



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电动机的 单片机控制

(第3版)



第六届全国高校出版社
优秀畅销书奖

王晓明 编著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电动机的单片机控制

(第3版)

王晓明 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

电动机的数字控制是电动机控制的发展趋势,用单片机对电动机进行控制是实现电动机数字控制最常用的手段。本书详尽、系统地介绍了常用的直流电动机、交流电动机、步进电动机、无刷直流电动机、交流永磁同步伺服电动机的控制原理和采用单片机进行控制的方法,并给出了单片机控制电路和软件;同时,还介绍了用于电动机驱动的常用功率元器件的特性和驱动电路,用于电动机闭环控制的常用传感器的原理以及与单片机的接口电路,用于电动机优化控制的数字 PID 与数字滤波的算法和编程。

本书适合对电动机的单片机控制感兴趣的初学者使用,可作为高等院校机电工程专业、电气自动化专业和电气工程专业的教材,还可作为相关专业的工程技术人员的自学用书。

图书在版编目(CIP)数据

电动机的单片机控制 / 王晓明编著. -- 3 版. -- 北
京: 北京航空航天大学出版社, 2011. 3
ISBN 978-7-5124-0343-7

I. ①电… II. ①王… III. ①电动机—单片微型计算
机—计算机控制 IV. ①TM321.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 022791 号

版权所有,侵权必究。

电动机的单片机控制(第 3 版)

王晓明 编著
责任编辑 刘晓明

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: bhpess@263.net 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本: 787×960 1/16 印张: 19 字数: 426 千字

2011 年 3 月第 3 版 2011 年 3 月第 1 次印刷 印数: 4 000 册

ISBN 978-7-5124-0343-7 定价: 35.00 元

前言

电动机作为最主要的动力源或运动源,在生产和生活中占有重要地位。随着计算机技术的发展以及新型电力电子功率器件的不断涌现,电动机的控制在近些年来也发生了深刻的变化,以单片机和 DSP 为主的全数字控制成为主流。在这巨大变化的背景下,一方面促使许多工程技术人员知识更新,另一方面促使高校尽快培养这方面的人才来满足社会需求。单片机尤其 8 位单片机是最便宜的控制器,与 DSP 相比掌握单片机技术的人最多,因此电动机的单片机控制技术更容易推广。本书正是为此目的创建了一整套电动机的单片机控制知识体系,来满足大专院校培养人才和工程技术人员更新知识的要求。

全书共 10 章:第 1~5 章主要介绍电动机控制所涉及的基本知识和技术,包括用于电动机驱动的电力电子开关器件、用于电动机反馈的检测传感器、用于电动机控制优化的数字 PID 算法和数字滤波算法。第 6~10 章分别介绍了直流电动机、三相交流异步电动机、步进电动机、无刷直流电动机、交流永磁同步伺服电动机这些常用电动机的单片机控制和接口方法。

本书在编写思路上有如下特点:

第一,力求使本书面向初学者,因此十分注意使读者能够掌握电动机的各种控制原理和方法,注意各种概念的介绍,在书写上尽量通俗、具体、详细。

第二,注意实用化。摒弃了那些用单片机去模拟 PWM 不实用的控制方法,摒弃了那些用分立元件组成的控制电路,而更多地利用新型单片机的 PWM 口,更多地利用专用集成电路,使只用一片 8 位单片机就能轻松地承担电动机的控制任务。

第三,选择了读者最熟悉的 51 兼容单片机和美国微芯公司的 8 位单片机作为举例之用,只要有 51 单片机基础的读者或 PIC 单片机基础的读者都能很容易地看懂本书中所给出的例子。

第四,注意给读者介绍最新的技术和最新的知识。



本书第1版自2002年出版后,深受读者的喜爱和好评,除了在中国大陆热销外,也在中国台湾和香港地区以及日本产生了热烈的反响,读者遍及海内外。这些年来,该书多次荣登多家书店畅销书排行榜,2004年获得第六届全国大学出版社优秀畅销书奖,2006年第2版入选普通高等教育“十一五”国家级规划教材,2007年被批准为辽宁省普通高等学校精品教材。目前已有包括北京航空航天大学、北京理工大学、武汉理工大学、哈尔滨工程大学、中国石油大学、华侨大学、南昌大学、杭州师范大学、辽宁工业大学等几十所高校使用本书作为教材或参考书,来培养本科生和研究生;许多企业也把这本书作为培训资料,来培养技术骨干。除了作为教材外,书中的电路和程序也被工程技术人员广泛地应用,来解决实际中遇到的技术问题或者直接形成产品。至今已有数百篇科技论文和一些书籍引用了本书部分内容,从中可以看到我们在推广和普及电动机数字控制技术方面取得的可喜成绩。

本次修订是在第2版的基础上针对读者的反馈意见以及教学中发现的不适之处而进行全面系统化的修改。

在这里衷心地感谢北京航空航天大学出版社在处理有关本书被盗版的诉讼过程中所做的不懈努力和坚定态度,也感谢北京航空航天大学出版社长期以来对本书在各方面所给予的大力支持。还要特别感谢佟绍成、李卫民、曾红、张广安、何勍、卫绍元、齐世武、李成英、王宏祥、张德强、张波、董振宇、潘静、杨红梅、赵英、王晓磊、康乐为本书的资料搜集和整理、图形绘制、文稿校对、程序和电路试验所做的工作以及对我工作所给予的各种支持和精神鼓励。

敬请读者继续为本书提供建设性意见。我的电子信箱: motor-nc@126.com.

作者

2011年2月

目 录

绪 论	1
第 1 章 机电传动系统的动力学基础	6
1.1 机电传动系统的运动方程	6
1.2 转矩和转动惯量的折算	7
1.3 负载机械和电动机的机械特性	9
1.4 机电传动系统稳定运行的条件	11
习题与思考题	12
第 2 章 常用电力电子开关器件	13
2.1 可关断晶闸管的特性和参数	13
2.1.1 可关断晶闸管的原理和性能	13
2.1.2 可关断晶闸管的门极驱动电路	17
2.2 功率晶体管的性能和应用	18
2.2.1 功率晶体管的特性和参数	18
2.2.2 功率晶体管的驱动	21
2.3 功率场效应管的性能和应用	23
2.3.1 功率场效应管的特性和参数	23
2.3.2 功率场效应管的驱动	27
2.4 绝缘栅双极晶体管的性能和应用	29
2.4.1 绝缘栅双极晶体管的特性和参数	29
2.4.2 绝缘栅双极晶体管的驱动	32
2.5 智能功率模块的性能和应用	35
2.5.1 智能功率模块的结构	35
2.5.2 智能功率模块的自保护特性	41
2.5.3 智能功率模块的应用	43
习题与思考题	45
第 3 章 C8051 单片机对电动机控制的支持	46
3.1 C8051F05/15 单片机的特点	46



3.2 C8051 单片机的组成	49
3.2.1 C8051 单片机的结构	49
3.2.2 中断系统	53
3.2.3 定时器/计数器	56
3.3 C8051 用于控制电动机时的输入/输出端口设置	61
3.4 电动机控制中 A/D 转换在 C8051 中的实现	65
3.5 电动机控制中 PWM 和测频在 C8051 中的实现	70
3.6 C8051 与 5 V 电动机控制系统的接口方法	80
习题与思考题	82
第 4 章 数字 PID 控制器与数字滤波	83
4.1 模拟 PID 控制原理	83
4.2 数字 PID 控制算法	85
4.2.1 位置式 PID 控制算法	85
4.2.2 增量式 PID 控制算法	86
4.2.3 数字 PID 控制算法子程序	87
4.3 数字 PID 的改进算法	94
4.3.1 对积分作用的改进	94
4.3.2 对微分作用的改进	96
4.4 数字 PID 控制器参数的选择方法和采样周期的选择	98
4.4.1 参数的选择方法	98
4.4.2 采样周期的选择	100
4.5 数字滤波技术	101
4.5.1 算术平均值法	102
4.5.2 移动平均滤波法	102
4.5.3 防脉冲干扰平均值法	105
4.5.4 数字低通滤波法	107
习题与思考题	110
第 5 章 位移、角度、转速检测传感器	111
5.1 光栅位移检测传感器	111
5.1.1 光栅传感器的特点和分类	111
5.1.2 光栅位移传感器的组成	113
5.1.3 光栅位移传感器的工作原理	114
5.1.4 光栅细分技术	117
5.1.5 光栅位移传感器与单片机的接口	119

5.2 光电编码盘角度检测传感器	121
5.2.1 绝对式光电编码盘	121
5.2.2 增量式光电编码盘	124
5.2.3 光电编码盘与单片机的接口	126
5.3 直流测速发电机	128
5.3.1 直流测速发电机的工作原理	128
5.3.2 影响直流测速发电机输出特性的因素及对策	129
5.3.3 直流测速发电机与单片机的接口	132
习题与思考题	133
第 6 章 直流电动机调速系统	134
6.1 直流电动机电枢的 PWM 调压调速原理	134
6.2 直流电动机的不可逆 PWM 系统	137
6.2.1 无制动的不可逆 PWM 系统	137
6.2.2 有制动的不可逆 PWM 系统	139
6.3 直流电动机双极性驱动可逆 PWM 系统	141
6.3.1 双极性驱动可逆 PWM 系统的控制原理	141
6.3.2 采用专用直流电动机驱动芯片 LMD18200 实现双极性控制	143
6.4 直流电动机单极性驱动可逆 PWM 系统	146
6.4.1 受限单极性驱动可逆 PWM 系统的控制原理	146
6.4.2 受限倍频单极性驱动可逆 PWM 系统的控制原理	147
6.4.3 用单片机实现受限单极性控制	148
6.5 小功率直流伺服系统	149
6.5.1 LM629 的功能和工作原理	149
6.5.2 LM629 的指令	151
6.5.3 LM629 的应用	155
习题与思考题	155
第 7 章 交流异步电动机变频调速系统	157
7.1 交流异步电动机变频调速原理	157
7.1.1 交流异步电动机调速原理	157
7.1.2 主电路和逆变电路工作原理	158
7.2 变频与变压	161
7.2.1 问题的提出	161
7.2.2 变频与变压的实现——SPWM 调制波	163
7.2.3 载波频率的选择	166



7.3 变频后的机械特性及其补偿	167
7.3.1 变频后的机械特性	167
7.3.2 U/f 转矩补偿法	168
7.4 SPWM 波发生器 SA4828 芯片	169
7.4.1 SA4828 的工作原理	169
7.4.2 SA4828 的编程	171
7.5 单片机控制交流异步电动机变频调速应用举例	175
7.5.1 硬件接口电路	175
7.5.2 编程举例	176
习题与思考题	183
第8章 步进电动机的单片机控制	184
8.1 步进电动机的结构和工作原理	184
8.1.1 步进电动机的分类与结构	184
8.1.2 反应式步进电动机的工作原理	187
8.1.3 二相混合式步进电动机的工作原理	192
8.2 步进电动机的特性	194
8.2.1 步进电动机的振荡、失步及解决方法	194
8.2.2 步进电动机的矩角特性	196
8.2.3 步进电动机的矩频特性	197
8.3 步进电动机的驱动	199
8.3.1 单电压驱动	199
8.3.2 双电压驱动	199
8.3.3 斩波驱动	201
8.3.4 细分驱动	201
8.3.5 集成电路驱动	203
8.3.6 双极性驱动	204
8.4 步进电动机的单片机控制	207
8.4.1 脉冲分配	208
8.4.2 速度控制	210
8.5 步进电动机的运行控制	212
8.5.1 位置控制	212
8.5.2 加、减速控制	214
习题与思考题	220

第 9 章 无刷直流电动机的原理及单片机控制	221
9.1 无刷直流电动机的结构和原理	221
9.1.1 无刷直流电动机的结构	221
9.1.2 位置传感器	222
9.1.3 无刷直流电动机的工作原理	226
9.2 无刷直流电动机的驱动	228
9.2.1 三相无刷直流电动机全桥驱动的连接方式	228
9.2.2 无刷直流电动机的 PWM 控制方式	231
9.2.3 正反转	233
9.3 无刷直流电动机的单片机控制	236
9.3.1 有位置传感器无刷直流电动机的单片机控制	236
9.3.2 无位置传感器无刷直流电动机的单片机控制	242
习题与思考题	250
第 10 章 交流永磁同步伺服电动机的磁场定向矢量控制	251
10.1 矢量控制技术	251
10.1.1 矢量控制的基本思想	251
10.1.2 矢量控制的坐标变换	252
10.2 电压空间矢量 SVPWM 技术	258
10.2.1 电压矢量与磁链矢量的关系	258
10.2.2 基本电压空间矢量	259
10.2.3 链轨迹的控制	261
10.2.4 t_1 、 t_2 、 t_0 的计算和扇区号的确定	263
10.3 转子磁场定向矢量控制	264
10.4 用单片机实现交流永磁同步伺服电动机的磁场定向矢量控制	265
10.4.1 交流伺服控制芯片的功能	265
10.4.2 应用举例	276
习题与思考题	289
参考文献	290

绪 论

1. 电动机的控制

在电气时代的今天,电动机一直在现代化的生产和生活中起着十分重要的作用。无论是在工农业生产、交通运输、国防、航空航天、医疗卫生、商务与办公设备中,还是在日常生活所用的家用电器中,都大量地使用着各种各样的电动机。据资料统计,现在有 90% 以上的动力来自于电动机,我国生产的电能大约有 60% 用于电动机。电动机与人们的生活息息相关,密不可分。

我们都知道,动力和运动是可以相互转换的,从这个意义上来讲,电动机也是最常用的运动源。对运动控制的最有效方式是对运动源的控制,因此,常常通过对电动机的控制来实现运动控制。实际上国外已将电动机的控制改名为运动控制。

对电动机的控制可分为简单控制和复杂控制两种。简单控制是指对电动机进行启动、制动、正反转控制和顺序控制,这类控制可通过继电器、可编程控制器和开关元件来实现。复杂控制是指对电动机的转速、转角、转矩、电压、电流等物理量进行控制,而且有时往往需要非常精确的控制。以前,对电动机简单控制的应用较多;随着现代化步伐的迈进,人们对自动化的需求越来越高,使电动机的复杂控制逐渐成为主流,其应用领域极为广泛。例如:军事和宇航方面的雷达天线、火炮瞄准、惯性导航、卫星姿态、飞船光电池对太阳跟踪的控制等;工业方面的专用加工设备、数控机床、工业机器人、塑料机械、印刷机械、绕线机、纺织机械、新型工业缝纫机、绣花机、泵和压缩机、轧机主传动、轧辊等设备的控制;计算机外围设备和办公设备中磁盘驱动器、光盘驱动器、绘图仪、扫描仪、打印机、传真机、复印机等控制;音像设备和家用电器中录音机、录像机、数码相机、数码摄像机、VCD 和 DVD 机、洗衣机、冰箱、空调、电扇、电动自行车的控制等。本书主要介绍电动机复杂控制的原理和方法,这些控制统称为电动机的控制。

电动机控制技术的发展得益于微电子、电力电子、传感器、永磁材料、自动控制、微机应用等技术的最新发展成就。正是这些技术的进步使电动机控制技术在最近 20 多年发生了天翻地覆的变化。其中电动机控制部分已由模拟控制逐渐让位于以单片机为主的微处理器控制,形成了数字与模拟的混合控制系统和纯数字控制系统的应用,并正向全数字控制方向快速发展。电动机驱动部分所用的功率器件经历了几次更新换代,目前开关速度更快、控制更容易的全控型功率器件 MOSFET 和 IGBT 成为主流。功率器件控制条件的变化和微电子技术的使用也使新型的电动机控制方法能够得到实现,脉宽调制控制方法(PWM、SPWM 和 SVPWM)、变频技术在交流调速中得到广泛应用。永磁材料技术的突破与微电子技术的结合



又产生了一批新型电动机,如永磁直流电动机、交流伺服电动机、开关磁阻电动机、超声波电动机、专为变频调速设计的交流电动机等。这一切变化似乎都是在瞬间完成的,让人感觉到技术进步的的魅力。

2. 单片机对电动机控制所起的作用

微处理器取代模拟电路作为电动机的控制器有如下特点:

- 电路更简单。模拟电路为了实现控制逻辑,需要许多电子元件,使得电路复杂。采用微处理器后,绝大多数控制逻辑可通过软件实现。
- 可以实现较复杂的控制。微处理器有更强的逻辑功能,运算速度快,精度高,有大容量的存储单元,因此有能力实现复杂的控制,如优化控制等。
- 具有较大的灵活性和适应性。微处理器的控制方式是由软件完成的。如果需要修改控制规律,一般不必改变系统的硬件电路,只需修改程序即可。在系统调试和升级时,可以不断尝试选择最优参数,非常方便。
- 无零点漂移,控制精度高。数字控制不会出现模拟电路中经常遇到的零点漂移问题。无论被控量是大是小,都可以保证足够的控制精度。
- 可提供人机界面,多机联网工作。现在普遍采用单片机作为电动机的控制器。实际上,可作为电动机控制器的单元还有多种,例如工业控制计算机、可编程控制器(PLC)、数字信号处理器(DSP)等。

工业控制计算机可谓功能最强大,它有极高的速度、强大的运算能力和接口功能、方便的软件环境,但由于成本高,体积大,所以只用于大型控制系统。

可编程控制器则正好相反,它只能完成逻辑判断、定时、计数和简单的运算。由于功能太弱,所以它只能用于简单的电动机控制。

单片机介于工业控制计算机和可编程控制器之间,它有较强的控制功能和低廉的成本。人们在选择电动机的控制器时,常常是在先满足功能需要的同时,优先选择成本低的控制器。因此,单片机往往成为优先选择的目标,单片机是目前世界上使用量最大的微处理器。

单片机产生于20世纪70年代,在我国经历了Z80单板机时代和MCS-51单片机时代。现在老的MCS-51单片机时代已渐渐过去,新一代各种各样的单片机不断出现,以至于无法给出哪一种单片机最好。新型单片机具有如下特点。

(1) 功能大大增强

许多单片机公司将16位单片机的性能下移到8位单片机,在单片机内部增加了如PWM口、比较和捕捉、A/D转换等功能,并增加了看门狗、各种串行总线接口等,使新一代单片机的功能更强大。

PWM口广泛地应用在直流电动机控制中,它经初始化设定后会自动地发出PWM控制信号,CPU只在需要调整参数时才介入。

捕捉功能在电动机控制中可用于测频,它相当于在老式单片机中用计数器与外中断联合

实现测频功能。

在有模拟信号存在的情况下(例如用直流测速发电机测速,或者测量电动机绕组的输出电压或电流),如果要将模拟信号输入单片机,则 A/D 转换器是必不可少的,将 A/D 转换器集成在单片机内会带来极大的方便。

电动机是一个电磁干扰源。电动机的启停还会影响电网电压的波动,它周围的电器开关也会引发火花干扰。因此,除了采用必要的隔离、屏蔽和电路板合理布线等措施外,看门狗的功能就显得格外重要。看门狗在工作时不断地监视程序运行的情况,一旦程序“跑飞”,会立刻使单片机复位。

单片机的另一个重大变化是出现了各种同步串行总线,如 SPI 总线、I²C 总线。同步串行总线由于使用的信号线少(例如 SPI 使用 3 条信号线,I²C 只使用 2 条信号线),所以占用电路板的面积大大减小。与并行总线相比,其信号受干扰的可能性也小。还有一个最突出的优点是单片机可利用的引脚相对增多。这就是同步串行总线风靡起来的原因,它大有取代并行总线之势。在电动机的控制中,要用到键盘和显示器作为人机界面,有时还要用到外接存储器,这时使用有同步串行总线接口的芯片将会大大减小电路的尺寸,降低成本。

此外,近年来某些单片机还集成了 LCD 驱动器、彩色 LCD 控制器、D/A 转换器、模拟比较器、放大器、滤波器以及 USB 接口等。尽管提高集成度会使单片机本身价格上升,但这会有助于加快系统设计,从而降低整体设计成本。

(2) 速度更快

速度更快是新一代单片机的又一个最大特点。用单片机对电动机进行实时控制,经常采用一些优化算法,如数字 PID 控制、数字滤波等。对于实时性很强的控制,速度低的单片机往往不能胜任。新一代单片机的速度比老式单片机的速度提高了 1 倍多,例如,Philips 公司 89CXX 系列 8 位单片机的工作频率达 33 MHz,Winbond 公司 W78 系列 8 位单片机的工作频率达到 41 MHz,Siemens 公司 SAB-C5 系列 8 位单片机的工作频率高达 48 MHz。

单片机速度的提高是因为采用了流水线技术,执行指令与提取指令可同时完成。另外,有些单片机采用了 RISC(Reduced Instruction Set Computer)结构技术,使指令执行的速度得到提高,如美国国家半导体公司的 COP8SK 系列 8 位单片机、美国 Microchip 公司的 PIC 系列 8 位单片机。

(3) 小型化和低功耗

采用同步串行总线可以减少无用的引脚,另外,由于采用了内部 FLASH 存储器,没有必要保留外接并行存储器的引脚,这些都使得单片机引脚的数目大大减少。这样一来,一方面提供了更多的引脚作为 I/O 口使用,另一方面也可以去掉众多引脚而使芯片小型化。例如,美国 Microchip 公司推出的 8 引脚和 18 引脚 8 位 PIC 系列单片机,中国台湾义隆公司推出的 18 引脚 8 位 EM78 系列单片机,中国武汉力源公司和 LG 半导体公司合作生产的 20 引脚 8 位 GMS97C1051/2051 单片机,美国 Atmel 公司生产的 20 引脚 8 位 AT89C2051 单片机。小型



化的单片机成本低,电路尺寸小。

低电压和低功耗也是新一代单片机的特色。大多数单片机都有休眠省电工作方式,低电压供电的单片机电源下限已由 2.7 V 降至 2.2 V、1.8 V,甚至 0.9 V 供电的单片机也已经问世,这些措施都可以降低单片机的功耗。这为移动设备,例如数码摄像机、便携式仪器、便携式视听设备、便携式计算机中的光盘驱动器和磁盘驱动器等的电动机控制提供了帮助。

过去多数人认为 8 位单片机不适合作为电动机的控制器,而转向使用 16 位单片机,但是现在应当对 8 位单片机刮目相看了。8 位单片机的功能和速度都与 16 位单片机不相上下,而且价格便宜,易于与占多数的 8 位芯片接口,同时越来越多的电动机专用集成电路的使用使单片机减轻了许多沉重的负担,因此 8 位单片机会成为普通电动机控制的主流处理器。

数字信号处理器 DSP 是近年来的后起之秀,它也属于微处理器的一种。DSP 出现在 20 世纪 80 年代,随着销售价格的下降,开始逐渐进入电动机的控制领域。许多公司都研制出以 DSP 为内核的集成电动机控制芯片,例如,美国 TI 公司的 TMS320C24X 系列,美国 AD 公司的 ADMC 系列。这些芯片不但具有高速信号处理和数字控制功能,而且还有为电动机控制应用所必需的外围功能。例如,TMS320F240 DSP 有 32 位累加器、8 KB FLASH ROM、512 字节的 RAM、3 个定时器、16 位外部数据总线等强大的数字处理资源;此外,还有 12 路 PWM 输出、2 个 10 位 A/D 转换、可编程死区控制、可编程空间 PWM 控制等电动机控制所特有的功能。

在电动机控制系统中采用电动机专用的 DSP,不但可以实现如矢量控制、直接转矩控制等控制算法,而且也有条件完成现代控制理论或智能控制理论的一些复杂算法,如自适应控制、神经网络等。这是单片机所不及的。

3. 电力电子功率器件对电动机控制所起的作用

电力电子技术和功率半导体器件的发展对电动机控制技术的发展影响极大,它关系到电动机的功率驱动。电力电子功率器件经历了从半控(只能控制“开”不能控制“关”)到全控,从电流控制到电压控制(场控),从几 kHz 到 500 kHz 以上开关频率的变化;而电动机的控制也相应地从相控变流转变到脉宽调制和变频技术。

从 20 世纪 70 年代开始,先后出现了几种有自关断能力的全控型功率器件,如可关断晶闸管(GTO)、功率晶体管(GTR)。这些全控型功率器件取代了普通晶闸管系统,提高了工作频率,简化了电路结构,提高了效率和可靠性。原来谐波成分大、功率因数差的相控变流器已逐步被斩波器或 PWM 变流器所取代,使电动机的调速范围明显增加。例如,利用 GTR 的直流电动机 PWM 调速系统的最大调速比可达 1:10 000,而用普通晶闸管系统的最大调速比约为 1:100。

其后又出现了功率场效应管(MOSFET)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)、MOS 控制晶闸管(IGCT)等,形成第三代功率器件。这些新型功率器件采用场控,工作频率可以更高,驱动电路更简单。它们正逐步取代 GTO 和 GTR。

然而发展并没有就此停止,号称第四代的功率集成电路已崭露头角。功率集成电路是电力电子技术与微电子技术相结合的产物,它将半导体功率器件与驱动电路、逻辑控制电路、检测和诊断电路、保护电路集成在一块芯片上,使功率器件含有某种智能功能,因此又称智能功率集成电路。

与分立功率器件组成的电动机驱动电路相比,智能功率集成电路有如下优点:

- 体积小,质量轻,但功能强大,很有可能将驱动器安装在电动机内部,形成一种“电子电动机”。
- 减少了电器元件数量,可提高系统的可靠性。内部集成的检测电路、诊断电路和保护电路增加了系统的可靠性。
- 控制电路与功率电路集成在一起,使监控更易实现。
- 集成化使电路的连线减少。减少了分布电容和分布电感及信号传输的延时,从而增加了系统的抗干扰能力。
- 集成化可以使电路参数优化,避免在使用分立元件时,因不同厂商的产品所带来的兼容性问题。
- 使用集成化器件取代分立元件来实现这些功能,将大大降低系统成本。

半导体功率器件发展的另一个方向是智能功率模块 IPM(Intelligent Power Module)。它是将多个(或单个)功率器件组成半桥或全桥,并集成了快速恢复二极管、栅极(或基极)驱动电路、保护电路而形成的一个混合模块。

所有这些都使电动机的驱动走向了集成化。

电动机的控制技术与微电子技术、电力电子技术的结合使其发展成为一门新的技术——运动控制。由于有微处理器和传感器作为系统的组成部分,赋予了系统以智能,所以又称为智能运动控制。它作为一门多学科交叉技术而存在,当每种技术出现了新的进展时,都将使它向前迈进一步,因此电动机控制技术的进步是日新月异的。

第 1 章

机电传动系统的动力学基础

以电动机为动力源和运动源来驱动工作机械的系统称为机电传动系统。它将电能转变为机械能,实现工作机械的启动、停止和速度调节。

为了设计电动机的调速系统,首先必须要知道负载的大小以及负载的性质,以此作为选择电动机和确定调速系统方案的依据。本章将介绍电动机与工作机械之间的转矩和速度的关系、工作机械的负载特性,以及机电传动系统稳定运行的条件。

1.1 机电传动系统的运动方程

电动机带动工作机械的机电传动系统如图 1-1 所示。电动机提供电磁转矩 T ,带动负载运动,负载反抗运动力,负载对运动力的反抗作用表现为负载转矩 T_z ,根据动力学列运动平衡方程式,则有

$$T - T_z = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1-1)$$

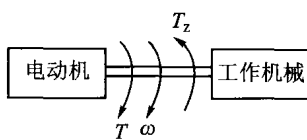


图 1-1 单轴机电传动系统

式中 T ——电动机的电磁转矩, $N \cdot m$;

T_z ——负载转矩, $N \cdot m$;

J ——工作机械系统折算到电动机轴上的总转动惯量, $kg \cdot m^2$;

ω ——电动机的角速度, rad/s 。

式(1-1)中的 $J \frac{d\omega}{dt}$ 是惯性力矩。当 $T > T_z$ 时, $\frac{d\omega}{dt} > 0$, 系统加速; 当 $T < T_z$ 时, $\frac{d\omega}{dt} < 0$, 系统减速; 当 $T = T_z$ 时, $\frac{d\omega}{dt} = 0$, 系统恒速。可见, 惯性力矩只在系统加速或减速时存在。

在实际工程计算中, 经常用转速 n 代替角速度 ω , $n = 60\omega/2\pi$ 。用一个假想飞轮的惯量(也称飞轮转矩) GD^2 代替转动惯量 J 。 GD^2 和 J 的关系为

$$J = \frac{mD^2}{4} = \frac{GD^2}{4g} \quad (1-2)$$

式中 G ——假想飞轮的重力, N ;

D ——假想飞轮的直径, m ;

m ——假想飞轮的质量, kg ;

g ——重力加速度, m/s^2 。

将这些变换都代入式(1-1)中,可得

$$T - T_z = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (1-3)$$

式中,常数 375 含有 $g=9.8 \text{ m/s}^2$ 的量纲。

由于传动系统有各种运动状态,以及工作机械负载性质的不同,电磁转矩 T 和负载转矩 T_z 不仅大小不同,方向也是变化的。因此,对式(1-3)中的转矩符号给出一种约定,通常以转速 n 的方向作为参考:

- 当电磁转矩 T 的方向与转速 n 的方向相同时为正,这时 T 为驱动转矩;
- 当电磁转矩 T 的方向与转速 n 的方向相反时为负,这时 T 为制动转矩。

由于负载转矩 T_z 的方向已事先反映在式(1-1)中,因此 T_z 的方向约定与 T 相反。当 T_z 的方向与转速 n 的方向相反时为正,相同时为负,如图 1-2 所示。

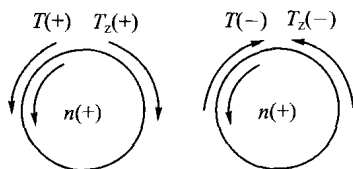


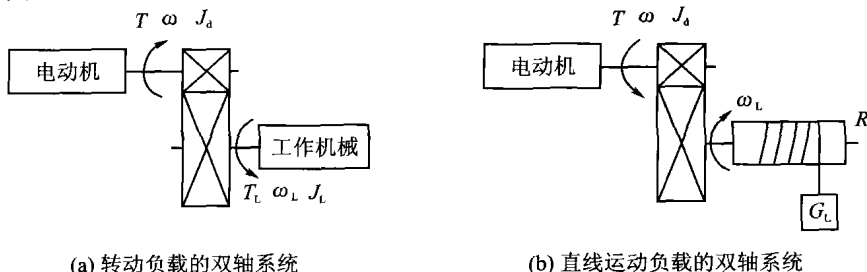
图 1-2 转矩方向符号的约定

1.2 转矩和转动惯量的折算

式(1-3)是图 1-1 所示的单轴传动系统运动方程。但在实际的机电传动系统中,在电动机与工作机械执行机构之间往往要经过齿轮减速箱、皮带传动、链传动等减速装置,这就形成了多轴传动。因此,为了列出这个系统的运动方程,必须先将各转动部分的转矩和转动惯量(或直线运动的质量)都折算到一根轴上,即简化成图 1-1 所示的最简单的单轴系统。

折算的基本原则是:折算前的多轴系统与折算后的单轴系统在能量关系上或功率关系上要保持不变。

下面以图 1-3 所示的双轴传动系统为例,来介绍折算方法。



(a) 转动负载的双轴系统

(b) 直线运动负载的双轴系统

图 1-3 双轴传动系统