

旋转导向用电机驱动电路的耐高温设计

张宇 史晓锋

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

摘要: 无刷直流电机驱动电路是旋转导向系统的一个重要组成部分。而井下高温工况对驱动电路的温升控制提出了更高的要求。设计了一款基于 SiC MOSFET 的耐高温电机驱动电路,从整体设计的角度分析了导致电路温升的几种因素,并结合电机设计和电路工作点设定,深入探究了 SiC MOSFET 安全工作特性。实验结果表明该电路具有耐高温、低温升、高可靠的特点,并在旋转导向系统得到成功应用。该设计的成功可为其他耐高温电机驱动电路的设计提供技术参考和依据。

关键词: 旋转导向;碳化硅 MOSFET;无刷直流电机驱动;耐高温

中图分类号: TM36⁺1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

High temperature resistant design of motor drive circuit used in rotary steering

Zhang Yu Shi Xiaofeng

(Electronic information engineering college, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Brushless DC motor drive circuit is an important part of rotary steering system. High temperature work condition bring higher request of the temperature rise control of motor drive circuit. This article designs a high temperature resistant motor drive circuit based on Silicon carbide (SiC) MOSFET and analyses the cause factors of temperature rise from a general design perspective and analyses the security working characteristics of SiC MOSFET in deeply combined with the motor designing and the setting system's working situation. Experimental results show that this circuit has characteristics of high temperature resistance, low temperature rise, high reliability and has used in rotary steering system successfully. In particular it provides technical references and depends in high temperature motor drive circuit designing.

Keywords: rotary steering; Silicon carbide MOSFET; brushless DC motor drive; high temperature resistance

1 引言

旋转导向钻井技术是 20 世纪 90 年代发展起来的以旋转导向钻井工具为核心的钻井新技术,其中旋转导向钻井系统主要由井下旋转导向钻井工具系统、双向通讯系统和地面监控系统 3 大部分组成。该技术克服了传统滑动导向并眼轨迹控制精度差、钻井成本高以及井深质量差等缺点,具有井身轨迹控制精度高、钻速高、井眼净化效果好以及较强的位移延伸能力。目前国外两家公司 Schlumberger 和 Baker Hughes 已经分别拥有商业化旋转导向系统如 Power Drive SRD 和 Auto Trak^[1]。

旋转导向执行机构由无刷直流电机提供动力。但是受到旋转导向系统机械结构及高温环境因素的限制,耐高温电机驱动电路设计成为了一大难点^[2]。

与传统基于硅半导体材料的功率器件相比以 SiC 技术为核心的半导体功率器件以其阻断电压高、通态电阻低、开关损耗小且耐高温等特点越来越受到重视^[3]。特别在高温、高频和大功率电子领域发挥着巨大应用优势和潜力^[4-6]。该技术的进步为井下耐高温电子设备设计开辟了一条新路。本文设计了基于 SiC MOSFET 电机驱动电路,对 SiC 功率器件的电气特性和参数进行了深入分析和研究并且从机电整体设计的角度提出了针对高温工况的高可靠性解决方案。

2 电机驱动电路设计

电机驱动电路如图 1 所示,主要由 DSP 控制单元、数据隔离单元、转角解算单元、三相桥式逆变单元以及旋转变

压器组成。

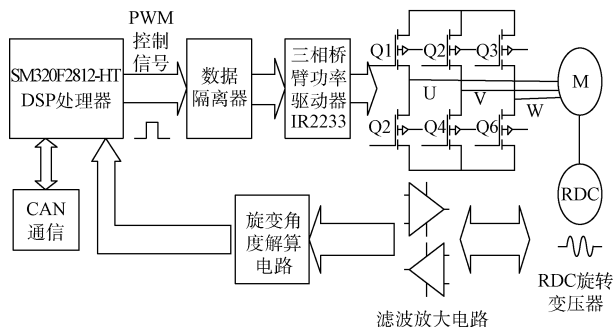


图1 电机驱动电路

2.1 电路构成

控制单元以 SM320F2812 DSP 为核心,负责产生驱动电路所需的 PWM 控制信号,同时对 RDC 转角解算得到的

位置转速信息、三相电流信息进行采集处理实现电机的反馈控制,并且通过 CAN 收发器与 PC 建立通信。

数据隔离单元采用低功耗、高耐压、高速率 6 通道数字隔离器。内部提供低脉冲宽度失真和逐通道毛刺滤波器以提高抗噪能力。不仅对信号进行了整形滤波并且实现了 3.3~5 V 电平转换增强了 PWM 信号的驱动力。

转角解算单元以 AD2S1210 旋变数字转换器为核心,可内部单独产生 2~20 kHz 激励信号,并行 16 位的数据接口最大跟踪速度可达 3 125 rp/s。旋转变压器由于安装位置靠近电机,处于高能电磁环境信号易受干扰。通过加入滤波功率放大电路有效提高了信号质量和解算精度。

三相桥式驱动电路由 IR2233 全桥控制器和 SiC MOSFET 共通构成。IR2233 内部如图 2 所示集成 3 组独立的半桥驱动电路,可对上下桥臂提供死区时间,上桥臂门极偏置电压由自举电路提供。

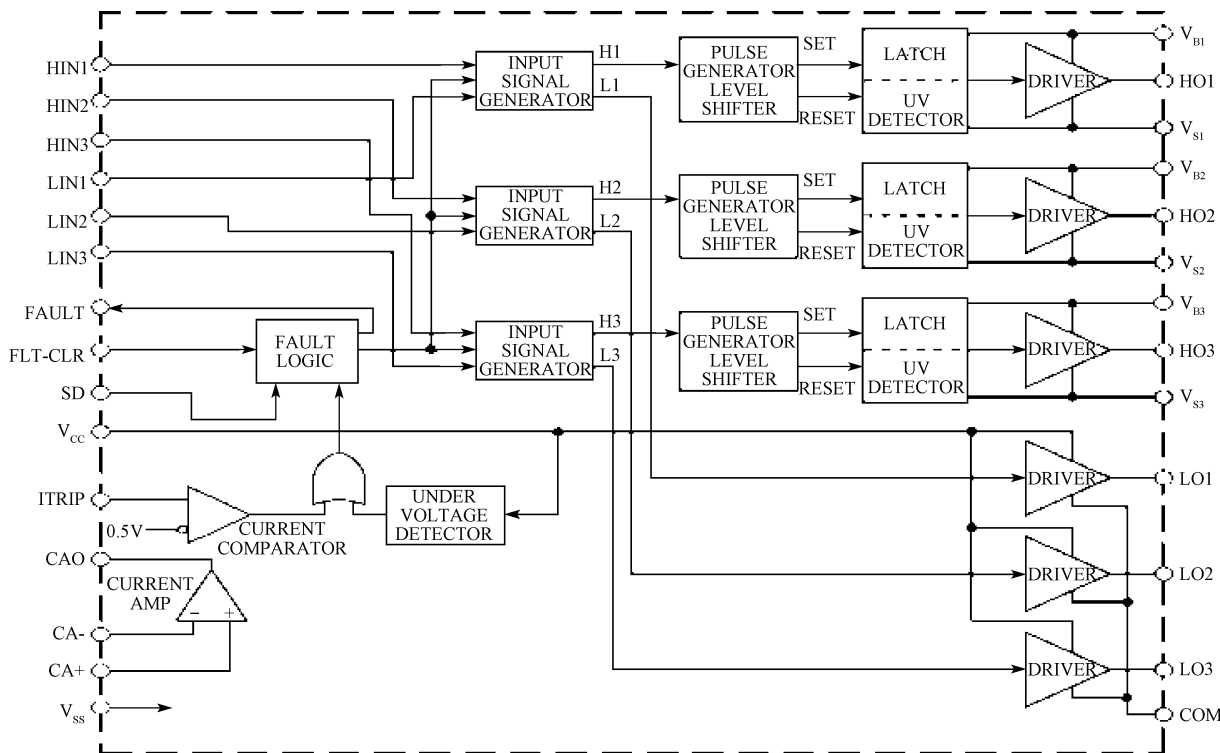


图2 IR2233 功能结构

2.2 自举电路

自举电路由自举电阻 R_{bs} 、自举二极管 D_{bs} 、自举电容 C_{bs} 组成如图 3 所示。自举电路基本工作原理是:当下桥臂导通后 V_s 为低电位,电源 V_{CC} 会通过 R_{bs} 、 D_{bs} 向 C_{bs} 充电为上桥臂提供偏置电压。当上桥臂导通时, V_s 电压接近母线电压 V_{BUS} ,自举二极管 D_{bs} 反向截止防止母线高压对低压电源影响实现了有效的隔离^[7]。

自举电阻电容决定了充电时间常数,参数需满足下管导通期间自举电容两端电压达到上桥臂偏置电压额定值,

且在下一次导通前端电压不低于自锁电压。

2.3 电机驱动换相策略

电机采用三相六状态 H_PWM-L_ON^[8] 的导通方式,电角度每经过 360°要进行 6 次换相。其中上管(Q1, Q3, Q5)受由 PWM 信号控制,下管(Q2, Q4, Q6)受开关信号控制,换向关系如图 4 所示。

采用 H_PWM-L_ON 单端控制方式可降低控制复杂度使转矩脉动最小,避免了双端控制带来不同步等问题。

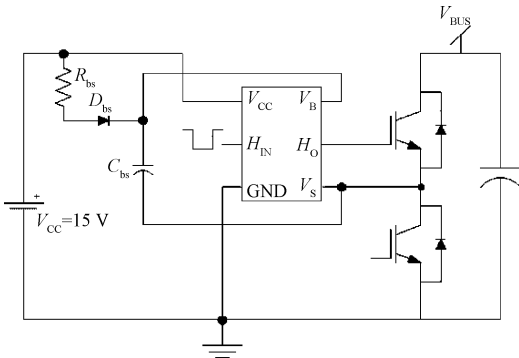


图 3 自举电路拓扑结构

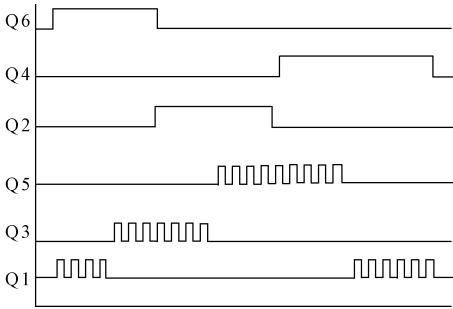


图 4 换向关系

3 驱动电路工作特性分析

SiC MOSFET 作为驱动电路核心功率器件是温升的主要来源。考虑到井下 125℃ 的高温环境，一方面需要考虑器件在高温工况下的工作情况，另一方面需要分析其工作特性提高电路效率，降低温升使电路稳定可靠^[9-12]。

3.1 SiC MOSFET 安全工作区域分析

SiC MOSFET 安全工作区域如图 5^[13] 所示给出了工作电压、电流、栅源导通时间的关系。 t_p 为栅源导通时间。

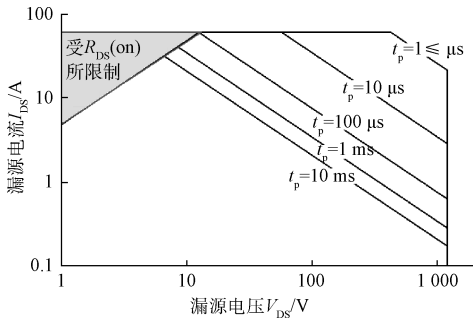


图 5 安全工作区域

从图中可以看出 SiC 虽然具有高耐压，高开关频率，高输出电流等优点，但不能同时满足必须合理设置漏源电压、漏源电流以及栅源导通时间在满足实际运行环境情况下保持其处于安全工作范围内。

3.2 安全工作区域影响因素

安全工作区域由五大组成因素，分别为 PWM 信号频率决定了 t_p 的最大值；占空比决定在固定频率下 t_p 具体数值；在 $V_{DS} < 10\text{ V}$ 时，安全工作范围和 t_p 无关；在 $V_{DS} > 10\text{ V}$ 时，在确定 V_{DS} 后， I_{DS} 容许的最大值随着 t_p 的增大而减少。

3.3 安全工作区域对电机工作条件的影响

无刷直流电机的输出电流有效值 I_{out} 和导通期间漏源电流 I_{DS} 以及栅源 PWM 控制信号占空比 $D(\%)$ 之间的关系为 $I_{DS} = \sqrt{\frac{I_{out}^2}{D}}$ 。可以看出在额定输出电流 I_{out} 相同情况下管子导通电流 I_{DS} 与占空比成反比，占空比越小导通电流 I_{DS} 越大，导通损耗越大温升也越高。若提高占空比会导致 t_p 增大安全工作区域变小。因此需合理设置栅源导通时间 t_p 综合考虑温升和安全工作区域大小情况而定。

直流无刷电机也须结合驱动电路的特性合理设计使其最大功率输出点与驱动电路最大功率输出点一致。若电机最大输出功率点较驱动电路最大功率输出点低，会导致占空比可调范围较小。当负载增加占空比提高， t_p 增大安全工作线下移，而 I_{DS} 则随负载的增加而增大将导致从某一时刻开始 I_{DS} 数值越过安全工作范围导致系统异常温度急剧升高^[14]。

直流无刷电机也须结合驱动电路的特性合理设计使其最大功率输出点与驱动电路最大功率输出点一致。若电机最大输出功率点较驱动电路最大功率输出点低，会导致占空比可调范围较小。当负载增加占空比提高， t_p 增大安全工作线下移，而 I_{DS} 则随负载的增加而增大将导致从某一时刻开始 I_{DS} 数值越过安全工作范围导致系统异常温度急剧升高^[14]。

4 驱动电路额定工作点对温升的影响

驱动电路应如何确定额定工作点，额定工作点对电路温升有何影响可通过下面两组实验得出结论。

4.1 低压条件驱动电路带载及温升情况测试

驱动电路在 48 V 工作电压下带载能力测试结果如表 1 所示。可以看出，采用脉宽调制单端控制方式驱动下电路能够在驱动 10 N·M 负载时转速达 150 r/min。电路温升也高可达 80℃ (环境温度 25℃)。对于旋转导向系统而言，高温工况限制了其温升不得超出 20℃，因此低压大电流的工作点不能满足系统要求。

表 1 驱动电路低压带载能力

占空比/ (%)	扭矩/ N·M	转速/ r·min ⁻¹	电源电流/ A	相电流/ A
30	0	212	0.30	0.38
30	1.68	158	1.00	2.50
30	3.37	138	1.80	4.60
30	5.24	112	2.14	7.10
30	6.30	103	3.00	8.16
47	6.40	218	4.90	8.37
47	7.71	201	5.70	9.89
47	8.92	180	6.70	11.50
47	10.14	150	7.50	12.89

4.2 高压条件下驱动电路温升情况测试

根据 SiC MOSFET 安全工作区域分析,结合低压条件下驱动能力测试及温升情况,合理调整工作电压并通过实验数据对比了在相同额定输入电压输出电流条件下,不同导通时间下漏源电流 I_{DS} 以及 SiC MOSFET 的温升情况(表 2)环境温度 26 °C。

表 2 SiC MOSFET 导通时间与温升表

电压/ V	相电流/ A	占空比/ (%)	时间/ min	温度/ °C	通导电 流/A
200	4	13	5	68.0	11.23
200	4	13	6	84.5	
200	4	13	7	90.5	
		$T_p = 21.58 \mu s$	$I_{DSmax} = 10 A$		
200	4	87	2	29.0	4.28
200	4	87	4	31.2	
200	4	87	5	32.0	
200	4	87	6	32.9	
200	4	87	7	33.5	
200	4	87	9	34.9	
200	4	87	14	37.2	
200	4	87	15	37.7	
200	4	87	17	38.2	
200	4	87	20	38.9	
		$T_p = 144.42 \mu s$	$I_{DSmax} = 4.5 A$		

由实验数据可得到在相同额定工作条件下,13%占空比对应的导通电流 I_{DS} 为 11.23 A,而 87%占空比时, I_{DS} 只有 4.28 A 而且温升很低,20 min 温度已经稳定在 38.9°C 左右。

因此,整个驱动系统设计不仅需要综合考虑电机以及电机驱动电路设计满足最大功率点一致,而且应尽量选择高压低流的工作点最大限度降低系统温升^[15]。

5 结 论

本文对电机驱动电路工作特性和 SiC MOSFET 安全工作区域进行了深刻剖析,并从电机与驱动电路功率点匹配入手,通过大量实验测试,最终得到了针对旋转导向系统高温环境下低温升限制的解决方案。为今后开展高温电机驱动电路设计提供了技术依据。

参考文献

[1] 苏义脑, 窦修荣, 王家进. 旋转导向钻井系统的功能、特性和典型结构[J]. 石油钻采工艺, 2003, 25(4): 5-7.

[2] 雷静, 杨甘生, 梁涛, 等. 国内外旋转导向钻井系统导向原理[J]. 探矿工程, 2012(9): 53-55.

[3] 赵斌, 秦海鸿, 马策宇, 等. SiC 功率器件的开关特性探究[J]. 电工电能新技术, 2014(3): 1-2.

[4] 赵斌. SiC 功率器件特性及其在 Buck 变换器中的应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.

[5] 陈治明, 李守智. 宽禁带半导体电力电子器件及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

[6] JIANG D, BURGOS R, WANG F, et al. Temperature-dependent characteristics of SiC devices: performance e-valuation and loss calculation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 27(2): 1013-1024.

[7] 宋洪强, 范永盛, 陆汉宁. 变频空调智能功率模块自举电路设计过程中的若干关键问题研究[C]. 中国制冷学会 2009 年学术年会, 2009.

[8] 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.

[9] 王学梅. 宽禁带碳化硅功率器件在电动汽车中的研究与应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 371-379.

[10] 郝夏斐, 潘三博. 碳化硅功率场效应功率晶体管仿真模型及其驱动研究[J]. 制造自动化, 2011, 33(4): 105-108.

[11] 吴凤江, 高晗瓔, 孙力. 桥式拓扑结构功率 MOSFET 驱动电路设计[J]. 电气传动, 2005, 35(6): 32-34.

[12] 张旭, 陈敏, 徐德鸿. SiC MOSFET 驱动电路及实验分析[J]. 电源学报, 2013(3): 71-76.

[13] 廖明栋, 范缜煜, 董福庆. 基于 DSP 的直流伺服电机驱动电路研究与分析[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(8): 77-79.

[14] 朱俊杰, 粟梅, 陈程, 等. 无刷直流电机反电势过零检测新方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 441-447.

[15] 朱剑波. 无刷直流电机控制系统的仿真与分析[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(12): 25-30.

作者简介

张宇, 1989 年出生, 北京航空航天大学在读硕士, 研究方向为测控与通信系统。

E-mail: zhangyubuaa@163.com

史晓锋, 副教授, 硕士生导师, 现任电子信息工程学院信息技术教研室主任。研究方向包括: 测控与通信系统、空天地一体化导航与测试技术、光电探测与光纤传感、嵌入式技术。