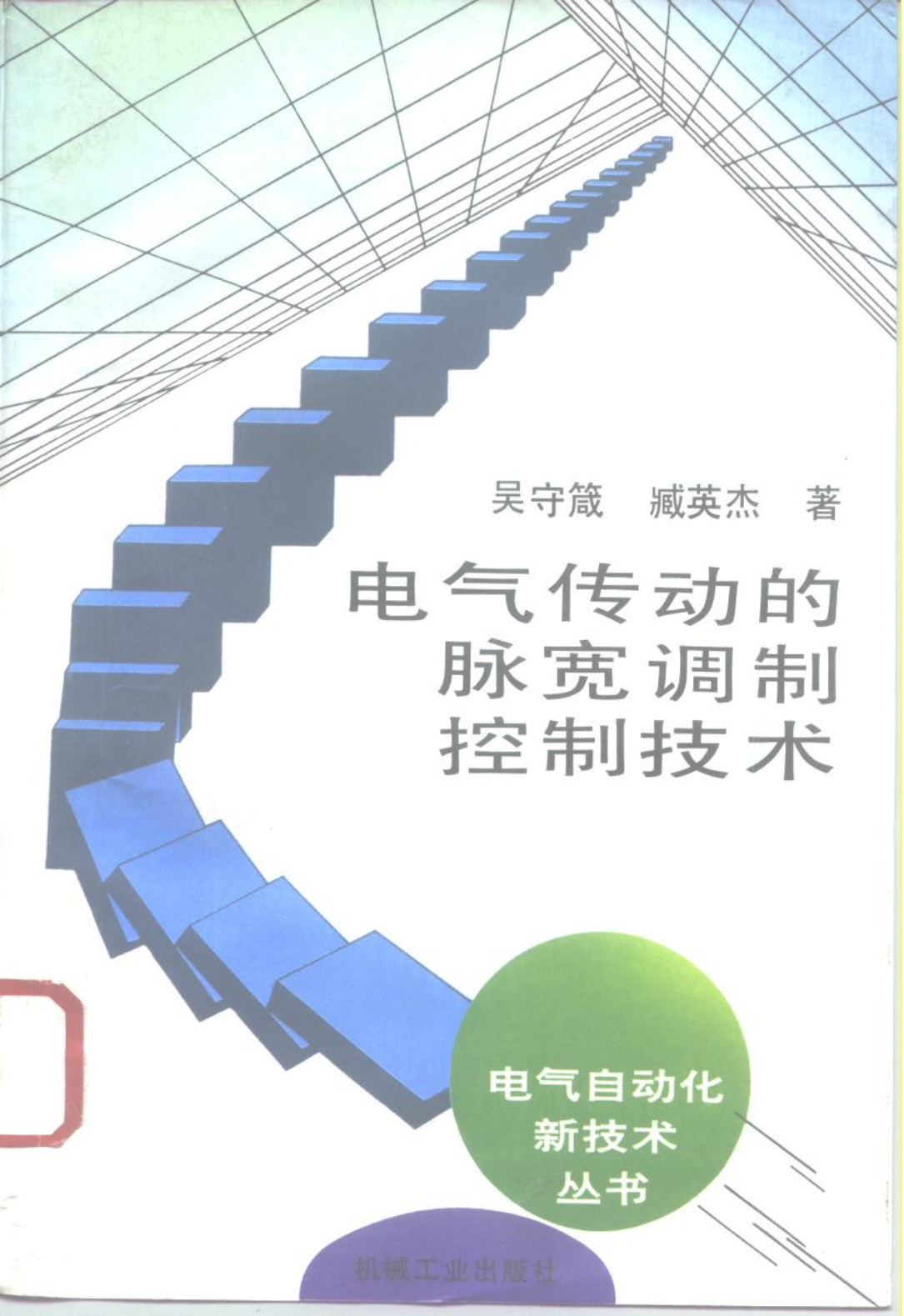




吴守箴 臧英杰 著

电气传动的 脉宽调制 控制技术

电气自动化
新技术
丛书

机械工业出版社

电气自动化新技术丛书

电气传动的脉宽调制控制技术

吴守箴 臧英杰 著

机械工业出版社

(京)新登字 054 号

电气传动的脉宽调制(PWM)控制技术是步进电动机传动控制、直流电动机斩波调速控制和交流电动机变频调速控制的核心技术,也是当前我国电气自动化领域的热点之一。

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。

本书可作为电气自动化领域中的工程技术人员、研究人员以及各高等院校有关教师、研究生、高年级学生的参考书,也可作为有关培训班的教材。

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

北京房山印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ 印张 7.75·字数 186 千字
1995 年 1 月北京第 1 版·1995 年 1 月北京第 1 次印刷
印数 00 001—4500·定价 12.00 元

*

ISBN 7-111-04453-3/TP·251

《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,推动人类社会向前发展,具有极其重要的意义。电气自动化技术既是多种学科的交叉综合,又是全面提高国民经济水平的有力手段,在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天,电气自动化技术日新月异。毫无疑问,电气自动化技术必将在建设“四化”,实现到 2000 年使国民生产总值比 1980 年翻两番的宏伟目标中发挥重要的作用。

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,负责丛书的组稿与定稿工作。丛书将由机械工业出版社分期分批陆续出版。

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,并适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际,结合应用阐述理论,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。

本丛书的读者将以工程技术人员为主,但也可作为科研人员及大专院校教师、研究生和学生的参考书。

编写出版《电气自动化新技术丛书》,对于我们是一种尝试,肯定会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。

本丛书选题将随新技术的发展不断扩充,凡属电气自动化领

域新技术均可作为专题撰写。我们面向社会公开征稿,欢迎自列选题投稿,来稿或索取稿约请函寄 300180 天津市津塘路 174 号中国自动化学会电气自动化专业委员会《电气自动化新技术丛书》编辑委员会。

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会成员

主任委员：夏德铃

副主任委员：喻士林 胡慎敏 陈亚鹏

委 员：(按姓氏笔画顺序)

王 炎 王永珠 许广锡

李序葆 刘宗富 孙流芳

冷增祥 陈伯时 李鹤轩

周国兴 陶近贤 涂 健

夏遂华 黄 俊 韩素琴

秘 书：杨 斌

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一回事,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 控制是脉冲幅度调制(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,展示不同频率时的PWM电压波形,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

1994年5月

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

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	10
2.1	步进电动机的工作原理与运行特性	10
2.2	步进电动机的控制方式与驱动电路	16
2.3	步进电动机 PWM 控制信号生成方法	21
2.4	步进电动机 PWM 控制程序例	29
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
3.3	由单片机控制的 PWM 直流可逆调速系统	53
第 4 章	单相变频器的 PWM 控制技术	62
4.1	单相变频器主电路	62
4.2	单相变频器的 PWM 控制法	64
4.3	单相桥式 PWM 变频器微机控制	72
第 5 章	三相变频器的 PAM 控制技术	77
5.1	三相变频器 PAM 控制概要	77
5.2	120°导通型六拍逆变器的控制技术	81
5.3	180°导通型六拍逆变器的控制技术	86
5.4	三相全桥整流桥的微机控制技术	96
5.5	由两片 8031 单片机控制的电压型 SCR-PAM 三相变频器	100
第 6 章	三相变频器的等脉宽 PWM 控制技术	110
6.1	等脉宽 PWM 的意义与信号生成方法	110

6.2	系统的硬件与软件	113
6.3	时间基数的计算方法	117
第7章	三相变频器的SPWM控制技术	119
7.1	三相变频器表格型SPWM控制技术	119
7.2	三相变频器采样型SPWM控制技术	130
7.3	三相SPWM集成电路及其应用	142
第8章	三相变频器磁链追踪型PWM控制技术	168
8.1	磁链追踪型PWM法的基本原理及分类	168
8.2	三段逼近式磁链追踪型PWM控制技术	172
8.3	比较判断式磁链追踪型PWM控制技术	179
第9章	三相变频器电流追踪型PWM控制技术	184
9.1	电流追踪型PWM控制基本原理	184
9.2	电流追踪型PWM控制变频调速系统	187
第10章	通用变频器及其应用	189
10.1	通用变频器的电路	190
10.2	通用变频器的技术要求与标准规格	206
10.3	通用变频器的试验方法	213
10.4	通用变频器的应用	223
附 录		228
附录A	MCS-51指令一览表	228
附录B	本书常用芯片引脚图	232

第1章 概述

1.1 电气传动国内外发展概况

电气传动是指以各类电机为动力的传动装置与系统。因电机种类的不同,有直流电动机传动(简称直流传动)、交流电动机传动(简称交流传动)、步进电动机传动(简称步进传动)、伺服电动机传动(简称伺服传动)等等。如众所周知,直流电机尽管比交流电机结构复杂、成本较高、维修保养费用较贵,但其调速性能很好,所以,在调速传动领域中一直占据主导地位。然而,近10年来,由于电力电子技术的迅速发展,使电气传动正面临着一场重大的变革,即交流调速传动迅猛发展,电气传动交流化的新时代正在到来。

交流电机与直流电机相比,有结构简单、牢固、成本低廉等许多优点,缺点是调速困难。现在,借助于电力电子技术已经很好地解决了交流电机调速问题,所以交流调速传动已进入与直流调速传动相媲美、相竞争并逐渐占据主导地位的时代。据日本早年统计,1975年销售的交流调速装置与直流调速装置之比为1:3,而到了1985年,反了过来,成为3:1。这种趋势,近10年来发展更快。到本世纪末,在工业发达国家,交流调速必将占据主导地位。

纵观交流调速传动发展的过程,大致是沿着三个方向发展的:一个是取代直流调速实现少维修、省力化为目标的高性能交流调速;另一个是以节能为目的,改恒速为调速,适用于风机、泵类、压缩机等通用机械的交流调速;第三个是直流调速难以实现的特大容量、极高转速领域的交流调速。

交流调速方式是按交流电机转速公式建立的。对于同步电动机、磁阻式电动机等,其转速为

$$n = \frac{60f}{p} \quad (1-1)$$

式中 p ——电动机极对数；

f ——定子电源频率(Hz)。

而对于笼型或绕线转子异步电动机,其转速为

$$n = \frac{60f}{p}(1 - s) \quad (1-2)$$

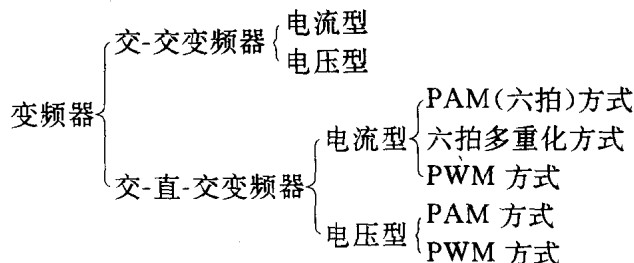
式中 s ——转差率。

因此,原则上讲,改变极对数 p ,改变转差率 s 和调节频率 f 都可以调速。但如众所周知,对于同步电动机,在运行中改变极对数会引起失步,因此只能调频调速;而对于异步电动机,以上三种方法虽均可以采用,但是变极调速是有级调速,而改变转差率 s 为目的的各种调速方法,如定子调压调速、电磁调速(滑差电机)、转子变电阻(或斩阻)调速都是耗能型调速方法,只有变频调速是最为理想的调速方法。近代,借助于电力电子技术,许多种新的调速方法得到了迅速的发展,诸如串级调速、双馈电动机变频调速、无换向器电动机、交流步进传动系统、交流伺服系统等。这些新的交流调速方法,各有不同的特点,不同的应用领域,不同的发展因缘、过程与前景。但是,串级调速与双馈电动机是使用传统的绕线转子异步电动机,转子绕组需由集电环引出,有电刷与集电环的电接触问题;无换向器电动机是同步电机结构,不但有电刷与集电环的电接触问题,而且还要增加转子位置检测装置;至于步进电动机和交流伺服系统是有特殊结构的特殊机种,应用范围也小。在电力电网中应用最普遍的是标准系列的普通笼型异步电动机和同步电动机。这些电动机使用变频器进行变频调速是最为合理的。因此,变频调速是交流调速中最理想、最有发展前途,发展最快的一种方法。

变频调速是以变频器向交流电动机供电,并构成开环或闭环系统。变频器是把固定电压、固定频率的交流电变换为可调电压、可调频率的交流电的变换器。变换过程中没有中间直流环节的,称

为交-交变频器,有中间直流环节的称为交-直-交变频器。直流可以认为是频率为零的交流,由直流变为定频定压或调频调压交流电的变换器,称为逆变器。因此,交-直-交变频器通常由整流器(AC-DC 变换)、中间直流储能电路和逆变器三部分构成。

变频器有多种,常用的变频器分类如下:



其中,电压型 PWM 方式交-直-交变频器发展最快。PWM 变频器迅速发展的原因:一是变频器所用的半导体开关器件不断地发展,二是 PWM 控制技术的日臻完善。

电力半导体开关器件主要有普通晶闸管(Thyristor,曾称可控硅元件(Silicon Controlled Rectifier,简称 SCR))^①、可关断晶闸管(Gate Turn Off thyristor,简称 GTO)、双极晶体管(Bijunction Transistor,简称 BJT)或称大功率晶体管(Giant Transistor,简称 GTR)、绝缘栅双极晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor,简称 IGBT)、场效应晶体管(MOSFET)等。近来又发展了将半导体开关器件与其周围器件(续流二极管等)构成的电路集成于一片芯片上的逆变器模块(invertor modular),以及将驱动电路、检测电路、保护电路等与逆变器电路集成于一体的功率集成电路(Power Integrated Circute,简称 PIC)等。几种主要半导体开关器件的开关频率、输出容量与应用领域示于图 1-1。

电力电子技术不仅促使交流传动迅速发展,同时也促使直流

① 为方便起见,本书沿用 SCR 代表普通晶闸管。

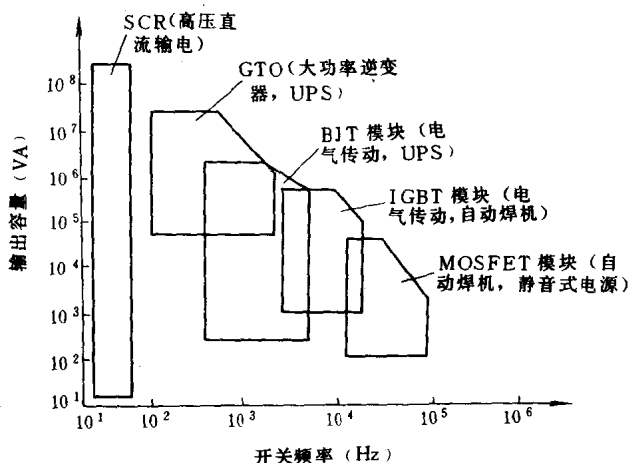


图 1-1 几种主要半导体开关器件
的输出容量、开关频率及其主要应用领域

传动得到了新的发展。例如,以往普遍应用的是晶闸管相控整流-直流电机调压调速系统,现在也发展了全波不控整流-PWM 斩波-直流电机调压调速系统。开关磁阻电动机也是由直流斩波器供电的。这种电机由反应式步进电机发展而来,定子为凸极式,上面绕有定子集中绕组;转子也是凸极结构,由硅钢片叠成,没有转子绕组,但转子上安装一个位置检测器,由位置检测器检出的转子位置信号去控制直流斩波器,顺序地切换供给定子绕组的直流脉冲电流,形成旋转磁场使转子转动。直流斩波器不存在逆变器同一桥臂两个半导体开关器件同时导通造成的直通短路问题,因而可靠性高、成本也比较低。目前正在努力设法取消转子位置检测器和消除低速时转矩脉动的问题。

总之,由于电力电子技术的进步,使电气传动的各个方面都发生了或正在发生着根本性的变化。近几年来,国外已将电气传动改名为运动控制,并认为运动控制分为三个组成部分:电源部分、执行器部分和控制器部分。电源部分主要由电力电子器件构成,用以形成和控制各种形式的电流供给执行器;执行器则将电能变换为

机械能,形成转矩(旋转运动)或机械力(直线运动);控制器接收上位计算机的指令,完成执行器运动控制和管理等。运动控制比电气传动一词更具有时代的特色,它是适应工业自动化、办公室自动化和家庭自动化而产生的一门新兴学科,正在迅速发展。

1.2 电气传动的 PWM 控制技术

前言中已经说过,在电气传动中,广泛地应用 PWM 控制技术。PWM 控制技术是利用半导体开关器件的导通与关断把直流电压变成电压脉冲列,并通过控制电压脉冲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。

半导体开关器件和 PWM 控制技术构成的直流斩波器可完成直流-直流电压变换(DC-DC 变换),如图 1-2 所示。改变脉冲的宽度或周期,在输入电压 U_d 不变的情况下,可以改变输出直流电压 U_L 的大小,达到调压的目的。这种 DC-DC“功率变压”广泛地应用于开关稳压电源、UPS 以及步进电动机、直流电动机调速传动系统中。

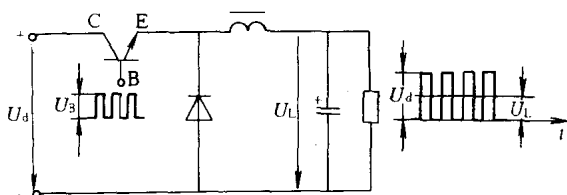


图 1-2 DC-DC 变换(直流 PWM 斩波器)

在交流变频调速传动中,用变频器进行“功率变频”。但变频的同时也必须协调地改变电动机的端电压,否则电动机将出现过励磁或欠励磁,这是众所周知的。为此,用于交流电气传动中的变频器实际上是变压(Variable Voltage,简称 VV)变频(Variable Frequency,简称 VF)器,即 VVVF。所以,通常也把这种变频器叫作

VVVF 装置或 VVVF。与此相对应的,还有定压(CV)、定频(CF)变频器,简称 CVCF 装置或 CVCF,通常作为定压定频电源使用。CVCF 可以认为是 VVVF 固定于某一点运行时的一种特殊工况。

VVVF 控制技术分为两种,一种是把 VV 与 VF 分开完成,如图 1-3 所示。图 1-3a 是在把交流电整流为直流电的同时进行相控调压,而后逆变为可调频率的交流电;图 1-3b 则是把交流电整流

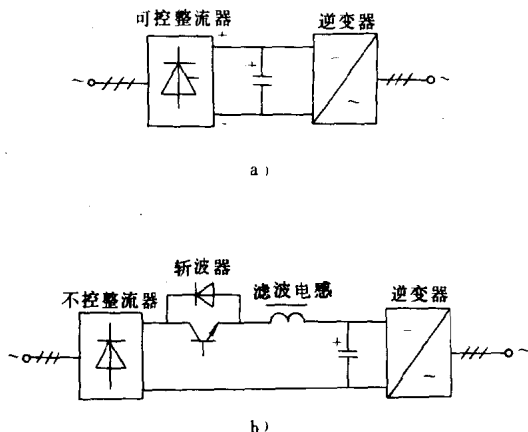


图 1-3 PAM 方式

a)可控整流-逆变方式 b)不控整流-斩波-逆变方式

为直流电之后用 PWM 斩波器调压,然后再将直流逆变为可调频率的交流。总之,图 1-3 中,前面的环节用来改变直流电压的幅值,后面的环节用来改变频率。这种前后分开控制的 VVVF 控制技术称为脉冲幅值调制(Pulse Amplitude Modulation)方式,简称 PAM 方式。另一种是将 VV 与 VF 集中于逆变器一起来完成的,即前面为不可控整流器,中间直流电压恒定,而后由逆变器既完成变频又完成变压,如图 1-4 所示。这种控制技术称为脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation)方式,简称 PWM 方式。

在 VVVF 控制技术发展的早期均采用 PAM 方式,这是由于