

具有误差抑制功能的磁编码器解码算法研究^{*}

李君伟, 王 爽

(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘 要: 磁编码器作为一种广泛使用的电机转子位置测量装置,其测量精度对整个控制系统的性能有着重要影响。为了提高转子位置测量精度,采用双二阶广义积分器-锁相环(DSOGI-PLL)解码算法提取磁编码器输出信号的正序分量,抑制磁编码器输出信号中存在的幅值误差和相位误差。针对传统二阶广义积分器(SOGI)无法抑制直流偏置误差的缺陷,提出改进型二阶广义积分器(ISOGI)以消除直流偏置误差,提高磁编码器解码精度。仿真和试验结果验证了所提方法的有效性。

关键词: 磁编码器; 二阶广义积分器(SOGI); 锁相环(PLL); 误差抑制

中图分类号: TN762 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)06-0030-07

doi: 10.12177/emca.2023.065

Research on Decoding Algorithm of Magnetic Encoder with Error Suppression Function^{*}

LI Junwei, WANG Shuang

(School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: As a widely used motor rotor position measuring device, the measuring accuracy of the magnetic encoder has an important impact on the performance of the entire control system. In order to improve the measuring accuracy of rotor position, the dual second-order generalized integrator with phase-locked loop (DSOGI-PLL) decoding algorithm is used to extract the positive sequence components of the output signals of the magnetic encoder, and restrain the amplitude error and phase error in the output signals of the magnetic encoder. Aiming at the defect that the conventional second-order generalized integrator (SOGI) cannot suppress the DC offset error, the improved second-order generalized integrator (ISOGI) is proposed to eliminate the DC offset error and improve the decoding accuracy of the magnetic encoder. The simulation and experiment results verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: magnetic encoder; second-order generalized integrator (SOGI); phase-locked loop (PLL); error suppression

0 引 言

转子位置和速度测量的精度在电机控制中起着重要作用^[1-2]。获取角度信息的方法大致分为使用角度传感器和无传感器方法^[3]。无传感器方法不使用角度传感器,成本低,但由于可靠性、实

用性和鲁棒性等原因,许多领域仍使用角度传感器。在众多传感器中,磁编码器因其可以很好地适应油污、粉尘和大温差等恶劣环境^[4],在对可靠性和稳定性要求较高的系统中得到了广泛应用。

但是磁编码器输出信号中往往包含多种非理想误差信号^[5]。为消除磁编码器的非理想误差,

收稿日期: 2023-02-18; 收到修改稿日期: 2023-03-07

^{*} 基金项目: 上海市自然科学基金资助项目(19ZR1418600)

作者简介: 李君伟(1997—),男,硕士研究生,研究方向为电机驱动与控制。

王 爽(1977—),男,博士,讲师,研究方向为电力电子与电机驱动控制。

有必要对磁编码器误差补偿算法进行研究,以提高电机位置测量精度。针对磁编码器存在的非理想误差,文献[6]提出双层径向基函数校正方法,第一层用于自适应地校正编码器信号中的缺陷,如相位偏移、振幅偏差和波形失真,第二层作为推理机,自适应地将正交编码器信号映射到高阶正弦信号,从而导出中间位置。但这种方法往往会受到磁编码器制作工艺的限制。文献[7]提出一种采用谐波抑制双锁相环(HR-DPLL)来提高绝对磁编码器精度的方法,但是这种方法无法同时抑制其他干扰。文献[8]为了消除随机误差,提出了高级自适应锁相环(AADPLL)。文献[9]采用正弦信号的自动校正法补偿直流偏置误差、相位误差和幅值误差,但是算法比较复杂。文献[10]采用双同步旋转坐标系锁相环算法提取不平衡正余弦信号的正序分量,这种方法对误差具有很好的抑制作用且精度较高,但需要将信号分解到双旋转坐标系下,并且后续正反向解耦网络较复杂,影响闭环瞬态响应速度。

本文针对磁编码器输出信号中存在的幅值误差、相位误差和直流偏置误差,提出改进型双二阶广义积分器-锁相环(IDSOGI-PLL)算法,对磁编码器存在的非理想误差进行抑制,提高位置角解算精度。

1 磁编码器及位置角解码原理

磁编码器主要由磁性传感器、磁栅、磁场检测结构、信号处理电路和解码算法组成,其结构如图1所示。磁编码器磁栅与电机转子同轴安装,当电机旋转时,磁栅转动产生旋转磁场,磁阻元件检测磁场的变化,产生包含转子位置信息的正弦信号 $u_{\sin}$ 和余弦信号 $u_{\cos}$,如下所示:

$$\begin{cases} u_{\sin} = U_m \sin \theta_m \\ u_{\cos} = U_m \cos \theta_m \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_m 为磁编码器输出信号的幅值; θ_m 为电机转子的位置角。

为了获得电机的转子位置信息,采用锁相环(PLL)解码算法。PLL 作为一个闭环控制系统,通常由鉴相器(PD)、环路滤波器(LF)和压控振荡器(VCO)三部分组成。其基本工作原理为输入 PLL 的电压相位信号与环路输出的电压相位信号经 PD 进行比较,将得到的相位差转换为相

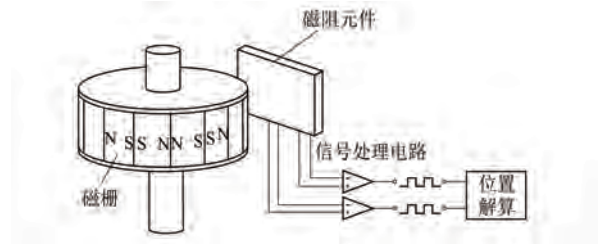


图1 磁编码器结构图

应的电压信号,然后经 LF 滤除噪声和高频信号。最后,将 LF 的输出信息送入 VCO 中。如果 PD 的输入信号和 LF 的输出信号的频率完全一致,则两者的相位差是一恒定值,VCO 的频率不再变化,最终实现锁相的目的。PLL 解码算法原理如图2所示,其中 $\hat{\theta}_m$ 为电机转子估计位置角, $\hat{\omega}_m$ 为估算角速度, K_p 和 K_i 分别为比例和积分系数。

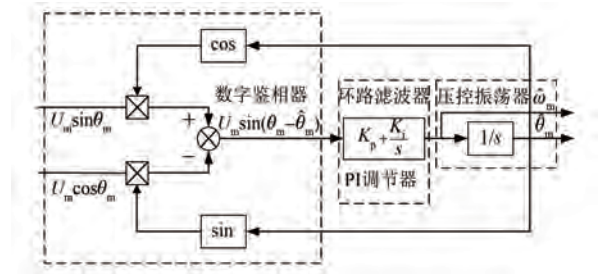


图2 PLL 解码算法原理图

磁编码器两相信号经过 PLL 数字 PD 输出的误差信号 u_{err} 可以表示为

$$u_{\text{err}} = U_m \sin(\theta_m - \hat{\theta}_m) \quad (2)$$

定义位置角跟踪误差为 $\Delta\theta = \theta_m - \hat{\theta}_m$, 当误差较小时,有 $\sin(\theta_m - \hat{\theta}_m) \approx \theta_m - \hat{\theta}_m$, 则:

$$u_{\text{err}} = U_m \sin(\theta_m - \hat{\theta}_m) \approx \theta_m - \hat{\theta}_m \quad (3)$$

通过比例积分环节即可得到估计角速度,对角速度进行积分可得到磁编码器的转子估计位置角 $\hat{\theta}_m$ 。反馈估计角后,经过锁相跟踪, u_{err} 最终趋近于零,则可以认为解算角度和输入角度相同,系统达到稳定。

值得注意的是,反正切和 CORDIC 等开环解码算法容易受外界扰动的影响,精度有限,实时跟踪能力差,而 PLL 算法作为一个二阶闭环系统,可以很好地抑制环境噪声和信号干扰,具有更高的解算精度和更快的响应速度。

2 磁编码器误差补偿算法

在磁编码器生产和制造的过程中,不可避免地会存在机械安装偏差。磁编码器输出信号中存在的误差主要包括幅值误差、相位误差和直流偏置误差。信号处理电路引起的误差主要包括幅值误差和直流偏置误差。其中,直流偏置误差主要是由信号处理电路和 A/D 采样芯片的零点漂移造成的,幅值误差则是由传感器信号输出端的灵敏度不完全一致以及信号处理电路放大倍数不同导致的。除此之外,在磁编码器安装中还存在与电机转子无法完全同轴同心的问题,导致磁编码器输出正余弦信号并非完全正交,存在相位上的误差。

2.1 基于双二阶广义积分器(DSOGI)的误差补偿

传统二阶广义积分器(SOGI)的结构如图3所示,其中 v 、 ε 和 k 分别表示输入信号、误差信号和阻尼因子, q 表示正交因子。若SOGI的谐振频率 $\hat{\omega}_m$ 和输入信号的频率 ω_m 相等,则SOGI的两路输出信号 v' 和 qv' 具有相同的幅值,但 qv' 相位比 v' 滞后 90° 。此外, v' 和输入信号 v 具有相同的幅值和相位。

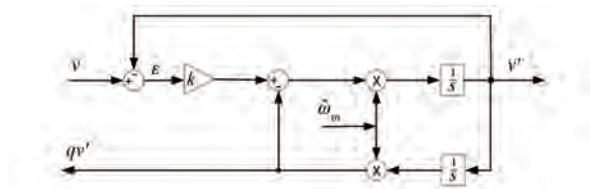


图3 传统 SOGI 结构图

SOGI 的闭环传递函数描述一般如下所示:

$$G_1(s) = \frac{v'(s)}{v(s)} = \frac{k\hat{\omega}_m s}{s^2 + k\hat{\omega}_m s + \hat{\omega}_m^2} \quad (4)$$

$$G_2(s) = \frac{qv'(s)}{v(s)} = \frac{k\hat{\omega}_m^2}{s^2 + k\hat{\omega}_m s + \hat{\omega}_m^2} \quad (5)$$

SOGI 中, $G_1(s)$ 和 $G_2(s)$ 传递函数的伯德图如图4所示。由图4可知, $G_1(s)$ 是一个二阶带通滤波器,其带宽与 k 有关。 $G_2(s)$ 是一个二阶低通滤波器(LPF), k 值越小,滤波效果越好,但瞬态响应时间会变长,权衡瞬态响应和滤波性能之间的关系, k 值设置为 $\sqrt{2}$ 。

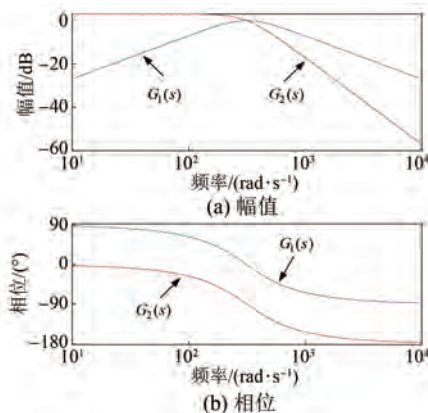


图4 $G_1(s)$ 和 $G_2(s)$ 的伯德图

本文利用两个单独的 SOGI 组成 DSOGI 提取磁编码器输出正余弦信号的正序分量,以实现对幅值误差和相位误差的补偿。利用 DSOGI 提取磁编码器输出信号正序分量的原理结构如图5所示。

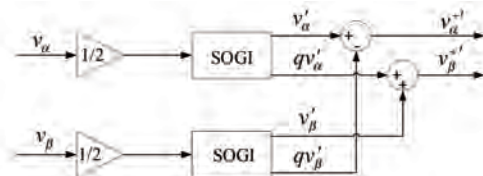


图5 DSOGI 提取正序分量的结构框图

图5中, v_α 、 v_β 分别为磁编码器输出的正、余弦信号, v'_α 、 qv'_α 和 v'_β 、 qv'_β 为经过DSOGI产生的正交信号, v_α^{+} 、 v_β^{+} 为DSOGI提取的正序分量。

设含有幅值误差和相位误差的磁编码器输出信号为

$$\begin{cases} u_{\sin} = \alpha \sin(\theta_m + \varphi) \\ u_{\cos} = \cos \theta_m \end{cases} \quad (6)$$

式中: α 为幅值误差系数; φ 为相位误差。

将含有误差的磁编码器信号输入DSOGI,由SOGI的传递函数可得:

$$X(s) = \frac{v_\alpha^{+}(s)}{v_\alpha(s)} = \frac{k\hat{\omega}_m}{2} \cdot \left[\frac{s^2 - \alpha\hat{\omega}_m(\omega_m \cos \varphi + s \sin \varphi)}{s(s^2 + k\hat{\omega}_m s + \hat{\omega}_m^2)} \right] \quad (7)$$

$$Y(s) = \frac{v_\beta^{+}(s)}{v_\beta(s)} = \frac{k\hat{\omega}_m}{2} \cdot$$

$$\left[\frac{\hat{\omega}_m s + \alpha s(\omega_m \cos \varphi + s \sin \varphi)}{\alpha(\omega_m \cos \varphi + s \sin \varphi)(s^2 + k\hat{\omega}_m s + \hat{\omega}_m^2)} \right] \quad (8)$$

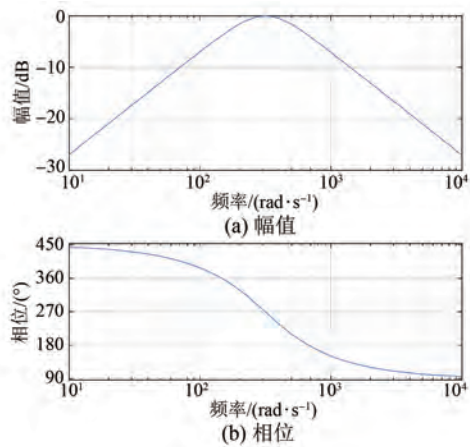


图 7 $G_4(s)$ 的伯德图

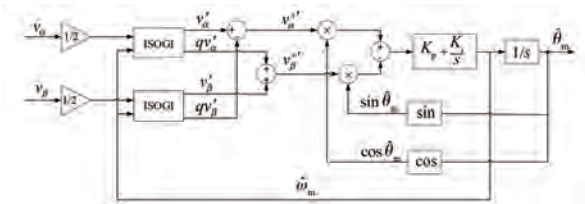


图 8 IDSOGI-PLL 解码算法结构图

3 仿真与试验结果

3.1 仿真验证

基于 MATLAB/Simulink 搭建仿真模型,对上述提出的 IDSOGI-PLL 解码算法进行仿真分析,给定正弦信号幅值误差系数 $\alpha=0.8$,相位误差 $\varphi=\pi/18$ rad,直流偏置误差 $U_{dc}=0.2$ V,输入信号幅值 $U_m=1$ V,电机转速 $n=3\ 000$ r/min。DSOGI 的输入、输出信号如图 9 和图 10 所示。从图 10 可以看出,由于 DSOGI 不能抑制直流偏置误差,其两相输出正余弦信号幅值不相等。

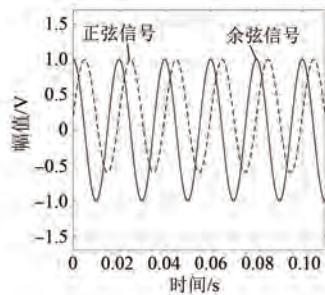


图 9 DSOGI 输入信号

将 DSOGI 两相输出信号送入 PLL 进行解码,仿真结果如图 11 和图 12 所示,从图中可以看出,

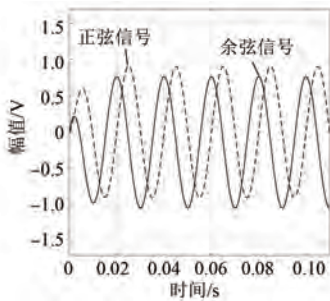


图 10 DSOGI 输出信号

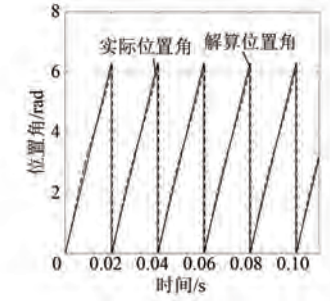


图 11 DSOGI-PLL 解码位置角仿真结果

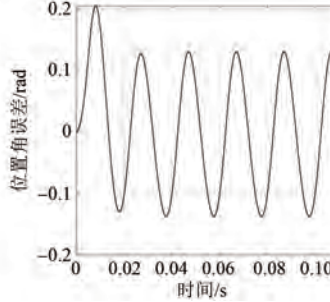


图 12 DSOGI-PLL 解码误差

由于直流偏置误差的存在,DSOGI-PLL 解算的位置角无法跟踪实际位置角,稳态角位置跟踪误差为 0.126 rad。IDSOGI 输出信号如图 13 所示,从图中可以看出,IDSOGI 两相输出信号的幅值相等,相位正交,表明 IDSOGI 可以有效消除误差的

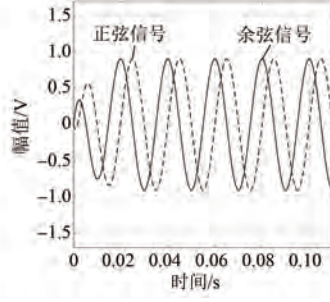


图 13 IDSOGI 输出信号

影响。IDSOGI-PLL 解码算法的仿真结果如图 14 和图 15 所示,图 14 中,IDSOGI-PLL 解算位置角可以很快地跟踪实际位置角,满足解码系统瞬态响应要求。图 15 中,IDSOGI-PLL 解算的位置角稳态跟踪误差为零,满足解码系统对精度的要求。

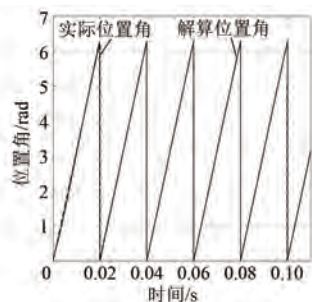


图 14 IDSOGI-PLL 解码位置角仿真结果

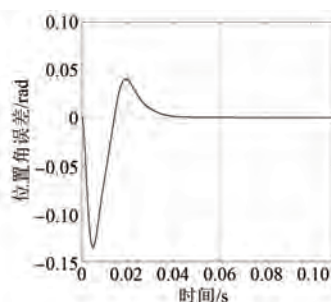


图 15 IDSOGI-PLL 解码误差

为验证所提算法能够抑制信号干扰以及在电机突加转速等暂态过程中的解码效果,设定电机转速在 0.4 ~ 1.2 s 内由 600 r/min 加速到 1 200 r/min,并在输入信号中加入 $-0.02 \sim 0.02$ V 的随机信号模拟电机实际运行工况下的干扰信号,仿真结果如图 16 和图 17 所示。从图 16 和图 17 中可以看出,加入扰动信号后,解算位置角也能够跟踪上实际位置角,在电机加速阶段,位置角跟踪误差略有增大并不断衰减,在电机加速完成

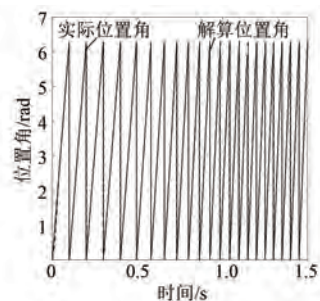


图 16 突加干扰下 IDSOGI-PLL 解码位置角仿真结果

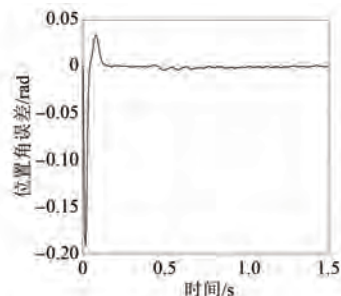


图 17 突加干扰下 IDSOGI-PLL 解码误差

后,误差收敛到零,验证了所提算法在存在干扰信号以及电机加速运行时也有较好的解码精度。

3.2 试验验证

对提出的具有误差抑制功能的 IDSOGI-PLL 磁编码器解码算法进行试验验证。该试验平台主要包括伺服电机、磁编码器、伺服控制器、示波器以及上位机等设备,试验平台如图 18 所示。



图 18 试验平台

试验平台采用高精度光电编码器的输出作为基准参考角度,用示波器采集基准编码器输出位置角和解算的位置角,将示波器采集的信号导入 MATLAB 中显示角度信息。电机转速为 3 000 r/min 时,试验结果如图 19 和图 20 所示。从图中可以看出,IDSOGI-PLL 解算位置角和基准位置角基本重合,且没有相位延迟,稳态位置角误差为 $-0.4^\circ \sim 0.5^\circ$,证明了所提算法具有较高的位置角解算精度和响应速度。

为验证所提算法在电机变转速运行时的解码效果,在 0.4~0.8 s 内将电机转速由 600 r/min 加速到 1 200 r/min,位置角和误差试验结果如图 21 和图 22 所示。从图中可以看出,当电机加速运行时,解算位置角依然能够跟踪上基准位置角,没有出现相位延迟,位置角跟踪误差在 $-0.4^\circ \sim 0.5^\circ$ 之间,验证了所提解码算法在电机变速运行的暂态过程中依然具有较高的解码精度。

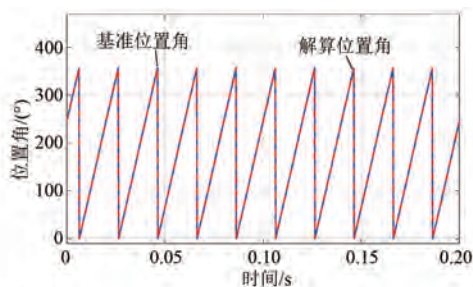


图 19 解算位置角和实际位置角对比图

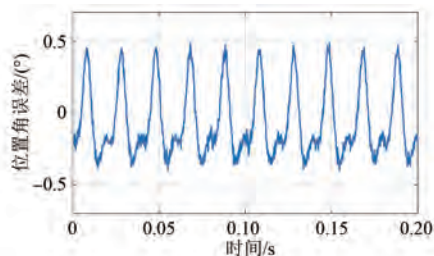


图 20 位置角解码误差图

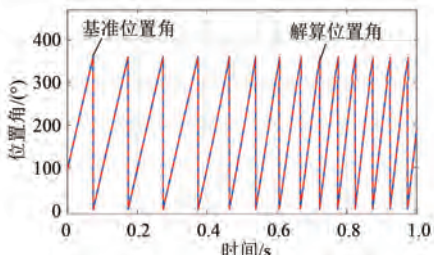


图 21 变速运行时的解算位置角和实际位置角对比图

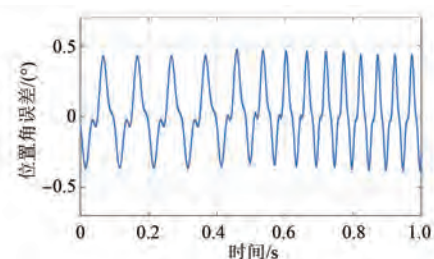


图 22 变速运行时的位置角解码误差图

4 结 语

本文设计了DSOGI算法提取正余弦信号的正序分量,有效抑制了幅值误差和相位误差。由于传统的SOGI不具备对直流偏置误差的抑制能力,在传统SOGI的基础上,增加一个广义积分器分支,提出了ISOGI,有效消除了磁编码器输出信号中的直流偏置误差。最后通过搭建仿真模型和试验平台

对所提方法进行分析验证,结果证明所提方法能够较为精确地解算出电机转子的位置角,且具有低延迟性,能够提高磁编码器的解码精度。

【参考文献】

- [1] LARA J, XU J, CHANDRA A. Effects of rotor position error in the performance of field-oriented-controlled PMSM drives for electric vehicle traction applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(8): 4738.
- [2] CHEN D, LI J, CHEN J, et al. On-line compensation of resolver periodic error for PMSM drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6): 5990.
- [3] CHOI J, NAM K, BOBTSOV A A, et al. Sensorless control of IPMSM based on regression model [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(9): 9191.
- [4] 唐苏亚. 磁性编码器及其应用[J]. 电子工程师, 1995(4): 27.
- [5] 薛凌云, 刘震天. 基于神经网络误差补偿的磁编码器细分算法[J]. 杭州电子科技大学学报(自然科学版), 2016, 36(2): 52.
- [6] TAN K, TANG K Z. Adaptive online correction and interpolation of quadrature encoder signals using radial basis functions [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(3): 370.
- [7] TRAN N C, NGUYEN H X, PARK J W, et al. Improving the accuracy of an absolute magnetic encoder by using harmonic rejection and a dual-phase-locked loop [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(7): 5476.
- [8] HOANG H V, JEON J W. An efficient approach to correct the signals and generate high-resolution quadrature pulses for magnetic encoders [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(8): 3634.
- [9] LI Y, LIU W Y, LI J, et al. Error compensation method for three-axis magnetic sensor based on ellipsoid fitting [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(7): 918.
- [10] BERGAS-JANE J, FERRATER-SIMON C, GROSS G, et al. High-accuracy all-digital resolver-to-digital conversion [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(1): 326.