

脉宽调制技术

李锡雄 陈婉儿

PWM

PWM

PWM

华中理工大学出版社

脉宽调制技术

李锡雄 陈婉儿

华中理工大学出版社

(鄂)新登字第 10 号

图书在版编目(CIP)数据

脉宽调制技术/李锡雄 陈婉儿

武汉:华中理工大学出版社,1996.1

ISBN 7-5609-1243-5

I. 脉…

I. ①李… ②陈…

II. 脉宽调制-技术

IV. TN787

脉宽调制技术

李锡雄 陈婉儿

责任编辑 黄以铭

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山 邮编:430074)

新华书店湖北发行所经销

武汉市青联彩印印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:14.25 字数:348 000

1996年1月第1版 1996年1月第1次印刷

印数:1-1 500

ISBN 7-5609-1243-5/TP·171

定价:14.00 元

(本书若有印装质量问题,请向承印厂调换)

前 言

脉宽调制技术起源甚早,但发展较缓慢。随着工业生产的需求和科学技术的发展,特别是80年代后,各种高集成度、高抗干扰能力和高性能价格比的单片微机的相继出现,以及各种高电压、大电流的全控型电力电子器件的出现和商品化,为脉宽调制技术的发展和應用提供了广阔的前景。

近10年来,脉宽调制技术获得了迅速发展,主要应用在功率逆变式变频器方面。功率逆变式变频器能将恒定电压或可调节电压的直流电能转变为正弦交流电能馈送给负载,它不但具有较高的输入功率因数和较好的输出波形,而且既可以调节其输出电压大小,又可以连续调节其输出频率,因而在工业上广泛用于调速传动装置和精密功率电源等系统中。

本书是在完成《智能脉宽变频调速主控制器的机理研究》(广东省科学基金会资助项目)和《在线式微机控制稳压稳频正弦波输出UPS系统的机理研究》(广东省高等教育局重点学科资助项目)等科研项目后编写的。书中收入了这些项目的一些研究成果。全书共分七章:第一章介绍脉宽调制技术的产生、发展与应用概况及近代各种脉宽调制模式。第二章论述了脉宽调制技术原理和几种PWM波脉宽算法。第三章论述了用单片微机产生PWM波的原理。第四章介绍功率逆变器原理。第五章讨论由集成器件组成的逆变器驱动电路及其保护电路等。第六、第七章分别介绍了用脉宽调制技术控制异步电动机的变频调速系统及无瞬间停电电源,包括系统硬件设置、部分软件设计、系统试验结果等。

研究生张晖、陈慧清、孙尽尧、唐升宗、王季布、刘以建、刘炜、区远江等对本书编写贡献很大,他们收集资料、论证方案、设计系统、编制软件、进行系统调试等,为编写本书做了大量工作。李文为本书的出版和在科研实验中亦做了大量工作。

华中理工大学陶醒世教授担任本书的主审,对本书的原稿提出了许多有益的意见。

广东工业大学(原广东工学院)领导及科研处领导、广东工业大学工业自动化学科组等热情支持本书的编写工作,并为本书的出版提供了经费资助。值此书出版之际,谨向他们致以衷心感谢。

脉宽调制技术是一项内容十分丰富并在迅速发展中的新技术,尽管书中的内容曾作过反复修改,但由于编者水平有限,错误、不妥之处在所难免,敬希读者批评指正。

编 者

1995年10月于广东工业大学

目 录

第一章 脉宽调制技术的产生、发展与模式

1.1 概述	(1)	1.5 主要脉宽调制模式	(10)
1.2 调速传动系统的发展趋势	(2)	1.6 几种新型 PWM 控制技术	(14)
1.3 PWM 变频调速系统的特点及现状	(3)	1.7 微机数字化 PWM 波控制方法	(17)
1.4 UPS 的发展概况	(7)		

第二章 脉宽调制技术原理

2.1 均值 PWM 波脉宽调制技术	(19)	2.4.4 导通时引起的波形失真及其补偿	(47)
2.1.1 均值 PWM 波原理与分析	(19)	2.5 周期补偿无差拍 PWM 控制算法	(48)
2.1.2 换相点公式及脉宽计算值	(22)	2.5.1 无差拍 PWM 控制算法	(48)
2.2 次最优 PWM 波参数算法	(22)	2.5.2 周期补偿无差拍 PWM 控制算法	(51)
2.2.1 次最优 PWM 波原理与分析	(23)	2.5.3 控制系统特性分析	(52)
2.2.2 次最优 PWM 波脉宽计算	(26)	2.5.4 旁路环流控制	(56)
2.3 DPWM(直接 PWM)波脉宽算法	(27)	2.6 状态观测器型无差拍 PWM 控制	(58)
2.3.1 DPWM 波控制技术	(27)	2.6.1 状态观测器原理	(58)
2.3.2 DPWM 波脉宽算法及计算机仿真	(29)	2.6.2 状态观测器型无差拍 PWM 控制	(60)
2.4 改进型等面积 PWM 控制算法	(33)	2.7 干扰预测型无差拍 PWM 控制算法	(64)
2.4.1 等面积 PWM 控制算法	(33)		
2.4.2 双极性逆变器输出电压、电流仿真	(35)		
2.4.3 改进型等面积 PWM 控制算法	(40)		

第三章 微型计算机控制产生 PWM 波的原理

3.1 Z-80 CPU 控制产生 PWM 波的原理	(68)	3.2.1 MCS-51 系列单片微机主要性能特点	(71)
3.1.1 三相电势发生器	(68)	3.2.2 次最优 PWM 波控制的变频调速	(71)
3.1.2 三角波发生器	(70)	3.2.3 产生 PWM 波的硬件电路	(72)
3.1.3 PWM 波合成器	(70)	3.2.4 产生次最优 PWM 波有关参数计算	(74)
3.2 MCS-51 系列单片微机控制产生			
次最优 PWM 波的原理	(71)		

3.3 MCS-8098 片内部件产生 PWM 波的原理	(76)	3.4 8098 单片微机控制产生均值 PWM 波的原理	(87)
3.3.1 8098 单片微机主要性能特点	(76)	3.4.1 均值 PWM 波解耦控制变频调速原理	(87)
3.3.2 8098 片内 PWM 部件产生 PWM 波的原理	(77)	3.4.2 产生均值 PWM 波的硬件电路和控制程序	(89)
3.3.3 8098 片内 HSO 部件产生 PWM 波的原理	(78)		

第四章 功率晶体管逆变器

4.1 概述	(92)	4.3.2 单相 PWM 逆变器	(97)
4.2 逆变器基本原理	(92)	4.3.3 三相 PWM 逆变器	(102)
4.2.1 电压型逆变器	(93)	4.4 电流型 PWM 逆变器	(108)
4.2.2 电流型逆变器	(95)	4.4.1 消除低次谐波的 PWM 控制	(108)
4.3 电压型 PWM 逆变器	(96)	4.4.2 次谐波调制方式	(111)
4.3.1 概述	(96)		

第五章 逆变器驱动电路与测控电路

5.1 GTR 驱动、检测与保护电路	(113)	5.2.1 IGBT 的特点	(123)
5.1.1 GTR 驱动电路	(113)	5.2.2 EXB841 驱动模块及其保护电路	(124)
5.1.2 逆变器工作参数的检测与保护电路	(115)	5.2.3 IGBT 实用缓冲保护电路	(127)
5.1.3 由 UAA4002 组成的驱动、保护电路	(117)	5.3 可关断功率晶体管延时互锁电路	(129)
5.1.4 驱动模块 M57215BL	(122)	5.4 PWM 开关延时校正电路	(130)
5.2 IGBT 驱动、检测与保护电路	(123)	5.5 频率/转速检测与显示电路	(131)

第六章 微机脉宽调制技术控制的电动机调速系统

6.1 小功率异步电动机变频调速系统	(149)	6.2.3 转差频率控制系统校正设计	(151)
6.1.1 电动机主要参数及控制要求	(134)	6.2.4 系统硬件设置	(156)
6.1.2 控制系统设置	(134)	6.2.5 系统软件设计	(157)
6.1.3 PWM 变频调速原理	(135)	6.2.6 输出电压、电流波形仿真与实验结果	(165)
6.1.4 系统性能特点	(137)	6.3 均值 PWM 波解耦控制变频调速系统	(169)
6.1.5 控制软件设计	(140)	6.3.1 标量解耦控制数学模型	(169)
6.2 异步电动机转差频率微机控制系统	(147)	6.3.2 微机硬件系统设置	(172)
6.2.1 转差频率控制规律——数学模型	(147)	6.3.3 系统控制程序设计	(175)
6.2.2 异步电动机转差频率微机控制原理		6.3.4 实验结果与分析	(179)

第七章 微机脉宽调制技术控制 UPS 系统

7.1 周期补偿无差拍控制 UPS 系统	7.2.1 系统硬件电路设置	(199)
..... (181)	7.2.2 系统控制软件设计	(199)
7.1.1 系统结构和工作原理	7.2.3 系统稳定性、仿真与试验结果 ...	(207)
(181)	附录一 部分专业名词术语英中文对照表	
7.1.2 系统硬件设置	 (211)	
(183)	附录二 部分常用集成电路引脚图	(213)
7.1.3 系统软件设计	参考文献	(218)
(185)		
7.1.4 仿真与实验结果		
(197)		
7.2 状态观测器型无差拍控制 UPS 系统		
..... (198)		

第一章 脉宽调制技术的产生、发展与模式

1.1 概 述

脉宽调制 (Pulse Width Modulation, 简称 PWM) 技术起源甚早, 随着工业生产的需求和科学技术的发展, 80 年代后, 它被广泛应用于工业功率控制装置的逆变器 (Inverter) 中, 从此获得迅速发展。它的特点是以微处理器和电力半导体元器件为核心, 横跨电力、电子、微型计算机及自动控制等多种学科领域。

将固定直流电压变换成固定的或可调的交流电压的装置称为逆变器。逆变器采用了脉宽调制技术后, 不仅有效地改善和提高了品质性能, 同时根据需要, 它还能将直流电压变换成电压和频率均可调节的交流电压, 因此, 它又是一种逆变式变频器, 并称这类逆变器为脉宽调制型变频器, 因它具有输入功率因数高和输出波形好的可贵特点, 近年来发展很快, 其技术关键之一是采用了 PWM 方法。自 80 年代初以来, 各国科技人员开发了多种 PWM 方法。归纳起来主要是: 自然采样 SPWM、载波调制 SPWM、谐波注入式 PWM、最优 PWM 和无差拍周期补偿 PWM 等。在众多的调制方法中, 它们分别采用了面积法、图解法、计算法、采样法、优化法、斩波法、角度法、跟踪法和次谐波法等原理对逆变器进行了有效的调制。

近年来, 脉宽调制型变频器主要用在两类工业功率控制装置中: 一是用于调速传动装置中, 尤其广泛用于交流调速系统中。采用了脉宽调制技术控制逆变器后, 使交流拖动系统实现了高调速比的平滑无级调速, 出现了交流调速传动系统与直流调速传动系统相媲美、相抗衡的时代, 出现了前者取代后者的趋势。二是用于精密功率电源中, 特别是用在不间断电源 (Uninterruptible Power Supply 简称 UPS) 中, 采用脉宽调制技术控制逆变器后, 为精密仪器、计算机系统等提供了一种高可靠性的稳频、稳压和正弦波输出的无瞬间停电电源。在电网停电时, 它依靠装置内已充电的蓄电池供电, 在装置内进行直流—交流变换, 继续向负载提供电能, 不停电时间取决于装置内的电池容量和负载功率。

上述两种工业功率控制装置, 因其用途及负载性质不同, 所以它们对采用脉宽调制技术控制的逆变器的结构形式和品质性能的要求也不尽相同, 主要区别见表 1-1-1。

表 1-1-1 两种不同用途的逆变器的主要区别

用 途		交流调速传动装置	不间断电源
主要结构形式		三相全控型功率 晶体管桥式电路	单相全控型功率 晶体管桥式电路
主 要 指 标	频 率 $\Delta f\% = \frac{f - f_H}{f_H} \times 100\%$	1~100Hz 连续可调	$f_H = 50\text{Hz}$ $\Delta f\% \leq 1\%$
	波形 THD%	允许含有 3、7 次 谐波 THD% $\leq 5\%$	正弦波输出 THD% $\leq 1\%$
	电 压 $\Delta U\% = \frac{U - U_H}{U_H} \times 100\%$	允许 $\Delta U\% \leq 5\%$	$\Delta U\% \leq 1\%$

本章将在介绍调速传动系统的发展趋势和 UPS 发展概况的基础上,再介绍几种主要的脉宽调制模式及最新 PWM 控制技术,以帮助读者初步了解 PWM 技术的基本原理、调制方法、主要模式及应用概况。

1.2 调速传动系统的发展趋势

由于交流电动机具有结构简单、坚固耐用、惯量 (GD^2) 小、动态响应特性好、效率高、经济可靠、抗恶劣环境能力强、易于向高压高速大容量方向发展等优点,而被广泛应用于机械、钢铁、纺织、铁道等行业中。目前在运行的电动机总量中,交流电动机占了绝大多数,但这些电动机多数是恒速运行的。无论在国外还是在国内,电动机消耗的电能约占全国用电量的 60% 以上,因此有效地利用电动机能量并降低其运行能耗,具有重要的现实意义。特别是对风机、压缩机、水泵类负荷采用变速控制,一般可节能 20%~30%,而这类负荷所耗电能约占全国发电总量的 30% 左右。

长期以来,为推广应用交流调速技术,人们朝着以下三个方面进行了不懈地努力:

(1) 以节能为目的,在风机、压缩机和水泵类机械中实现简便易行、性能要求不高的交流调速技术;

(2) 以取代直流电动机调速系统为目标的高性能交流调速技术的研究;

(3) 向直流电动机无法涉入的领域如特大容量、特高速度的应用场合发展。

交流调速技术的发展与微处理器、功率器件、功率变换器、新型调速电机和传动控制技术等的发展密切相关。交流调速技术的发展趋向,主要表现在新型功率器件、高功率变换器、高性能矢量变换控制和微型计算机控制等方面的发展与应用。

随着可关断晶闸管 (GTO)、大功率晶体管 (GTR)、功率 MOS 场效应管 (PMOSFET) 以及绝缘门极双极晶体管 (IGBT) 等具有自关断能力的功率开关管的出现和商品化,使功率变换装置的结构不断简化、可靠性不断提高。同时,高性能微处理器的出现及现代控制理论的发展,诸如自适应控制 (磁通自适应、断续电流自适应、参数自适应等模型参考自适应控制),观测控制及状态观测器 (磁通观测器、力矩观测器、负荷扰动观测器等),采用前馈控制补偿速度降、提高调速精度、以节能及平稳快速等为目标函数的优化控制、线性二次型积分控制 (LQI)、滑模变结构控制及模糊控制等新技术在交流调速系统中的广泛应用,促使了以微型计算机为核心的新一代控制系统及单元的诞生与发展。从部分采用微处理器的数字模拟混合控制向着全面采用微机控制或专用控制机的全数字化方向发展。同时,除原有控制功能外,还向着多功能 (包括监视、显示、保护、故障自诊断自处理等) 方向发展,使交流调速性能大为提高,以至完全可以与直流调速性能相媲美。特别在改善系统功率因数方面还优于直流调速系统,因而形成了交流调速越来越多地取代了直流调速的新局面。例如在 1975 年,日本在调速领域中直流调速占 80%,交流调速仅占 20%,到了 1985 年,情况恰好相反。在表 1-2-1 中给出了交流调速传动系统产品的情况,它代表了近年来交流调速的水平。

交流调速的优势还在于价格的优势。从整个电气传动系统的价格组成来看,以 1982 年的统计资料分析,在直流传动系统中直流电动机的价格占 60%,控制设备价格占 40%,而在同一容量的交流传动系统中,交流电动机价格不到 30%,控制设备价格却超过 70%。近年来,控制设备价格不断下降的趋势为交流调速传动系统的推广应用创造了极为有利的条件。

表 1-2-1 交流电动机调速系统产品现状

型式	控制	功率	变频器		输出 电流	电动机	说明
			方式	元件			
高性能型	微型机 矢量控制	几 kW	交直交 电压型	MOSFET 或 GTR	正弦	永磁电动机、 感应电动机	伺服系统
		几百 kW	交直交 电压型	GTR	正弦	感应电动机	
		几千 kW	交直交 电压型	GTO	正弦	感应电动机	
			交直交 电流型	晶闸管	方波、 梯形波	感应电动机	
			交直交 电流型	GTO	正弦	感应电动机	
		万 kW	交交变频	晶闸管	正弦	感应电动机、 同步电动机	600r/min 以下无环 流, 600~1500r/min 有环流
		几万 kW	无换向器 电动机	晶闸管	方波、 梯形波	同步电动机	1500r/min 以上
普通型	压 频 比 恒 定 控 制	几百 kW	交直交 电压型	GTR	正弦	感应电动机	
		几千 kW	交直交 电流型	SCR	方波、 梯形波	感应电动机	
		万 kW	交直交 电流型	SCR	方波、 梯形波	绕线转子式 感应电动机	串级调速
		几万 kW	无换向器 电动机	SCR	方波、 梯形波	同步电动机	

近代交流调速技术正朝着变频调速、串级调速、双馈电动机、无换向器电动机、交流伺服系统、交流步进拖动系统、交流调速节能技术、无功补偿及谐波抑制等八个分支和 PWM 控制、矢量控制、转差频率控制、直接转矩控制、磁场控制、相位控制、变压变频控制、微机控制等方向发展。其中以微机数字化 PWM 波变频调速控制技术的发展尤为迅速,而且已有许多成果,形成了商品化系列产品投放市场,为工业生产服务。

1.3 PWM 变频调速系统的特点及现状

如果连续地改变电源频率,同时相应地改变供电电压,可十分理想地实现交流电动机的无级调速,这就是交流电动机的变频调速方式。变频调速能实现宽范围的调速,而且具有良好的静态和动态性能指标,完全可以满足现代变速传动装置的要求。

变频调速系统需要一个变频电源给电动机供电。因对输入信号的功率变换形式不同,变频电源又可分成交直交变频器和交交变频器。前者是变频调速系统中广泛使用的方法,后者只适用于低速(最高频率为电源频率的 $1/3 \sim 1/2$)、大容量的场合。由于变频器的负载通常为异步电动机,其功率因数是滞后的,同时因直流环节不便向负载提供无功功率,必须在其间设置储能元件,以吞吐系统的无功能量。根据无功能量的处理方式,变频器可分为电流型

(Current Structure Inverter 简称 CSI) 和电压型 (Voltage Structure Inverter 简称 VSI) 两大类，如图 1-3-1 所示，它们各自的优点如表 1-3-1 所述。

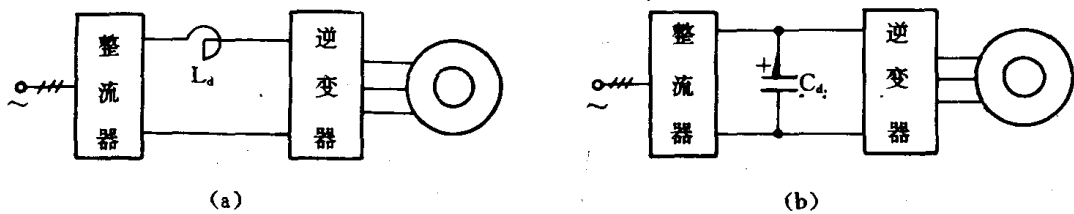


图 1-3-1 电流型和电压型变频器框图

(a) CSI
(b) VSI

表 1-3-1 交流传动系统中常用的两类变频器的优点

VSI 优点	CSI 优点
若仅需电动运行则功率电路简单 在直流回路有小量能量储存 有可能采用多电动机传动 逆变器效率高 可能用快速响应的控制方法 弱磁范围很大 不需要附加的调谐电容器 没有谐振现象	电动机的噪声电平非常低 电动机的附加功率损耗低 4 象限运行 (双向转动的电动和再生运行) 简单、价格适宜的功率电路 转矩脉动小 过流保护简单

逆变器是变频调速系统的核心。选择怎样的控制方法对逆变器各开关器件的通断次序及通断时间进行控制，与开关器件的特性密切相关。

图 1-3-2 表示一种典型的逆变器模型。

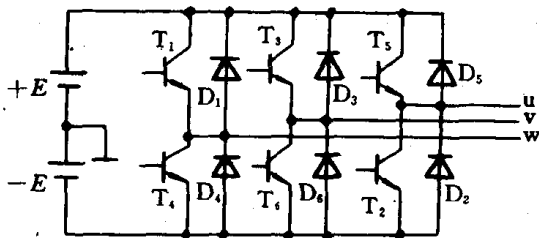
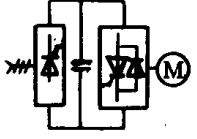
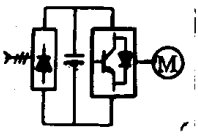
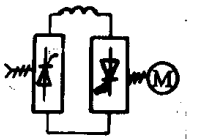
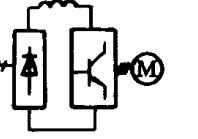
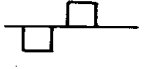
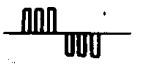
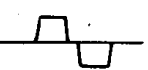
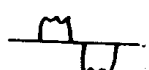


图 1-3-2 逆变器模型

早期的开关器件主要是晶闸管 (SCR)，其开关频率低，属于半控器件，对逆变器的控制主要是脉冲幅度调制 (Pulse Amplitude Modulation 简称 PAM)，它有许多缺点：谐波大、功率因数低、转速脉动大、动态响应慢及线路复杂。后来由于 GTO、GTR、MOSFET 和 IGBT 等全控器件的产生，其开关频率比 SCR 高得多，由此出现了脉宽调制 PWM 技术，它用一系列宽度不同的等幅脉冲序列来逼近正弦波，产生接近正弦的电压、电流波形，其特点是功率因数较高，同时又能克服 PAM 法的所有缺点。表 1-3-2 所示是 PAM 法与 PWM 法的特性比较。

由变频器-交流电动机组成的调速系统是一种组合方便、使用可靠而且节能效果好的系统。世界各生产变频器的厂家为满足用户的要求，不断推出性能更好、功能更全、保护更充

表 1-3-2 PAM 与 PWM 法特性比较

项目	电 压 型			电 流 型	
	PAM	PWM	不等 PWM	PAM	PWM
代表的主回路结构			同左		
电压波形					
电流波形					
效 率	①	③	⑤	②	④
脉动转矩	③	②	①	⑤	④
噪 声	①	③	⑤	②	④
响应性	④	②	①	⑤	③
制 动	直流制动	直流制动	直流制动	再生制动	直流制动
价 格	④	①	③	⑤	②
主 用 途	水泵、风机、纤维卷取机，一般物品传送带（最适于高效率、高频运行）	一般物品传送带，加工机械（通用性高）	加工机械主轴（电动机的振动最小）	水泵、风机、磨床，选矿滚筒（最适宜于四象限运行）	磨床，选矿滚筒，水泵、风机（适宜于小容量单机运行）

注：①～⑤为优劣的排列顺序

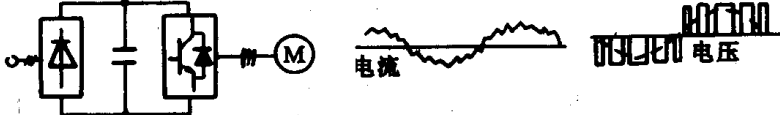
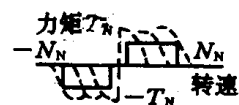
分、使用更方便的变频器，它们有以下特点。

(1) 产品系列化：除了生产通用型产品外，为配合不同功率、不同用途的电动机，还发展了适应各种特殊场合使用的专用传动系统系列。

(2) 性能更好：用磁通控制型正弦波 PWM 控制方式的变频器，使得电动机的旋转磁场成为理想的圆形磁场，转矩脉动较小、电动机运行平稳，克服了电压型正弦波 PWM 控制中电动机低速运行时转矩脉动大的缺点；用电流限幅控制方式，使变频器能快速响应电流检测器的瞬变过程，测出其电流峰值到达限幅值的时刻，并及时关断有关晶体管，抑制电流增加，同时指令输出频率自动补偿，保证了不发生电流冲击现象；用频带控制方式的变频器，可保证其输出电流波形更接近于正弦波。

(3) 功能更全：新的变频器大多采用高速的 16 位微处理器与专用大规模集成电路为核心部件，配置了许多新的控制软件，增加了许多新功能。

表 1-3-3 电压型 PWM 式逆变器的性能

性能项目		电压型 PWM 式逆变器 (晶体管)	
主回路构成			
速度-力矩特性			
控制方式		用二极管整流器变换成一定的直流电压, 通过逆变器控制输出频率和电压	
特 点		1. 适合于泵、风机等力矩平方下降负荷 2. 能在全速范围内高效率运转, 但快速启动困难 3. 可对电动机调速 4. 功率因数高, 力矩脉动小	1. 适合宽范围恒力矩负荷 2. 加减速时间较短 3. 能在全速范围内高效率运转 4. 可对电动机调速 5. 功率因数高, 力矩脉动小
驱动对象 调速范围 调速精度 频率精度 力矩特性 功 率 功率因数 谐 波		中小型笼形电动机, 同步电动机 1:10 (6~60Hz) 2%~5% <1% 力矩平方下降 很 高 很 高 很 小	中小型笼形电动机, 同步电动机 1:40 (3~120Hz) <2% <1% 1:10 (恒力矩) 很 高 很 高 很 小
负荷特性	恒力矩 恒功率 力矩平方下降	一 般 不 能 很 好	很 好 很 好 很 好
运转特性	单方向 可 逆 加减速 频繁启制动 频繁反转 稳定性	很 好 好 不 能 好 不 能 一 般	很 好 很 好 很 好 很 好 很 好 很 好
启动加速	急 速 慢 速 启动力矩	一 般 很 好 一 般	好 很 好 好
减速制动	急 速 慢 速 再生制动	一 般 很 好 可动力制动	不 能 很 好 可动力制动
投 资		便 宜	
主要用途		风机、泵类负荷传动 皮带运输机、印刷机、卷取机、推床、机床主轴、化纤和纺织机械传动	

(4) 保护更充分：采取各种保护措施，力求万无一失。

(5) 使用更方便：新推出的变频器一般都采用触摸式键盘配以数字显示，使变频器的工作方式设定、频率设定、加减速时间设定以及电动机运行状态设定等操作，都可通过键盘操作完成，并有数字显示，使用起来极为方便。当保护电路动作时还可显示故障原因，便于迅速采取处理对策。

PWM 法除了具有频谱形状可调，即脉冲序列中各脉宽可调节的这一重要特点外，另一重要特点是还可以对其输出电压、电流作线性幅度调节与控制，而且这种调节与控制完全由人们设置的 PWM 波调制的控制算法在逆变器内予以实现。因而，不仅极易对被控对象异步电动机实施恒转矩或恒功率控制，而且逆变器本身可直接由功率二极管组成的整流桥来供电，使功率变换系统更加简单、经济和可靠。

当然，PWM 控制方法也有不足之处：如在需要宽调速场合中，电动机高速运行时，功率晶体管开关频率猛增，高频换流过程势必使开关器件的额定参数降低，输出波形中高次谐波分量增加，从而造成桥臂上下两管误通率增加等。

不过，PWM 控制方法的出现，的确促使了高性能交流传动调速系统的发展和日趋完善。为了帮助读者了解 PWM 控制式逆变器的特点，表 1-3-3 中列出了电压型 PWM 式逆变器的性能情况。

1.4 UPS 的发展概况

随着科学技术的发展，计算机以及各种精密自动化电子设备被广泛地应用于办公自动化、数据处理与通讯、气象航天、国防军事、高精密测试、显示记录装置以及工业自动控制等领域。在办公自动化及工业生产各个行业中，单片微机系统和微型计算机控制网络系统已逐渐取代旧式数据统计、造表及继电接触系统，形成现代化管理网络或全自动化控制网络，促使国民经济向更高层次发展。

这些计算机和精密电子设备对电源的质量有较高的要求，但目前电网供电质量在许多场合不能满足这一要求。我国电网容量严重不足，污染较严重，随机性冲击、断电频繁。

表 1-4-1 为某国在某年度全国电信局市电中断统计值。表 1-4-2 为国内外城市供电系统可靠性数据。电网质量不仅直接影响计算机设备的正常运行，降低了其预期应用效果及性能指标，给某些部门如空中交通管理、雷达导航、通讯系统等带来严重后果。

表 1-4-1 某国在某年度全国电信局市电中断统计值

项目	超高压	高 压		低 压	
		电话交换局	无线中继站	电话交换局	无线中继站
平均停电次数 次/年	5.9	8.7	23.6	5.8	17.0
累计平均停电时间 分钟/年	934	616	1952	645	1154
每次平均停电时间 分钟/次	158	71	83	111	68

表 1-4-2 国内外城市供电系统可靠性数据

国家 或 城市	年 度	平均供电可用率		年均用户停电时间	
		统计值	百分比 $\times 100$	统计值 分钟/年 $\cdot$ 户	百分比 $\times 100$
A 国	1978/1979	0.999827	100.00	1.52	100.00
B 国	1979	0.999617	99.98	3.36	221.00
中国	A 市	0.991979	99.22	70.26	4622.30
	B 市	0.993300	99.34	58.77	3866.40
	C 市	0.974320	97.45	219.93	14469.07
	D 市	0.990100	99.03	65.59	4315.13

注：表中百分比 = $\frac{\text{某统计值}}{\text{A 国统计值}}$

在线式正弦波不间断电源 (UPS) 是一种具有无瞬间中断、稳压、稳频、抑制干扰等优越性能的设备，它能满足特殊设备的供电要求。UPS 装置的核心部件是直流-交流逆变器。它是实现稳频稳压，并在市电中断时把蓄电池电能变为交流电能输出的装置。其性能优劣决定着整机的效率、体积、噪声、造价、可靠性以及输出电压品质等多方面性能。逆变器控制的研究对稳频稳压 (CVCF)、变频变压 (VVVF) 等领域具有理论的和应用的价值。

在工业发达国家，对 UPS 的机理研究起步较早，UPS 理论及技术较成熟。70 年代以来，各种高压大功率半导体器件的不断涌现及其质量不断提高，价格不断降低，促使了固态变流技术的发展。目前，各种系列的静止型 UPS 早已推向市场，这些产品的供电品质、供电方式和系统结构各有其特点，能适应不同用户的需要。其中最能体现 UPS 的优点，并为目前大多数高档 UPS 所采用的一种结构类型如图 1-4-1 所示，这种 UPS 称为在线式 UPS。图中油机型电源为备用电源，转换开关一般采用静态无触点开关。

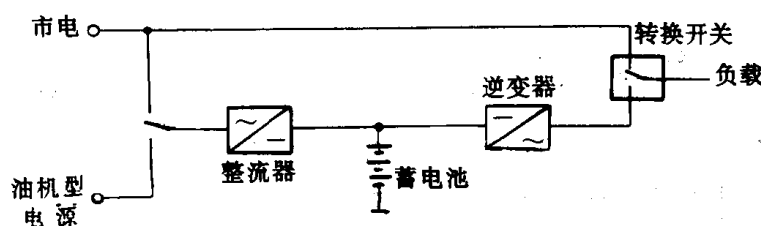


图 1-4-1 在线式 UPS 框图

随着高频自关断器件、高频 PWM 控制方式及控制手段、新型磁性材料和高性能传感器等技术的发展，UPS 技术也有了很大发展，主要体现在以下三个方面。

1. 各种类型 UPS 系统不断问世

以体积小、重量轻、效率高、噪声低和价格便宜为目标而研制的新型 UPS 系统，主要有三类。

(1) 后备式 (Standby Supply) UPS: 如图 1-4-2 所示，这种 UPS 平时由市电直接向负载供电并给蓄电池充电，一旦市电中断则改由逆变器供电。由于整流器只完成对蓄电池充电，故其体积较小。

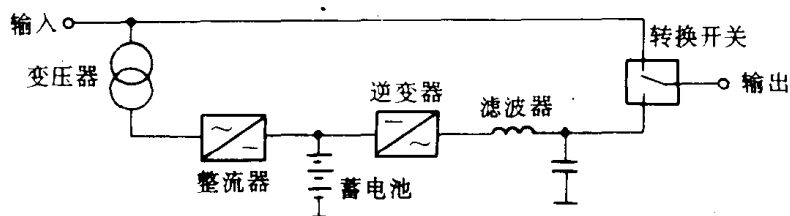


图 1-4-2 后备式 UPS 框图

(2) 并联工作型 (Parallel Processing) UPS: 其结构如图 1-4-3 所示, 这种 UPS 通常也是由电网通过旁路向负载供电, 装置内设有一两用变换器, 市电正常时, 两用变换器作为充电器运行, 它将交流电整流后对蓄电池充电, 同时还作为一个电压调节器使用, 起着调节负载端电压的任务。当市电故障时, 输入端的电子开关断开, 两用变换器作为逆变器把电池电能变为交流电供给负载。

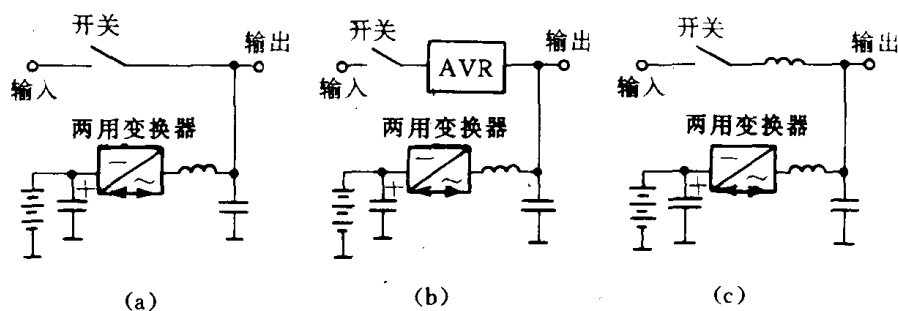


图 1-4-3 并联工作型 UPS 框图

(a) 基本型 (b) AVR (c) 交流电抗型

(3) 高频链路 (High Frequency Link) UPS: 其结构如图 1-4-4 所示, 这种 UPS 的特点是没有工频变压器, 而是在直流部分加入高频 DC/DC 变换器来实现输出和电网隔离 (图 1-4-4 (a)); 或是采用高频逆变方式产生高频 PWM 波, 然后用循环变流器件将此高频电压波转化为工频电压再供给负载 (图 1-4-4 (b))。

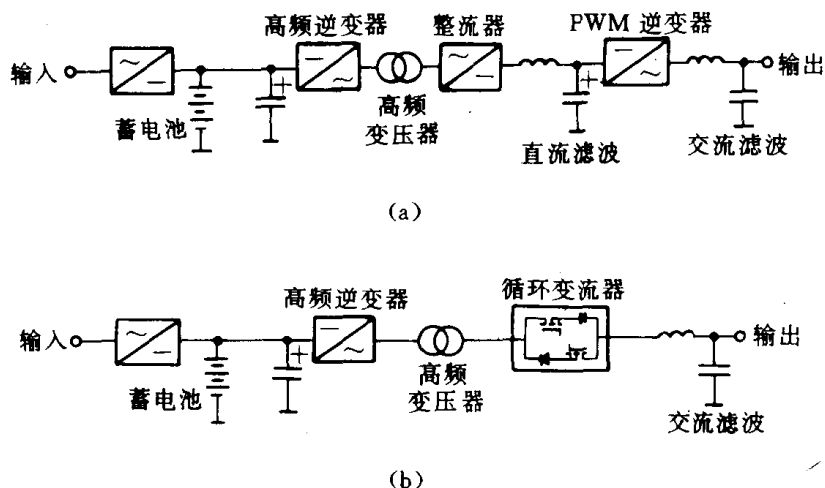


图 1-4-4 高频链路 UPS 框图

(a) DC/DC 变换器型 (b) 循环变流器型

上述各种方案中, 前两种虽然能实现减小体积和重量、降低成本的要求, 但其性能显然不能满足精密设备的要求, 高频链路 UPS 采用高频变压器代替工频变压器, 大大减少了 UPS

系统的体积、重量和噪声,提高了装置的功率密度,同时又具有在线式 UPS 的全部优点,如波形失真小,能实现真正的不间断供电,所以它被认为是一种很有前途的方案。

2. 控制方式不断改进

为克服电路中非理想因素产生的低次谐波和整流负载及其他非线性负载引起的输出电压畸变,人们对传统的 PWM 控制方案进行了许多改进,提出了瞬时值反馈控制 (Instantaneous Control)、无差拍控制 (Dead beat Control)、周期控制 (Repetitive Control) 和乒乓控制 (Bang-Bang Control) 等控制方案,这些新的控制方案大大改善了逆变器的输出波形,因而减少了输出交流滤波器的体积、重量,提高了系统的动态性能。

3. 使用新的全控型功率器件

逆变器的功率半导体开关器件正朝着功率更大、驱动更简单和开关频率更高的方向发展。80 年代以来, GTO、GTR、MOSFET 和 IGBT 等新型高性能功率半导体器件差不多淘汰了使用复杂的不可关断器件 (SCR)。

4. 大容量 UPS 的智能化程度越来越高

目前国外大容量 UPS 均为微机监控系统,能自动检测 UPS 运行中各部分的状态和参数的变化,并对故障具有自动处理能力。同时微机还参与 UPS 的控制过程和提供良好的人-机界面。

综上所述,逆变器仍是各类 UPS 装置的核心组成部分,与其他各种交流传动调速系统的控制方法、方式相比,采用微机数字化 PWM 技术,对 UPS 的逆变器进行控制更为有效,它既可提高、完善 UPS 装置的品质性能,又便于设置、扩展、修改各种功能,操作简便,自动化程度高,它已成为近年来 UPS 装置的主要研究方向与发展趋势。

1.5 主要脉宽调制模式

图 1-5-1 表示一个单相双极性输出的 PWM 波形,对它进行傅里叶变换,可以得到:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum (a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_1 t) \quad (1-5-1)$$

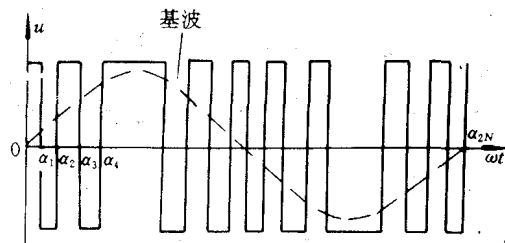


图 1-5-1 PWM 波形

$$\begin{aligned} \text{式中, } a_0 &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d(\omega t) = \frac{2E}{\pi} \left[\pi - \sum_{j=1}^N (\alpha_{2j} - \alpha_{2j-1}) \right]; \\ a_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(n\omega_1 t) d(\omega t) = \frac{2E}{n\pi} \left[1 - \sum_{j=1}^N (\sin \alpha_{2j} - \sin \alpha_{2j-1}) \right]; \\ b_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(n\omega_1 t) d(\omega t) = \frac{2E}{n\pi} \left[1 + \sum_{j=1}^N (\cos \alpha_{2j} - \cos \alpha_{2j-1}) \right]; \end{aligned}$$

$2N$ 为载波比。