

● 现代工业自动化技术应用丛书

PWM与数字化电动机 控制技术应用

孙立志 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



TN787/3

2008

现代工业自动化技术应用丛书

PWM与数字化电动机 控制技术应用

孙立志 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

电动机控制正在向一体化电动机及控制数字化的方向发展。一体化电动机, 包括无刷直流电动机及永磁同步电动机系统等, 正在成为调速及伺服应用的主流。而脉宽调制 (PWM) 技术则是控制数字化的基础。

本书的主要内容是现代电动机控制的基础及实用技术。在总结 PWM 功率开关电路技术的基础上, 讲述了几种主流电动机的控制原理及方法, 重点突出了无刷直流电动机及永磁同步电动机系统等一体化电动机的内容。

本书的写作力求内容新颖、全面、实用性强。在注重基本概念、基本原理、基本电路讲述的基础上, 力求体现电气领域内最新的理论方法及实现手段。以新型单片机 MCU 和 DSP 为控制核心, 给出了具体的 C 语言控制程序。

本书可供电气工程领域内工程技术人员阅读, 也可供相关专业的高校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

PWM 与数字化电动机控制技术应用 / 孙立志编著. —北京: 中国电力出版社, 2008

(现代工业自动化技术应用丛书)

ISBN 978-7-5083-5875-8

I. P… II. 孙… III. ①脉宽调制②电动机—控制系统
IV. TN787 TM320.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 094340 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 1 月第一版 2008 年 1 月北京第一次印刷

1000 毫米×1400 毫米 B5 开本 14.5 印张 292 千字

印数 0001—3000 册 定价 28.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

序 言



现代工业自动化技术是信息社会中的关键技术和核心技术之一。自动化技术促进了人类文明的发展。实现工业生产自动化可以提高系统性能、改善劳动条件、减轻劳动强度、大幅提高生产率、节约能源、提高产品质量和经济效益。自动化设备可以代替人完成各类高危作业。

现代工业自动化系统已呈现开放性、智能化、信息化与网络化的特点，它融合了自动化技术、信息技术、现代控制技术、网络技术、通信技术、先进制造技术及现代管理学等诸多学科的先进技术，需要各学科的专家及工程技术人员通力合作，从而实现多学科专业知识与系统集成、形成实现现代工业自动化发展的手段或模式。

为了推广现代工业自动化技术的应用，总结、发展和提高我国工业自动化技术的应用水平，培养高水平的工程技术人员，帮助工作在生产第一线的工程技术人员能够及时拓展知识结构，较全面地了解 and 掌握现代工业自动化领域中的最新技术和应用，中国电力出版社组织编写了《现代工业自动化技术应用丛书》。

一、丛书的编写宗旨

团结组织工业自动化领域的专家、学者、科技工作者、工程技术人员和团体，共谋策划与编写，促进我国工业自动化技术的繁荣和发展。

二、丛书的编写原则

1. 以技术应用为主。理论与实践密切结合，通过剖析工程实例，介绍最新技术和产品的应用，以适应工业现场的需要。可操作性强。
2. 丛书各分册均以现场应用实际或范围划分。各分册之间既相互联系又自成体系。
3. 编委会特邀请该领域有扎实理论基础并富有实践经验的专家、学者和工程技术人员来承担编写工作。

三、丛书读者对象

以工程技术人员为主要读者对象，也适宜科研人员和大中专院校师生参考。

我们相信《现代工业自动化技术应用丛书》的出版必将对我国工业自动化技术的应用起到积极作用。编写出版《现代工业自动化技术应用丛书》对于我

们是一种全新的尝试，难免存在一些问题，希望广大读者给予支持和帮助，我们的联系方式是 mo_bingying@cepp.com.cn。同时，热忱希望各行业从事工业自动化及相关技术的专家、学者、工程技术人员借此机会积极参与，将您在工作实践中获得的丰富经验总结出来，共同为提高我国工业自动化技术的应用水平作出贡献。

**《现代工业自动化技术应用丛书》
编委会**

前 言



随着电力电子技术、微处理器技术的发展以及永磁材料技术的进步，交、直流电动机调速及伺服系统正在向一体化电动机以及控制数字化的方向发展。一体化电动机的发展方向主要体现于集控制及电动机于一体的无刷直流电动机及永磁同步电动机系统正在成为交、直流电气传动系统的主流。而脉宽调制（PWM）技术以及相应的功率开关电路技术则是控制数字化的基础。具体地讲，单片机及 DSP 的性能不断提高，尤其是 DSP 中集成的硬件资源越来越多，从应用的角度更加接近于单片机。同时电力电子器件及其驱动技术更加成熟，如 IPM 模块等功率范围也越来越广。在此基础上，PWM 控制技术及电动机控制技术也日趋成熟，空间矢量 SPWM 等技术的出现及广泛应用等，一方面使得传统电气传动中的电动机控制系统性能不断提高，另一方面也使得较新型的高性能一体化电动机系统在直流及交流电气传动中的应用越来越广。

本书的主要内容是现代电动机控制的基础及实用技术，同时力求体现上述发展趋势。第 1 章内容为 PWM 技术基础，主要介绍了 PWM 技术的基本概念及实现方法，以及空间矢量脉宽调制（SVPWM）技术的基本原理及实现流程。第 2 章是关于 PWM 功率开关电路设计的内容，意图从实用的角度叙述功率开关电路设计的典型环节及实现方法。第 3 章介绍了直流电动机 PWM 控制的基本方式，并给出了基于单片机 MCU 的实现方案及 C 语言控制程序。第 4、5 章为本书的重点内容，分别从工作原理开始，讲述了方波无刷直流电动机以及正弦波的永磁同步电动机系统的驱动及控制方法。第 6 章介绍了感应电动机的基本控制方式，即 VVVF 控制以及矢量控制的基本原理及实现方法。全书力求内容新颖、全面、实用性强。在注重基本概念、基本原理、基本电路讲述的基础上，力求体现电气领域内最新的理论方法及实现手段。在几种电动机的控制内容中，以新型单片机 MCU 和 DSP 为控制核心，给出了具体的 C 语言控制程序。

全书主要由哈尔滨工业大学孙立志副教授编写。其中，第 2.1 节现代功率电子器件由哈尔滨工业大学邹继明副教授执笔，研究生王思远对本书的部分程序进行了调试及试验工作。全书由哈尔滨工业大学杨贵杰教授审阅，并提出了许多宝贵的补充及修改意见，在此表示真诚的感谢。

由于编者知识有限，加之时间仓促，书中定有不少疏漏和错误之处，恳切希望读者提出宝贵的批评和指正。

编 者

目 录

序言
前言

第1章 PWM 技术基础 1

- 1.1 电气传动系统与 PWM 技术 1
 - 1.1.1 电气传动的发展与趋势 1
 - 1.1.2 脉宽调制技术的发展概述 2
- 1.2 直流电气传动中的 PWM 技术 4
 - 1.2.1 直流 PWM 控制的基本原理 4
 - 1.2.2 直流 PWM 控制的基本电路 6
- 1.3 交流电气传动中的 SPWM 技术 9
 - 1.3.1 SPWM 的基本方法 9
 - 1.3.2 数字 SPWM 控制 13
- 1.4 空间矢量 SVPWM 技术 17
 - 1.4.1 空间矢量 SVPWM 的基本概念 17
 - 1.4.2 空间矢量 SVPWM 的实现 19
 - 1.4.3 SVPWM 算法流程 22

第2章 PWM 功率开关电路设计 23

- 2.1 现代功率电子器件 23
 - 2.1.1 功率 MOSFET 的应用特点 23
 - 2.1.2 IGBT 的应用特点 26
 - 2.1.3 智能功率模块 IPM 28
- 2.2 功率电子器件的驱动电路设计 29
 - 2.2.1 MOS 门功率器件的驱动条件 29

- 2.2.2 MOS 门功率器件的基本驱动电路 30
- 2.2.3 MOS 门功率器件的悬浮驱动 32
- 2.2.4 IGBT 的专用驱动集成电路 34
- 2.3 缓冲电路设计 36
 - 2.3.1 缓冲电路的基本概念 36
 - 2.3.2 开通缓冲电路 37
 - 2.3.3 分立式关断缓冲电路 38
 - 2.3.4 桥式关断缓冲电路 39
 - 2.3.5 缓冲电路的设计 39
- 2.4 PWM 功率电路的保护设计电路 41
 - 2.4.1 泵升电压及过电压保护电路 41
 - 2.4.2 电流检测及过电流保护 42

第3章 直流电动机的 PWM 控制 45

- 3.1 不可逆直流 PWM 控制 45
 - 3.1.1 无制动状态的不可逆 PWM 控制 45
 - 3.1.2 具有制动回路的不可逆 PWM 控制 50
- 3.2 可逆直流 PWM 系统 52
 - 3.2.1 双极性可逆 PWM 模式 52
 - 3.2.2 单极性可逆 PWM 模式 55
 - 3.2.3 单极性倍频可逆 PWM 模式 57
 - 3.2.4 受限单极性可逆 PWM 模式 58

3.2.5 受限单极性倍频可逆 PWM 模式	59	4.5 受限单极性 PWM 控制	97
3.2.6 各种可逆直流 PWM 模式的比较	59	4.5.1 下桥臂 PWM 调制方式	97
3.3 直流电动机的单片机控制	60	4.5.2 上桥臂 PWM 调制方式	104
3.3.1 PIC 系列单片机结构及原理	61	4.5.3 上、下桥臂轮流 PWM 调制方式	107
3.3.2 单片机控制的电路及程序	67	4.5.4 受限单极性倍频 PWM 模式	114
第 4 章 无刷直流电动机及其 PWM 控制	73	4.6 单极性和双极性 PWM 控制	115
4.1 无刷直流电动机的运行原理	73	4.6.1 单极性 PWM 模式	115
4.1.1 无刷直流电动机的基本原理	73	4.6.2 单极性倍频 PWM 模式	117
4.1.2 恒定转矩的产生	75	4.6.3 双极性 PWM 模式	118
4.1.3 平顶波反电动势波形的获得	76	4.6.4 其他 PWM 模式	120
4.2 无刷直流电动机的结构及设计特点	78	4.7 无位置传感无刷直流电动机	121
4.2.1 无刷直流电动机的总体结构	79	4.7.1 无位置传感的实现方法	121
4.2.2 电动机定子结构特点	81	4.7.2 反电动势过零检测的实现	123
4.2.3 永磁转子结构形式	82	4.7.3 无位置传感无刷直流电动机的起动	126
4.2.4 常用永磁材料	84	4.8 无刷直流电动机的典型集成控制电路	128
4.3 方波无刷直流电动机的转子位置传感	85	4.8.1 典型集成控制电路	128
4.3.1 霍尔效应传感器	86	4.8.2 无位置传感的集成控制电路	134
4.3.2 光电开关	87	4.9 无刷直流电动机的 DSC 控制	140
4.3.3 位置传感器的安装位置	87	4.9.1 dsPIC 数字信号控制器结构及原理	140
4.4 无刷直流电动机的换相电路实现及运行特性	88	4.9.2 无位置传感的无刷直流电动机的控制实现	145
4.4.1 换相逻辑	88	第 5 章 永磁同步电动机系统及其 SPWM 控制	157
4.4.2 双向运行的实现	92	5.1 永磁同步电动机系统的构成及设计特点	157
4.4.3 无刷直流电动机的运行特性	94		

5.1.1	永磁同步电动机系统的构成	157
5.1.2	永磁同步电动机本体设计特点	158
5.2	永磁同步电动机系统的位置传感	161
5.2.1	常用跟踪型位置传感器	161
5.2.2	一种新型的磁阻型旋转变压器	164
5.3	永磁同步电动机自同步运行的 SPWM 控制电路	169
5.3.1	位置信号变换电路	170
5.3.2	电流指令生成电路	172
5.3.3	电流环与 SPWM 电路	174
5.4	永磁同步电动机的简易驱动控制	175
5.4.1	基于开关霍尔传感器的正弦波驱动技术	175
5.4.2	基于线性霍尔传感器的正弦波驱动技术	177
5.5	永磁同步伺服电动机的矢量控制	178
5.5.1	矢量控制的原理及实现	178
5.5.2	$i_d=0$ 控制及系统模型	180
5.6	永磁同步伺服电动机的定位转矩及转矩波动	182

5.6.1	永磁同步电动机的定位转矩及抑制	182
5.6.2	永磁同步电动机的波动转矩及抑制	186
5.7	永磁同步伺服电动机的 DSP 控制	191
5.7.1	TMS320C2000 系列 DSP 结构与原理	191
5.7.2	永磁同步电动机的 DSP 控制实现	200

第 6 章 感应电动机的 SPWM 控制

6.1	感应电动机的变压变频控制	210
6.1.1	VVVF 控制的基本原理	210
6.1.2	VVVF 控制的方式	210
6.1.3	VVVF 控制的实现	214
6.2	感应电动机的矢量控制	216
6.2.1	矢量控制的坐标变换	216
6.2.2	矢量控制的基本原理	217
6.2.3	转子磁链的观测	219
6.2.4	矢量控制系统的构成及实现	219

参考文献	221
------------	-----

第1章 PWM 技术基础

1.1 电气传动系统与 PWM 技术

1.1.1 电气传动的发展与趋势

随着电力电子技术、微处理器技术的发展以及材料技术尤其是永磁材料技术的进步,电气传动系统,包括交、直流电动机调速及伺服系统,正在向系统高性能、控制数字化、一体化机电的方向发展。

直流传动系统控制简单、调速特性好,一直是调速传动领域中的重要组成部分。现代的直流传动系统的发展方向是电动机主极永磁化及换向无刷化,而无刷直流电动机正是在这样的趋势下所发展起来的机电一体化电动机系统。一般意义上的无刷直流电动机(Brushless DC Motor, BLDCM)是指方波无刷直流电动机,其特征是只需简单的开关位置信号即可通过逆变桥驱动永磁电动机工作。1975年无刷直流电动机首次出现在NASA报告中。之后,由于高性能、低成本的第三代永磁材料的出现,以及大功率、全控型功率器件的出现,使无刷直流电动机系统获得了迅速的发展。1977年,出现了采用钕钴永磁材料的无刷直流电动机。之后不久,无刷直流电动机系统开始广泛采用高磁能积、高矫顽力、低成本的第三代NdFeB永磁材料,且采用霍尔元件作位置传感器,采用三相全桥驱动方式,以提高输出转矩,使其更加实用。1986年,H. R. Bolton对方波无刷直流电动机系统进行了全面的总结,这标志着方波无刷直流电动机系统在理论上、驱动控制方法上已基本成熟。近年来,虽然永磁直流电动机也随着永磁材料技术的发展而得到了性能的提高,依然在直流传动系统中被广泛应用,但直流传动系统已经处于无刷直流电动机大规模普及与应用的阶段。

现代交流传动系统已经由感应电动机为主发展为多机种,尤其是以永磁同步电动机的发展最为显著。

一方面,由感应电机构成的交流调速系统性能依然不断提高,变压变频(VVVF)技术及矢量控制技术完全成熟。通过模仿直流电动机中转矩控制的思路,采用坐标变换,把交流感应电动机的定子电流分解成励磁分量和转矩分量,并通过对磁通和转矩的独立控制,使感应电动机获得类似直流电动机的控制特性。近年来

又陆续提出了直接转矩控制、解耦控制等方法,从而使交流调速控制有了突破性的发展,并出现了一系列用于交流调速系统的高性价比的通用变频器。

另一方面,永磁同步电动机调速及高性能伺服技术发展迅速,应用功率范围不断扩大。永磁同步电动机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM),又被称为正弦波无刷直流电动机系统,实际上为带有位置传感器的、由逆变器驱动的永磁同步电动机系统。其反电势波形为正弦波,相应的绕组电流也为正弦波。关于永磁同步电动机的研究主要集中于电动机的新型结构形式、气隙磁场的设计、计算和绕组电流的控制。其中,绕组电流的控制为大部分文献研究的焦点。1982年,G. P. Fatt从理论上指出了两种有效获得正弦绕组电流的方法,即静止坐标系下的电流控制方法,它包括电流调节型SPWM控制方法(CRPWM)和电流滞环控制方法,指出了其应用范围,并加以实验验证。至今,这两种方法在永磁同步电动机系统中得到了最广泛的应用。1987年,P. Pillay对方波无刷直流电动机和正弦波无刷直流电动机系统进行了全面的对比,在总结正弦波无刷直流电动机各种研究成果的基础上,提出了基于旋转坐标系下的正弦波无刷直流电动机系统绕组电流控制方法: i_d 、 i_q 法。此后的研究虽然在控制手段上不断改进,但控制方法没有本质的突破。一般实现电流控制的手段有模拟方法、模拟数字混合方法、全数字方法等,并在逐步向全数字控制方向发展。

感应电动机和永磁同步电动机系统相比较,无论是在效率、功率密度等各方面,永磁同步电动机系统均具有相当优势。因此,交流永磁同步电动机在交流传动系统中的应用范围会继续扩大。

综上所述,高性能直流传动系统在向方波无刷直流电动机为主的方向发展,而方波无刷直流电动机在向电流正弦化的方向发展;同时,高性能交流传动系统在向交流永磁同步电动机系统为主的方向发展,而永磁同步电动机系统也在向无位置检测或位置检测简易化的方向发展。由于二者的电动机本体均为永磁同步电动机,且系统结构大致相同,因此交、直流之分越来越模糊,二者的发展方向相同,概念趋向一致。在电动机理论和其他相关技术发展的推动下,“无刷直流电动机”的概念已由最初特指具有电子换向的直流电动机发展到泛指一切具备有刷直流电动机外部特征的由驱动器驱动的永磁同步电动机。无刷直流电动机或永磁同步电动机的发展亦促使电动机理论与电力电子技术、微电子技术、计算机技术、现代控制理论及高性能材料的紧密结合。如今,无刷直流电动机或永磁同步电动机系统集特种电动机、变流机构、检测元件、控制软件和硬件于一体,形成新一代的一体化电动机系统,体现着当今应用科学的最新成果,是机电一体化的高技术产物。

1.1.2 脉宽调制技术的发展概述

随着全控型功率电子器件的发展,脉冲调宽(PWM)技术与开关功率电路成为主流技术,在功率应用中基本取代了线性功率放大电路,以减小功率器件导通损

耗,提高驱动效率。在 PWM 技术中,功率器件工作在开关饱和和导通状态,通过改变功率器件的驱动脉冲信号的开通与关断的时间,来改变加在负载两端的平均电压的大小。当负载为直流电动机时,也就实现了电动机的调压调速控制,这也就是 PWM 控制的基本原理。

改变脉冲信号的开通、关断时间有两种基本方式。一种方式是将脉冲信号的开关频率及周期 T 固定,通过改变导通脉冲的宽度来改变负载的平均电压,这就是脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, PWM)。另一种方式是将脉冲信号的导通宽度固定,通过改变开关频率及周期 T 来改变负载的平均电压,这就是脉冲频率调制 (Pulse Frequency Modulation, PFM)。

由于 PFM 控制是通过改变脉冲频率来实现平均电压的调节的,频率变化范围较大。在频率较低时,往往人耳所感觉到的电磁噪声较高;而在频率较高时,会导致功率器件开关损耗的增加,而且还存在功率器件关断速度的限制。最严重的情况是,在某些特殊频率下系统有可能产生机械谐振,就会导致系统产生振荡和出现音频啸叫声。而在 PWM 控制中,由于脉冲频率固定,通过频率选择不但可以克服上述问题,而且有利于消除系统中由于功率器件开关所导致的固定频率的电磁干扰。因此在电气传动领域内 PWM 控制技术成为应用的主流。

在交流电气传动中,脉宽调制技术用于产生单相或三相交流电即实现逆变,控制信号变为幅值和频率均可变化的周期信号。在各种形式的周期控制信号中,正弦波控制信号应用最为普遍,因此一般统称为正弦波脉宽调制 (Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM)。传统的 SPWM 技术多采用模拟技术来实现,即脉宽调制信号的获得是通过三角波与所希望的调制函数直接比较而获得。随着高性能的交流伺服驱动系统的全数字控制的发展,要求用数字方法来实现脉宽调制。纵观现有的文献,数字脉宽调制方法多采用规则采样技术,通过三角载波与所希望的调制函数的比较获得数学方程式, PWM 信号则是通过对规则采样技术获得的数学方程式的计算获得的。这种数字脉宽调制方法是对模拟自然采样的三角波—正弦波 (SPWM) 方法的近似。虽然还存在一些 SPWM 优化算法,诸如谐波型 SPWM 技术以及准最优 SPWM 技术等,但算法复杂,计算时间增加,应用较少。

而近年来出现的空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 技术,相应的数字计算方法形成的脉宽调制信号与传统的 SPWM 信号相比,具有更多优点。因此空间矢量脉宽调制技术在交流电动机驱动系统中得到了广泛的应用。

1.2 直流电气传动中的 PWM 技术

1.2.1 直流 PWM 控制的基本原理

直流 PWM 调速控制电路如图 1-1a 所示, 可控开关 S1 以固定的周期重复地接通和断开。当开关 S1 接通时, 供电电源 U 通过开关 S1 施加到直流电动机两端, 电动机在电源作用下旋转, 同时电动机电枢电感储存能量; 当开关 S1 断开时, 供电电源停止向电动机提供能量, 但此时电枢电感所储存的能量将通过续流二极管 VD1 使电动机电枢电流继续维持, 电枢电流仍然产生电磁转矩使得电动机继续旋转。开关 S1 重复动作时, 在电动机电枢两端就形成了一系列的电压脉冲波形, 如图 1-1b 所示。

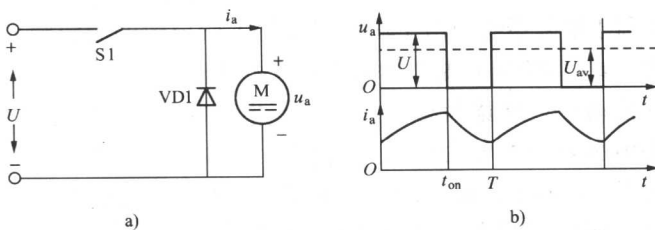


图 1-1 直流 PWM 调速控制示意图

a) 控制电路 b) 电压及电流波形

1. 平均电压与占空比

在 PWM 控制中, 电枢电压平均值 U_{av} 由电源电压、脉冲周期 T 以及开关 S1 在每个周期内所导通的时间 t_{on} 决定, 可以用式 (1-1) 表示

$$U_{av} = U \frac{t_{on}}{T} = \alpha U \quad (1-1)$$

式中: α 为占空比, 也就是导通时间与脉冲周期之比, $\alpha = t_{on}/T$ 。式 (1-1) 表明, 平均电压由脉冲占空比及电源电压所决定, 与占空比成正比。改变占空比能够相应地改变平均电压, 也就实现了直流电动机的调压调速。

2. PWM 信号的产生

改变脉冲占空比可以实现电动机转速的调节, 但首先需要将控制转速的指令信号转换为具有相应占空比的脉冲信号。PWM 信号产生的基本方法是, 将控制指令信号与固定频率的三角波或锯齿波载波信号进行比较, 从而产生占空比正比于控制指令电压的脉冲信号。

因此, PWM 信号产生电路主要由恒频波形发生器以及脉冲宽度调制电路组成。恒频波形发生器的作用是产生恒定频率的振荡波形作为载波, 提供时间比较的基准, 该波形可以是三角波, 也可以是锯齿波。脉冲宽度调制电路实际上就是电压/脉宽转换电路, 一般由电压比较器 (或具有正反馈的高增益运算放大器) 构成。

在比较器两个输入端分别施加载波信号和控制指令信号, 比较器输出将按下述规律变化: ① 当控制指令信号电压大于或等于三角波电压时, 输出信号为比较器电源正电压 U_{cc} ; ② 当控制指令信号电压小于三角波电压时, 输出信号为电源地信号 $0V$ 或比较器电源负电压 $-U_{cc}$ 。

图 1-2 是一个典型的 PWM 信号产生电路结构示意图。函数发生器产生固定频率为 f 的三角波或锯齿波, 与控制指令信号 U_i 在比较器中比较后, 即产生宽度变化正比于控制指令信号的调制开关信号。

3. 单极性 PWM 与双极性 PWM 信号

根据载波信号及输出信号极性的不同, PWM 信号可以分为单极性 PWM 信号与双极性 PWM 信号两种。

单极性 PWM 电路中, 载波信号为偏置的三角波或锯齿波, 电压变化从电源地信号 $0V$ 到载波信号最大值 U_{cm} , 即 $0V \sim U_{cm}$ 。同时 PWM 脉冲信号的变化范围为 $0V \sim U_{cc}$, 波形如图 1-3a 所示。

双极性 PWM 电路中, 载波信号一般为正、负半周对称的三角波, 电压变化从控制信号最大值 U_{cm} 到负最大值 $-U_{cm}$, 即 $-U_{cm} \sim U_{cm}$ 。同时 PWM 脉冲信号的变化范围为 $-U_{cc} \sim U_{cc}$, 波形如图 1-3b 所示。

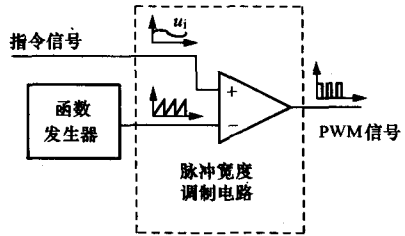


图 1-2 PWM 信号产生电路结构示意图

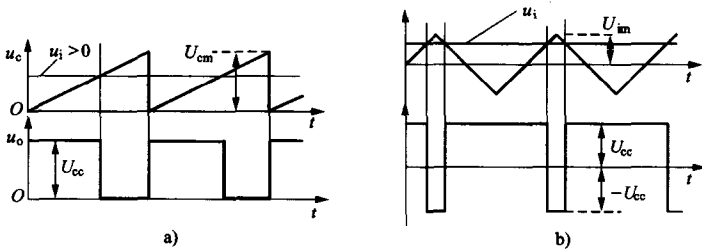


图 1-3 PWM 信号波形示意图

a) 单极性 PWM b) 双极性 PWM

单极性 PWM 与双极性 PWM 信号的主要差别在于: 当控制指令信号 $u_i = 0$ 时, 单极性 PWM 信号占空比 $\alpha = 0$, 而双极性 PWM 信号占空比 $\alpha = 50\%$ 。

4. 信号系数

PWM 控制中, 除占空比 α 之外, 另一个重要参数是信号系数 (调制比), 定义为控制信号 U_i 与载波信号最大值 U_{cm} 之比, 一般用符号 ρ 表示, 即

$$\rho = U_i / U_{cm} \quad (1-2)$$

在单极性 PWM 与双极性 PWM 中, 信号系数的取值不同。单极性 PWM 中, 控制指令信号在 $0V$ 到载波信号最大值 U_{cm} 之间变化, 信号系数的取值范围为 $0 \sim 1$; 而在双极性 PWM 中, 控制指令信号在最大值 U_{cm} 到负最大值 $-U_{cm}$ 之间变化, 信号系数的取值范围为 $-1 \sim 1$ 。

信号系数与占空比 α 和信号系数 ρ 之间的关系也与 PWM 的极性有关。对于单极性 PWM 信号, 占空比与信号系数相等, 即 $\alpha = \rho$; 而对于双极性 PWM 信号, 信号系数的取值范围为 $-1 \sim 1$, 而占空比的取值范围为 $0 \sim 1$, 占空比与信号系数的关系变为 $\rho = 2\alpha - 1$ 。

1.2.2 直流 PWM 控制的基本电路

根据上面所述, 直流 PWM 的基本电路主要由恒频波形发生器以及脉冲宽度调制电路组成。脉冲宽度调制电路可以采用比较器或运算放大器构成, 因此实现 PWM 信号的主要电路是产生稳定恒频载波信号的波形发生器电路。下面介绍直流 PWM 的具体电路形式。

1. 基本三角波调制电路

由三角波发生器和电压比较器组成的 PWM 调制电路如图 1-4a 所示。图中所示三角波发生器主要由两个运算放大器构成, 运算放大器 A1 为迟滞比较器, 运算放大器 A2 为反向积分器, 它们共同组成正反馈电路, 形成自激振荡。A1 的输出信号为对称方波, A2 的输出信号经积分后变为三角波。比较器 A3 构成 PWM 脉冲生成器。

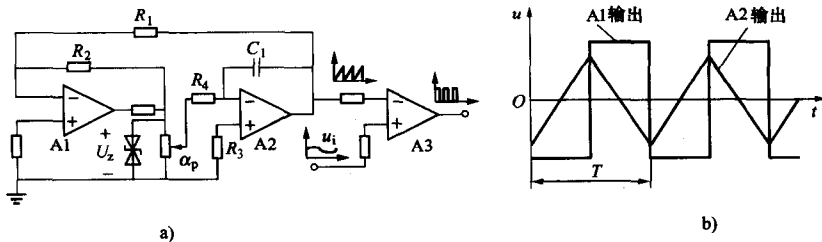


图 1-4 基本三角波调制电路

a) 基本电路 b) 波形示意图

具体地讲, 比较器 A1 输出方波波形, 其正负幅值由稳压管稳定在电压 U_z 。该波形经电位器分压后加到积分器的输入端, 电位器的分压系数为 α_p , 即加到积分

器 A2 反相输入端的电压为 $\alpha_p U_z$ ，积分器将对该输入电压进行积分，并经电阻 R_1 引入比较器 A1 同相输入端。当比较器输出电压为低电平时，积分器输出电压为一线性增长的电压。当输出电压达到某一幅值时，比较器翻转，输出高电平信号。此时积分器将反向积分，输出一个线性下降的电压。当输出电压下降到反向幅值时，比较器又输出低电平。上述过程周而复始，便形成自激振荡，其波形如图 1-4b 所示。

根据上述电路分析，可以确定三角波及方波的振荡频率为

$$f = \frac{1}{T} = \frac{R_2 \alpha_p}{4R_1 R_4 C_1} \quad (1-3)$$

根据上式进行频率调整时，需注意以下几点：

- (1) 改变稳压管的稳压值，即可改变输出方波的幅值，同时也影响三角波的幅值；
- (2) 改变 R_1 与 R_2 之间的比值，可以改变上下门限电压，从而可改变三角波的幅值。但其比值不影响方波幅值而影响振荡频率；
- (3) 改变电位器的分压系数 α_p 和积分电路的 R_4 、 C_1 ，可单独改变振荡频率而不影响幅值。

此振荡器电路可以输出线性度良好的三角波电压，采用通用型运算放大器即可获得 1~20kHz 的振荡频率，频率调整简便，在工程中应用普遍。

2. 基本锯齿波调制电路

由锯齿波发生器和电压比较器组成的 PWM 调制电路如图 1-5a 所示。图中所示的锯齿波发生器与上述三角波发生器相似，主要核心电路也是两个运算放大器。

该电路的工作原理与图 1-4a 相同。对比图 1-4a 所示电路，其不同之处在于积分器的输入回路中，增加了由二极管 VD1 与电阻 R_5 组成的支路。该支路的作用在于积分时间的调解。在比较器输出电压为低电平时，二极管截止，积分时间常数为 $R_4 C_1$ 。若将二极管反接，则积分时间常数为 $(R_4 // R_5) C_1$ 。这样两个运放的输出就变成了矩形脉冲和锯齿波，波形如图 1-5b 所示。

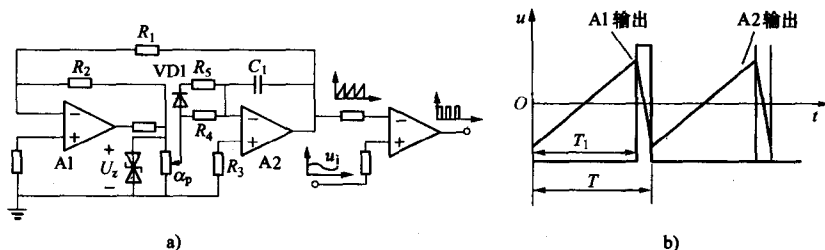


图 1-5 基本锯齿波调制电路

a) 基本电路 b) 波形示意图

根据上述电路分析可知,锯齿波的振荡频率可以通过分别计算两段积分时间来确定,即

$$T_1 = \frac{4R_1R_4C_1}{R_2\alpha_p} \quad (1-4)$$

$$T - T_1 = T_2 = \frac{4R_1R_4R_5C_1}{R_2\alpha_p(R_4 + R_5)} \quad (1-5)$$

因此,锯齿波的振荡频率为

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\alpha_p R_2 (R_4 + R_5)}{2R_1R_4C_1(R_4 + 2R_5)} \quad (1-6)$$

而锯齿波波形的控制,可以通过控制比较器输出的矩形波占空比 α_p 来完成,即

$$\alpha_p = \frac{T - T_1}{T} = \frac{R_5}{R_4 + 2R_5} \quad (1-7)$$

3. 专用集成电路的应用

除由运算放大器构成 PWM 控制电路之外,还可以采用一些专用集成电路,包括专用函数发生器集成电路,以及一些专用脉宽调制控制电路等。

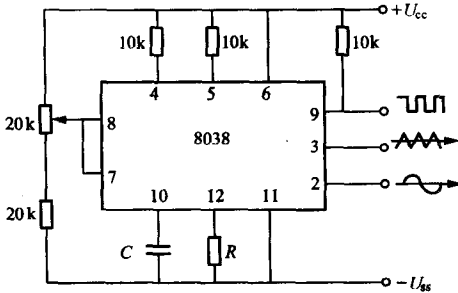


图 1-6 函数发生器 8038 典型应用电路

专用函数发生器的典型集成电路有 8038 (5G8083) 等。8038 是低成本函数发生器,可产生方波、三角波和正弦波。一般采用正负双电源,但在用作发生方波时,也可以使用单电源,即将 V_{ss} 引脚接地(11脚)。8038 内部有 2 个窗口比较器,1 个 RS 触发器,正弦波变换电阻网络以及输出缓冲电路,它的工作频率可以覆盖 0 ~ 200kHz。图 1-6 所示是该集成电路的典型应用电路。

除专用函数发生器之外,还可以采用一些专用脉宽调制控制集成电路,包括开关电源专用脉宽调制器以及直流电动机专用 PWM 控制电路。这些专用集成电路大多采用内置振荡器,外接阻容网络来设定载波频率。同时不但包括脉宽比较器电路,而且往往还具有丰富的资源用于电动机的控制,如误差电压放大器电路,可以用于构成直流电动机的电流、速度或位置调节器,以及功率放大器接口电路等。这样可以应用一片集成电路就可以构成直流电动机的控制器。

单极性调制控制专用集成电路很多。比较常用的开关电源专用脉宽调制器电路有 TL494、SG3524、TL495、MB3759、TL497 等,以及直流电动机专用 PWM 控制电路包括 SG1731/2731/3731、MC33030、UC3637、L292 等电路,均可以用于直流