



“十二五”国家重点图书
航空航天精品系列

MODERN DIGITAL CONTROL PRACTICE

现代数字控制实践

● 王茂 申立群 编著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



“十二五”国家重点图书·航空航天精品系列
本书受自然科学基金(基金号: 60904050)等基金资助

MODERN DIGITAL CONTROL PRACTICE

现代数字控制实践

● 王茂 申立群 编著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内容简介

本书是一本系统阐述有关数字闭环控制系统设计和实现的专门著作,内容涉及数字系统硬件设计中的特殊技术细节考虑、常用的微处理器的各种实用接口扩展设计、主从分布式数字控制中多处理器的串并行数据通信、数字控制的电磁兼容设计及若干具体的电磁兼容问题解决实例、角位置信号的数字测量、数字接口的前置和后置处理模拟电路设计等,以及数字控制器的算法实现及汇编语言的软件设计。

本书可作为研究生或者爱好计算机硬件设计和数字系统的高年级本科生的教材或参考书,也适合具有一定数字控制实践经验的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代数字控制实践/王茂等编著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2011.1

ISBN 978-7-5603-3155-3

I. ①现… II. ①王… III. ①数字控制
IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 265310 号

责任编辑 王桂芝
封面设计 刘洪涛
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 东北林业大学印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 15.25 字数 400 千字
版 次 2011 年 3 月第 1 版 2011 年 3 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5603-3155-3
定 价 34.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

数字控制是指以数字计算机作为广义控制器实现对连续或离散对象(或过程)的开环或闭环控制的控制方法,它在诸多方面都有着传统模拟控制无法比拟的优点。随着微处理器及其相关电子技术的发展和进步,基于微处理器的数字控制越来越广泛地被用于控制工程实践中。

数字控制技术是一门多学科综合技术,它不仅包含古典控制理论、现代非线性控制科学的应用、微处理器数字系统的硬件扩展技术及软件设计,还涉及非电物理量的数字测量、模拟电路技术等,尤其是现代数字控制实践中还会遇到电磁兼容技术问题。

目前,大多有关数字控制的著作基本上偏重理论的分析 and 系统设计,而有关微处理器数字系统技术的教材则大多局限于某种处理器的基本结构和一般应用介绍。在作者的教学实践中发现,虽然很多读者对数字控制用到的各方面知识都有较深入的掌握,但在具体的数字闭环控制实践中往往不能有效地综合运用。为此,本书作者从工程实际出发,围绕实际的数字控制系统的设计和实现,介绍了多种常用微处理器的基础知识及外围接口扩展技术、数字控制的整个设计过程、硬软件实现方法等,试图使读者从全局的高度对数字控制技术有概括的了解,融会贯通地掌握所用到的诸方面的知识,提高对基础知识的综合运用水平和实际动手能力。

本书大部分章节的内容都是作者多年数字控制实践经验的系统总结和提炼,同时为了方便读者对数字控制技术有全面、系统的理解和掌握,介绍了有关数字控制的基础知识。基础知识的介绍不是简单的资料汇编,而是作者在参阅了大量相关文献的基础上,融会了本人实践过程中的心得体会,比如基础部分的硬件扩展及基于汇编语言的控制软件编程,都结合作者亲自设计和调试过的实例来介绍,以期对读者快速掌握、提升理解等有所帮助。

本书是一本有关数字闭环控制系统设计及实现的全面、系统而且实用的学习教程,内容涉及常用的微处理器接口扩展设计、多处理器的数据通信、数字控制的电磁兼容设计、角位置信号的数字测量、数字接口的前置和后置处理模拟电路设计等。本书可作为高年级研究生或者爱好计算机硬件设计和数字系统的高年级本科生的教材或参考书,也适合具有一定数字控制实践经验的科技人员参考。

本书第1、3、6、8、9章由王茂编著,第2、4、5、7章由申立群编著,博士研究生孙光辉编写了5.9节的主要内容,硕士研究生金海亮为本书第8章部分内容的编著提供了大量的基础素材,魏延岭、顾玥等帮助查阅了许多相关资料,并对初稿中的错误甄别进行了大量有益的工作。编著过程中,还得到了哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心游文虎博士的大力支持和帮助。作者在此一并表示感谢。

本书得到自然科学基金(基金号:60904050)、中国博士后基金(基金号:20090450997)、黑龙江省博士后基金(基金号:LBH-Z08182)资助。

作 者
2010年10月
于哈尔滨工业大学

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 数字控制的必要性及优点	1
1.2 目前比较流行的几种数字控制实现简介	1
1.3 一般单个数字控制系统的硬件构成	2
1.4 集中式多系统数字控制及主从分布式多系统数字控制结构	2
1.5 数字控制方案选择	3
1.5.1 工业控制计算机及 DsPACE 实时仿真系统用于数字控制时的优缺点	4
1.5.2 PC/104 控制计算机用于数字控制时的优缺点	4
1.5.3 MCS-51 系列单片机用于数字控制时的优缺点	5
1.5.4 MCS-96 系列 16 位单片机用于数字控制时的优缺点	5
1.5.5 DSP(或 DSC)微处理/控制器或 32 位单片机用于数字控制时的优缺点	6
1.6 数字控制设计的主要内容及一般过程	7
第2章 数字控制硬件设计基础	8
2.1 数字控制中常用微处理器的接口引脚功能及引脚设置	8
2.1.1 80C31 单片机用于扩展的主要信号引脚定义、功能及封装	8
2.1.2 80C196KC 单片机用于并行扩展的主要信号引脚定义、功能及封装尺寸	9
2.1.3 DSPLF2407A 数字信号控制器用于扩展的主要信号引脚定义、功能及封装	11
2.1.4 工业控制计算机、PC/104 的 ISA 总线引脚及物理尺寸定义	15
2.2 关于 TTL 数字接口芯片驱动问题	21
2.2.1 一般 TTL 芯片的输出、输入结构	22
2.2.2 其他电路驱动 TTL 芯片	22
2.2.3 TTL 电路驱动其他接口电路	23
2.2.4 TTL 电路驱动 TTL 电路时的驱动能力	23
2.3 5 V、3.3 V 混合供电系统中的电平兼容问题	24
2.4 关于 OC 输出结构的数字器件的使用	24
2.5 关于微处理器芯片本身的准双向口及其操作说明	25
2.6 数字控制中几种常用微处理器的中断结构特点及区别	25
2.6.1 80C31 单片机中断系统特点	26
2.6.2 80C196KC 单片机中断系统特点	26
2.6.3 DSPLF2407A 数字信号控制器中断系统特点	26
第3章 数字控制基本硬件扩展设计	28
3.1 数字控制中常用微处理器的最小系统设计	28
3.1.1 微处理器的时钟电路设置与连接	28
3.1.2 微处理器的复位电路设置与连接	29
3.2 微处理器总线驱动能力扩展	31
3.3 常用微处理器的程序存储扩展技术	34

3.3.1	MCS-51 系列单片机数字控制系统的程序存储扩展	36
3.3.2	MCS-96 系列单片机数字控制系统的程序存储扩展	36
3.3.3	DSPLF2407A 微控制器数字控制系统的程序存储扩展	39
3.3.4	执行代码可切换程序存储扩展技术	39
3.4	数字控制中常用微处理器的数据存储扩展	40
3.4.1	MCS-51 系列单片机数字控制系统的数据存储扩展	41
3.4.2	MCS-96 系列单片机数字控制系统的数据存储扩展	43
3.4.3	DSPLF2407A 微控制器数字控制系统的数据存储扩展	43
3.4.4	超出微处理器最大寻址空间的数据存储扩展技术	45
3.5	一般并行数字 I/O 扩展	51
3.5.1	一般并行数字 I/O 扩展的基本设计方法	51
3.5.2	MCS-51 及 MCS-96 系列单片机的并行数字 I/O 扩展设计	52
3.5.3	DSPLF2407A 的并行数字 I/O 扩展设计	55
3.5.4	工业控制计算机或 PC/104 的一般数字 I/O 接口扩展设计	56
3.6	数字控制的模拟输入、输出接口扩展	58
3.6.1	常用 A/D、D/A 接口芯片及同微处理器的接口方法	58
3.6.2	A/D、D/A 转换器的精密参考电源	62
3.7	数字电路的 EPLD 实现	64
3.7.1	EPLD 器件的分类	65
3.7.2	EPLD 器件的选择	66
3.7.3	EPLD 器件的开发工具及流程	66
3.7.4	EPLD 器件的设计输入	67
3.7.5	EPLD 器件设计文件的编译及编程	67
3.7.6	EPLD 编程器的安装	68
3.8	单片机系统的加密技术	69
3.8.1	程序隐藏法	69
3.8.2	硬、软件同时加密技术	70
第 4 章	数字控制中的多处理器数据通信	74
4.1	引言	74
4.2	并行通信的基本原理及接口设计	74
4.2.1	并行通信的基本构成	74
4.2.2	并行通信的优、缺点	75
4.2.3	单主模式并行通信设计	75
4.2.4	单主模式多机并行通信的信息传递控制	77
4.2.5	多主模式并行通信硬件设计	77
4.2.6	多主模式并行通信优先级仲裁电路	79
4.2.7	多主模式多机并行通信的信息传递控制	79
4.3	异步串行通信的基本原理及接口设计	80
4.3.1	串行通信的优缺点	80
4.3.2	近距离串行通信的硬件连接	81

4.3.3 单主多机远距离串行通信的硬件连接	81
4.3.4 单主多机串行通信的信息传递控制	83
4.3.5 单主异步串行通信的信号同步	84
4.3.6 单主异步串行通信的纠错处理	84
4.3.7 单主异步串行通信电平转换接口芯片选择	84
4.3.8 多主异步多机串行通信	86
4.3.9 多机 CAN 总线串行通信的优点	86
4.3.10 多机 CAN 总线串行通信的硬件连接	87
4.3.11 多机 CAN 总线串行通信优先级仲裁	88
4.3.12 多机 CAN 总线串行通信的信息传递控制	89
4.3.13 CAN 总线串行通信的信号同步	90
4.3.14 CAN 总线串行通信的纠错处理	90
4.3.15 CAN 总线串行通信接口芯片选择	90
第 5 章 数字控制的算法实现及软件设计	93
5.1 引 言	93
5.2 数字控制的控制器设计及数字化处理方法	93
5.2.1 零阶保持器的近似	93
5.2.2 控制器的数字化处理方法及逼近度讨论	94
5.3 采样周期选取	95
5.4 数字控制算法的实现	96
5.4.1 一般的单输入、单输出数字控制算法基本表达	96
5.4.2 数字控制算法的并联实现表达	96
5.4.3 数字控制算法的递阶表达	98
5.4.4 双反馈环数字控制的并行算法表达	98
5.5 数字控制算法的双处理器并行实现	99
5.5.1 双处理器并行实现的数字控制系统构成	99
5.5.2 数字控制系统双处理器并行实现的硬件结构	99
5.6 数字控制软件设计基础	100
5.6.1 数字控制器软件实现的主要设计内容及设计原则	101
5.6.2 完整的数字控制软件构成及基于汇编语言设计的注意事项	101
5.6.3 数字控制软件实现中的控制器参数及控制变量序列设置	101
5.7 基于 80C196KC 汇编语言的数字控制软件设计	102
5.7.1 适合 80C196KC 汇编语言的浮点数数据结构	102
5.7.2 80C196KC 汇编语言的浮点数运算方法及规则	103
5.7.3 80C196KC 汇编语言的浮点数运算符程序	103
5.8 基于 DSPLF2407A 汇编语言的数字控制软件设计	107
5.8.1 适合 DSPLF2407A 汇编语言的浮点数数据结构	107
5.8.2 DSPLF2407A 汇编语言 6 字节浮点控制器算法实现子程序	108
5.9 基于工业控制计算机或 PC/104 的数字控制软件设计	114
5.9.1 基于工业控制计算机的数字控制软件设计	114

5.9.2 基于 PC/104 的数字控制软件设计	120
5.10 数字控制实现中控制变量序列的初值处理	120
第 6 章 数字控制系统的电磁兼容设计	122
6.1 电源部分的电磁兼容设计	122
6.1.1 稳压电源输出端滤波处理措施	123
6.1.2 稳压电源交流输入端的滤波处理	123
6.1.3 稳压电源的二次稳压处理	124
6.2 数字电路部分的电磁兼容设计	124
6.2.1 数字电路原理设计阶段的电磁兼容考虑	124
6.2.2 数字电路印刷电路板设计阶段的电磁兼容考虑	125
6.3 模拟电路部分的电磁兼容设计	127
6.3.1 运算放大器电路原理设计阶段的电磁兼容考虑	128
6.3.2 运算放大器电路印刷 PCB 板设计阶段的电磁兼容考虑	128
6.4 基于 PWM 的电机驱动系统的电磁兼容设计	129
6.4.1 辐射干扰的抑制措施	129
6.4.2 传导干扰的抑制措施	129
6.4.3 基于 PWM 的驱动器电磁兼容的系统设计	130
6.5 软件设计上的抗干扰措施	130
6.5.1 数据采集或反馈信号中的干扰去除	130
6.5.2 数据通信的软件抗干扰措施	131
6.5.3 程序运行失常的软件抗干扰措施	131
6.5.4 信号状态采样判别中的抗瞬态干扰措施	131
6.6 外部信号走线的电磁兼容设计	131
6.7 几个电磁兼容问题解决实例	132
6.7.1 继电器线圈的电磁干扰抑制	132
6.7.2 数字控制机械执行机构部分的接地处理	133
6.7.3 控制箱壳体接地处理	134
6.7.4 角位置数字化测量的前置放大电路的抗干扰措施	134
6.7.5 角度方向判别处理中的瞬态干扰抑制	135
6.7.6 PWM 电机驱动系统中的一个问题解决	136
第 7 章 数字控制系统中常用的模拟电路	138
7.1 前 言	138
7.2 运算放大器电路设计的一般原则	138
7.2.1 运算放大器电路主要指标	138
7.2.2 运算放大器输入电压限制及保护措施	138
7.2.3 运算放大器的选取原则	139
7.3 常见的几种电路介绍	139
7.3.1 单位增益隔离器	139
7.3.2 基本反相放大器电路	140

7.3.3 基本同相放大器电路	140
7.3.4 差分放大器电路	141
7.3.5 相敏解调放大器电路	142
7.3.6 仪用放大器电路	143
7.3.7 绝对值放大电路	144
7.3.8 移相电路	145
7.3.9 低通滤波器电路	146
7.3.10 高通滤波器电路	148
7.3.11 带通滤波器电路	149
第8章 回转运动控制的角位置数字反馈信号测量	151
8.1 引 言	151
8.2 基于旋转变压器及感应同步器的鉴幅式双通道测角系统原理及实现	152
8.2.1 轴角变换器 AD2S80 简介	152
8.2.2 AD2S80 闭环测角原理及闭环系统特性分析	153
8.2.3 AD2S80 的外围电路参数选取	155
8.2.4 轴角变换器 AD2S80 的调零	157
8.2.5 最高速率限制	157
8.2.6 分辨率设置的注意事项	158
8.2.7 输入信号接法同角度增大方向的关系及增大方向调整	159
8.2.8 鉴幅式角位置数字测量系统整体硬件结构	160
8.2.9 鉴幅式角位置数字测量系统激磁电源及角度反馈信号处理模拟 电路设计	160
8.2.10 鉴幅式角位置数字测量的误差分析及补偿	162
8.2.11 双通道测角数据耦合处理	163
8.3 基于旋转变压器及感应同步器的混合式双通道测角系统原理及实现	167
8.3.1 精测角系统基本原理	167
8.3.2 闭环激磁电源设计	167
8.3.3 精测反馈前置放大器设计	177
8.3.4 精测反馈回路的滤波、检零电路设计	177
8.3.5 混合式双通道测角系统角度编码电路硬件结构原理	178
8.3.6 混合式双通道测角系统的辅助功能设计	179
8.3.7 误差补偿参数调试方法	179
8.3.8 混合式角位置数字测量的动态误差及自动补偿	184
8.4 测角传感器安装及接线对信号质量的影响	188
第9章 闭环系统数字控制设计实例	190
9.1 设计任务提出	190
9.2 总体方案设计	190
9.2.1 总体构成	190
9.2.2 电机参数及驱动方式选择	190

9.2.3	角位置反馈系统方案选择	191
9.2.4	速度反馈传感器选择	191
9.2.5	数字控制处理器选择及数字控制系统整体硬件结构	191
9.3	数字控制系统硬件设计	192
9.3.1	角度测量及反馈系统接口硬件	192
9.3.2	上位机指令给定及读取角度信息的串-并转换接口硬件设计	192
9.3.3	DSPLF2407A 处理器本身的最小系统及外扩展接口设计	195
9.3.4	数字控制系统的电源管理硬件设计	202
9.4	控制器结构及参数设计	203
9.4.1	精密位置控制的双控制器切换规则	204
9.4.2	粗位置控制器结构及参数设计	204
9.4.3	位置控制的精控制器设计	205
9.5	数字控制系统软件设计	207
9.5.1	上位机人机交互界面设计	207
9.5.2	串-并转换单元的软件设计	215
9.5.3	主控数字系统的软件设计	219
9.6	闭环数字控制系统的实际调试	225
9.6.1	闭环数字控制系统调试的一般步骤	226
9.6.2	利用仿真器调试数字控制系统时的一些注意事项	226
9.6.3	调试过程中的其他值得考虑的问题	227
9.6.4	转台闭环数字控制的位置响应实测曲线	228
9.7	闭环数字控制系统的性能测试	229
9.7.1	角位置定位精度检测	229
9.7.2	角位置定位重复性检测	230
9.7.3	速率准确度及平稳性检测	231
9.7.4	速率分辨力检测	231
参考文献		233

第1章 绪 论

过去人们根据计算机参与控制的方式和程度以及完成的功能不同,将数字控制分类为操作指示控制、直接数字控制、计算机监督控制及分布数字控制、程序控制、顺序控制等^{[1][2]}。随着计算机技术及数字控制技术的发展,现代数字控制往往能同时完成以上所有分类的功能,这样的分类及称谓逐渐地被淡化或摒弃。因此,现在所谓的数字控制,就是指以数字计算机作为广义控制器实现对连续或离散对象(或过程)的开环或闭环控制的控制方法。它的主要内容包括数字校正器一般设计及实现方法、单个数字控制系统实现硬件构成及基于硬件的软件设计、多个数字控制系统之间的数据通信等。

1.1 数字控制的必要性及优点

随着控制功能及性能指标要求的日益提高,过去常采用的模拟控制方法遇到越来越大的困难,因此采用全数字化的控制方案越来越显得必要。同模拟的控制系统比较,全数字化的控制系统具有如下优点^[3]:

(1) 实践中用于构成控制系统的很多环节,如运动控制中的角位置测量及反馈系统、指令给定及直流无刷力矩电机的功放等,越来越多地采用了数字实现,全数字化的控制系统可以避免不必要的信息形式转换,不仅可以简化系统硬件,而且可以减小误差。

(2) 全数字化的控制系统可以大大提高系统的集成度,从而提高系统的可靠性。

(3) 数字系统具有较高的噪声容限,消除了模拟系统中干扰噪音对系统性能的影响,而且克服了模拟系统难以克服的时漂、温漂等缺点,有利于提高系统的抗干扰能力和系统精度。

(4) 数字化后控制律完全由软件实现,很容易在不增加或改变硬件的前提下实现一些如控制回路切换等模拟电路难以实现的控制。

(5) 现代控制如自适应控制等基本上都是非线性控制,这样的控制几乎无法用模拟的方法实现,数字算法则可方便实现对任何非线性控制律的逼近,因此数字控制为现代控制在工程实践中的应用提供了基础。

(6) 全数字化控制系统的控制规律的更换和控制参数调整可以通过更改程序存储器的内容来完成,使系统调试变得极为方便。

(7) 采用数字控制可以基于一套硬件实现多个系统的控制,大大简化了多控制系统的硬件结构,同时可以不用增加任何硬件完成各系统的信息交换和协同控制。

(8) 全数字化的控制方案使数字测控系统易于标准化、系列化,有利于缩短研制周期,减少制造成本,而且便于用户维护和维修。

1.2 目前比较流行的几种数字控制实现简介

工业控制中有大量的逻辑控制或数字测量,这类系统一般属于开环数字控制。由于算法一般比较简单,系统对数字处理单元的要求不高,但对系统的性价比和可靠性要求较高,这类

系统往往采用性价比较高的 8 位单片机,如较流行的英特尔公司的 MCS - 51 系列八位单片机 80C31、PIC 的 8 位单片机等来实现。尤其是近些年来 MCS - 51 系列的 8 位单片机及类似的微处理器芯片不断推陈出新,在处理速度及性能上也有所发展,基于此类微处理器的数字控制获得了越来越广泛的应用。

很多的工业过程控制、运动控制则往往采用闭环控制,而且经常遇到多系统控制。这类系统的控制算法相对复杂,同时性能指标对计算机的运算精度要求也高,因此要求计算机的运算速度较高。

对于单系统闭环控制,大多采用字长较长的高性能单片机,如 MCS - 96 系列的十六位单片机 80C196KX 等,或采用具有较强控制功能的 DSP(称为 DSC),如 TMS320 系列的 LF2407A、F2812 等来实现。

对于多系统控制则分两种方式:集中式数字控制和主从分布式数字控制。集中式数字控制大多直接采用一个工业控制计算机,同时完成几个系统或参量的数字控制,或者采用基于 PC/104 等简化的系统计算机构成的数字处理系统来实现。也有很多系统采用分布式数字控制方式,这类结构中,每个子系统多采用同单系统闭环控制相同的实现方法,上位机则采用一个一般的系统计算机完成人机信息交换或协调控制管理等功能。

1.3 一般单个数字控制系统的硬件构成

现代数字控制几乎都是基于计算机来实现的,这里所谓的数字控制硬件,不包含控制系统中的执行部分及被控对象的硬件,而是指数字控制器的计算机硬件及其外围扩展电路,即图 1.1 中虚线框内部分。

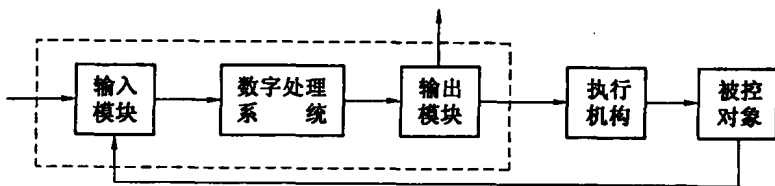


图 1.1 一般单个数字控制系统硬件构成

控制系统分为开环控制和闭环控制两种,对于数字实现的控制系统来讲,不论开环还是闭环控制,最基本的硬件结构都差不多。笼统地讲,它主要由三大部分构成:输入模块(前向通道)、计算机系统本身和输出模块(后向通道)。输入类型不外乎数字输入和模拟输入,当系统中有模拟输入时,其硬件结构中会包含多路转换电路和 A/D 转换电路。同样地输出模块中也会包含一般的数字输出口和模拟输出口,其模拟量输出是由 D/A 转换器实现的。数字处理系统则是指工业控制计算机、PC/104 等系统计算机或基于各类单片机、DSP 等不同微处理器构成的硬件系统。

1.4 集中式多系统数字控制及主从分布式多系统数字控制结构

实践中常会遇到一个设备中包含几个控制系统的情形,并且各个控制系统之间还需要进行协同工作或者信息交换,这时可以采用两种不同的数字控制方案。一是用一个计算机实现对所有系统的控制,如图 1.2 所示;另一是采用主从分布式数字控制,如图 1.3 所示。前者因为

要在同一采样间隔完成几个控制器的综合,所以对计算机的运算速度等性能有较高的要求,而且一旦主控计算机出现故障,则会造成所有系统瘫痪,整体安全性较差;但这种方案能够方便完成几个控制系统之间的协同控制和信息交换,目前很多应用中都采取这样的数字控制方式。后者则是将每个系统的控制分给不同的计算机去完成,而系统之间的协调和信息交换采用一个上位机完成,它实质上是一种多机并行控制,其优点是同样的采样周期下对每个子系统的运算速度要求不高,可以采用低成本的硬件实现高性能的控制,而且某一个子系统出现故障时不会对其他系统造成大的影响,整体安全性好。

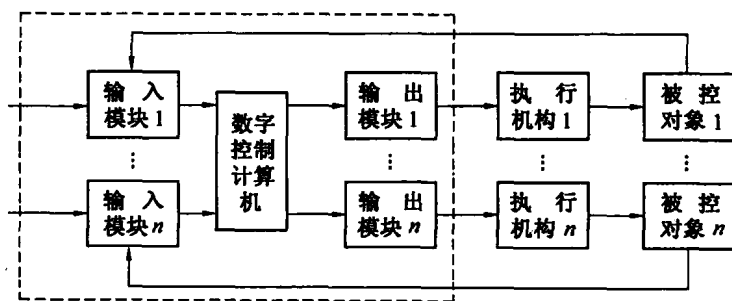


图 1.2 集中式多系统数字控制结构

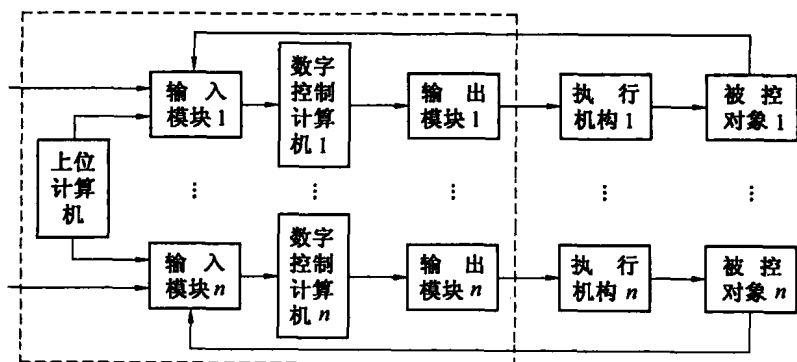


图 1.3 分布式多系统数字控制结构

由于一般计算机的运算速度不可能无限提高,集中式多系统数字控制中的子系统不可能太多,分布式多系统数字控制对子系统的数量则几乎没有限制。当然也可以综合两种方案的优点,采用分布-集中式的多系统数字控制方案。这种方案采用多个高性能计算机和一个上位计算机构成多系统数字控制,上、下位计算机构成主从分布控制,每个下位计算机又采用集中式多系统数字控制方式,它的硬件成本较高,一般很少采用,此处就不做进一步介绍了。

1.5 数字控制方案选择

在数字控制工程实践中,研究开发人员首先遇到的问题就是方案选择。方案选择一般经过两个过程:第一,首先根据任务要求,提出一种或几种方案,确保能实现任务所要求的功能和性能指标;第二,对提出的方案进行评估。

评估的内容一般包括:可行性评估、性价比评估、研制或开发周期评估、可靠性评估。

对于单系统的数字控制,主要考虑采用何种数字控制硬件及外围扩展芯片。在方案选择时,不是说选用性能最好的硬件系统及数字芯片就好,而是在能满足要求的前提下选择性价比

最好的。如果性价比差不多,则要选择开发人员最熟悉的方案,这样会大大减小开发研制周期。方案中所采用的数字芯片最好是市面流行的通用器件,以保证元器件供货的长期性及以后维修时的便利性。

对于多系统的数字控制,首先得确定是采用集中式方案还是主从分布式方案。采用集中式方案,可以简化硬件系统设计,有利于小型化,故障率也相对较低。但这种方案对数字控制计算机的处理速度要求较高,同时系统运行的整体安全性方面存在较大潜在隐患。而采用主从分布式控制方案,虽然每个子系统都必须有一套控制硬件,但它对计算机的处理速度要求不高。当采用同等处理速度的计算机时,可以提高采样频率,有利于控制系统的性能提高。由于采用多个计算机(或微处理器),可靠性比集中式差,但出现故障时的影响比集中式小。故对大多数数字控制来讲,选择主从分布式控制方案比较合适。

当选定了采用集中式控制方式或主从分布式控制方式后,数字控制方案的选择则更多地体现在如何选择实现数字控制算法的计算机或微处理器。为了方便读者选择,下面简单介绍一下常用的几种计算机和微处理器的特性及用于数字控制时的优缺点。

1.5.1 工业控制计算机及 DsPACE 实时仿真系统用于数字控制时的优缺点

工业控制计算机同一般的 PC 机类似,属于系统计算机,其基本硬件配置功能、采用的操作系统及软件资源同 PC 机一样^{[4][5]}。因为是面向工业控制,它使用的微处理器、所配置的外设一般不如 PC 机先进和丰富,但比普通的 PC 机可靠性高,各部分硬件之间的兼容性也好,处理速度虽然略低于普通的 PC 机但远高于一般的单片机及 DSP(DSC);同时,为满足工业控制的需要,在设计上还专门为使用者提供了若干可供外部接口扩展的 PCI 插槽和 ISA 插槽,并提供许多通用的 I/O 及 A/D、D/A 等标准接口板供开发者选择,因此很多开发人员喜欢用工业控制计算机来实现数字控制。用它来实现数字控制可以省去大量的硬件设计工作和软件开发工作,使用者可以方便地使用如 C、VC++ 等高级语言编写数字控制算法实现的应用程序。但工业控制计算机是一个完整的系统机,在用作数字控制时,存在大量的资源浪费,系统的性价比不高;同时整个控制系统硬件体积相对庞大,很难满足小型化、嵌入式要求。还有一个问题是这样的数字控制程序大多在 Windows 操作系统下运行,系统的实时性和安全性都存在不足。所谓的实时性不仅仅是指数字系统的采样频率能做到多高,还意味着系统上电初始化过程的长短及其采样定时的准确、稳定与否等。即使采用了 RTX 实时操作系统,其实时性也不比采用其他如 DSP(DSC)等硬件系统好。

DsPACE 实时仿真系统是由德国 DsPACE 公司开发的一套基于 MATLAB/Simulink 的控制系统开发及半实物仿真的硬件平台,可以实现同 MATLAB/Simulink 的完全无缝连接。除了能实现支持 MATLAB/Simulink 的完全无缝连接及控制代码自动生成等功能外,在本质上同工业控制计算机基本相同,比如它也具有高的可靠性和可扩充性(同工业控制计算机一样为用户提供通用的 A/D、D/A 及一般 I/O 扩展板)。用 DsPACE 实时仿真系统来实现数字控制比基于工业控制计算机的实现更加方便,其缺点是无法实现嵌入式设计,从而达到小型化目的,性价比还不如采用工业控制计算机高。

工业控制计算机及 DsPACE 比较适合用于集中式多系统数字控制。

1.5.2 PC/104 控制计算机用于数字控制时的优缺点

工业控制计算机厂商针对嵌入式应用要求,开发了若干嵌入式主板、嵌入式单板电脑及嵌

入式工业控制计算机等产品。在这些产品中 PC/104 嵌入式主板无论从几何尺寸还是性价比方面讲都具有一定的优势,而且已经形成了一种工业标准,因此在实际的工业数字控制中最为常用。

PC/104 相当于一种功能和性能上都做了简化的工业控制计算机,它去除了一般工业控制计算机的大部分外扩,比如电源、底板、机箱等,只保留了其中的处理器及核心外围设备部分;性能上如内存容量、硬盘容量等也进行了缩减,硬盘多采用小容量的 CF 卡,PCI 及 ISA 总线插槽以 A、B、C、D 四排共 104 针的 IDC 插针替代,实质是一个基于工业控制计算机处理器的最小系统,整个系统的几何尺寸大大缩小。操作系统则多采用单任务的 DOS,更具实时性。因此 PC/104 比工业控制计算机更适合用于数字控制的实现。

在采用 PC/104 进行数字控制硬件设计时,PC/104 可以看作是一个经过二次集成的微处理器,系统中所需的输入、输出口可根据使用者的具体要求进行扩展,就如同采用单片机进行数字控制设计一样。它的优点是处理速度快,体积相对于工业控制计算机及 DsPACE 小很多,可以实现准嵌入式设计。但相对于单片机及 DSP(DSC)来讲,其体积还是显得比较大。

PC/104 的处理速度很快,体积也不算大,性价比也不错,既可用于集中式多系统数字控制也可用于主从分布式数字控制的下位机。

1.5.3 MCS - 51 系列单片机用于数字控制时的优缺点

MCS - 51 系列单片机是一款高性能 8 位单片机,最先由 Intel 公司推出,由于其优越的性能和较强的控制功能,在工程实际中有广泛的应用^{[6][7][8]}。近些年来相继有其他公司的类似产品如飞利浦公司的 80C51 系列单片机等见诸市场,但所采用的基本技术和工艺大同小异,只是在某些方面如功耗、时钟频率和外设进行了一些改进或扩充,故这里的 51 系列单片机不单是指 Intel 的 MCS - 51 单片机而是包括其他公司类似产品在内的广义称谓。

MCS - 51 系列单片机采用 8 位 CPU,内部一般集成有 256 到 512 个字节 RAM,通用异步串行通信接口(SCI),包括外中断和内中断共 5 个中断源、两个中断优先级的中断处理单元,一个 A 累加器和 B 辅助累加器及若干内部特殊功能寄存器,有的型号芯片还提供了 I2C 总线。芯片采用准哈佛结构,提供可与低 8 位地址复用的 8 位数据总线和 8 位高地址总线、若干读/写等控制线及一般的 I/O 线。专用的程序读取控制信号 PSEN 允许用户通过 16 位地址总线和 8 位数据总线实现独立的 64K 空间程序存储器扩展;通过外引的 16 位地址总线和 8 位数据总线还可实现 64K 空间的数据存储器及 I/O 扩展(数据存储空间和 I/O 空间统一编址)。

所有的系列单片机都不擅长计算处理,这是因为它的 CPU 采用较窄的 8 位数据总线宽度,同时所有的算术和逻辑运算都必须通过一个专用累加器 A 来完成,瓶颈效应严重,故大大限制了其运算速度。但 51 系列单片机在有限条指令里提供了相对多的判断、跳转及比较指令,同时提供简单的硬件乘法及除法电路,因此,51 系列单片机特别适合应用于计算不是很复杂但逻辑控制功能要求较高的工业控制场合。

MCS - 51 系列单片机具有较强的逻辑控制功能和较高的性价比,在大多开环数字控制及测量应用中有其独特的优势。

1.5.4 MCS - 96 系列 16 位单片机用于数字控制时的优缺点

MCS - 96 系列单片机是一类 16 位单片机,其 CPU 采用 16 位总线结构,外部可设置为 8 位或 16 位数据总线。芯片内部集成有 256 字节的 RAM、通用异步串行通信接口(SCI 接口)、高

速输入/输出单元、10位A/D转换器、可处理8个中断源共计20种中断事件的中断处理单元及其他外围部件^{[9][10][11]}。

与MCS-51系列单片机相比不足之处是其系统结构采用冯·诺依曼结构,程序存储、数据存储及I/O统一编址,总共的可寻址空间为64K。除了这点外,在其他方面的功能基本都比51系列有所增强,至少不比51系列差。尤其是它不仅采用了16位的CPU,而且其内部的232个RAM都可以用作累加器进行算术、逻辑运算,消除了51系列的瓶颈效应,同时其硬件乘、除法电路的位数增大了一倍,大大提高了其运算速度。

同目前常用的单片机比较,MCS-96系列16位单片机是最适合作为工业数字控制的一类单片机,其指令系统中也提供了大量用于判断、跳转和比较的指令,不仅保留了51系列的强大的控制功能,而且运算能力有大幅度提高,可惜的是由于其功耗相对较大,难以进一步提高工作主频,其系列中的某些产品正在慢慢淡出市场。不过用户可以选择其他具有类似性能和功能的单片机来替代。

总之,类似MCS-96系列的16位单片机是比较适合实现单个闭环系统的数字控制的,尤其适合作为主从分布式数字控制的下位机,具有较高的性价比。

1.5.5 DSP(或DSC)微处理/控制器或32位单片机用于数字控制时的优缺点

DSP是一类主要面向数字信号处理的处理器产品,它具有较高的运算速度和强大的计算能力,流行的DSP工作主频都在40MHz以上,但大多数DSP并不大适合作为工业控制来用。随着技术的发展和用户需求,DSP生产厂商逐渐将其芯片的数字信号处理能力和工业控制相结合,推出了适合工业控制的DSP芯片如TMS320LF2407A、TMS320F2812等,这类芯片正在慢慢地被习惯称为DSC^{[12][13][14]}。

32位单片机具有灵活的控制功能,其算术运算能力比16位单片机有很大增强。当选择32位单片机时,其实主要是想利用它的算术运算能力,但由于同DSC相比其运算能力和速度仍显逊色,故在追求运算速度的应用场合,它就没有DSC更有优势,因此这里不做详细介绍。

DSC(这里DSC是专指适合工业控制的DSP芯片)内部采用32位的中央处理单元,片内集成了比单片机丰富得多的RAM,同时具有32K用于存储程序的片内FLASH,SCI外设接口及先进的CAN总线接口,中断处理功能和能力更加强大。这类芯片对外提供16位地址总线、16位数据总线和若干控制总线,很适合用户进行外围数据、程序及I/O扩展。系统结构采用哈佛结构,允许进行独立的64K程序存储空间、64K的数据存储空间及64K的I/O地址扩展。

DSC毕竟是在DSP基础上发展起来的,其控制功能不如单片机灵活,指令系统中用于判断、跳转及比较的指令很少,要想实现像单片机的某些判断跳转等功能必须用多条指令完成,但好在该类芯片的工作主频很高,指令周期极短,这个缺点几乎不影响其工作效率,只是程序设计稍显冗长。

同单片机相比,DSC的性价比不是最好,但随着技术发展,这类芯片的造价越来越低,到目前为止,如TMS320LF2407A这样的DSC的造价已经不比16位的单片机高多少,其性价比完全可以同单片机媲美,因此越来越多的开发人员喜欢选用DSC来实现各类闭环系统的数字控制。

DSC可以用于实现单个闭环系统的数字控制,它具有的高速串行CAN总线使其更适合作为主从分布式数字控制的下位机。由于其运算速度很快,也可以用作多系统集中式数字控制的硬件构成。

1.6 数字控制设计的主要内容及一般过程

数字控制设计的主要内容包括以下几个方面:数字控制算法设计;控制系统硬件设计;数字控制算法的软件实现;抗干扰设计。

1. 数字控制算法设计

对于开环控制系统,其算法设计相对简单,主要是控制规则设计或者数字滤波算法设计。对于闭环系统来讲,则基本上是基于古典或现代控制原理进行校正环节设计,以保证整个闭环系统的稳定性和满足系统动、静态指标要求。数字控制的直接设计方法,由于其缺乏与过去工程实践中常用的指标定义有确切对应关系的性能指标定义,一般工程中很少采用。所以数字控制的控制器设计过程同过去的模拟控制设计基本相同。

2. 控制系统硬件设计

控制系统硬件设计主要包括电源系统设计、所选定的微处理器的最小系统硬件设计以及实现控制功能的输入输出硬件扩展设计,有时可能还会涉及到数据存储的设计问题。

3. 数字控制算法的软件实现

首先选择合适的离散化方法,将所设计的模拟校正器转换为差分方程表达,其目的是以数字算法来逼近或模拟基于古典控制理论设计的控制器。

4. 抗干扰设计

数字控制的抗干扰能力在某些方面比模拟控制有优势,但是也存在不如模拟控制之处。对于模拟控制来讲,当系统遇到某些瞬态尖峰干扰时,系统会在该时刻受到影响,如果系统鲁棒性好的话,这样的干扰不会造成系统瘫痪,当干扰消失后,系统还会保持原有的性能。而对于数字控制来讲,控制算法用程序来实现,这样的瞬态尖峰可能会造成程序的不正常运行,从而使得整个系统瘫痪,因此数字控制中抗干扰设计也是一个重要的内容。