

一种国产无刷直流电机驱动电路的设计

潘运昌

(南昌航空大学 测试与光电工程学院, 南昌 330000)

摘要: 无刷直流电机是一种应用及其广阔的产品, 由于其具有体积小、高输出功率、高效率、控制简单、能实现无级调速、运行速度范围宽、高可靠性和低维护要求等特点, 被广泛应用于汽车电子、自动化、航空航天等各个领域。然而在中国, 我们大多使用的无刷直流电机驱动电路中的芯片都依赖进口, 几乎很少出现一款完完整整由我们自己国内制造的芯片设计的无刷直流电机驱动电路, 驱动器, 所以设计一款国产化无刷直流电机驱动电路, 驱动器是非常有必要的。

关键词: 无刷直流电机(BLDC); 位置传感器; 无极调速; 国产化驱动电路

中图分类号: TM36 + 1; TP273

文献标志码: A

文章编号: 1001-6848(2023)05-0067-05

DOI:10.15934/j.cnki.micromotors.2023.05.014

Design of a Domestic Brushless DC Motor Drive Circuit

PAN Yunchang

(Nanchang Hangkong University School of Testing and Opto-electronic Engineering,
Nanchang 330000, China)

Abstract: Brushless DC motor motors is an application and broad product, since it has small volume, high output power, high efficiency, simple control, can realize stepless speed regulation, wide speed range, high reliability and low maintenance requirements and other characteristics, widely used in automotive electronics, automation, aerospace and other fields. In China, however, most of us use the brushless DC motor drive circuit of the chip are dependent on imports, rarely appear a whole made by our own domestic chip design of brushless DC motor drive circuit, drive, so design a localization of brushless dc motor drive circuit, the drive is very necessary.

Key words: brushless direct current motor (BLDC); position sensor; stepless speed regulation; domestic driver circuit

0 引言

无刷直流电机(Brushless Direct Current Motor, 简称 BLDC) 是利用位置传感器以及电子开关线路来代替我们传统的直流电机中的电刷和机械换向器, 这大大提高了系统的可靠性, 性能也相比于传统的直流电机有非常大的优势^[1-2]。无刷直流电机属于永磁同步电机的一种, 它并不是字面上那种真正的直流电机, 它的本质是直流电源输入, 采用逆变电路, 电子逆变器将直流电转化为交流电, 并且有转子位置检测以及反馈的三相交流永磁同步电机^[3]。目前常见的驱动电路有使用 IR2101S + MOS 的驱动的, 使用 SI9979DS 芯片 + MOS 驱动的, 下面将分别介绍这两种驱动电路, 并提出一种使用国产驱动芯片 JY01 搭配国产 MOS 管设计的国产化无刷直流电机驱动电路。

1 无刷直流电机的原理

无刷直流电机的工作原理和有刷直流电机十分类似。主要是靠霍尔传感器或者反电动势获得当前转子的位置, 然后根据设定的换相表获得当前时间应该给哪两相绕组通电, 从而获得定子磁链和反向与转子磁链的方向呈一定的角度。我们都知道只要通电的导体放置于磁场中, 它就会受到一个作用力, 这个力, 我们称为洛伦磁力。并且由于作用力与反作用力, 导体将承受相等且相反的力。当线圈中通入电流时, 会产生磁场, 该磁场与定子的磁极相互作用, 这时如果我们改变线圈的电流方向, 那么转子感应出来的磁场方向也将相应的发生变化, 这时候我们就能让转子在磁场的作用下一直转动。尽管通的是直流电, 但开关仍会产生具有梯形形状的交流

收稿日期: 2022 - 10 - 24

作者简介: 潘运昌(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为基于国产 FPGA 的无刷直流电机的控制。

流电压波形^[4]。然后由于无刷直流电机不同于有刷电机,它是没有电刷的,因此要实现换相必须是电子控制的,为了使电机旋转起来,必须给我们需要的绕组通电,因此我们必须事先知道转子的位置,才能精确地给特定的绕组通电。这里我们通常使用霍尔传感器,霍尔传感器是利用霍尔效应来工作的,通过霍尔传感器的位置传感器检测转子的位置信息,并将其转化为电信号。大多数无刷直流电机都是采用三个霍尔传感器,间隔呈 60°或 120°放置。如图 1 所示为霍尔传感器间隔按 60°摆放。



图 1 BLDC 霍尔传感器

2 无刷直流电机的驱动方式

分析无刷直流电动机的驱动方式,必须先从其结构入手。无刷直流电动机的定子结构与感应电动机很相似,由一堆钢板组成,绕着轴向断裂的槽。一般来说,大部分无刷直流电动机都是由 3 个定子组成的。此外,线圈连接和以定子线圈为基础,可分为梯形(ladder)和正弦(sine)电动机。在梯形电动机中,逆转动力是梯形,在正弦电动机中,逆转动力是正弦型。如图 2 所示为直流无刷电动机的反电动势波形^[5]。

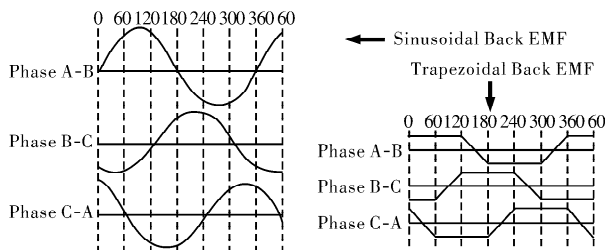


图 2 BLDC 电机反电动势波形

无刷直流电机的驱动方式可以按照不同的类别分为多种方式,他们各自的特点。按驱动波形分类,可以分为方波驱动和正弦驱动。方波驱动这种驱动方式实现起来非常方便,易于实现电机无位置传感器控制。正弦驱动这种驱动方式可以改善电机的运行效果,是运行中输出的力矩比较均匀,但是实现起来比较复杂。同时这种方法又有 SPWM 和 SVPWM(空间矢量 PWM)两种方式。无刷直流电机驱动方式的主要进化过程如下,从取消霍尔元件变为无位置传感器的驱动方式,从方波驱动到正弦波

驱动方式,进而演变成无位置传感器和正弦波驱动方式相结合,最后引入矢量控制。采用无位置传感器控制,取消霍尔元件等,有利于在苛刻条件下的无刷直流电机驱动,而引入矢量控制技术是无刷直流电机的性能提升,且效率达到极限。目前市面上大多数还是无刷直流有感电机,所以这里我们主要研究无刷直流有感电机,调速方式使用 0-5 V 电压调速或者 PWM 模拟电压调速方式^[6]。

3 常见的驱动电路分析

3.1 IR2101S + IRF540N 的驱动电路

一般的无刷直流电动机的驱动电路中,有在高侧和低侧门驱动器 IR2101S 上组合 IGBT 或 MOSFET 的驱动电路。IR2101S 为双通道、栅极驱动、高压高速功率驱动器,采用高度集成的电平转换技术,大大简化了逻辑电路对功率器件的控制要求,提高了驱动电路的可靠性,其引脚图和应用电路如图 3 所示^[7]。

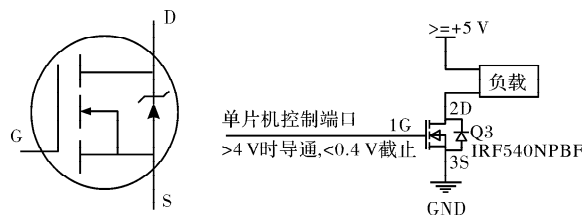


图 3 IR2101S 引脚图和应用电路

另外,由于上管采用外部自带电容器,激励电源数量比其他 IC 激励大幅减少,从工程上减少了控制变压器的体积和电源数量,降低了产品成本。可以提高系统可靠性。如图 4 所示 IR2101S 本身是半桥驱动,采用上桥下桥驱动方式,即一个驱动需要一个 IR2101S 和两个 MOS 管,共三路。所以电机驱动的成本很大一部分在这里。而且根据 MOS 管的不同应用和不同功率,需要考虑成本,尽量选择性价比高的 MOS 管。这里我们使用的 MOS 管为 IRF540N,IRF540N 来自国际整流器的先进 HEXFET 功率 MOS 场效应管采用先进的处理技术,实现每个硅面正低通电阻。这种优势,结合 HEXFET 功率 MOSFET 的快速开关速度和坚固的器件设计,为设计者提供了一个非常高效和可靠的设备,适用于各种应用。由于 IRF540N 主要用于为配件提供稳定电压,所以一般使用在 CPU、AGP 槽位、内存槽位附近。其中在 CPU 与 AGP 插槽附近各安排一组 IRF540N,IRF540N 一般是以两个组成一组的形式出现主板上的。IRF540N 是一个电压控制元件。只要在其电压控制元件上加上所需的电压,就可以使其导电。其导通与饱和状态的三极管相似,导通结的压降最小。U2 为 IR2101S, Q1 和 Q2 是 IRF540N

图中包括转子位置信号检测这里采用的霍尔传感器，然后还有电流采样电路用来保护电路。

4 国产化控制的驱动电路

设计国产化无刷直流电机驱动电路，我们这里主要采用的是上海居逸电子科技有限公司自主研发的无刷直流电机驱动芯片，这里我们用到了 JY01，JY213L，JY2605M，UTC317 这几个芯片。JY01 为无刷直流电动机专用驱动控制 IC，可应用于带霍尔霍尔的电机上，具有应用方便、外围电路简单、成本低、SPWM 驱动方式，以低噪声、高效率、质量稳定和完善的政策支持，迅速得到广大电子工程师的认可，已广泛应用于各个领域。各类直流无刷风扇、直流无刷泵、割草机、踏板车、平衡车、机器人、科学仪器设备、汽车燃油泵、电动车窗、电动座椅调节、空调风扇、电动后视镜调节，如吸尘器、空调、水暖设备等家电、高端儿童玩具、飞机模型、汽车模型、模型等；在手工工具上也得到了广泛的应用，如砂光机、手钻、雕刻机、电动螺丝刀等。下面是它的工作特性。

功能特性：

- 工作电压：4.5 V - 5.5 V
- 工作温度：-40 度 ~ 85 度
- 驱动方式：SPWM
- 转向控制：正/反
- 软换转向：有
- 转速信号：有
- 过载保护：有
- 电流闭环：有
- 恒流驱动：有
- 堵转保护：有
- 缓启功能：有
- 转速调节：线性
- 双模驱动：有霍尔/无霍尔
- 适应电机：无霍尔电机/有霍尔电机
- 缓启动时间分为 1S；3S；10S 三档可选
- 特有技术：JYKJ 全工况安全启动功能

JY213L 是一种用于功率 MOS 管和 IGBT 器件的高速三相门驱动器，具有三个独立的高、低侧参考输出通道，内置的死区保护和穿透保护，避免损坏半桥 UVLO 电路可以防止 VCC 和 VBS 电压低于

阈值时发生故障。一种新的高压 BCD 工艺和共模噪声抵消，保证了高侧驱动器在高噪声条件下的稳定运行，同时实现了良好的负瞬态电压容限，包括一个使能引脚(EN)，以便使用待机模式将芯片设置为低静态电流状态，以延长寿命，特别适用于三相电机用途的高速功率 MOSFET 和 IGBT 的栅极激励芯片内置死区时间和上下管直通保护，有防止半桥电路损坏的效果。为防止芯片工作低电源电压，输出管受到芯片内部锁止电路的损害，通过先进的高压 bcd 制程和内置共模噪声技术来消除该现象，同时驱动器高 dv/dt 噪音环境工作稳定，并具有芯片宽度范负瞬实态电压承受能力。为了延长电池的使用时间，可以通过控制 ENB 引脚使芯片处于低电流消耗的待机模式。如图 7 所示为其典型应用电路。

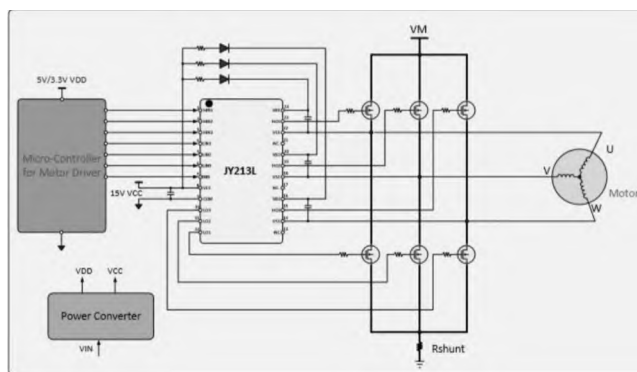


图 7 JY213L 典型应用电路

然后这里我们采用的是双 N 沟道 MOS 管 JY2605M。JY2605M 采用最新的沟槽处理技术，以实现高电池密度，并降低低栅极电荷的导通电阻。这些特性结合在一起，使这种设计成为一种极其高效和可靠的器件，适用于电源开关应用和各种各样的其他应用。如图 8 所示为其实物图和引脚图。

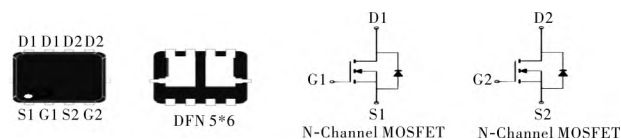


图 8 JY2605M 实物图和引脚图

这里的电源模块中我们用到了可调节三端正电压稳压器 UTC317。UTC317 是可调节的三端正电压稳压器，在输出电压范围 1.2 V 到 37 V 时能够提供超过 1.5 A 的电流，非常易于使用。如图 9 所示是我所设计的国产化无刷直流电机驱动电路。

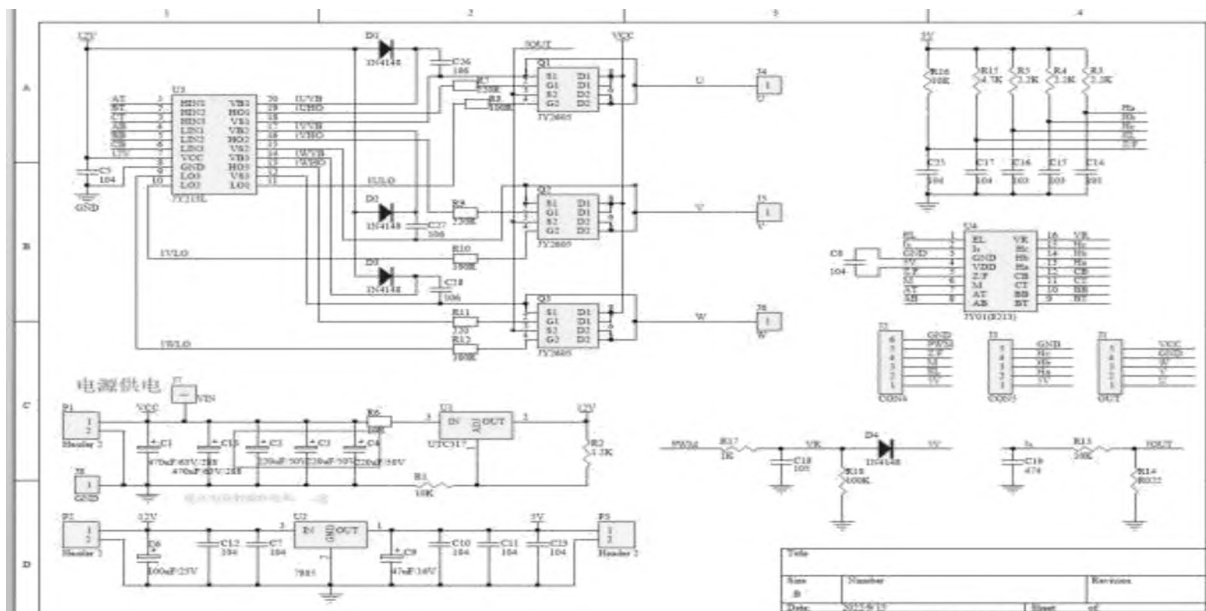


图9 国产化驱动电路

图中包含多个模块，电源模块，位置检测模块，电流采样模块。电源模块用于提供电源，这里我们所用到的电源有 0-5 V 调速电源以及 24 电机工作电源。位置检测模块这里我们同样使用的是霍尔传感器，JY01 芯片中包含霍尔信号检测，电流采样模块用来采集三个 MOS 中的电流以及功率，这里的采样电阻使用的是 22 毫欧的电阻，驱动电路这里我们采用的是 JY01 + JY213L + JY2605M。经过实验，发现这款电路能够正常的实现无刷电机控制的一些基本功能，如调速，正反转，使能控制等。这里的调速我们可以使用电位器调节 0-5 V 电压来控制电机的转速，也可以使用单片机，DSP，FPGA 等来产生 PWM 信号进行模拟电压调速。后期计划使用国产 FPGA 配合这款国产化驱动电路来实现无刷直流电机控制的更复杂的功能，如电流速度的双闭环控制等^[9]。如图 10 和图 11 所示为这款驱动电路的 PCB 图和 3D 图。

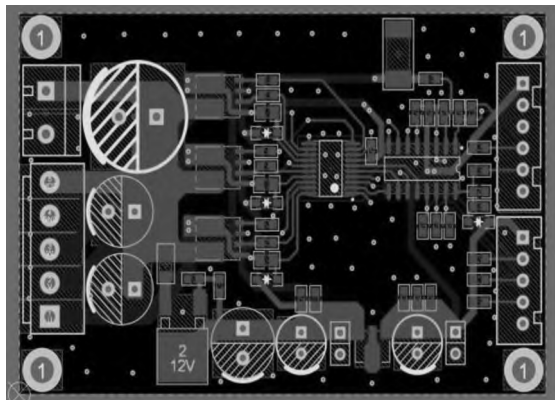


图10 国产化控制驱动电路 pcb 图

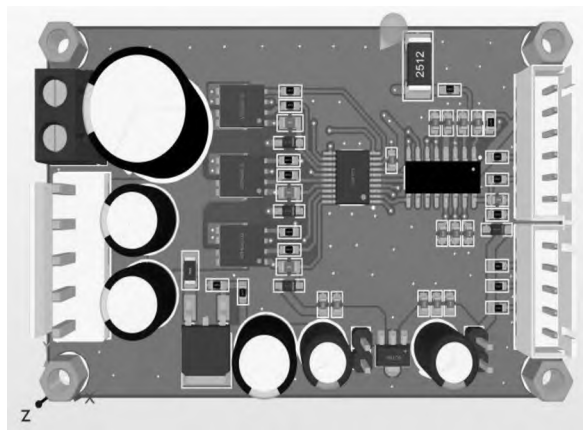


图11 国产化控制驱动电路 3D 图

5 结 语

无刷直流电机广泛应用于各种应用需求，汽车，航空，自动化系统等，并且经过近几十年的发展，无刷直流电机在技术上也日益成熟^[10]，表现出优良的特性，深受市场欢迎，未来很有可能代替有刷直流电机的主体地位，并且在国产化时代，国产化芯片的潮流下，设计一款完完整整的国产化无刷直流电机驱动电路是非常有必要的，本文设计并提出了一款国产化无刷直流电机驱动电路可以实现一些常见的功能，如电机的正反转，调速，使能控制等，能够满足日常所需。可以使用电压调速，也可以使用 PWM 模拟电压调速。后期为完整的实现国产化控制，我们可以利用国产单片机或 DSP，FPGA 产生 PWM 波，输送给驱动板来实现电机的调速，当然也可以使用算法搭配一个简单的逆变电路来实现无刷直流电机的控制。

(下转第 81 页)

表3 闭口槽不同桥拱高度电磁参数对比表

桥拱高 h_{02} /mm	0.2	0.5	1
最大转矩倍数	2.03	1.58	1.12
效率 /%	91.9	91.5	89.9
功率因数	0.90	0.87	0.79
转子铝耗 /kW	3.20	3.34	3.98
总损耗 /kW	20.42	21.30	24.27

从上表可见,槽口(桥拱)高度 h_{02} 越小,电机最大转矩倍数越大。因为依据式(1)和式(2), h_{02} 越小,槽比漏磁导 λ_s 越小,槽漏抗 X_s 就越小。依据式(3),总漏抗 X_σ 越小,电机转矩倍数就越大。同时槽口(桥拱)高度 h_{02} 越小,效率和功率因数也越高,损耗也小。

这种关系在闭口槽转子中表现的尤为明显,对闭口槽的影响也更大。所以,铸铝转子如果设计为闭口槽,随着 h_{02} 的增加,电机的整体性能将显著下降。当 h_{02} 大于 1 mm 时,电机的最大转矩倍数将接近 1,已难以满足正常起动和制动要求。其变化关系如图 4 所示。

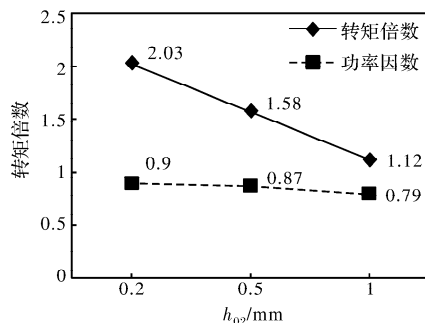


图4 闭口槽桥拱高度与转矩倍数、功率因数关系

3 槽型选取原则

根据以上分析可见,铸铝转子半闭口槽和闭口槽各有优缺点,在设计时需根据应用需求进行选择。

(1) 铸铝转子采用半闭口槽,齿部脉振损耗将会增大,也会产生一定的电磁噪声。但根据以上计算对比可见,其转矩倍数、效率和功率因数均优于

闭口槽。在这些特性要求较高的电机中应优先设计为半闭口槽。

(2) 铸铝转子采用闭口槽,减小了气隙磁阻,激磁电流相对来讲要小一些,产生的铝损耗也就小一些。同时有效减少铁心表面磁通脉振产生的附加损耗,电磁噪声也有一定程度的降低,这是闭口槽的优势。但转子采用闭口槽,因槽漏抗增大,其转矩倍数、功率因数和效率均不如半闭口槽。

(3) 铸铝转子的槽口(桥拱)高度对电机性能影响较大,特别是在闭口槽中。随着 h_{02} 的增加,转子漏抗也在增大,功率因数、效率和转矩倍数都会明显下降。因此采用闭口槽时应同时兼顾起动和过载能力数据的变化不能低于标准允许的限值。

(4) 转子闭口槽 h_{02} 越小,电机各方面性能越优。但 h_{02} 过小,加工工艺和制造过程难度又会增大。 h_{02} 为 0.2 mm 以下时闭口槽的电机特性基本接近于半闭口槽。

4 结 语

随着铸铝转子在异步牵引电机和轨道交通领域的应用,其较高的电磁负荷和运行特性对铸铝转子性能也提出更高的要求。本文关于铸铝转子槽口设计的探究和成果,对其它产品转子槽型设计也具有较高的参考价值和借鉴意义。

参考文献

- [1] 陈世坤. 电机设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [2] 阎治安, 崔新艺, 苏少平. 电机学[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2008.
- [3] 赵海森, 刘晓芳, 杨亚秋, 等. 基于有限元分析的超高效电机定子槽型优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2011.
- [4] 陈永校, 汤宗武. 小功率电动机[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [5] 傅丰礼, 戴政. 异步电动机起动等效槽口宽的计算[J]. 微电机, 1990.

(上接第71页)

参考文献

- [1] 梁超, 段富海, 邓君毅, 等. 无位置传感器无刷直流电机控制方法综述[J]. 微电机, 2021, 54(2): 99-103.
- [2] 任志斌, 陈柳彬, 房梦程. BLDC 新型无位置传感器调速系统实现[J]. 微电机, 2021, 54(10): 79-83.
- [3] 肖云峰, 徐康, 马丽梅, 等. 新型无刷直流电机结构与性能分析[J]. 微电机, 2021, 54(9): 33-36, 42.
- [4] 牧雅璐, 刘景林, 曹祯芝, 等. 无刷直流电机无位置传感器单相反电势检测法[J]. 微电机, 2020, 53(10): 27-31.
- [5] 应群伟, 谢控勤. 一种 BLDCM 反电动势过零检测方法[J]. 微

处理机, 2009(4): 30-04.

- [6] 寇元超, 郝珂庆, 王志业, 等. 一种降低无刷直流电机非导通相续流的 PWM 调制方式研究[J]. 微电机, 2020(12): 53-12.
- [7] 范承志, 王宇峰, 林小娥, 等. 一种无位置传感器无刷直流电机驱动电路[J]. 微电机(伺服技术), 2001(3): 25-3.
- [8] 张安, 康东, 解洪亮. DSP 在无刷直流电动机中的应用[J]. 电子世界, 2012(13): 61-62.
- [9] 闫冉. 基于 FPGA 的无刷直流电机控制系统的仿真及研究[J]. 信息通信, 2018(3): 3-483.
- [10] 胡申旦, 杨进. 无位置传感器永磁无刷直流电机位置检测误差因素分析[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(6): 91.