

引用格式:张洁,何文涛,冯华星. 基于直流无刷电机的 PWM 电路设计 [J]. 微电子学与计算机,2021,38(3):84-88. [ZHANG J, HE W T, FENG H X. The design of PWM circuit based on DC brushless motor [J]. Microelectronics & Computer, 2021, 38 (3):84-88.]

基于直流无刷电机的 PWM 电路设计

张 洁^{1,2}, 何文涛^{1,3}, 冯华星^{1,3}

(1 中国科学院微电子研究所, 北京 121002; 2 中国科学院大学, 北京 100864;

3 杭州中科微电子有限公司, 浙江 杭州 310053)

摘 要: 针对直流无刷电机驱动系统存在的模拟 PWM 技术控制难、PWM 芯片少以及 PWM 死区时间精度低等问题, 本文采用 Verilog 语言设计了一款纯数字电路实现的 PWM 波形生成器. 文中简要介绍了 PWM 在直流无刷电机系统的控制原理、电机转子位置和电机相导通的关系及 PWM 调制方式, 重点描述了采用纯数字方法实现 PWM 波形发生器的设计流程. 通过增加时钟除频模块, 死区计数时钟频率可提高到 PWM 计数器的 16 倍; 两通道 PWM 共用一个死区计数器, 节省了设计资源. 设计的 PWM 波形生成器可通过 SPI 接口进行参数配置, 实现可编程、方便控制等优点.

关键词: PWM; 死区; 直流无刷电机; PWM 调制方式; 霍尔传感器

中图分类号: TM921; TN431. 2

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2021)03—0084—05

The design of PWM circuit based on DC brushless motor

ZHANG Jie^{1,2}, HE Wen-tao^{1,3}, FENG Hua-xing^{1,3}

(1 Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 121002, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China;

3 Hangzhou Zhongke Microelectronics Co., Ltd, Hangzhou 310053, China)

Abstract: In view of the problems in the brushless DC motor drive system, such as the difficulty of analog PWM technology control, the lack of PWM chips and the low precision of PWM dead time, this paper designs a pure digital PWM waveform generator using Verilog language. This paper briefly introduces the control principle of PWM in brushless DC motor system, the relationship between motor rotor position and motor phase conduction and the PWM modulation mode, and emphatically describes the design process of PWM waveform generator using pure digital method. By adding a clock divider module, the clock frequency of dead-time counter can be increased to 16 times that of PWM counter. Two channels of PWM share a dead-time counter, saving design resources. The designed PWM waveform generator can be configured through SPI interface to realize the advantages of programmable, convenient control and so on.

Key words: PWM; dead zone; BLDCM; PWM modulation mod; Hall sensor

1 引言

随着电力电子技术的不断提高, PWM(脉冲宽度调制技术)技术得到了飞速的发展, 纯数字法实现 PWM 电路成为当下的研究热点^[1]. 但是目前在集

成电路领域中, 大多数的 PWM 都和 MCU 集成一体化, 这就使得控制 PWM 电路变得复杂化, 而且集成芯片的 PWM 精度不能随意控制^[2]. 为简化 PWM 电路在电机驱动系统的控制, 提高 PWM 精度及死区精度, 同时节省微处理器内部资源, 节省成

本,本文设计一款采用纯数字法实现的 PWM 发生器,死区时间不同于传统的死区时间设计,死区计数器时钟和 PWM 计数时钟相互独立,采用高频时钟对死区进行计数,且互补 PWM 共用一个死区计数器,简化了死区控制部分.同时该电路产生的 PWM 脉冲的周期占空比可调,集成多种 PWM 调制方式,极大地简化了控制电机转速及转向的控制步骤.

2 PWM 控制 BLDCM 工作原理

2.1 带霍尔传感器 BLDCM 工作原理

霍尔传感器根据霍尔磁场效应制作而成,正向磁场输出 1,反向输出 0.霍尔传感器在直流无刷电机中每隔 120°安装一个,根据霍尔信号可推断出电机转子所在扇区,具体对应关系如图 1 所示.

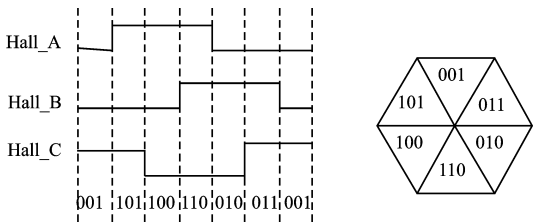


图 1 电机位置对应霍尔值

以方波驱动的直流无刷电机为例,霍尔信号改变对应电机换相操作,其正转逻辑如表 1 所示,反转时导通相上下臂相反(不同电机对应起始时刻不同).比如在检测到霍尔信号为 101 时,控制驱动管 A-和 B+导通,其他驱动管关断,两个导通相产生磁场力矩控制电机转子顺时针转动.

表 1 BLDCM 电机正传控制逻辑

霍尔	A+	A-	B+	B-	C+	C-
101	关断	导通	导通	关断	关断	关断
001	关断	导通	关断	关断	导通	关断
011	关断	关断	关断	导通	导通	关断
010	导通	关断	关断	导通	关断	关断
110	导通	关断	关断	关断	关断	导通
100	关断	关断	导通	关断	关断	导通

2.2 无位置传感 BLDCM 工作原理

无位置传感器的 BLDCM 和带霍尔传感器控制原理类似,都要对电机转子所在扇区进行判断.无位置传感 BLDCM 通过反电动势过零检测确定电机位置区间控制换相,电机的反电动势和电流之间的关系如图 2 所示^[4].电机的换相操作发生在关断相的反电动势过零点延迟 30°时刻^[5],具体换相逻辑和带霍尔位置传感器的电机一样.

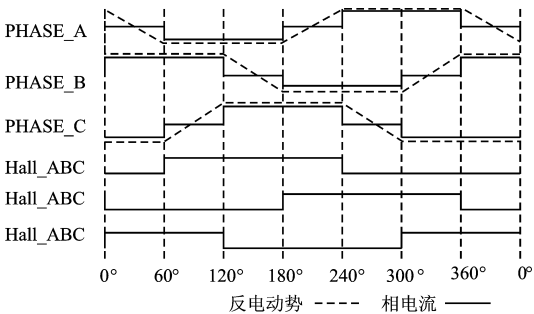


图 2 反电动势与霍尔信号关系图

2.3 PWM 调制原理

控制 PWM 占空比可达到控制电机转速的效果,PWM 占空比越大,加在电机驱动上的电压越大,电机就转速更快,反之亦然.从上述分析可知每个霍尔状态对应两个导通相,导通相通过不同的 PWM 调制可达到不同的控速和消除转矩效应的效果,常用的 PWM 调制方式有 5 种^[6],如图 3 所示.

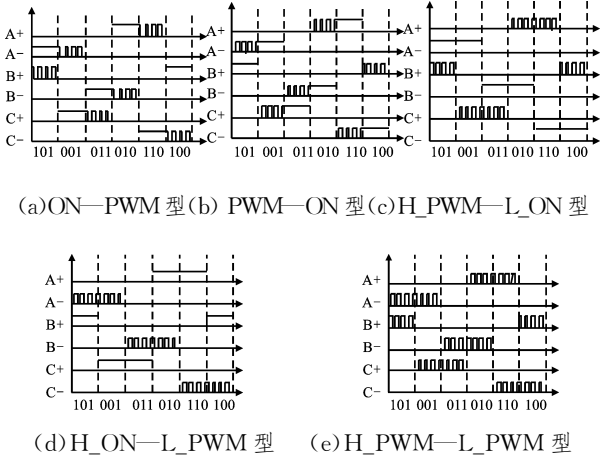


图 3 5 种 PWM 调制方式

3 电路设计

图 4 是针对直流无刷电机控制系统设计的整体电路结构框图,包括 SPI 读写模块、PWM 波形发生器和霍尔信号处理模块. SPI 读写模块主要负责处理 PWM 波形发生器的控制信号;PWM 波形发生器主要包括时钟处理模块、计数比较模块、死区模块、极性屏蔽模块;霍尔处理模块主要处理霍尔信号,将位置信号转换为换相信息,控制电机驱动电路的导通相,该模块支持 5 种 PWM 调制方式.

3.1 SPI 读写控制

SPI 模块控制写入(读取)寄存器数据,该模块将接收的串行数据转换为主机发送的并行数据,包括地址和数据两部分.其中地址负责译码发送读写指令及寄存器地址信息,数据部分为写入(读取)具

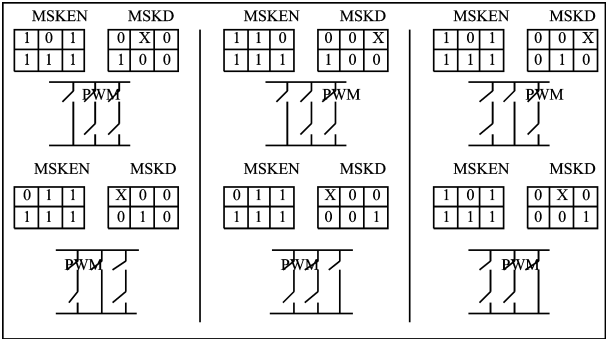
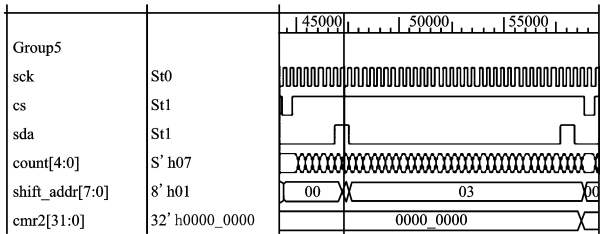


图 7 PWM-ON 调制屏蔽工作示意图

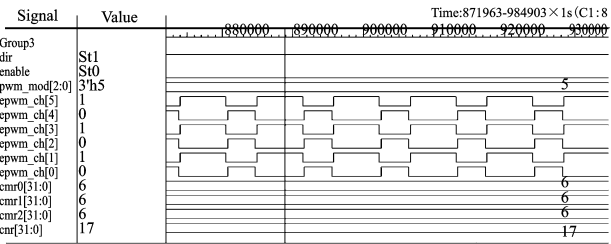
4 实验结果分析

本文设计完成电路经过 VCS 仿真及实验平台验证. VCS 验证功能如下,图 8 分别验证了 SPI 读写控制模块、PWM 脉冲发生器模块及 PWM 换相调制模块.

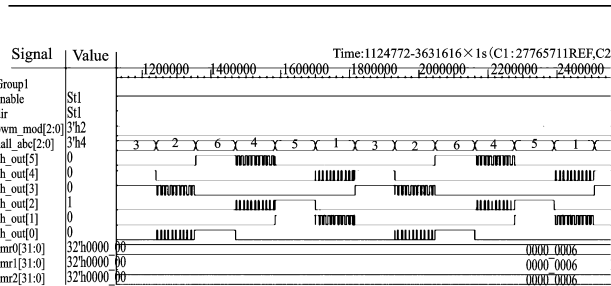
实验采用基于 STM32F407 为核心搭建的无刷直流电机实验控制平台,实验采用额定电压 24 V,转速 3000 r/min,极对数 4,定子绕组电阻 0.6 Ω,



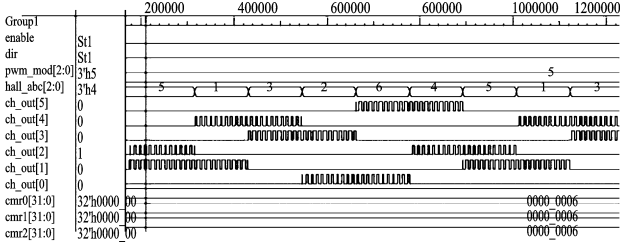
(a) SPI 写寄存器



(b) 占空比为 35.2%的带死区 PWM 波形输出



(c) 有感模式下的 ON_PWM 调制方式



(d) 有感模式下的 H_PWM_L_PWM 调试方式

图 8 VCS 仿真结果

绕组电感 0.75 mH 的永磁无刷直流电机. 实验平台示意图如图 9 所示,主要包括控制电路(MCU 和 FPGA 电路)、驱动电路、实验电机、示波器等,MCU 控制 FPGA 生成特定占空比的 PWM,进而控制驱动电路驱动电机工作.

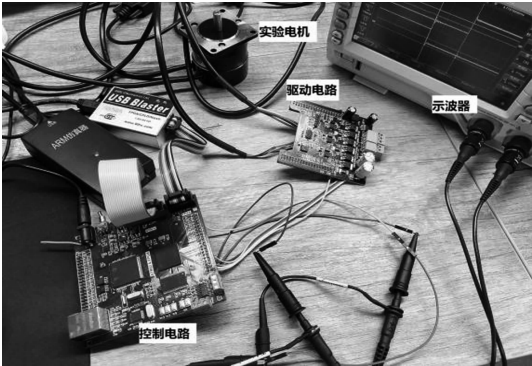


图 9 实验平台图

该实验验证平台提供时钟频率为 100 MHz,设置时钟分频得到死区计数时钟 10 MHz,死区时间设置为 600 ns,分别在 PWM 占空比为 10%、30% 时,对死区时间进行测量. 实验结果如图 10 所示,实验结果显示在 PWM 占空比为 10%、30% 时,互补对的死区时间均为 600 ns,PWM 输出功能正确,同时该实验对 PWM 的调制方式进行了验证,实验结果表明该电路可应用于电机驱动系统中,具有实际可行性.

5 结束语

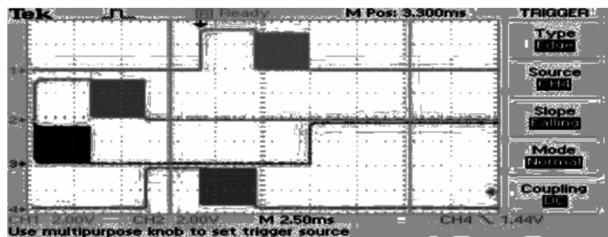
实验结果表明本文设计电路具有实际可行性,可用于电机驱动控制系统中. 本文设计产生的 PWM 具有可编程性,可根据需要自由扩展输出 PWM 数量,配置 PWM 生成电路的死区时间、周期占空比、极性、屏蔽及 PWM 调制方式等,具有控制灵活、使用方便等特性;该电路死区计数和 PWM 计数时钟分开,增加时钟除频模块,保证死区计数时钟频率高于 PWM 计数时钟频率,有效避免了因为死区计数间隔大导致的死区精度低的问题,同时该电



(a) 占空比为 10% 时死区时间测量图



(b) 占空比为 30% 时死区时间测量图



(c) ON-PWM 调制方式测量图

图 10 实验平台的测试结果

路设计采用两路 PWM 共用一个死区计数器,简化了设计步骤;该电路既可通过外部任意处理器 SPI 接口访问和配置该模块,同时内部集成的 5 种 PWM 调制方式简化了 PWM 控制部分.理论上该模块除了用在电机驱动系统中,也可配置成生成独立无关的 PWM 用于控制呼吸灯等简易操作系统.

参考文献:

- [1] 陈坤,周兴,文武. 基于改进数字 PWM 逆变器控制器设计[J]. 船电技术, 2018, 38(3): 42-46.
CHEN K, ZHOU X, WEN W. Design of inverter controller based on improved digital PWM[J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2018, 38(3): 42-46.
- [2] 张惠国,钱斌,潘启勇,等. 直流无刷电机控制实验系统设计与实现[J]. 实验技术与管理, 2016, 33(10): 76-80. DOI: 10.16791/j.cnki.sjg.2016.10.020.
ZHANG H G, QIAN B, PAN Q Y, et al. Design and realization of experimental system for controlling brushless direct current motor[J]. Experimental Technology and Management, 2016, 33(10): 76-80. DOI: 10.16791/j.cnki.sjg.2016.10.020.
- [3] 赵栓. 基于 PWM 波的小型永磁发电机调速电路设计与实现[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
ZHAO S. Design and implementation of speed control

circuit for small permanent magnet generator based on PWM wave[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.

- [4] PHAM N T, VAN NGUYEN N. Novel carrier based PWM techniques reduce common mode voltage for six phase induction motor drives[J]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2019, 10(5): 287-299. DOI: 10.14569/IJACSA.2019.0100537.
- [5] SHI J, LI S H. Analysis and compensation control of dead-time effect on space vector PWM[J]. Journal of Power Electronics, 2015, 15(2): 431-442. DOI: 10.6113/jpe.2015.15.2.431.
- [6] 周美兰,高肇明,吴晓刚,等. 五种 PWM 方式对直流无刷电机系统换相转矩脉动的影响[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(7): 15-21. DOI: 10.3969/j.issn.1007-449X.2013.07.003.
ZHOU M L, GAO Z M, WU X G, et al. Influence of five kinds of PWM on commutation torque ripples in BLDCM control system[J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(7): 15-21. DOI: 10.3969/j.issn.1007-449X.2013.07.003.
- [7] 翁崇杰,熊晓明,马德. 一种可支持硬件触发机制的灵活可配 PWM IP 核的设计与实现[J]. 微电子学与计算机, 2016, 33(7): 154-158. DOI: 10.19304/j.cnki.issn 1000-7180, 2016.07.034.
WENG C J, XIONG X M, MA D. Design and implementation of a configurable PWM IP Core with hardware trigger mechanism[J]. Microelectronics & Computer, 2016, 33(7): 154-158. DOI: 10.19304/j.cnki.issn 1000-7180, 2016.07.034.
- [8] 谢斌,姚莉,陈远金,等. H 桥直流无刷电机 PWM 控制器设计[J]. 集成电路通讯, 2014, 32(2): 5-10.
XIE B, YAO L, CHEN Y J, et al. Design of H-bridge brushless DC motor PWM controller[J]. Integrated Circuit Communication, 2014, 32(2): 5-10.
- [9] 汪宁. 基于 FPGA 的 PWM 发生器的研究与设计[D]. 济南: 山东大学, 2008.
WANG N. Research and design of PWM generator based on FPGA[D]. Jinan: Shandong University, 2008.

作者简介:

张洁女, (1995-), 硕士研究生. 研究方向为数字集成电路设计. E-mail: zhangjie@casic.ac.cn.

何文涛男, (1982-), 博士. 研究方向为卫星导航接收机信号处理算法、超大规模集成电路设计.

冯华星男, (1981-), 硕士. 研究方向为数字集成电路设计.