

第2版

电气传动的 脉宽调制控制技术

吴守箴 臧英杰 等著

电气自动化
新技术丛书



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



电气自动化新技术丛书

电气传动的脉宽调制控制技术

第 2 版

吴守箴 臧英杰 熊小林 著
陈 实 邵日明 翁颖钧



机械工业出版社

电气传动的脉宽调制 (PWM) 控制技术是电气传动自动化领域的核心技术之一。本书基于作者多年来从事这方面教学与科研工作的体会以及所取得的科研成果, 详细地介绍了各种典型的 PWM 控制技术的基本思路、数学模型、控制算法、实现控制的手段与技巧等。本书在叙述原理时, 深入浅出, 注重基本概念, 避免繁琐的数学推导; 在介绍实现 PWM 控制的手段时, 以介绍单片机为核心的微机控制技术为主, 并给出若干微机控制程序及说明。

本书第 1 版出版以来已印刷五次, 这次修订, 融入了作者近年来若干新的科研成果, 除对原有章节作了许多修订、补充、改写外, 还新增了交流电气传动闭环控制系统及 PWM 控制技术和专用变频器及专用变频电源。在介绍单片机控制技术方面, 也由 8 位单片机发展到了 16 位单片机和 DSP 控制技术。

本书可作为电气自动化领域的工程技术人员、研究人员以及大专院校有关专业师生、研究生的参考书, 也可作为有关培训班的教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

电气传动的脉宽调制控制技术/吴守箴等著. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2002.12

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 7-111-04453-3

I. 电… II. 吴… III. 电力传动—脉宽调制

IV. TM921.52

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 086300 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: 孙流芳 版式设计: 冉晓华 责任校对: 刘志文

封面设计: 姚毅 责任印制: 付方敏

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 1 月第 2 版·第 1 次印刷

850mm × 1168mm^{1/32} · 11.375 印张 · 302 千字

12001 - 16000 册

定价: 22.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527
封面无防伪标均为盗版

《电气自动化新技术丛书》

序 言

科学技术的发展,对于改变社会的生产面貌,推动人类文明向前发展,具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合,特别在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天,电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问,电气自动化技术必将在提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域中的新技术,中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合成立了《电气自动化新技术丛书》编辑委员会,负责组织编辑《电气自动化新技术丛书》。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色:

一、本丛书是专题论著,选题内容新颖,反映电气自动化新技术的成就和应用经验,适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际,重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出,条理清晰,语言通俗,文笔流畅,便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者,也可供科研人员及大专院校师生参考。

编写出版《电气自动化新技术丛书》,对于我们是一种尝试,难免存在不少问题和缺点,希广大读者给予支持和帮助,并欢迎大家批评指正。

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会

第4届《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会成员

主 任：王 炎

副主任：王兆安 王志良 赵相宾 牛新国

委 员：王正元 王永骥 王兆安 王 旭

王志良 王 炎 牛新国 尹力明

刘宗富 许宏纲 孙流芳 阮 毅

李永东 李崇坚 陈伯时 陈敏逊

陈维均 周国兴 赵光宙 赵 杰

赵相宾 张 浩 张敬明 郑颖楠

涂 健 徐殿国 黄席樾 彭鸿才

霍勇进 戴先中

秘 书：刘凤英

第4届《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会的话

自1992年本丛书问世以来,在学会领导和广大作者、读者的支持下,至今已出版发行丛书38种33万余册,受到广大读者的欢迎,对促进我国电气传动自动化新技术的发展和传播起到了很大作用。

许多读者来信,表示这套丛书对他们的工作帮助很大,希望我们再接再厉,不断推出介绍电气传动自动化新技术的丛书。因此,本届编委会决定选择一些大家所关心的新选题,继续组织编写出版,同时对受读者欢迎的已出版的丛书,根据技术的发展,我们将组织一些作者进行修订再版,以满足广大读者的需要。

我们诚恳地希望广大读者来函,提出您的宝贵意见和建议,以使本丛书搞得更好。

在本丛书出版期间,为加快与支持丛书出版,成立了丛书出版基金,得到了中国电工技术学会、天津电气传动设计研究所等单位的支持,在此我们对所有资助单位再次表示感谢。

第4届《电气自动化新技术丛书》编辑委员会

2002年10月12日

第 2 版前言

本书于 1995 年 1 月第 1 版出版以来,承读者厚爱,至 2000 年 5 月止,已第 5 次印刷。但近几年来,与本书有关的技术发展迅速,作者们在教学和科技开发过程中也有了若干新的体会和成果,因此感到有必要作一些新的增补与修订。

此次再版,保留了第 1 版的前言全文,未作任何修订。这样既可以通过该前言,了解本书的内容特点,也可以了解原第 1 版的章节结构。再版前言只对增补、修订的内容以及参与的作者做了说明。增补、修订的内容如下:

第 1 章 1.1 节,增补了新的功率器件(IPM、IGCT 等)的若干内容;1.2 节,增补了升压斩波线路及其工作原理。

第 3 章 3.2 节,增补了常用的其他集成 PWM 控制器的相关内容。新增了 3.4 节:上海地铁 1 号线车辆直流牵引电动机 PWM 斩波调速系统。

第 7 章,新增了 7.3 节:提高三相变频器输出电压基波分量的方法。在 7.4 节中,补充了英国 MITEL 公司的 SA4828 型 PWM 发生器的工作原理和应用技术。

第 8 章 8.2 节中,对若干文字和表达式作了校正。新增了 8.4 节:高精度比较判断式磁链追踪型 PWM 控制技术。

第 9 章作了较大的变动:除重写 9.1 节外,9.2 节以单相半桥变频器为例,写了单相变频器电流追踪型 PWM 控制技术;9.3 节重写了三相变频器电流追踪型 PWM 控制技术。

原第 10 章通用变频器及其应用改为第 11 章。新的第 10 章写了交流电气传动闭环控制系统及 PWM 控制技术。此前,我们讨论的 PWM 控制的变频器,无论是电压型的还是电流型的,也无论是单相的还是三相的,都是频率开环的。频率开环,虽可以

调频调速,但其动态性能不好。对要求动态性能好的变频调速系统,就须使用闭环控制技术。本章写了交流电气传动闭环控制系统的主要控制方法:转差控制、矢量控制和直接转矩控制以及形成 PWM 波的方法。

新增了第 12 章专用变频器及专用变频电源”。专用变频器及专用变频电源是为通用变频器、传统电源无法适用的场合而专门设计的、具有独特功能的变频器和变频电源,它有与通用变频器不同的电路结构和新的能量变换环节,如降压斩波变换器或升压斩波变换器等。因此,有必要专门设置一章加以讨论。

其他,第 2 章以及第 4、5、6 三章在内容上均未作大的变动,只作了若干文字上的修改。

此外,在新增的第 9、10、12 章中,由于控制系统采用了 16 位单片机和 DSP,因此在本书附录 B 中补充了 16 位单片机和 DSP 的有关芯片的引脚图。

本书,新增的 3.4 节由熊小林硕士执笔,7.4.3 节中增补的“SA4828 及其应用”以及新增的第 9 章由邵日明硕士执笔;新增补的 8.4 节由吴守箴教授执笔,新增的第 10 章由翁颖钧博士执笔,新增的第 12 章由陈实硕士执笔,其他各章节中增补的内容均由臧英杰教授执笔。最后,本书由臧英杰教授审阅、补充、修订后定稿。

在此修订再版之际,对一直给予本书出版、再版以关怀和支持的《电气自动化新技术丛书》编委会的各位专家、教授、尤其是喻士林、陈伯时、孙流芳等诸位教授、教授级高级工程师表示由衷的感谢。对读者的支持谨致深深的谢意。书中内容如有不妥或错误之处,敬请各位批评指正。

臧英杰

2002 年 7 月

于上海英杰电力电子技术研究所

第 1 版前言

脉宽调制 (Pulse Width Modulation) 控制技术, 通常简称为 PWM 控制技术, 是利用半导体开关器件的导通和关断, 把直流电压变成电压脉冲列, 控制电压脉冲的宽度或周期以达到变压目的, 或者控制电压脉冲宽度和脉冲列的周期以达到变压变频目的的一种控制技术。PWM 控制技术广泛地应用于开关稳压电源、不间断电源 (UPS) 以及直流电动机传动、交流电动机传动等电气传动系统中。本书只介绍电气传动中的 PWM 控制技术。

近 10 年来, 电气传动的 PWM 控制技术已成为电气传动自动控制技术的热点之一, 陆续发表了许多有关论文, 有不少近期出版的书中也包括 PWM 控制技术的若干内容。但至今还没有一本论述 PWM 控制技术的专著出版, 以致给正在和将要在电气自动化领域工作的工程技术人员造成某种不便。本书以作者多年来从事这方面教学与科研工作的体会以及所取得的科技成果为基础, 并吸收其他研究成果, 系统地介绍步进电动机传动、直流电动机传动、单相交流电动机传动及三相交流电动机传动中的 PWM 控制技术。内容包括各种典型的 PWM 控制的基本思路、数学模型、控制算法、实现的手段与技巧等。在介绍 PWM 控制的手段时, 以介绍采用 8031 单片机为核心的微机控制技术为主, 同时也介绍几种 PWM 电路芯片的应用。最后, 作为 PWM 控制技术应用的例子, 介绍了通用变频器及其功能、标准规格、试验方法、测量方法与应用实例等。作者在力求内容的系统性、完整性的基础上, 尽力深入浅出地讲清基本概念; 在给出必要的数学模型时尽可能避开繁琐的数学推证; 在介绍以微机为核心实现 PWM 控制的具体方法时, 列出若干微机控制程序, 便于读者了

解微机控制是怎么回事，从中受到启发。

本书共 10 章。第 1 章简述电气传动国内外发展概况，介绍 PWM 控制技术的分类、原理与发展。

第 2 章在简述步进电机的结构、原理及其驱动电路之后，重点讨论 PWM 驱动信号的生成方法，并给出一个四相步进电动机双向运转与定位控制的微机程序。

第 3 章讲直流电动机的 PWM 斩波调压控制与 H 桥 PWM 控制，讨论这两种 PWM 控制的原理、电路构成，专用 PWM 电路芯片以及微机控制技术等。

第 4 章讲中抽式与桥式两种典型单相变频器的主电路与单相 PWM 控制原理，并介绍一种由 8 位单片微机实现的单相桥式变频器 PWM 控制的硬件及软件技术。

第 5 章是讲三相变频器的 PAM 控制。PAM 控制是脉冲幅值调制（Pulse Amplitude Modulation）的简称。在介绍以后各章的三相变频器的 PWM 控制技术之前，介绍 PAM 的概念及方法是必要的。本章重点介绍由软件实现的三相电压型变频器的 PAM 控制技术，之后指出 PAM 方法的实用价值以及它的缺点，并引导到以后各章的三相变频器 PWM 控制。

第 6 章介绍三相变频器的等脉宽 PWM 控制，这种方法在中频变频器中有其应用价值。本章重点是介绍等脉宽 PWM 信号的生成方法、控制系统硬件及微机程序等。

第 7 章介绍三相变频器的正弦波 PWM（Sinusoidal Pulse Width Modulation）控制技术，简称 SPWM 控制技术。SPWM 控制方法有多种，第 1 章和第 4 章中对其发展及分类已有叙述，本章重点介绍表格型及采样型 SPWM 技术。在采样型 SPWM 法中又重点介绍不对称规则采样法的控制算法、用微机实现控制时的量化方法等；还介绍两种常见的三相 PWM 电路芯片的功能及应用方法。

第 8 章介绍与 SPWM 法不同的一种新的 PWM 法：磁链追

踪型 PWM 法。与 SPWM 法相比，磁链追踪型 PWM 法有许多优点，因而得到越来越广泛的应用。本章主要介绍它的原理、数学模型以及两种不同的处理方法。

第 9 章介绍单相与三相变频器电流追踪型 PWM 控制技术。它不同于 SPWM 法，也不同于磁链追踪型 PWM 法。它把电机的电压模型改为电流模型，从而使控制简单，并提高了动态性能。电流追踪型 PWM 控制有许多不同的形式，本章介绍主要的两种，即电流滞环控制型和固定开关频率型的基本原理和电路构成等。

最后，第 10 章，作为 PWM 控制技术成功应用的实例，介绍在国民经济各部门广泛应用的 PWM 通用变频器，介绍通用变频器的功能、电路构成、标准规格、测量方法与选择方法等，综合性地说明 PWM 控制的实用价值，为本书作一个良好的结尾。

作者期望本书能对正在从事和将要从事电气自动化领域工程技术工作的工程技术人员、研究人员有所帮助；本书也可作为各大学有关专业教师、研究生和高年级学生的选修课教材或参考书。

本书第 4 章至第 8 章由吴守箴执笔，其余各章由臧英杰执笔。

上海工业大学陈伯时教授和上海交通大学陈敏逊教授审阅了本书的写作提纲，并提出了许多宝贵的补充、修改意见，作者表示由衷的感谢。在本书选题和出版过程中，得到中国自动化学会电气自动化专业委员会、中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会、电气自动化新技术丛书编辑委员会喻士林等各位专家、教授的大力帮助，作者表示十分感谢。在本书写作过程中还得到九江伟恒升科技器材公司黄佶工程师以及上海铁道学院三元变频技术研究室李玲玲、洪国华、陈实、甘爽等诸位同仁的支持与帮助，在此一并表示感谢。

由于作者学识水平所限和时间紧迫，在 PWM 控制技术方面

一定还有许多好的内容没有得到反映，恳请读者谅解。书中内容也难免有不当或错误之处，敬希有关专家和各位读者给予批评指正。

作 者
于上海铁道学院^①
1994 年 5 月

① 上海铁道学院于 1995 年 5 月与上海铁道医学院合并为上海铁道大学，上海铁道大学又于 2000 年 4 月并入同济大学。

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

第4届《电气自动化新技术丛书》编辑委员会的话

第2版前言

第1版前言

第1章 概述	1
1.1 电气传动国内外发展概况	1
1.2 电气传动的PWM控制技术	5
第2章 步进电动机的PWM控制技术	11
2.1 步进电动机的工作原理与运行特性	11
2.1.1 步进电动机及其分类	11
2.1.2 步进电动机工作原理	12
2.1.3 步进电动机运行特性	14
2.2 步进电动机的控制方式与驱动电路	17
2.3 步进电动机PWM控制信号生成方法	21
2.3.1 1相励磁时PWM信号的生成方法	22
2.3.2 2相励磁时PWM信号的生成方法	23
2.3.3 1—2相励磁时PWM信号的生成方法	23
2.4 步进电动机PWM控制程序例	28
2.4.1 双向有限步数运转PWM控制程序例	28
2.4.2 绝对值定位控制程序例	33
2.5 步进电动机的速度控制	40
第3章 直流电动机的PWM控制技术	45
3.1 直流电动机的PWM控制原理	45
3.2 由集成PWM控制器控制的直流不可逆调速系统	48
3.2.1 系统构成	48
3.2.2 SG1525集成PWM控制器的结构框图和功能	50
3.2.3 系统工作原理	53

3.2.4 TL494 集成 PWM 控制器的结构框图、 工作原理和应用	54
3.3 由单片机控制的 PWM 直流可逆调速系统	56
3.3.1 系统概述	56
3.3.2 控制算法	60
3.4 地铁车辆直流牵引电动机斩波调速系统	63
3.4.1 直流牵引系统主电路及其工作原理	63
3.4.2 牵引控制系统	71
第 4 章 单相变频器的 PWM 控制技术	76
4.1 单相变频器主电路	76
4.2 单相变频器的 PWM 控制法	78
4.3 单相桥式 PWM 变频器微机控制	86
第 5 章 三相变频器的 PAM 控制技术	91
5.1 三相变频器 PAM 控制概要	91
5.2 120°导通型六拍逆变器的控制技术	95
5.3 180°导通型六拍逆变器的控制技术	99
5.3.1 工作原理与开关顺序	99
5.3.2 微机控制系统的硬件与软件	103
5.4 三相全桥整流桥的微机控制技术	111
5.4.1 工作原理与触发脉冲	111
5.4.2 微机控制技术	115
5.5 由两片 8031 单片机控制的电压型 SCR - PAM 三相变频器	115
5.5.1 主电路	115
5.5.2 微机控制系统	117
第 6 章 三相变频器的等脉宽 PWM 控制技术	125
6.1 等脉宽 PWM 的意义与信号生成方法	125
6.2 系统的硬件与软件	128
6.3 时间基数的计算方法	132
第 7 章 三相变频器的 SPWM 控制技术	134
7.1 三相变频器表格型 SPWM 控制技术	134
7.1.1 表格型 SPWM 法	135
7.1.2 生成 PWM 信号的程序	139

7.1.3	频率调整数据的求法	141
7.1.4	时间基数的求法	141
7.2	三相变频器采样型 SPWM 控制技术	145
7.2.1	三相采样型 SPWM 法的生成原理与控制算法	145
7.2.2	用 8031 微机系统实现三相变频器不对称规则 采样型 SPWM 控制	148
7.3	提高三相变频器输出电压基波分量的方法	156
7.4	三相 SPWM 集成电路及其应用	159
7.4.1	HEF4752 及其应用	160
7.4.2	SLE4520 及其应用	169
7.4.3	SA4828 及其应用	184
第 8 章	三相变频器磁链追踪型 PWM 控制技术	193
8.1	磁链追踪型 PWM 法的基本原理与分类	193
8.1.1	磁链追踪型 PWM 法基本原理	193
8.1.2	磁链追踪型 PWM 法的分类	196
8.2	三段逼近式磁链追踪型 PWM 控制技术	197
8.2.1	三段逼近式磁链追踪基本原理	197
8.2.2	控制算法	198
8.2.3	零矢量分割法	199
8.2.4	控制系统构成与软件技术	200
8.3	比较判断式磁链追踪型 PWM 控制技术	202
8.3.1	比较判断式磁链追踪基本原理	202
8.3.2	控制算法	203
8.3.3	控制系统构成与软件技术	205
8.4	高精度比较判断式磁链追踪型 PWM 控制技术	207
8.4.1	高精度磁链追踪基本原理	207
8.4.2	控制算法	207
第 9 章	单相与三相变频器电流追踪型 PWM 控制技术	212
9.1	电流追踪型 PWM 控制基本原理	213
9.1.1	滞环宽度控制法	213
9.1.2	定时比较判断法	218
9.2	单相变频器电流追踪型 PWM 控制技术	221
9.3	三相变频器电流追踪型 PWM 控制技术	223

第 10 章 交流电气传动闭环控制系统及 PWM 控制技术	236
10.1 转差控制技术及其 PWM 波生成	237
10.1.1 转差控制基本原理	237
10.1.2 控制系统框图	238
10.1.3 PWM 波生成的特点	239
10.2 矢量控制技术及其 PWM 波的生成	239
10.2.1 概述	239
10.2.2 矢量控制基本原理	240
10.2.3 矢量控制系统的构成	250
10.2.4 PWM 波生成的特点	254
10.3 直接转矩控制技术及其 PWM 波生成的特点	254
10.3.1 概述	254
10.3.2 直接转矩控制基本原理	255
10.3.3 直接转矩控制的功能模块图与工作原理	260
10.3.4 直接转矩控制时异步电动机的数学模型	266
10.3.5 直接转矩控制系统中逆变器 PWM 波生成的特点	268
第 11 章 通用变频器及其应用	270
11.1 通用变频器的电路	271
11.1.1 主电路	271
11.1.2 吸收电路与 di/dt 抑制电路	276
11.1.3 采样电路	277
11.1.4 驱动电路	278
11.1.5 控制电路	283
11.1.6 信号处理与故障保护电路	284
11.1.7 外部接口电路	286
11.1.8 控制电源与驱动电源	287
11.2 通用变频器的技术要求与标准规格	287
11.2.1 通用变频器的术语	287
11.2.2 通用变频器的技术要求	289
11.2.3 通用变频器的标准规格	294
11.3 通用变频器的试验方法	294
11.3.1 负载试验线路与测量仪表	297
11.3.2 变频器特性测量实例	299

11.4 通用变频器的应用	306
第 12 章 专用变频器与专用变频电源	311
12.1 具有升压 PWM 斩波器的三相变频电源	317
12.1.1 主电路	317
12.1.2 PWM 控制技术	318
12.2 具有降压 PWM 斩波器的三相变频电源	320
12.2.1 主电路	320
12.2.2 PWM 控制技术	321
12.3 大功率三相四线制变频电源	322
12.3.1 主电路	322
12.3.2 PWM 控制技术	323
附录	333
附录 A MCS-51 指令一览表	333
附录 B 本书常用芯片引脚图	339
参考文献	342