

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2026.01.009

电机滑行状态下霍尔位置传感器的偏差校正方法

陈 炜¹, 隋月帅¹, 阎 彦²

(1. 天津工业大学 电气工程学院, 天津 300387; 2. 浙江大学 电气工程学院, 杭州 310027)

摘要: 针对无刷直流电机霍尔位置传感器受到安装精度的限制容易出现安装偏差的问题, 提出了一种在电机自由滑行状态下的霍尔位置传感器安装偏差校正方法。关断逆变器开关管的开关信号, 电机进入滑行状态, 通过构造虚拟中性点检测反电动势(ZMF)过零点信息, 识别霍尔位置传感器的安装偏差。结果表明: 所提方法可以有效避免开关管斩波对反电动势过零点检测的干扰, 提高反电动势过零点信号的检测精度, 有利于霍尔位置传感器偏差角度识别; 当 A、B、C 相霍尔位置传感器分别引入安装偏差约为滞后 15° 和超前 10°、0° 电角度时, 校正后三相霍尔信号的绝对误差分别约为超前 0.3°、超前 1.22° 和滞后 0.77° 电角度。

关键词: 无刷直流电机; 霍尔位置传感器; 安装偏差; 自由滑行状态; 反电动势过零点

中图分类号: TM351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-024X(2026)01-0063-07

Correction method for Hall position sensors misalignment of motor in free coasting condition

CHEN Wei¹, SUI Yueshuai¹, YAN Yan²

(1. School of Electrical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problem that the Hall position sensor of brushless direct current motor (BLDCM) is prone to installation misalignment due to the limitations of installation accuracy, an installation misalignment correction method for Hall position sensor of motor in free coasting condition is proposed. The switching signal of the inverter is turned off, and the motor enters the free coasting condition. A virtual neutral point is constructed to detect the back electromotive force (EMF) zero crossing signal, the installation misalignment of the Hall position sensor is identified. The results show that the proposed method effectively mitigates the interference of inverter chopping on the detection of the back EMF zero crossing signal, improves the detection accuracy of the back EMF zero crossing signal, and helps to identify the misalignment angle of the Hall position sensor. When the installation misalignments of phases A, B, and C Hall position sensor are approximately 15° lagging, 10° leading, and 0° leading in electrical angle, respectively, the absolute errors of the three-phase Hall signal after correction are approximately 0.3° leading, 1.22° leading, and 0.77° lagging in electrical angle.

Key words: brushless direct current motor (BLDCM); Hall position sensor; installation misalignment; coasting condition; back electromotive force (EMF) zero crossing

无刷直流电机 (brushless direct current motor, BLDCM) 具有结构简单、效率高、功率密度大等优点, 被广泛应用于家用电器、航空航天、电动汽车、工业生产等领域^[1-4]。在有位置传感器的电机控制系统中, 转子位置信号是实现正确换相的关键依据。霍尔位置传感器因成本低廉、抗干扰能力强、体积小等优点被广

泛应用于无刷直流电机的转子位置检测^[5-8]。

为了实现无刷直流电机两两导通的三相六步换相驱动方式, 将 3 个霍尔位置传感器相隔 120° 电角度安装, 在 1 个电周期内共提供 6 个转子位置信息。霍尔位置传感器有 2 种安装方式: 一种是与电机本体一体的安装方式, 将霍尔芯片直接安装在定子铁心槽口

收稿日期: 2024-04-07

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目(U23A20643); 国家自然科学基金重大项目(51991383)

通信作者: 陈 炜(1977—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电机系统及其控制技术。E-mail: chen_wei@tiangong.edu.cn

或齿顶的凹槽,这种方式更节省空间,但更容易受到定子电枢反应磁场变化的干扰和发热的影响;另一种是与电机本体分离安装的方式,将霍尔位置传感器和一些阻容元件焊接在一块印刷电路板上,电路板固定在定子支架或者端盖上,感应磁场可以由电机本体永磁转子提供,也可以由另外安装在转轴上的永磁转子提供。分离安装的方式便于调整位置传感器的位置,具有一定的安装灵活性。在分离安装方式下,需要使用原动机对电机进行反拖,通过测量反电动势和霍尔信号对应相位关系来确定霍尔位置传感器的安装位置^[9]。在极对数较多或者小型电机中,霍尔位置传感器的 2 种安装方式容易受到安装工艺的限制,使得霍尔位置传感器的安装不可避免地出现偏差^[10-14]。另外,电机在长时间的运行中,不可避免地震动会使得霍尔位置传感器的安装位置出现偏移,使得无刷直流电机的换相精度受到影响。换相偏差导致逆变器不对称工作,在一个电周期内扇区划分不均等,电流波形出现畸变。因此,对电机霍尔位置传感器进行偏差校正显得十分必要。

目前存在的无刷直流电机换相偏差校正方法大致概括为 2 类。一类是对换相信号本身进行研究。文献[15-16]将霍尔信号的高阶谐波滤除,利用基波分量进行转子位置和转速计算,利用反正切函数解算转子位置和转速,但是滤波器造成的相位偏移会影响该方法的计算精度;文献[17]构造了恒速工况,通过“在一个电周期内转子位置和时间成线性关系”计算出扇区长度,进而计算出霍尔信号的偏差角度,但该方法对于速度的稳定性要求较高。另一类是根据电机电压或电流信息获得换相误差信息,提取出信息中可反映换相点偏移角度的变量。文献[18-19]分别利用相电流和直流链路电流进行霍尔位置传感器的偏差校正,考虑到了换相偏差对电机电流的影响,但使用电流在校正偏差时需要考虑电机的运行工况。文献[20]将单位反电动势矢量交叉乘积,使用比例积分型控制器使位置误差快速收敛到零;文献[12]通过构造虚拟中性点,利用反电动势过零点来计算绝对位置偏差。但是上述 2 种方法在提取反电动势信号时易受到逆变器斩波干扰。

本文以确定霍尔位置传感器的偏差角度、校正霍尔位置传感器的安装偏差为目标,提出一种在电机转子自由滑行状态下的霍尔位置传感器安装偏差校正方法。充分利用关断逆变器开关管的驱动信号,在转子依靠惯性自由滑行的阶段检测相反电动势的过零点,利用电机转速计算过零点和霍尔信号跳变沿之间的角度,识别出霍尔位置传感器的安装偏差,在电机

再次运行时进行偏差校正。由于在转子自由滑行状态进行偏差识别,该方法可以避免开关管斩波对反电动势检测的干扰,提高了反电动势过零点信号的检测精度。最后,本文通过实验验证了所提方法的可行性和有效性。

1 无刷直流电机换相偏差分析

1.1 无刷直流电机数学模型

因为具有正弦反电动势的无刷直流电机拥有铁损耗小、制造成本低廉、应用广泛等优点^[13,21],故本文选择正弦反电动势电机作为研究对象。图 1 为无刷直流电机系统等效电路。

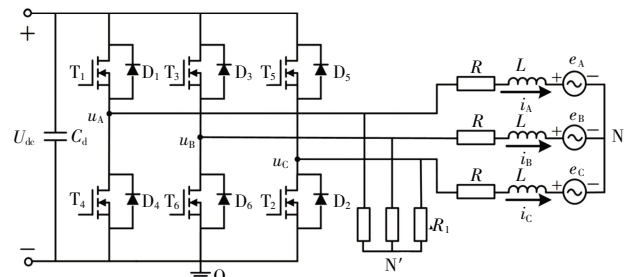


图 1 无刷直流电机系统等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of BLDCM system

无刷直流电机系统的等效电路由直流电源、三相逆变器、无刷直流电机和虚拟中性点电阻网络构成。 T_1-T_6 为三相逆变电路开关管; D_1-D_6 为对应开关管的反并联二极管; U_{dc} 为直流电源电压; C_d 为直流母线电容; O 为电压参考零点; u_N 为电机中性点电压; N' 为虚拟中性点($R_1 \gg R$), $u_{N'}$ 为电机虚拟中性点电压。忽略开关管压降及其自身结构产生的影响,则电机三相绕组端电压方程为

$$\begin{cases} u_A = Ri_A + L \frac{di_A}{dt} + e_A + u_N \\ u_B = Ri_B + L \frac{di_B}{dt} + e_B + u_N \\ u_C = Ri_C + L \frac{di_C}{dt} + e_C + u_N \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_A, u_B, u_C 为电机三相绕组端电压; i_A, i_B, i_C 为三相相电流,相电流的参考方向见图 1; e_A, e_B, e_C 为相反电动势; R 和 L 分别为定子绕组的相电阻和相电感。永磁无刷直流电机可由三相绕组的电磁功率得到其电磁转矩的表达式为:

$$T_e = \frac{e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C}{\omega_m} \quad (2)$$

式中: T_e 为电机输出的电磁转矩; ω_m 为电机转子机械角速率。

1.2 霍尔位置传感器偏差对电机换相的影响

无刷直流电机在两相导通模式下工作,这意味着在每个换相周期内有 2 相绕组处于导通状态,另 1 项绕组处于悬空状态。传统的无刷直流电机相电流通常为 120°导通、60°关断的方波,以 3 个安装相隔 120°电角度的霍尔位置传感器提供的霍尔信号跳变沿作为换相依据,将 360°电周期分为 6 个换相周期,在换相周期内开通对应相开关管,产生电磁转矩,其对应关系如图 2 所示。图 2 中: θ 为电机电角度; H_A 、 H_B 、 H_C 分别为 A、B、C 三相霍尔信号。以 A 相为例进行分析,当霍尔信号 H_A 上升沿跳变时,关断 T_5 开关管,开通 T_1 开关管,电机电流从 C+B 转换为 A+B, i_A 作为开通相开始正向导通。理想情况下, H_A 上升沿跳变对应相反电动势 e_A 过零点延迟 30°电角度。

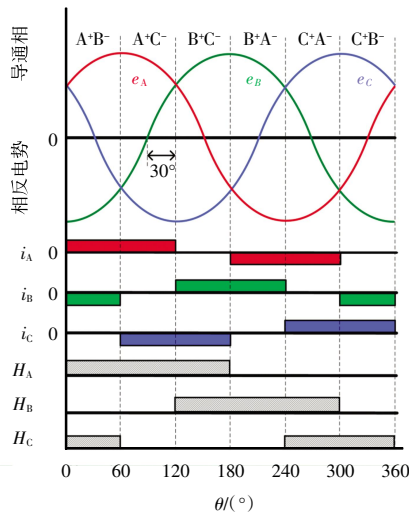


图 2 无刷直流电机反电动势、相电流及霍尔信号关系

Fig.2 Relationship between phase back EMF, phase current, and Hall signal of BLDCM

根据式(2)所示,无刷直流电机的电磁转矩与三相电流和反电动势的乘积呈正相关,当电机的定子绕组中通入与相反电动势同相位的理想方波电流时,电机输出最大电磁转矩。所以,正确的换相点在相反电动势过零点滞后 30°电角度,理想的霍尔信号与电机反电动势和电流的关系见图 2。

采用实线表示理想情况下的霍尔信号,虚线表示具有偏差的霍尔信号,如图 3 所示。

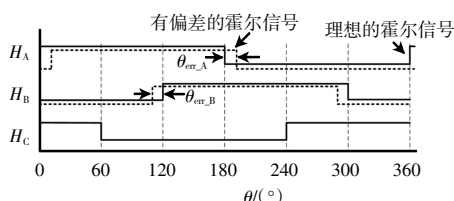


图 3 理想的霍尔信号、有偏差的霍尔信号示意

Fig.3 Schematic of ideal Hall signal and deviated Hall signal

图 3 中: H_A 为滞后安装 $|\theta_{err,A}|$ 电角度; H_B 为超前安装 $|\theta_{err,B}|$ 电角度; H_C 表示安装没有偏差。将三相霍尔位置传感器的偏差角度记为 $\theta_{err,k}$ ($k = A, B, C$)。如果 $\theta_{err,k} < 0$, 表示安装超前;如果 $\theta_{err,k} > 0$, 表示霍尔位置传感器安装滞后。

2 霍尔位置传感器偏差校正方法

2.1 滑行状态下反电动势过零点检测

关断逆变器开关管的驱动信号,无刷直流电机转子处于自由滑行状态时,电机三相都为悬空相,二极管处于反向截止状态,且由于电阻 $R_1 \gg R$, 所以三相定子绕组电流 i_A, i_B, i_C 接近为 0。由式(1)可得:

$$u_{N'} = \frac{u_A - u_B - u_C}{3} = \frac{e_A + e_B + e_C}{3} + u_{N'} \quad (3)$$

因为正弦反电动势电机满足三相反电势之和为 0,所以在无刷直流电机转子自由滑行中,电机中性点 N 和虚拟中性点 N' 二者可以进行电压等效,即 $u_N = u_{N'}$ 。对于中性点未引出的电机来说,电机相反电动势信号可以通过检测对应相与虚拟中性点的电压差得到

$$\begin{cases} e_A = u_A - u_{N'} \\ e_B = u_B - u_{N'} \\ e_C = u_C - u_{N'} \end{cases} \quad (4)$$

使用过零点比较器检测端电压和虚拟中性点的电压信号可以得到反电动势过零点信号。当电机处于自由滑行阶段时,由于开关管全部关断,反电动势过零点检测不会受到开关管的斩波干扰,提高了反电动势过零点检测精度。

2.2 霍尔位置传感器安装偏差计算方法

为了在霍尔信号出现偏差时尽可能准确地计算出电机转速,使用高频计数器记录单相霍尔信号高电平和低电平持续时间 T_n ($n = 1, 2, 3, \dots, m$), 利用式(5)计算出转子在滑行过程中的平均电角速率:

$$\omega_{avg} = \frac{180}{\sum_{n=1}^m T_n} \cdot m \quad (5)$$

式中: m 为记录时间间隔 T_n 的个数; ω_{avg} 为电机在 m 个 T_n 时间内的平均电角速度。

以 A 相霍尔信号滞后、B 相霍尔信号超前为例进行分析,如图 4 所示。在相反电动势过零点时刻 t_0 到霍尔信号跳变沿时刻 t_1 期间对转速 ω_{avg} 进行积分,如式(6)所示,得到相反电动势过零点和霍尔信号跳变沿之间的角度值 $\theta_{EH,kw}$ ($k = A, B, C; w = 1, 2, 3, \dots, 2p$), p 表示电机极对数。由于相反电动势过零点超前于理想的霍尔信号 30°电角度,因此积分值 $\theta_{EH,kw}$ 需要减去

30°电角度即可得到霍尔位置传感器偏差角度 θ_{err_kw} 。霍尔位置传感器偏差角度 θ_{err_kw} 的计算过程如式(6)所示:

$$\begin{cases} \theta_{EH_kw} = \int_{t_0}^{t_1} \omega_{avg} dt \\ \theta_{err_kw} = \theta_{EH_kw} - 30^\circ \end{cases} \quad (6)$$

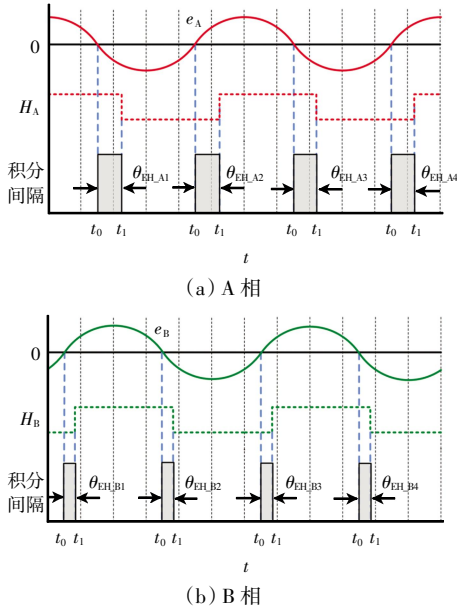


图 4 相反电动势过零点和霍尔信号跳变沿之间积分区域示意
Fig.4 Integral region between phase back EMF zero crossing and Hall signal jump edge

为了避免偶然性,减少偏差角度计算误差,对一个机械周期内计算出来的 $2p$ 个 θ_{err_kw} 取平均值:

$$\theta_{err_k} = \frac{\theta_{err_k1} + \theta_{err_k2} + \dots + \theta_{err_k2p}}{2p} \quad (7)$$

图 5 为无刷直流电机滑行状态下霍尔位置传感器偏差校正方法的整体框图。电机通过转速和电流 PI 控制生成占空比。PWM 发生器结合占空比生成脉冲信号控制逆变器,实现电机正常运行。

拓扑结构中使用 3 个阻值相同的电阻 R_1 构造电机的虚拟中性点 u_N , 电阻 R_1 阻值远大于电机绕组阻值($R_1 \gg R$)。在电机自由滑行阶段进行霍尔位置传感器的偏差角度识别,本文方法使用三路过零点电压比较器,将虚拟中性点电压 u_N 和电机端电压 u_A, u_B, u_C 分别进行比较,得到相反电动势过零点信号。

转子处于自由滑行阶段时执行偏差计算的程序段。控制器利用霍尔信号 H_A, H_B, H_C 计算出电机滑行时的转速 ω_{avg} , 将相反电动势过零点至该相霍尔信号跳变沿之间的区间定义为积分区间。在积分区间内对电机转速进行积分,通过计算得到霍尔位置传感器的偏差角度 θ_{err_kw} 。为了避免偶然性,选择对一个机械周期内计算出来的偏差角度 θ_{err_kw} 取平均值得到 θ_{err_k} , 将其储存在寄存器中。

在电机运行阶段执行位置补偿程序段。电机再次运行时,利用电机转速对有偏差的霍尔信号 H_A, H_B, H_C 进行校正:读取寄存器中的霍尔偏差角度 θ_{err_k} , 当偏差角度 $\theta_{err_k} < 0$ 时,将霍尔信号 H_k 延迟 $|\theta_{err_k}|$ 电角度,以校正超前安装偏差;当 $\theta_{err_k} > 0$ 时,在霍尔信号 H_k 跳变沿时开始,在转子转过 $180^\circ - |\theta_{err_k}|$ 电角度后将霍尔信号 H_k 进行翻转,以校正滞后安装偏差。偏差校正后,电机使用校正后的霍尔信号 H'_A, H'_B, H'_C 控制电机换相。

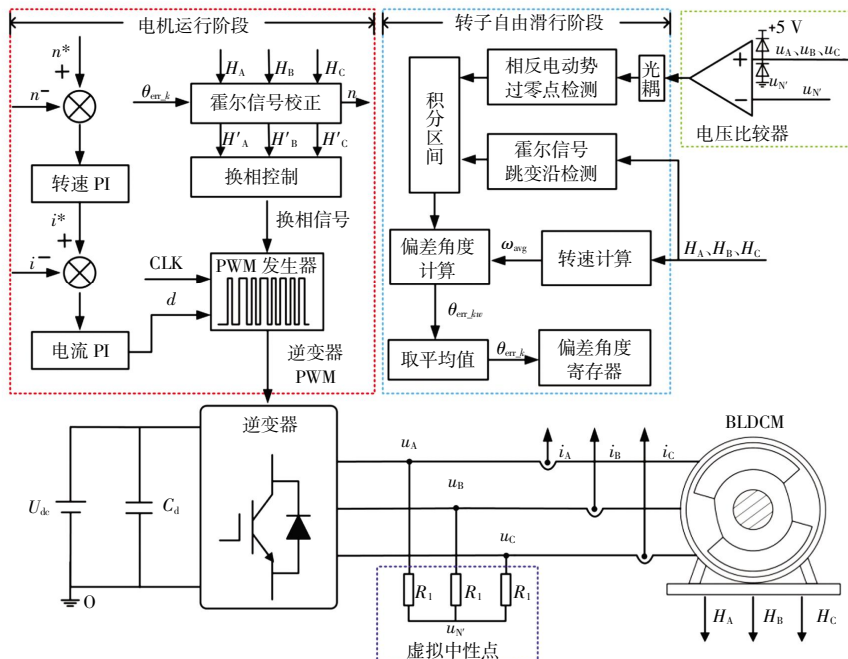


图 5 本文方法的整体框图

Fig.5 Overall block diagram of the proposed method

3 硬件实现与实验验证

为了验证理论分析的正确性和提出策略的有效性,搭建了图 6 所示的实验平台,系统由 DSP 和 FPGA 搭建,直流电源由 Keysight N7973A 提供,使用 Magtrol 电机测试系统为电机提供负载,虚拟中性点电阻 R_1 阻值为 5 k Ω 。实验所选用的电机参数如表 1 所示。

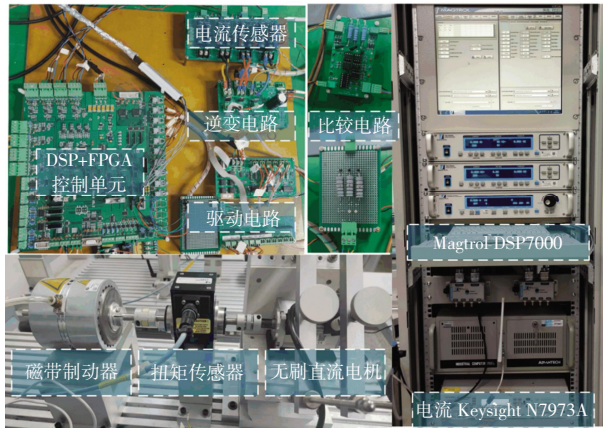


图 6 实验系统实物

Fig.6 Physical object of experimental system

表 1 实验选用 BLDCM 参数

Tab.1 Parameters of BLDCM

参数	数值	参数	数值
额定电压 U_N / V	48	额定电流 I_N / A	10
额定功率 P_N / W	400	线电阻 R_l / Ω	0.23
额定转矩 T_N / (N·m)	1.27	线电感 L_l / mH	0.36
额定转速 n_N / (r·min ⁻¹)	3 000	转动惯量 J / (g·m ²)	0.042
极对数 p	5		

使用 5 对极轴向充磁的小磁块给霍尔位置传感器提供感应磁场,小磁块 N、S 均匀交替排列,通过磁盘固定在电机转轴上,错位的霍尔位置传感器安装在印刷电路板上,采用铝制支架将印刷电路板固定在磁盘表面。为了验证所提方法的有效性,本文在安装霍尔位置传感器时引入了偏差角度 $\theta_{in,k}$,A 相霍尔位置传感器滞后安装 15°电角度,B 相霍尔位置传感器超前安装 10°电角度,C 相霍尔位置传感器不引入安装偏差,其中 $\theta_{in,A} = 15^\circ$ 、 $\theta_{in,B} = -10^\circ$ 、 $\theta_{in,C} = 0^\circ$ 。由于安装工艺精度限制,实际情况中霍尔位置传感器不能准确安装至给定偏差角度,会存在一定安装偏差。

电机运行在 3 000 r/min 额定转速空载情况下,关断开关管,转子进入自由滑行状态。为突出本文在反向电势过零点检测上的优势,给出了电机在运行状态和自由滑行状态时的 u_{AN} 、 u_{BN} 、 u_{CN} 波形,如图 7 所示。

在滑行阶段, u_{AN} 、 u_{BN} 、 u_{CN} 可以等效为相反电动势 e_A 、 e_B 、 e_C 。由图 7 可知,状态切换前后波形噪声出现显

著差异,说明在转子自由滑行时检测相反电动势过零点具有明显优势。

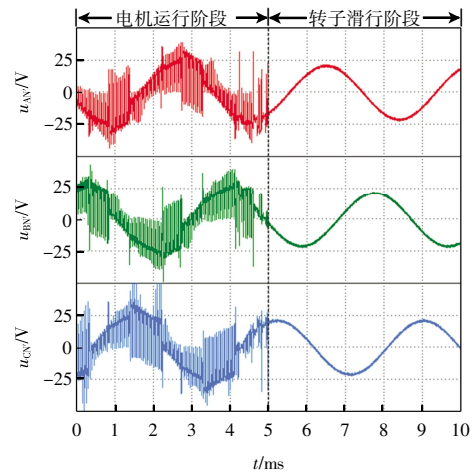


图 7 电机运行阶段和转子滑行阶段 u_{AN} 、 u_{BN} 、 u_{CN} 波形

Fig.7 u_{AN} 、 u_{BN} and u_{CN} waveforms of motor running stage and rotor coasting stage

霍尔位置传感器的偏差角度计算如图 8 所示。

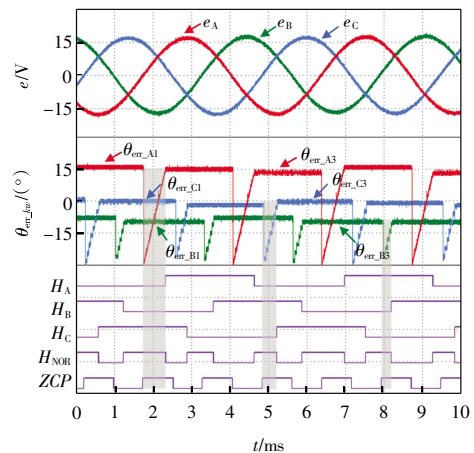


图 8 霍尔位置传感器偏差角度计算

Fig.8 Calculation of Misalignment angle of Hall position sensor

由图 8 可知,当转子进入自由滑行状态时,通过过零点比较器得到相反电动势过零点 ZCP 信号,在相反电动势过零点到霍尔信号 H_A 、 H_B 、 H_C 跳变沿之间对转子转速进行积分,积分区域为图 8 中阴影部分,得到的角度 $\theta_{EH,kw}$ 与 30°电角度做差即可以得到每相霍尔位置传感器的偏差角度 $\theta_{err,kw}$ 。

表 2 为计算所得霍尔位置传感器偏差角度 $\theta_{err,kw}$ 。

利用式(7)对表 2 中的一个机械周期内的单相霍尔位置传感器偏差角度取平均值得到 $\theta_{err,k}$,则所提方法识别出三相霍尔位置传感器的偏差电角度分别为 $\theta_{err,A} = 15.3^\circ$ 、 $\theta_{err,B} = -8.78^\circ$ 、 $\theta_{err,C} = -0.77^\circ$ 。在电机再次运行时根据识别出的偏差角度对霍尔信号进行校正,校正后的三相霍尔信号绝对误差 $\theta_{abs,k}$ 可以由引入的安

表 2 霍尔位置传感器偏差角度实验数据

Tab.2 Experimental data of misalignment angle for Hall position sensor

偏差角度	$k = A$	$k = B$	$k = C$
$\theta_{err,k1}$	17.7°	-7.5°	1.4°
$\theta_{err,k2}$	14.1°	-9.4°	-1.7°
$\theta_{err,k3}$	15.7°	-8.3°	-0.3°
$\theta_{err,k4}$	16.2°	-7.9°	-0.5°
$\theta_{err,k5}$	15.9°	-7.9°	-0.6°
$\theta_{err,k6}$	14.9°	-9.1°	-2.9°
$\theta_{err,k7}$	15.3°	-8.9°	0.6°
$\theta_{err,k8}$	13.7°	-9.1°	-1.8°
$\theta_{err,k9}$	14.7°	-9.9°	-1.6°
$\theta_{err,k10}$	14.8°	-9.8°	-0.3°
$\theta_{err,k}$	15.3°	-8.78°	-0.77°

装偏差 $\theta_{int,k}$ 与所提方法识别出的偏差角度 $\theta_{err,k}$ 做差得到, 如式(8)所示, 可得 $\theta_{abs,A} = -0.3^\circ, \theta_{abs,B} = -1.22^\circ, \theta_{abs,C} = 0.77^\circ$ 电角度。

$$\theta_{abs,k} = \theta_{int,k} - \theta_{err,k} \quad (8)$$

图 9 为电机运行在 600 r/min、1.27 N·m 工况下霍尔信号校正前和校正后的电机三相电流和换相信号。

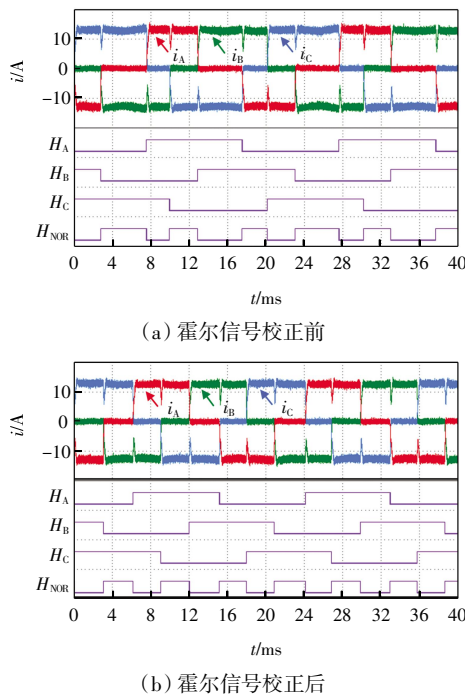


图 9 霍尔信号校正前后扇区长度 H_{XOR}, H'_{XOR} 对比

Fig.9 Comparison of sector lengths H_{XOR}, H'_{XOR} of Hall signal before and after correction

图 9 中: H_A, H_B, H_C 是未校正的霍尔信号; H'_A, H'_B, H'_C 是校正之后的霍尔信号; H_{XOR}, H'_{XOR} 代表校正前后三相霍尔信号的异或信号, 在霍尔信号发生跳变时 H_{XOR}, H'_{XOR} 发生翻转, 可以直观地反映出扇区长度。校正前扇区长度分别为 $84.7^\circ, 43.7^\circ, 50.9^\circ, 83.7^\circ, 44.5^\circ, 52.5^\circ$, 校正后分别为 $58.16^\circ, 62.2^\circ, 60.19^\circ, 59.17^\circ,$

$61.2^\circ, 59.17^\circ$, 理想情况下扇区长度为 60° 。由对比可知, 实施校正方法后, 有效改善了电机运行扇区长度不均等的问题。

为验证校正角度的准确性, 本文在控制开关管关断之后, 检测了相反电动势、线反电动势和校正前后霍尔信号的对应关系, 结果如图 10 所示。

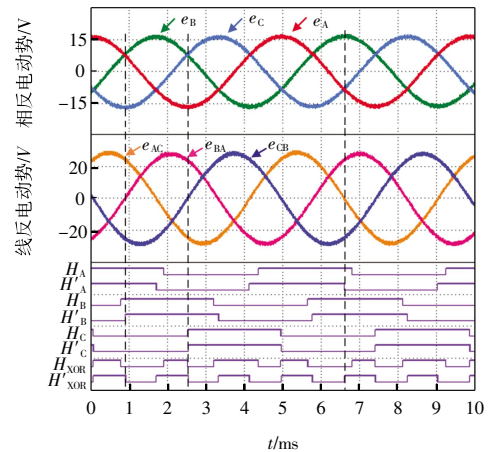


图 10 反电动势和校正前后霍尔信号波形

Fig.10 Waveforms of back EMF and Hall signal before and after correction

图 10 中, 理想情况下霍尔信号跳变沿对应两相反电动势的交点, 对应线反电动势过零点。校正之后的霍尔信号 H'_A 的跳变沿对应 e_A 和 e_C 的交点, H'_B 的跳变沿对应 e_B 和 e_A 的交点, H'_C 的跳变沿对应 e_C 和 e_B 的交点, 因此能够证明本文方法对偏差角度进行校正的准确性。

4 结论

针对霍尔位置传感器因受到安装工艺的限制, 不可避免地出现安装偏差的问题, 本文提出在电机滑行状态下利用相反电动势过零点信号进行霍尔位置传感器的偏差校正, 并通过实验验证了所提方法的可行性和有效性。实验结果表明:

(1) 电机滑行状态下, 逆变器全部关断, 采集相反电动势过零点时不会受到逆变器斩波的干扰, 提高了过零点的检测精度。

(2) 当 A、B、C 相霍尔位置传感器分别引入安装偏差约为滞后 15° 、超前 $10^\circ, 0^\circ$ 电角度时, 校正后三相霍尔信号的绝对误差分别约为超前 0.3° 、超前 1.22° 、滞后 0.77° 电角度。

(3) 本文方法充分利用电机运行结束后至停转期间转子自由滑行的工况, 适合作为电机正常运行结束后的一种位置传感器自检方案, 具有实际应用价值。

参考文献:

- [1] XIA C L, JIANG G K, CHEN W, et al. Switching-gain adaptation current control for brushless DC motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(4): 2044–2052.
- [2] KHAZAEE A, ZARCHI H A, MARKADEH G A, et al. MT-PA strategy for direct torque control of brushless DC motor drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(8): 6692–6700.
- [3] BURNAND G, THABUIS A, ARAUJO D M, et al. Novel optimized shape and topology for slotless windings in BLDC machines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(2): 1275–1283.
- [4] 郑碧凝, 李新旻, 张国政, 等. 一种提高变流器效率的无刷直流电机速度控制策略[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(10): 32–37.
- ZHENG B N, LI X M, ZHANG G Z, et al. A speed control strategy for brushless DC motor to improve converter efficiency is presented[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(10): 32–37(in Chinese).
- [5] 郑杰, 曹太强, 司国雷, 等. 基于开关型霍尔传感器的PMSM转子位置估计方法研究[J]. 电源学报, 2023, 21(3): 139–147.
- ZHENG J, CAO T Q, SI G L, et al. Research on estimation method for PMSM rotor position based on switch-type Hall sensor[J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(3): 139–147(in Chinese).
- [6] 张懿, 张明明, 魏海峰, 等. 基于霍尔传感器的永磁同步电机高精度转子位置观测[J]. 电工技术学报, 2019, 34(22): 4642–4650.
- ZHANG Y, ZHANG M M, WEI H F, et al. High precision rotor position observation of permanent magnet synchronous motor based on Hall sensors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(22): 4642–4650(in Chinese).
- [7] PAPATHANASOPOULOS D A, SPYROPOULOS D V, MITRONIKAS E D. Fault diagnosis of misaligned Hall-effect position sensors in brushless DC motor drives using a Goertzel algorithm[C]//2019 IEEE 12th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED). Toulouse, France:IEEE, 2019:167–173.
- [8] ZHANG C L, LI B R, YE P Q, et al. Analysis and compensation of hall sensor-based position detection errors in TPM-SLM[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(20): 22612–22622.
- [9] ALAEINOVIN P, CHINIFOROOSH S, JATSKEVICH J. Evaluating misalignment of hall sensors in brushless DC motors[C]//2008 IEEE Canada Electric Power Conference. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2008: 1–6.
- [10] NI Q N, YANG M, ODHANO S A, et al. A new position and speed estimation scheme for position control of PMSM drives using low-resolution position sensors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(4): 3747–3758.
- [11] AHN H J, LEE D M. A new bumpless rotor-flux position estimation scheme for vector-controlled washing machine[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(2): 466–473.
- [12] PARK J S, CHOI J H, LEE J. Compensation method of position signal error with misaligned Hall-effect sensors of BLDC motor[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2016, 11(4): 889–897.
- [13] PARK J S, LEE K D. Online advanced angle adjustment method for sinusoidal BLDC motors with misaligned hall sensors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(11): 8247–8253.
- [14] BASZYNSKI M, PIROG S. A novel speed measurement method for a high-speed BLDC motor based on the signals from the rotor position sensor[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(1): 84–91.
- [15] LIU G, CHEN B D, SONG X D. High-precision speed and position estimation based on hall vector frequency tracking for PMSM with bipolar Hall-effect sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(6): 2347–2355.
- [16] ZHAO M J, AN Q T, CHEN C Q, et al. Observer based improved position estimation in field-oriented controlled PMSM with misplaced Hall-effect sensors[J]. Energies, 2022, 15(16): 5985.
- [17] KOLANO K, DRZYMAŁA B, GĘCA J. Sinusoidal control of a brushless DC motor with misalignment of hall sensors[J]. Energies, 2021, 14(13): 3845.
- [18] YAO X L, MA C W, ZHAO J C, et al. Rapid estimation and compensation method of commutation error caused by Hall sensor installation error for BLDC motors[J]. IET Electric Power Applications, 2020, 14(3): 337–347.
- [19] ZHANG Q, FENG M. Combined commutation optimisation strategy for brushless DC motors with misaligned hall sensors[J]. IET Electric Power Applications, 2018, 12(3): 301–307.
- [20] KIM S Y, CHOI C, LEE K, et al. An improved rotor position estimation with vector-tracking observer in PMSM drives with low-resolution Hall-effect sensors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(9): 4078–4086.
- [21] LIU G, CUI C J, WANG K, et al. Sensorless control for high-speed brushless DC motor based on the line-to-line back EMF[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7): 4669–4683.

本文引文格式:

陈炜, 隋月帅, 阎彦. 电机滑行状态下霍尔位置传感器的偏差校正方法[J]. 天津工业大学学报, 2026, 45(1): 63–69.

CHEN W, SUI Y S, YAN Y. Correction method for Hall position sensors misalignment of motor in free coasting condition[J]. Journal of Tiangong University, 2026, 45(1): 63–69(in Chinese).

(责任编辑:程晓英)