制、可变增益控制、振动抑制控制、模型规范适应控制、反复控制、预测控制、模型跟踪控制、在线自动修正控制、模糊控制、神经网络控制、 H_{∞} 控制等。通过采用这些功能算法, 使伺服控制器的响应速度、稳定性、准确性和可操作性都达到了很高的水平。

在一些国家的很多场合中, 数字伺服控制系统已代替了模拟式伺服控制系统。由于大规模集成电路的飞速发展, 以及计算机 (特别是高性能、高集成度数字控制器——DSP 控制器) 在伺服控制系统中的普遍应用, 近年来, 构成伺服控制系统的重要组成部分——伺服元件发生了巨大的变革, 并且向着便于计算机控制的方向发展。为提高控制精度, 便于计算机连接, 位置、速度等测量元件也趋于数字化、集成化。

模拟式伺服系统的静态精度受位置检测元件精度和运算放大器精度限制, 通常只能达到角分级。要进一步提高伺服系统的静态精度, 必须用数字计算机作控制器, 用高精度数字式元件 (如感应同步器、光电编码器) 作位置反馈元件, 实现模拟式伺服系统数字化。

从前面的讨论可以看出, 数字化伺服系统的应用越来越广, 用户对伺服驱动技术的要求越来越高。总的来说, 整个伺服系统的发展趋势可以概括为以下几个方面:

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看, 几乎所有的产品都是交流伺服系统。在工业发达国家, 交流伺服电动机的市场占有率已经超过 80%。在国内, 生产交流伺服电动机的厂家也越来越多, 正在逐步地超过生产直流伺服电动机的厂家。可以预见, 在不远的将来, 除了在某些微型电动机领域之外, 交流伺服电动机将完全取代直流伺服电动机。

2. 全数字化

采用新型高速微处理器和专用数字信号处理器 (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)、功率场效应晶体管 (MOSFET) 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 Module, 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, 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途中由上位计算机加以修改, 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

在国外, 以工业局域网技术为基础的工厂自动化 (Factory Automation, FA) 技术在最近 10 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连能力, 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。

综上所述, 伺服系统将向两个方向发展: 一个是满足一般工业应用要求, 对性能指标要求不高的应用场合, 追求低成本、少维护、使用简单等特点的驱动产品, 如变频电动机、变频器等; 另一个就是代表着伺服系统发展水平的主导产品——伺服电动机、伺服控制器, 追求高性能、高速度、数字化、智能型、网络化的驱动控制, 以满足用户较高的应用要求。

1.2 数字伺服控制系统的基本概念

什么是数字伺服控制系统? 数字伺服控制系统是用数字控制器来控制被控对象的某种状态, 使其能自动地、连续地、精确地复现输入信号的变化规律, 它通常是闭环控制系统。

数字伺服控制系统的种类很多, 组成状况和工作状况也是多种多样。它有检测装置, 用来检测输入信号和系统的输出, 有放大装置和执行部件, 为使各部件之间有效地线配和使系统具有良好的工作品质, 一般还有信号转换线路和补偿装置。这仅指信息在系统中传递所必经的各个部分。此外, 以上各部分都离不开相应的能源设备、保护装置、控制设备和其他辅助设备。

数字伺服控制系统的输出可以是各种不同的物理量, 本书将结合机械运动控制中的问题进行讨论, 如速度 (包括角速度) 控制、位置 (包括转角) 控制和运动轨迹控制, 讨论各种速度数字伺服控制系统和位置数字伺服控制系统的原理与设计问题。

数字伺服控制系统的静态精度取决于计算机字长和位置反馈元件的分辨率。选择构成高精度数字的计算元件和高分辨率的数字反馈元件, 便可构成高精度数字伺服控制系统。用当前高性能的 DSP 芯片作控制器不但精度高, 还能够实现模拟伺服系统难以实现的各种复杂的控制规律, 如最优控制律、自适应控制律、神经网络和模糊等智能算法的控制律, 并可以借助于高速的软件算法达到智能化。因此, 发展数字式伺服控制系统是发展高性能伺服系统的必然趋势。

图 1-1 给出了伺服系统的原理框图。图中所示为由电流环、速度环和位置环构成的三环位置控制系统, 即位置伺服系统。这是一个模拟的或称连续时间信号的位置伺服系统, 系统中的各种物理量: 电动机电流、电动机速度、输出的位置、给定信号等均为模拟量, 电流控制器、速度控制器、位置控制器均为模拟控制器。

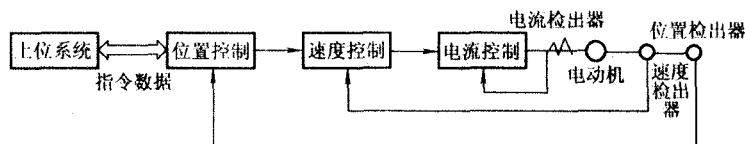


图 1-1 位置伺服系统框图

图 1-2 给出的是数字伺服控制系统的原理框图。从图中可以看出, 在模拟伺服系统的基础上, 将模拟校正装置 (控制器) 用数字计算机代替, 作为数字控制器, 就构成了计算机控制的数字伺服控制系统。这一替换使伺服系统发生了质的飞跃。

20 世纪 70 年代以后, 微型计算机的发展, 尤其是单片微型计算机的迅速发展, 使它们体积小、重量轻、工作可靠、价格低廉, 在伺服系统中取代了大量的模拟电路和数字电路, 提高了伺服系统的可靠性, 增强了伺服系统的通用性和灵活性, 促使伺服系统向数字化方向

的发展。更值得一提的是,应用数字计算机作数字控制器,使许多控制理论和技术中的新方法,例如最优控制,自适应控制和智能控制等,可能应用于伺服系统中,使伺服系统的性能和效率得到极大提高。

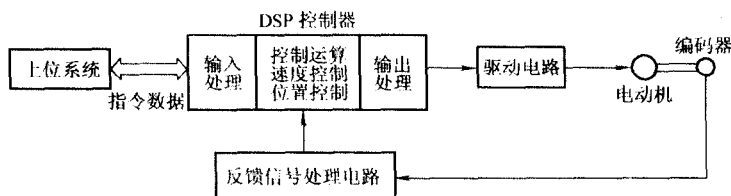


图 1-2 数字伺服控制系统框图

应用微型计算机作数字控制器有很多优点,分别如下:

- 1) 数字伺服控制系统中,从检测部件到控件算法精度的计算等,均可以采用数字部件。只要适当地选择字长,可以得到很高的检测精度和计算精度,因而提高了伺服系统的精度。
- 2) 数字信号的传递可以有效地抑制噪声,从而提高了系统的抗干扰能力。
- 3) 数字伺服控制系统允许采用高灵敏度的控制元件,以提高系统的控制精度。
- 4) 用微型计算机代替模拟电路或数字电路,使电路简化,体积减小。
- 5) 可用一台微型计算机分时控制若干个系统,提高了设备利用率,经济性好。
- 6) 微型计算机便宜,使系统造价低,而控制性能提高。
- 7) 控制算法由软件实现,控制器内部的信号由程序控制,系统的适应性和通用性增强,不同的控制规律只需编制不同的控制软件即可实现。

8) 对用户的误操作,计算机可以将其自动进行出错处理,从而防止误动作和误操作。

与模拟伺服系统比较,引入计算机的数字伺服系统也有其缺点:

- 1) 不同的系统或者相同的系统采用不同型号的微型计算机,要求不同的程序,因而软件工作量较大。
- 2) 软件与所选择的硬件是一一对应的,要求设计、制造、运行和维护的工程师能熟练地掌握硬件和软件技术。
- 3) 在硬件和软件的设计和制造过程中,开始就必须考虑采取有效的抗干扰措施,提高系统的抗干扰能力。

其中,第3点是控制工程师在硬、软件设计制造、调试中,必须自始至终认真谨慎对待的问题。

从图 1-2 中看到,数字伺服控制系统中驱动负载运动的执行部件与模拟伺服系统中的相同,它可以是各种电动机,如可以是直流电动机、步进电动机交流伺服电动机等。关于驱动电动机的类型选择、容量计算、传动比的选择等,均与模拟伺服系统中相同。

驱动伺服电动机是需要能量的,伺服电动机功率越大,所需要的驱动能量越大。供给伺服电动机的能量,需要功率驱动电路。关于伺服电动机的功率驱动电路,在模拟伺服系统中已讨论,在设计数字伺服控制系统时可以选用,也可以选用带有数字部件(如微型计算机、数字信号处理器、数字电路等)控制的功率驱动电路。

模拟伺服系统中有一个输入轴,还有一个输出轴,输出轴跟随着输入轴运动,最终消除