

小型交流伺服电机 控制电路 设计

〔日〕石岛 胜 著
薛 亮 祝建俊 译



科学出版社

小型交流伺服电机 控制电路设计

〔日〕石岛 胜 著
薛 亮 祝建俊 译

科 学 出 版 社
北 京

图字: 01-2012-0416 号

内 容 简 介

本书主要介绍小型交流伺服电机的基本特性、设计方法及应用实例。主要内容包括交流伺服电机的基本原理、构造与特征,电机驱动电路,电机控制,反馈控制电路的设计,使用单片机控制交流伺服电机,驱动交流伺服电机的三相 PWM 控制回路,基于软件的伺服控制器的设计,基于汇编语言实现的伺服控制器高速化,交流伺服电机的控制实验等。书后还给出了与直流电机有关的专业名词解释,对于读者理解书中的内容有很大的帮助。

本书内容实用性强、结构清晰合理、言简意赅,对实际操作有很强的指导性和借鉴意义。

本书适合工科院校电子、电工等相关专业的师生参考阅读,同时适合作为广大电气从业人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

小型交流伺服电机控制电路设计/(日)石岛胜著;薛亮,祝建俊译.
—北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-035815-8

I. 小… II. ①石…②薛…③祝… III. 小型电机-交流伺服电机-控制
电路-电路设计 IV. TM383.402

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 248424 号

责任编辑:杨 凯/责任制作:董立颖 魏 谨

责任印制:赵德静/封面设计:卢雪娇

北京东方科龙图文有限公司 制作

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

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

骏杰印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 1 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2013 年 1 月第一次印刷 印张: 15 1/4

印数: 1—5 000 字数: 225 000

定 价: 36.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前言



本书是以月刊《晶体管技术》从 2005 年 12 月开始的特辑“电机的基础与实用控制电路设计”为基础,增添、修改完成的。希望能作为交流伺服电机的入门书与实用书奉献给读者。

控制电机需要广范围的知识与经验,不仅需要理解电机的原理与构造,更需要关于驱动方法以及控制电路的知识和经验。

鉴于上述原因,本书能够传达给读者的内容非常多,涵盖众多领域技术。我也考虑过是否应该限制一下涉及的领域,但是为了解说交流伺服电机的实际控制方法,还是保留了大部分必要内容。

本书主要涉及以下技术领域:

- (1) 电机的构造和原理。
- (2) 强电。
- (3) 微处理器的应用。
- (4) 数字信号处理。
- (5) 电机调整/控制。

书中引用的数学式与程序代码,大部分都是以中学与高中学习过的三角函数及微积分作为基础的。

本人是在设备制造厂工作的技术人员,在实际的设计中看到,与大学级别的高等数学相比,应用更多的是中学与高中级别的初等数学。希望各位能够通过本书理解这样的状况。

本书的读者对象如下:

- (1) 刚刚接触电子系统或者机械系统设计的工程师。
- (2) 亲自参与电机控制的非专业设计者。
- (3) 研究电机及机器人等领域的工科生。

若能够让年轻的技术者及研究者读到本书,则是作者的幸运。本书列举的电机控制主板是费了许多年月开发而已经商品化的东西。能够将电机驱动方法及控制回路的实践解说得如此详尽的书籍尚不多见,希望读者能感受到无法从教科书中得到的现实中的设计感觉。

最后,我要感谢给了我这次机会并且与我共同努力了两年的《晶体管技术》编辑部及制作部的全体同仁。

目 录

第 1 部分 基础篇

第 1 章 交流伺服电机的基础	3
1.1 本书的重点课题	3
1.2 本书中使用的交流伺服电机	4
1.2.1 代表性的交流伺服电机	4
1.2.2 交流伺服电机的内部构造	5
1.2.3 交流伺服电机的用途	5
1.3 电机的构造及原理	7
1.3.1 直流电机的基本构造	8
1.3.2 直流电机的转动原理	9
1.3.3 无刷直流电机的基本构造	10
1.3.4 无刷电机的旋转原理	11
1.4 电机的分类与直流伺服电机在分类中所处的位置	12
1.4.1 直流伺服电机属于旋转电机	13
1.4.2 交流伺服电机是有逆变器电路的交流电机	13
1.4.3 交流伺服电机是同步电机	14
1.4.4 交流伺服电机的特征	14
1.5 伺服是什么	15
1.5.1 伺服机构与伺服电机	15
1.5.2 直流伺服电机	15
1.5.3 RC 伺服	16
1.5.4 位置检出机构	18
1.5.5 交流伺服电机的系统构成	20

第 2 章 交流伺服电机的构造与特征	22
2.1 产生旋转力的原理	22
2.1.1 有关磁铁的知识	22
2.1.2 实际的电机	23
2.1.3 电机的恢复转矩和平衡点	25
2.2 旋转力与步进驱动	26
2.2.1 制造旋转磁场的方法	26
2.2.2 使其连续的旋转	26
2.2.3 决定位置机构的特征	28
2.2.4 控制位置	28
2.2.5 控制速度	29
2.3 无刷直流电机驱动	29
2.3.1 让电机不停止地转动	29
2.3.2 不会产生失步	30
2.3.3 检测转子的位置	30
2.3.4 控制速度	32
2.3.5 控制位置	33
2.4 交流电机驱动(正弦波驱动)	33
2.4.1 交流伺服电机驱动(正弦波驱动)的电流分配	34
2.4.2 交流伺服电机驱动(正弦波驱动)的转子位置检测	35
2.4.3 很容易实现高旋转/高效率的电机驱动的无刷直流电机 驱动	36
2.4.4 很难实现高旋转/高效率的电机驱动的交流伺服电机驱动	37
2.5 基于正弦波驱动的微步进驱动	40
2.5.1 三相正弦波驱动的稳定点	40
2.5.2 转子的步进角不总是正确的	40
2.5.3 抑制电机振动的效果	41
2.6 有刷直流电机	41

第 3 章 电机驱动电路的基础	43
3.1 电机驱动的基础知识	43
3.1.1 力与转矩的关系	43
3.1.2 转矩和功率的关系	44
3.1.3 电机驱动的 4 象限运行过程	45
3.1.4 直流电机的等价电路	46
3.1.5 直流电机的转数可以通过电压控制	47
3.1.6 线性放大器驱动和 PWM 放大器驱动	48
3.2 电机的 PWM 驱动方法	52
3.2.1 电桥电路 PWM 驱动的 MOSFET 栅极驱动器电路的例子	53
3.2.2 电桥 PWM 驱动方法的特征	54
3.2.3 线性 PWM 驱动的 MOSFET 栅极驱动器电路的例子	56
3.2.4 线性 PWM 驱动方法的特征	59
3.3 基于 PWM 驱动的电机电流的检测方法	61
3.3.1 直接测量电机线的方法(A 方法)	62
3.3.2 测量电压侧 MOSFET 的电源和 GND 的电流的方法 (B 方法)	63
3.3.3 测量电源电流的方法(C 方法)	63
3.3.4 测量电机电流的电路实例(A 方法)	63
第 4 章 电机控制的基础	65
4.1 电机控制的基础知识	65
4.1.1 拉普拉斯变换是什么?	65
4.1.2 传递函数是什么?	66
4.1.3 方框图是什么?	66
4.1.4 电机的传递函数	67
4.1.5 转矩控制放大器的传递函数	69
4.1.6 传感器的传递函数	70
4.1.7 电机驱动部的传递函数	70
4.2 伺服控制器的作用	71
4.2.1 位置控制的运作原理	71

4.2.2	速度控制的运作原理	72
4.3	数字信号处理的基础知识	73
4.3.1	延迟单元 $1/z$	73
4.3.2	连续系统传递函数和离散系统传递函数	73
4.3.3	数字滤波器的设计方法	74
4.4	数字滤波器设计帮助软件(DSP.EXE)	76
4.4.1	模拟滤波器设计	77
4.4.2	解析模拟滤波器频率特性(c3)	78
4.4.3	s - z 变换(c4)	78
4.4.4	解析数字滤波器频率特性(c5)	79
4.4.5	数字滤波器参数的保存(c6)	79
4.4.6	数字 PID 控制器的设计(w7)	80
4.4.7	数字位置/速度环控制器的设计(w8)	80
4.5	抓住滤波器设计的特征	81
4.5.1	2 次 LPF 的特征	81
4.5.2	2 次陷波滤波器的特征	82
4.5.3	PID 控制器的特征	83
4.5.4	位置/速度环控制器的特征	85
4.6	伺服控制器的系统设计	86
4.6.1	伺服控制器的构成	86
4.6.2	目标轨迹生成器	86
4.6.3	系统延迟	87
4.6.4	反馈控制器	88
4.6.5	前馈控制器	88
4.6.6	输出滤波器	88

第 2 部分 应用篇

第 5 章	使用单片机控制交流伺服电机的基础	91
5.1	H8S/2367F 和 CoolRunner II 的主要特征	91
5.1.1	16 bit 高速 H8S/2000 CPU	91

5.1.2	丰富的周边功能	92
5.1.3	CoolRunnerII (XC2C256)的主要特征	92
5.2	单片机的使用方法	92
5.2.1	PWM 信号的产生方法	93
5.2.2	DMA 的使用方法	94
5.2.3	DTC 的使用方法	97
5.2.4	环路计算用的时基的产生方法	99
5.2.5	中断控制器的使用方法	100
5.2.6	增计数的产生方法	101
5.2.7	实时通信接口(SCI)的使用方法	102
5.3	PLD 的使用方法	103
5.3.1	CPLD 及 FPGA	103
5.3.2	CPLD 的设计工具	103
5.3.3	设计中的注意点	103
5.4	交流伺服电机控制回路的系统设计	104
5.4.1	设计目标	104
5.4.2	三相正弦波 PWM 驱动	104
5.4.3	自增计数器	105
5.4.4	PWM 频率	106
5.4.5	电流环频率	106
5.4.6	伺服环频率	106
5.4.7	电机电流检出频率	107

第 6 章 驱动交流伺服电机的三相 PWM 控制回路的 实践

6.1	设计参数	108
6.1.1	控制部分的参数	108
6.1.2	驱动部分的参数	108
6.2	使用部件及电路的选定	109
6.2.1	MOSFET 的确定	109
6.2.2	MOSFET 栅极驱动电路	110

6.2.3	电机电流检测电路	111
6.3	交流伺服电机驱动硬件电路	112
6.3.1	使用微控制器内置的 TPU 生成三相 PWM 的方法	112
6.3.2	非重叠 PWM 信号	113
6.3.3	转子位置检测电路(CPLD)	115
6.4	向量控制的基础知识	118
6.4.1	模拟的参数	119
6.4.2	电机电流三相(U,V,W)的波形	120
6.4.3	电机电流的三相(U,V,W)→二相(α, β)转换	120
6.4.4	电机电流的二相(α, β)到 $d-q$ 的转换	121
6.4.5	PI(比例积分)控制器	123
6.4.6	PI 控制器 $d-q \rightarrow \alpha'-\beta'$ 变换	125
6.4.7	二相(α', β')→三相(U,V,W)变换	126
6.5	基于微控制器的向量控制实验	127
6.5.1	计算转子的位置,从 LUT(Look Up Table)中读取 sin 值和 cos 值	128
6.5.2	U 相和 V 相的电机电流值的读取、偏差修正、增益修正	129
6.5.3	对电机电流进行 $\alpha\beta$ 变换,再进行 $d-q$ 变换	131
6.5.4	PI(比例积分)控制器	132
6.5.5	PI 控制器 $d-q \rightarrow$ 二相(α', β')→三相(U,V,W)变换	135
6.5.6	三相(U,V,W)→PWM 变换	135
6.5.7	对应各种各样的电机	139
第 7 章	基于软件的伺服控制器的设计	141
7.1	伺服控制器的构成	141
7.1.1	读取编码计数器的值,计算位置和速度	141
7.1.2	计算反馈(PID 或者是位置/速度环)	143
7.1.3	前馈 & 输出滤波器	145
7.1.4	伺服输出(转矩指令)处理	146
7.1.5	标准值的生成	148
7.2	反馈控制器	149

7.2.1	PID 控制器的运算步骤	149
7.2.2	位置/速度环控制器计算路径	150
7.3	IIR 数字滤波器计算路径	151
7.4	前馈计算路径	154
7.5	目标轨迹生成器	155
7.5.1	目标轨迹生成相关的基础知识	155
7.5.2	目标位置轨迹的生成方法	157
7.5.3	目标速度轨迹的生成方法	158
第 8 章	基于汇编语言实现的伺服控制器高速化	160
8.1	IEEE 标准的单精度浮点	160
8.1.1	单精度浮点的位配置	160
8.1.2	单精度浮点的表示方法	161
8.2	16 位精度浮点	162
8.2.1	16 位精度浮点的位的设置	162
8.2.2	16 位精度浮点的表示方法	163
8.2.3	16 位精度浮点的计算精度	164
8.2.4	16 位精度浮点的计算方法	164
8.3	PID 控制器	180
8.3.1	寄存器的使用方法	182
8.3.2	计算顺序和运行时间	183
8.3.3	在积分项中设置极限	184
8.4	位置/速度环控制器	184
8.4.1	寄存器的使用方法	187
8.4.2	计算顺序和运行时间	187
8.4.3	在积分项中设置极限值	188
8.5	IIR 数字滤波器	188
8.5.1	寄存器和局部变量的使用方法	190
8.5.2	计算顺序和运行时间	192

第 9 章 交流伺服电机的控制实验	193
9.1 电机控制实验的设备	193
9.1.1 电机控制主板	194
9.1.2 使用的电机	195
9.1.3 实验中用的负荷	195
9.2 伺服调整方法	196
9.2.1 有关伺服调整的一些参数	196
9.2.2 伺服锁定的实现	197
9.2.3 伺服调整工具	200
9.2.4 PID 参数的决定方法	201
9.2.5 加速度极限和速度极限的确定方法	202
9.2.6 驱动极限(转矩控制放大器的电流极限)的确定方法	204
9.2.7 前馈的确定方法	204
9.2.8 数字滤波器的系数	204
9.3 电机控制实验(PID 控制器)	204
9.3.1 微小距离传送的定位性能	204
9.3.2 高速传送响应性能	207
9.3.3 速度控制性能	207
9.4 电机控制实验(位置/速度环控制器)	208
9.4.1 位置/速度环控制器是二重反馈控制器	209
9.4.2 伺服增益的决定	209
9.4.3 开环频率特性	210
9.5 电机的输出功率	213
9.5.1 电机转动圈数和输出功率的关系	213
9.5.2 电机转动是在做功	214
 附 录 交流/直流伺服电机驱动 MCG02	 215
专业术语解释	217
参考文献	229

第 **1** 部分

基础篇

第 1 章

交流伺服电机的基础

交流伺服电机一般是从电机制造商处把商品电机及伺服放大器作为一套而购入的。本人是在电机制造厂工作的技术人员,然而数年前我从未想过会由我自己来设计交流伺服电机的控制电路。

刚开始设计交流伺服电机的控制电路的理由是因为最近广受注目的人形机器人。人形机器人是模仿人类而制造的机器人,所以要使用非常多的电机。电机制造商制造的电机与伺服放大器,尺寸都过大,因此必须对电机及伺服放大器进行小型化。在这种背景下,我得到了在公司开发伺服放大器的机会。

刚刚开始开发交流伺服电机的伺服放大器的时候,我在书店与网络上寻找过相关的书籍,然而介绍电机的种类、特征、构造的书虽然多,但是关于交流伺服电机的实用控制方法及控制电路的书籍非常少。为了收集到设计所必需的资料我费了相当大的工夫。

1.1 本书的重点课题

电机的历史非常悠久,可以追溯到 19 世纪初。当时,电机本来是为了旋转而发明的一种设备。随着技术的发展,电机被用在各种各样的地方,电机的材料、构造及控制方法都得到了大幅度的提高,对电机的转动精度与效率等有了更多要求。近年因为地球温暖化问题,从保护环境观点来说,高效而清洁的电机技术将愈发重要。从控制层面来看,关键技术是矢量控制技术和高精度的

伺服控制技术。

交流伺服电机在所有的电机中是最昂贵的一种,用途仅限于 FA(Factory Automation)领域,但是在交流伺服电机上开发出来的矢量控制技术和高精度伺服控制技术正迎合了这样的时代要求。因此,在冰箱、空调这些家庭电器上,以及在工业机器、铁路、汽车等领域,开发低成本、高效率的电机控制技术成为最近非常热门的研究课题。作为结果,一部分家庭电器实现了不用电流传感器与速度传感器的无线传感器(sensorless)矢量控制,空调及冰箱的耗电量降低到了原来的 $1/4$ 。

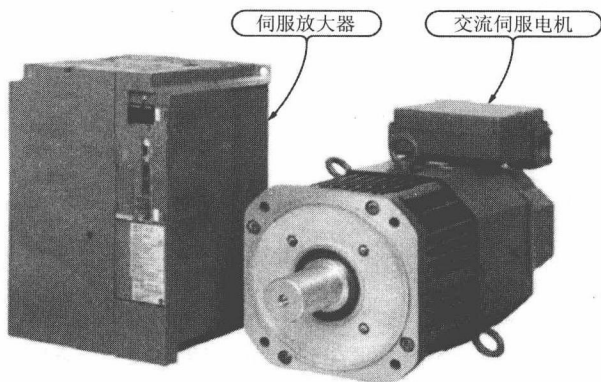
本书的重点课题是对交流伺服电机的矢量控制及伺服控制进行技术解说,目的是希望读者能理解这些控制技术。

1.2 本书中使用的交流伺服电机

交流伺服电机从某种意义上来说是特殊的电机,在家庭中较难看见。可能诸位有听说过交流伺服电机,但是实际上见过交流伺服电机的读者估计寥寥无几。那么就让我们看看交流伺服电机到底是什么样的吧。

1.2.1 代表性的交流伺服电机

照片 1.1 是典型的交流伺服电机(三菱电机)的外观。像这样,交流伺服电机由电机与伺服放大器组成,作为一个系统而工作。交流伺服电机中功率较小



照片 1.1 典型的交流伺服电机(三菱电机)外观