

低压电动车开关磁阻电机隔离驱动技术*

蔡 骏¹, 向 程¹, 刘泽远², 邵雨楠¹, 吴少龙¹
 (1. 南京信息工程大学 自动化学院, 江苏 南京 210044;
 2. 南京邮电大学 自动化学院, 江苏 南京 210023)

摘 要: 在传统的低压电动车开关磁阻电机(SRM)驱动系统的设计中, 优先考虑的问题是系统的体积和成本。通常在 MOSFET 驱动电路、相电流和母线电压采样电路设计中直接忽略了数字地和功率地的隔离问题, 使得整个驱动系统的可靠性大打折扣。在保持传统的非隔离驱动系统中驱动电路和电阻采样电路的基础上, 提出采用高速光耦实现 PWM 控制信号与 MOSFET 驱动信号的隔离, 采用线性光耦实现相电流和母线电压采样信号与控制器 AD 采样信号之间的隔离。该方式可以在尽量不增加系统体积和成本的情况下, 实现数字地和功率地隔离, 从而进一步提升低压电动车 SRM 驱动系统的可靠性, 具有广阔的应用前景。

关键词: 开关磁阻电机; 电动车; 驱动系统; 隔离

中图分类号: TM 352 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)02-0109-05

Isolated Driving Technique for Low-Voltage Electric Vehicle Switched Reluctance Motor Drives*

CAI Jun¹, XIANG Cheng¹, LIU Zeyuan², SHAO Yunan¹, WU Shaolong¹
 (1. School of Automation, Nanjing University of Information Science & Technology,
 Nanjing 210044, China;
 2. School of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: In the design process of traditional low-voltage electric vehicle switched reluctance motor (SRM) drive system, the first consideration was the volume and cost of the system. Generally, the isolation of the digital ground and the power ground was always neglected in the design of the MOSFET driving circuits and the phase current and bus voltage sampling circuits, which deteriorated the reliability greatly in the driving system. Based on the traditional drive circuit and resistance sampling circuit in non-isolated drive system, a high-speed optocoupler was proposed to isolate the PWM control signal from the MOSFET drive signal, and a linear optocoupler was used to isolate the phase current sampling signal and bus voltage sampling signal from the AD sampling signal of the controller. This method could achieve the isolation of digital ground and power ground without increasing too much the system size and cost, and thus further improve the reliability of low-voltage electric vehicle SRM drive system. The proposed method had important application prospects.

Key words: switched reluctance motor (SRM); electric vehicle; driving system; isolation

0 引 言

开关磁阻电机(SRM)调速系统以其结构简

单、起动转矩大、容错能力强等优点, 已经成为电动车驱动电机的重要选择^[1]。控制器和功率变换器是电动车 SRM 驱动系统设计的关键。文献[2-

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51607095); 南京信息工程大学高层次人才科研启动基金项目(20152017)

作者简介: 蔡 骏(1982—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电机驱动技术和能量管理技术。

向 程(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为开关磁阻电机控制。

刘泽远(1981—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为无轴承开关磁阻电机系统。

3]基于 ARM 控制器设计了低速低压电动车控制器,在功率系统中驱动电路使用简易的三极管搭建,电流采样运用精密电阻器进行采样。该方式虽然最大限度降低了系统成本,但由于数字地和功率地未隔离,不可避免会造成系统稳定性和可靠性降低,无法发挥 SRM 本身的高可靠性和强容错能力。文献[4-8]以 DSP 为主控芯片,驱动电路采用专用驱动芯片,而相电流采用霍尔电流传感器进行采样,均实现了驱动系统数字地和功率地的隔离,但该方式增加了系统的成本和体积,无法满足低速低压电动车电机驱动系统的应用中对成本和体积的苛刻要求。文献[9-10]提出一类适合电动车 SRM 控制的多电平功率变换器及控制方法,但由于系统复杂、成本昂贵,故难以在低成本的低压电动车电机驱动领域实现应用。

本文提出采用高速光耦实现脉宽调制(PWM)控制信号与 MOSFET 驱动信号的隔离,采用线性光耦实现相电流和母线电压采样信号与控制器 AD 采样信号之间的隔离。试验结果验证了该方法可以在尽量不增加系统体积和成本的情况下,实现数字地和功率地隔离,从而进一步提升低压电动车 SRM 驱动系统可靠性,具有广阔的应用前景。

1 传统的低压电动车 SRM 驱动系统

低压电动车 SRM 驱动系统结构框图如图 1 所示。整个系统包含 SRM 电机、功率电路和控制器部分,集成了电机驱动控制、挡位、刹车和显示等基础功能,且具有欠压过压保护、过流保护和温度保护(控制器温度和电机温度)功能。

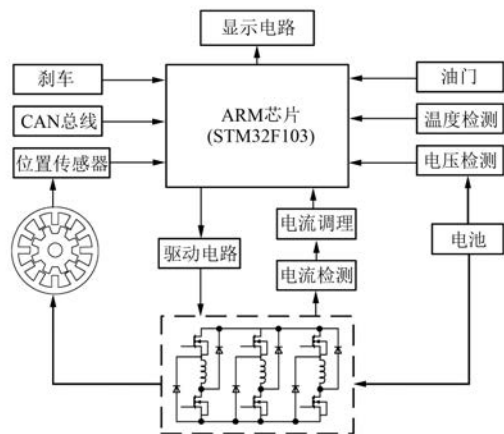


图 1 传统低压电动车 SRM 驱动系统结构框图

1.1 传统低压电动车 SRM 非隔离驱动电路

在传统的低压电动车驱动设计时,考虑到成本问题,通常并不采用专用驱动芯片,而是使用廉价的三极管等元器件搭建驱动电路,如图 2 所示。该电路在无刷直流电机和 SRM 驱动系统中是通用的。其基本原理如下。

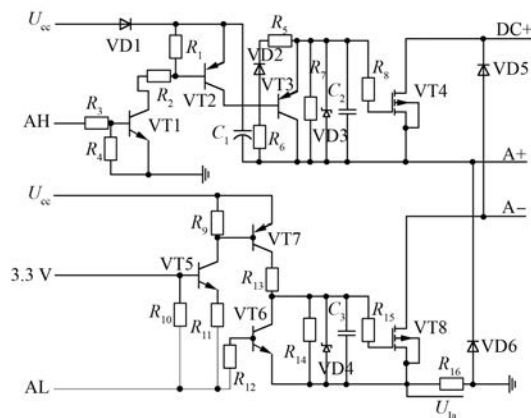


图 2 A 相不对称半桥驱动电路

(1) 当 AH 输入为高电平时,三极管 VT1 导通, U_{cc} 经过 R_1 和 R_2 分压,VT2 产生偏置电压后导通,由于二极管 VD2 和 R_5 存在压降,VT3 发射极电压小于基极电压,VT3 截止;当下桥臂 VT8 导通时, U_{cc} 经过 VD1、绕组和 VT8,对 C_1 进行充电。由于 C_1 经过充电产生浮地,形成 MOSFET 驱动电压,MOSFET 开通。当 AH 输入为低电平时,VT1 截止, R_1 无电流流过,VT2 无偏置电压而截止,随后 VD2 截止,栅极电压将 VT3 导通,因此 MOS 管 VT4 栅极电荷快速释放,MOSFET 关断。

(2) 当 AL 为低电平时,VT5 导通, U_{cc} 经过 R_9 、 R_{11} 分压使 VT7 的发射极电压高于基极电压,VT7 导通,由于 VT6 无电压偏置而截止,MOS 管 VT8 导通;当 AL 为高电平时,VT5 无偏置截止, R_9 无电流导致 VT7 无偏置截止,VT6 基极电压大于发射极电压,VT6 导通,VT8 栅极电荷通过 VT6 迅速消失,MOS 管关断。

1.2 传统低压电动车 SRM 非隔离采样电路

1.2.1 电流采样电路

霍尔电流传感器和电阻采样是电机驱动系统中最常用的电流检测方式,其中,霍尔电流传感器具备隔离和高精度采样的能力,但是传感器引入通常会占用较大的电路板面积和系统体积,并且增加系统成本。在低压电动车 SRM 驱动系统中,

通常采用电阻采样来进行电流采样。考虑到低压电动车驱动系统中电机绕组电流较大,通常会采用康铜丝或锰铜丝作为采样电阻。但是采用康铜丝采样在检测过程中会存在一系列干扰问题:

(1) 高频开关干扰。功率变换器高频开关信号容易产生很高的谐波干扰信号。

(2) PCB 走线干扰。PCB 板布局和走线易产生寄生电感,在开关器件开通和关断的瞬间产生高频谐波,影响电流采样线性度。

(3) 地之间的干扰。由于整个数字地与模拟地未隔离,导致母线的强电与信号的弱电产生波动,影响电流采样的准确性。

由于康铜丝分压很小,且易受上述诸多干扰的影响,需要对其进行无源二阶滤波和放大处理之后,再经控制芯片 AD 采样。

1.2.2 母线电压采样电路

检测电池的欠压和过压,通常需要对母线电压进行采样。目前电压采样方式主要有电阻分压采样和霍尔电压传感器。霍尔电压传感器电压采样方式虽然具有隔离功能,但是由于其价格高、体积大等缺点,都不适用于此传统的低压电动车控制器,因此在低压电动车 SRM 驱动系统中优先采用电阻分压采样的方式。

1.3 传统低压电动车 SRM 驱动系统存在的问题

如图 3 所示,传统低压电动车 SRM 驱动系统的功率部分采用不对称半桥的功率变换器,其驱动电路采用三极管搭建,因此强电与弱电部分共地;而采样电路(电流采样电路、母线电压采样电路)均采用廉价的电阻采样,采样信号均未进行隔离处理而直接输入 ARM 中。由于强电与弱电没有进行隔离,数字信号与模拟信号相互作用,影响信号的采样效果,长期运行会导致系统稳定性与可靠性降低,因此有必要对强电与弱电进行隔离处理。

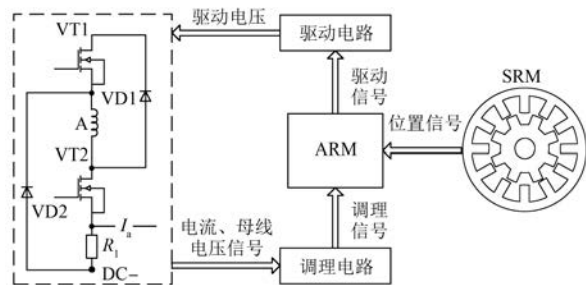


图 3 传统低压电动车 SRM 非隔离驱动系统框图

低压电动车 SRM 隔离驱动系统框图如图 4 所示。

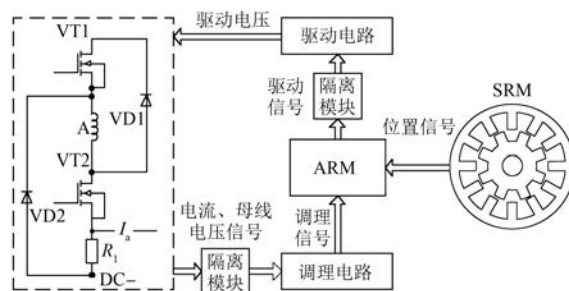


图 4 低压电动车 SRM 隔离驱动系统框图

2 低压电动车 SRM 的隔离驱动系统

从传统的低压电动车 SRM 非隔离驱动系统可以看出,数字地和功率地没有隔离的主要原因在于 MOSFET 驱动电路部分以及相电流和母线电压的电阻采样部分均没有实现隔离。因此,在保持传统的非隔离驱动系统中驱动电路和电阻采样电路的基础上,尽量不增加系统体积和成本,实现数字地和功率地隔离,是进一步提升低压电动车 SRM 驱动系统可靠性的关键。

2.1 低压电动车 SRM 隔离驱动方案

要实现驱动系统的数字地和功率地隔离,从 MOSFET 驱动电路方面可以采用隔离专用驱动芯片,而相电流和母线电压采样方面可以采用电流和电压传感器,然而该方式会大大增加控制器的系统体积和成本,并不适合低压电动车这类对于控制器体积和成本要求极为苛刻的应用领域。为解决该问题,本文针对 MOSFET 驱动以及相电流和母线电压采样分别提出了隔离方案。

(1) 对于 MOSFET 驱动电路部分:在保留原有的 MOSFET 驱动电路情况下,通过在 ARM 与原驱动电路之间增加高速光耦,实现控制信号与驱动信号的隔离。

(2) 对于相电流和母线电压采样部分:在保留康铜丝相电流采样电路和母线电压的电阻分压电路的情况下,在采样电路输出与 ARM 的 AD 采样之间加入线性光耦,实现实际采样信号与 ARM 模拟采样信号之间的隔离。

2.2 隔离驱动设计实例

2.2.1 MOSFET 驱动部分

如图 5 所示,将驱动信号使用高速光耦进行

隔离再输入到驱动电路中,隔离光耦芯片选择高速隔离光耦 6N137。PWMA 信号与 AH 信号相反,输入部分 R_{21} 为限流电阻,由于 PWMA 为 CPU 输出的信号为 3.3 V,二极管的正向导通压降为 1.4~1.8 V,而芯片的工作电流 I_F 为 10~15 mA, R_{21} 的值应该选择在 100~200 Ω ; 输出部分引脚 8 与引脚 5 之间接了一个 0.1 μF 的钽电容,可以吸收电源上的纹波,减少开关工作时的冲击, R_{22} 为上拉电阻,选择 4.7 k Ω ,引脚 7 为使能引脚,此引脚空置或者高电平时芯片可以正常工作。

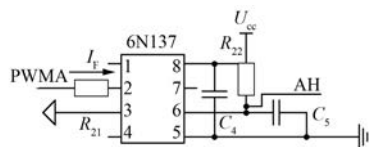


图 5 6N137 驱动隔离电路

2.2.2 相电流和母线电压采样部分

电流采样优化电路如图 6 所示,选用 HCNR200 线性光耦芯片进行隔离放大,其中, U_{la} 为电阻采样电流的输出电压, U_1 是经过隔离放大后进入 CPU 的电压信号。当发光二极管有电流 I_{F1} 流过时,光线照在 VD2 和 VD3 上,VD2 是反馈二极管产生控制电流 I_{P1} ,补偿 I_{F1} 的非线性,从而使 VD3 输出的电流 I_{P2} 与电流 I_{F1} 形成线性关系。 I_{F1} 、 I_{P1} 与 I_{P2} 存在线性关系,假设其线性系数分别为 $K_1 = I_{P1}/I_{F1}$ 、 $K_2 = I_{P2}/I_{F1}$,而 HCNR200 的系数 $K_1 = K_2$ 且为 0.25%~0.75%,一般选取 0.5%。 I_{F1} 通过手册可知为 10 mA,二极管的压降为 1.6 V,由式(1)可知,放大倍数由 R_4 、 R_2 决定。

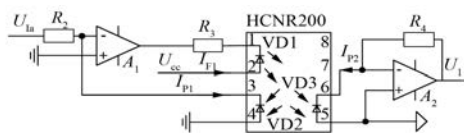


图 6 电流采样优化电路

$$U_1 = I_{P2}R_4 = K_2 I_{F1} R_4 = \frac{K_2 R_4}{K_1 R_2} U_{la} = \frac{R_4}{R_2} U_{la} \quad (1)$$

同样地电压检测部分也通过使用 HCNR200 线性光耦,将电压采样信号输入到 ARM,通过驱动部分与电压电流的隔离,实现整个系统的隔离,从而提高系统的稳定性与可靠性。

3 试验验证

为了验证驱动隔离电路与线性隔离的可行性,首先选取了 A 相驱动信号进行隔离前后的对比,如图 7 所示。CPU 输出 18 kHz 的驱动信号,其隔离前与隔离后的信号相同,可以实时进行隔离跟踪。选取 HCNR200 隔离前后波形进行比较,如图 8 所示,隔离后的电流可以线性跟踪隔离前信号。由此验证了运用 6N137 高速光耦芯片与 HCNR200 线性光耦进行信号隔离的可行性。

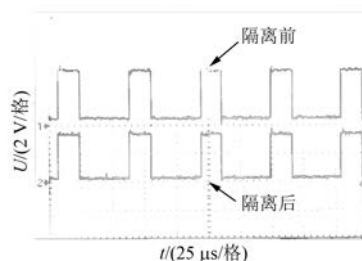


图 7 驱动隔离前后波形(隔离示波器)

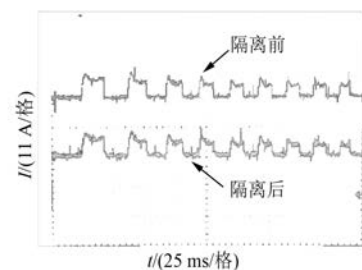


图 8 电流隔离前后波形(隔离示波器)

为了验证隔离驱动电路的可行性,在 1 台 12/8 结构低压电动车 SRM 上进行试验。

(1) 自启动阶段。转速低于 300 r/min 时,开通角为 0°,关断角为 22.5°,直接利用电机位置信号作为电机驱动信号控制电机自启动运行。图 9 所示为电机在自启动运行阶段经 HCNR200 隔离后输出的三相电流波形。该波形稳定而没有失真,反映了实际采样电流的大小。

(2) 驱动运行阶段。转速大于 300 r/min 后,开通角为 0°,关断角为 18°,利用转把给定不对称半桥的上管 PWM 占空比,实现转速的调节。正常运行阶段采集 HCNR200 隔离后三相电流如图 10 所示,电机运行在 1 500 r/min,可以看出 HCNR200 线性隔离芯片可以实现对电流的快速

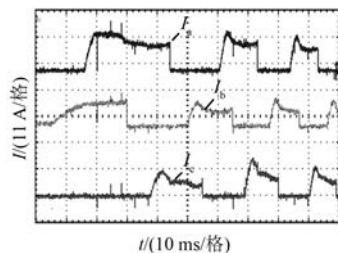


图9 自启动阶段三相电流

线性跟踪,且实现了数字地与功率地之间的隔离,提高了整个系统的稳定性。

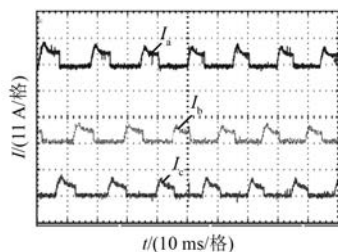


图10 正常运行阶段电流

4 结 语

本文通过采用高速光耦实现了控制信号与驱动信号的隔离,利用线性光耦实现了康铜丝电流采样信号以及母线电压的电阻分压信号与控制器AD采样信号的隔离。通过该方案的实施,在基本不增加系统体积成本的条件下,解决了传统低压电动车SRM驱动系统中控制地和功率地不隔离的问题,进一步提升了低压电动车SRM驱动系统的可靠性。

【参考文献】

- [1] BOSTANCI E, MOALLEM M, PARSAPOUR A, et al. Opportunities and challenges of switched reluctance motor drives for electric propulsion: a comparative study [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2017, 3(1): 58.
- [2] 张明灏. 开关磁阻电机控制器电流采样及保护设计 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [3] 钟锐, 徐宇拓, 陆生礼. 基于 Cortex M3 处理器的开关磁阻电机控制器设计 [J]. 电子技术应用, 2011, 37(3): 32.
- [4] 朱曰莹, 赵桂范, 杨娜. 电动汽车用开关磁阻电机驱动系统设计及优化 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(11): 88.
- [5] 黄为龙. 电动车开关磁阻电机控制器研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- [6] 周聪, 刘闯, 王凯, 等. 用于开关磁阻电机驱动系统的新型单电阻电流采样技术 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(5): 55.
- [7] 张超, 全力, 朱孝勇, 等. 基于 DSP+CPLD 的车用开关磁阻电机驱动控制系统的设计 [J]. 电机与控制应用, 2013, 40(1): 13.
- [8] 谈宏兴. 电动汽车用开关磁阻电机控制系统的设计与研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2014.
- [9] HU Y, GAN C, CAO W, et al. Split converter-fed SRM drive for flexible charging in EV/HEV applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(10): 6085.
- [10] GAN C, WU J, HU Y, et al. New integrated multilevel converter for switched reluctance motor drives in plug-in hybrid electric vehicles with flexible energy conversion [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(5): 3754.

收稿日期: 2018-09-17

(上接第 108 页)

- [59] SCHIEFER M, DOPPELBAUER M. Indirect slot cooling for high-power-density machines with concentrated winding [C] // 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2015: 1820.
- [60] POLIKARPOVA M, PONOMAREV P, LINDH P, et al. Hybrid cooling method of axial-flux permanent-magnet machines for vehicle applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(12): 7382.

- [61] KARNAVAS Y L, CHASIOTIS I D, PEPONAKIS E L. Cooling system design and thermal analysis of an electric vehicle's in-wheel PMSM [C] // 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2016: 1439.
- [62] LEE K H, CHA H R, KIM Y B. Development of an interior permanent magnet motor through rotor cooling for electric vehicles [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 95: 348.

收稿日期: 2018-08-22