

基于 GaN 器件的高速直流无刷电机驱动器

史炳伟¹, 谢门喜²

(1. 苏州大学 电子信息学院, 江苏 苏州 215006;

2. 苏州大学 智能结构与系统研究所, 江苏 苏州 215006)

摘要: 传统直流无刷电机(BLDCM)驱动器以硅晶体管作为功率器件,工作频率低、开关损耗大,不适用于高速应用场合。宽禁带半导体氮化镓(GaN)晶体管,具有开关速度快、导通电阻小等优势,是高速驱动器的理想选择之一。基于 GaN 器件,设计了一款 20 000 r/min 转速的高速 BLDCM 驱动器。首先介绍了 BLDCM 驱动的工作原理,然后分析了 GaN 器件晶体管栅极驱动电阻值的计算过程,选取 Si8273 作为 GaN 晶体管 GS61008P 的驱动芯片,利用霍尔信号配合数字控制器软件得到换相脉冲,以完成高速驱动器的软硬件设计。实验结果表明,GaN 方案显著减小了驱动器体积,提高了响应速度。

关键词: 直流无刷电机; 高速电机; 驱动器; 宽禁带半导体; 氮化镓

中图分类号: TM 355 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)01-0066-05

doi: 10.12177/emca.2019.126

High-Speed Brushless DC Motor Driver Based on GaN Devices

SHI Bingwei¹, XIE Menxi²

(1. School of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China;

2. Institute of Intelligent Structure and Systems, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: Traditional brushless DC motor (BLDCM) drivers which utilize silicon devices, due to the low working frequency and high switch loss, cannot fulfill high-speed applications. Wide-band-gap GaN devices with low turn-on resistance and high switch frequency are the optimum choice for high-speed drivers. A BLDCM driver based on GaN devices is designed. The motor rotation speed of 20 000 r/min is achieved. The BLDCM driver theory is introduced. The GaN devices' gate-drive resistance is calculated. Choosing gate-drive chip Si8273 to drive GS61008P and using Hall signal to obtain commutation time, the design of high-speed driver is completed. Experiment results show that GaN devices improve the controller's response significantly and the size of the controller is also comparatively smaller.

Key words: brushless DC motor (BLDCM); high-speed motor; driver; wide-band-gap semiconductor; GaN

0 引言

高速直流无刷电机(HSBLDCM)具有功率密度大、响应速度快、维护成本低等优势,广泛应用于鼓风机、压缩机等工业领域^[1-2]。HSBLDCM 每分钟转速可达数万转,而传统的硅(Si)基 MOSFET 无论是工作频率、封装尺寸还是耐压、耐

温等性能均显不足^[3],制约了 HSBLDCM 驱动器性能的进一步提高。宽禁带半导体器件氮化镓高电子迁移率晶体管(GaN HEMT)具有开关速度快、开关损耗低等优势^[3],在各个应用场合开始替代 Si 器件,且与同为第三代半导体器件的 SiC 相比,价格优势更明显^[4]。

GaN 器件的高速开关特性,可有效减小驱动

收稿日期: 2019-10-11; 收到修改稿日期: 2019-10-30

作者简介: 史炳伟(1991—),男,硕士研究生,研究方向为电机控制。

谢门喜(1984—),男,博士,研究方向为电力电子技术。

器被动元器件尺寸,但会引起较大的电压变化 (dv/dt),使其对高频寄生参数更为敏感^[5],且较低的栅极驱动电压给驱动电路的设计带来了挑战。与 SiC 相比,GaN 器件的工业应用起步较晚,在驱动 HSBLDCM 方面有待进一步挖掘^[3]。文献[6]提出将 GaN 器件应用于 HSBLDCM 驱动器中,但没有具体试验验证。为此,本文设计了一款基于 GaN 器件的 HSBLDCM 驱动器,器件选用 GaN Systems 公司的 GS61008P,尺寸仅为同性能 Si 材料的 35%,可有效提高驱动器的功率密度。

本文首先介绍了 BLDCM 驱动器相关理论,然后重点阐述 GaN 器件晶体管驱动电阻的计算及 BLDCM 驱动器软硬件设计过程,最后通过试验验证了 GaN 器件能够应用于高速场合,且性能稳定可靠。

1 BLDCM 驱动器相关理论

BLDCM 驱动器拓扑结构如图 1 所示^[7]。图 1 中,晶体管 VT1~VT6 组成三相全桥逆变器,旁路二极管 VD1~VD6 为换相提供续流通道。6 个晶体管在特定的逻辑控制下,为 BLDCM 绕组提供三相交变电流。

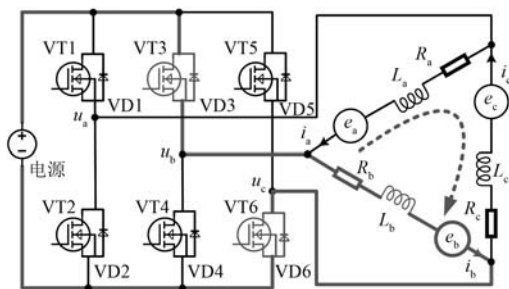


图 1 BLDCM 驱动器拓扑结构

结合图 1,可知 BLDCM 驱动器的数学模型^[7]为

$$\begin{bmatrix} u_{ab} \\ u_{bc} \\ u_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + j\omega L_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b + j\omega L_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c + j\omega L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: u_a 、 u_b 、 u_c 为电机各相端点电压,而 $u_{ab} = u_a - u_b$, u_{bc} 、 u_{ca} 亦然; R_a 、 R_b 、 R_c 为各相电阻;各相电感为 L_a 、 L_b 、 L_c (含彼此间互感); i_a 、 i_b 、 i_c 为各相电流; e_a 、 e_b 、 e_c 为反电动势。

BLDCM 电子换相过程如图 2 所示。

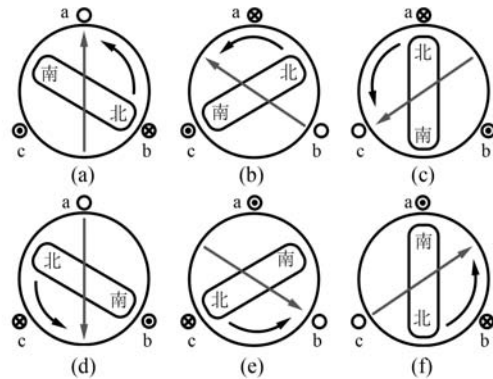


图 2 BLDCM 换相过程

图 2(a) 中,表示电流自 b 相流入(用 \otimes 表示),由 c 相流出(用 \odot 表示),电流在驱动器中的流向参考图 1 加粗路径。由右手定则可知感应磁场方向如图 2(a) 直线箭头。若此时转子位置也如图 2(a) 中所画,根据电磁原理,转子将逆时针旋转。当其转过 60° 后,切换电流通向至图 2(b),则电磁方向随之转过 60° ,以此类推,持续地给转子提供转矩^[7]。

随着 BLDCM 转速增大,电子换相频率升高,快速响应的晶体管变得越发重要。

2 GaN 器件驱动参数

GaN 器件晶体管导通电阻小、开关频率高,可有效代替 Si 器件。与 Si 器件相比,GaN 器件对高频寄生参数更为敏感,驱动电压仅为 $5 \sim 7 \text{ V}$,只有 Si 晶体管的一半,因此对驱动设计的要求更高。GaN 晶体管信号模型如图 3 所示,是一种压控电流源^[8]。

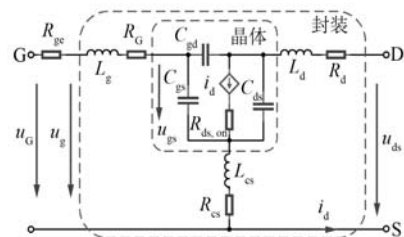


图 3 GaN 器件信号模型

图 3 中, L_g 、 R_g 、 R_{ge} 为栅极寄生电感及内外电阻; L_d 、 R_d 为漏极端的寄生电感和电阻; L_{cs} 、 R_{cs} 为共源极寄生电感和电阻; C_{gs} 、 C_{gd} 、 C_{ds} 为栅源、栅漏、漏源极电容; $R_{ds,on}$ 为导通电阻; u_{gs} 、 u_c 为内外

部栅极电压。根据图 3, 可以得到 u_G 到 u_{gs} 的传递函数 $G_{gs}(s)$:

$$G_{gs}(s) = \frac{1}{(L_g + L_{cs})C_{gs}s^2 + (R_{ge} + R_G + R_{cs})C_{gs}s + 1} \quad (2)$$

为了使高速电机可靠运行, 需尽量发挥 GaN 器件的高速开关特性, 但是过高的开关频率会导致较大的电磁干扰 (EMI) 和电压变化率 (dv/dt), 因此必须合理设计驱动参数。将式 (2) 改写为

$$G_{gs}(s) = \frac{1}{s^2 + \frac{R_{ge} + R_G + R_{cs}}{L_g + L_{cs}}s + \frac{1}{(L_g + L_{cs})C_{gs}}} \quad (3)$$

式 (3) 是一个二阶模型, 其标准参数为

$$2\xi\omega_n = \frac{R_{ge} + R_G + R_{cs}}{L_g + L_{cs}} \quad (4)$$

$$\omega_n^2 = \frac{1}{(L_g + L_{cs})C_{gs}} \quad (5)$$

式中: ξ 为阻尼系数, 一般取 0.707; ω_n 为系统固有频率。

消去 ω_n 可得:

$$R_{ge} + R_G + R_{cs} = 2\xi \sqrt{\frac{L_g + L_{cs}}{C_{gs}}} \quad (6)$$

其中: R_G 、 R_{cs} 存在于芯片内部, 值较小。

本文选择 GaN Systems 公司的 GS61008P 作为功率晶体管, 查阅技术手册可知其输入电容值为 590 pF, 走线电感取经验值 30 nH, 根据式 (6) 计算出电阻 R_{ge} 为 10 Ω 。

3 驱动器软硬件设计

3.1 硬件设计

图 4 所示为硬件设计框图。主要包括微处理器、电源、三相桥及其桥驱。其中微处理器 TMS320F28379D 给无刷电机提供换相逻辑, 同时监测电压、电流等信号, 以保证驱动系统的安全可靠。电源部分利用 LM5017 芯片得到 6 V 的 GaN 器件驱动电源, 再经过两级 LDO 为微处理器提供模拟和数字电源。表 1 所示为无刷电机参数: 额定转速为 20 000 r/min, 电感、惯性矩等相对较小, 需要较高频率的脉宽调制 (PWM) 驱动。

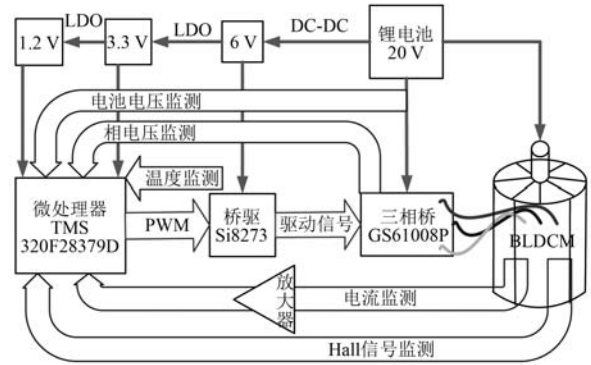


图 4 硬件设计框图

表 1 无刷电机参数

参数名称	参数值
磁极数	4
齿槽数	6
额定工作电压/V	20
额定转速/(r·min ⁻¹)	20 000
相电阻/ Ω	0.025
相电感/mH	0.004
惯性矩/(kg·m ²)	0.000 005 25

为了充分发挥 GaN 晶体管 GS61008P 的性能, 选取 Silicon Labs 公司的 Si8273 作为栅极驱动芯片。该芯片具有高低压隔离, 宽电压供电, dv/dt 抑制等能力。具体的驱动电路如图 5 所示。

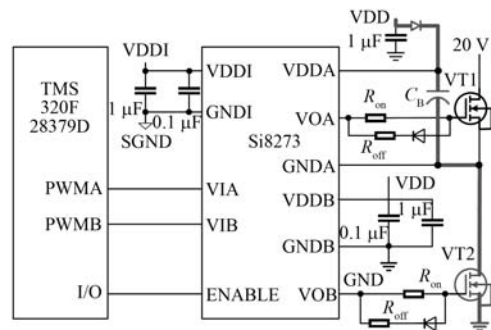


图 5 半桥驱动原理图

根据前文分析, R_{on} 取 10 Ω 。由于晶体管的关断能力要弱于开起能力, 所以为了快速关断, R_{off} 一般取 R_{on} 的 1/10~1/5。根据原理图设计制作的电路板及放大后的驱动电路如图 6 所示。

得益于 GaN Systems 公司特有的封装技术, GS61008P 尺寸仅为 7.6 mm×4.6 mm, 是同类 Si

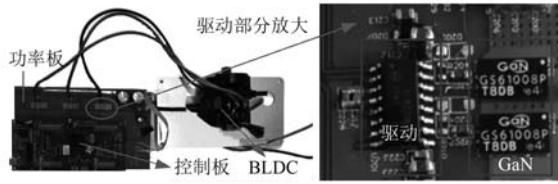


图 6 硬件实物照片

产品的 35%,有效增大了功率密度。需注意的是驱动芯片应尽量靠近晶体管,以降低走线的寄生效应。在 PCB 布板时,借助驱动芯片的隔离特性,将信号地(SGND)和功率地(GND)进行单点连接,以减少干扰。

3.2 软件设计

软件采用前后台结构。图 7(a)所示为前台主循环程序流程图,通过判断状态标志位来进行状态切换,相应标志位在中断程序中被更新。图 7(b)所示为后台 Hall 信号捕获中断服务程序流程图,电子换相逻辑如图 2 所示。需注意程序在初始化过程中,下管导通要一定的时间,使电容 C_B 按图 5 加粗路径完成自举充电。

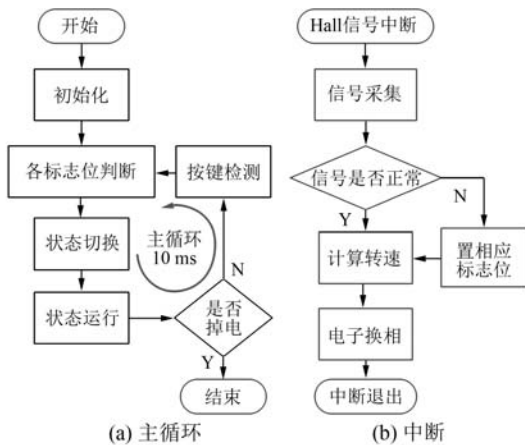


图 7 软件流程图

图 8 所示为图 7(a)中状态切换的具体展开,共 6 种状态,由不同条件触发运行。

4 试验结果

根据前文分析,驱动器的开起关断电阻分别取 $10\ \Omega$ 和 $2\ \Omega$ 。a 相下管的开起波形如图 9 所示,关断波形如图 10 所示。由图 9、图 10 可见,开关时间约为 $40\ ns$,比一般的 Si 晶体管快。

图 11 所示为 HSBLDCM 完整的运行过程。

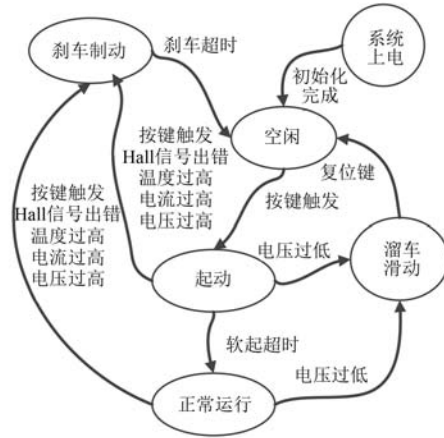


图 8 状态切换的具体展开

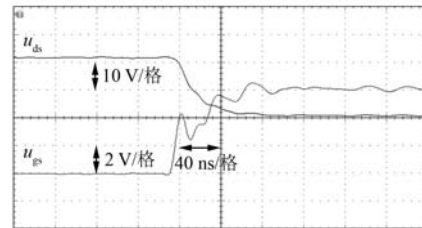


图 9 a 相下管的开起波形

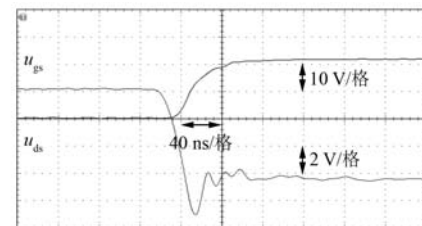


图 10 a 相下管的关断波形

在 5 s 处,PWM 占空比从 70% 阶跃到 100%。图 12、图 13 所示为 70% 占空比和 100% 占空比的运行细节。全速时转速高达 $20\ 000\ r/min$,运行状况良好。

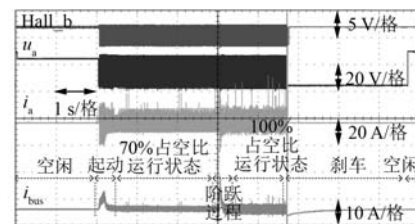


图 11 HSBLDCM 完整运行过程

图 14 所示为 PWM 占空比从 70% 至 100% 的

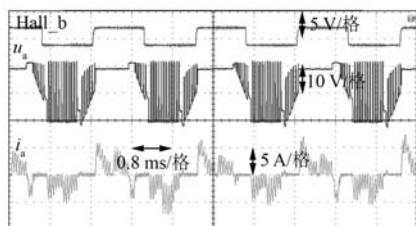


图 12 70% 占空比运行状况

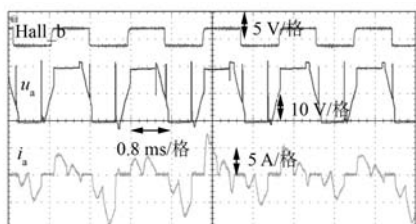


图 13 100% 占空比运行状况

阶跃动态。由图 14 可知,直流母线峰值电流达 15 A,纹波较小,驱动器响应迅速,整个过渡过程持续时间仅为 30 ms。

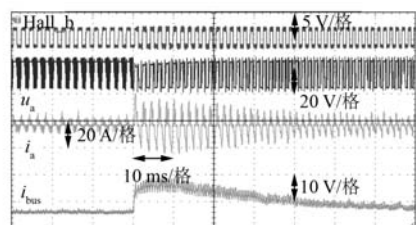


图 14 占空比从 70% 至 100% 的阶跃状态

5 结 语

针对 Si 基材料工作频率低、开关损耗大等缺点,本文将宽禁带半导体器件 GaN HEMT 应用于 HSBLLDCM 驱动器中,并通过信号建模、理论分析

以及软硬件设计,成功驱动了转速为 20 000 r/min 的高速电机。试验结果表明:基于 GaN 器件的 HSBLLDCM 驱动器运行稳定可靠、尺寸封装小、功率密度大、响应速度快。

【参考文献】

- [1] CUI C, LIU G, WANG K. A novel drive method for high-speed brushless DC motor operating in a wide range [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(9): 4998.
- [2] LIU G, CHEN S, ZHENG S, et al. Sensorless low-current start-up strategy of 100-kW BLDC motor with small inductance [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(3): 1131.
- [3] MORYA A K, GARDNER M C, ANVARI B, et al. Wide bandgap devices in AC electric drives: opportunities and challenges [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(1): 3.
- [4] 崔梅婷. GaN 器件的特性及应用研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [5] MENG W, ZHANG F, FU Z, et al. High dv/dt noise modeling and reduction on control circuits of GaN-based full bridge inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(12): 12246.
- [6] LEE W, HAN D, SARLIOGLU B. GaN-based single phase brushless DC motor drive for high-speed applications [C] // IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2014.
- [7] 叶金虎. 现代无刷直流永磁电动机的原理和设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 14-44.
- [8] ZENG Z, LI X. Comparative study on multiple degrees of freedom of gate driver for transient behavior regulation of SiC MOSFET [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(10): 8754.

[期刊订阅]

在邮局漏订的读者,可直接从邮局汇款至我杂志社发行部补订

地址:上海市武宁路 505 号《电机与控制应用》发行部

邮编: 200063

电话: 021-62574990-745

传真: 021-62576377

国内邮发代号: 4-199

每册定价: 12.00 元

全年定价: 144.00 元