

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.05.015

基于正负序分离的无轴承永磁同步电机位置传感器容错控制

韩冰阳, 鲍旭聪, 王晓琳, 石滕瑞, 范臻雪
(南京航空航天大学自动化学院, 南京 211106)

摘要: 无轴承永磁同步电机 (Bearingless permanent magnet synchronous motor, BPMSM) 凭借无接触、无磨损的优异性能在工业生产中获得广泛应用, 对旋转和悬浮的精确控制是保证其稳定运行的关键, 需实时获取高精度的转子位置信息以实现切向力矩和径向悬浮力的解耦。为保证位置传感器故障情况下 BPMSM 稳定运行, 文中提出一种基于正负序量分离的 BPMSM 传感器容错控制方案。首先, 结合 BPMSM 数学模型, 分析传感器故障对电机转矩和悬浮系统的影响。在此基础上, 提出一种基于过零点检测的故障诊断函数, 实时监测传感器信号故障。其次, 引入旋转坐标系分析传感器信号中正序分量和负序分量的特征, 分离出正序分量并提取其中的转子位置信息, 构建位置检测容错系统完成故障信号到容错策略的切换, 实现 BPMSM 在传感器故障情况下的稳定运行。最后, 基于一台 BPMSM 实验样机对所提方案的有效性进行了充分的仿真与实验验证。

关键词: 无轴承永磁同步电机; 转子位置检测; 正负序分量; 故障诊断; 容错控制

中图分类号: TM351 文献标志码: A 文章编号: 1005-2615(2023)05-0888-10

Fault-Tolerant Control of Position Sensor for Bearingless Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Separation of Positive and Negative Sequence

HAN Bingyang, BAO Xucong, WANG Xiaolin, SHI Tengrui, FAN Zhenxue

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: The bearingless permanent magnet synchronous motor (BPMSM) is widely used in industrial production due to the excellent performance of no contact and no wear. However, to achieve accurate control of rotation and suspension, the key is to obtain high-precision rotor position to decouple tangential torque and radial levitation force. To ensure the stable operation of BPMSM in case of position sensor failure, a fault tolerant method of position sensor for BPMSM based on the separation of positive and negative sequence is put forward. First, on the basis of the mathematical model of BPMSM, the influence of sensor failure on the torque and suspension subsystem of the motor is analyzed. On this basis, a fault diagnosis function based on zero crossing detection is proposed to monitor sensor signal faults in real time. Then, rotary coordinate is introduced to analyze the characteristics of positive and negative sequence in single-phase hall signal. Rotor position is calculated by phase-locked loop, which ensure the phase of rotor position is consistent with the positive sequence component separated from hall signal. Fault tolerant system for position detection completed the switch from the fault system to the fault-tolerant control system, realized the normal operation of the BPMSM under sensor fault. Finally, The effectiveness of the proposed method is fully verified by

基金项目: 国家自然科学基金(52177048); 江苏省自然科学基金(BK20201297)。

收稿日期: 2022-12-12; **修订日期:** 2023-04-03

通信作者: 王晓琳, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: wangxl@nuaa.edu.cn。

引用格式: 韩冰阳, 鲍旭聪, 王晓琳, 等. 基于正负序分离的无轴承永磁同步电机位置传感器容错控制[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(5): 888-897. HAN Bingyang, BAO Xucong, WANG Xiaolin, et al. Fault-tolerant control of position sensor for bearingless permanent magnet synchronous motor based on separation of positive and negative sequence[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(5): 888-897.

simulation and experiment on a BPMSM prototype.

Key words: bearingless permanent magnet synchronous motor (BPMSM); rotor position detection; positive and negative sequence components; fault diagnosis; fault-tolerance control

无轴承电机是近年来发展起来的一种新型磁悬浮电机。它在传统机械轴承电机旋转磁场的基础上叠加了额外的悬浮磁场为转子提供悬浮力,同时实现电机的自旋转和自悬浮。无轴承永磁同步电机 (Bearingless permanent magnet synchronous motor, BPMSM) 不仅具有传统永磁同步电机效率高、功率密度大的特点,还具有无轴承电机无接触、无磨损的优良特性,因此在航空航天、超洁净流体运输等对电机密封性要求较高的领域获得了广泛的应用^[1-4]。

为实现对 BPMSM 旋转和悬浮的精确控制,需要获取转子相对定子绕组的准确位置,霍尔传感器成本低,体积小,且无需和转子同轴连接,是 BPMSM 目前最常用的位置检测方案^[5-7]。然而,在电机实际运行过程中,恶劣的工况,例如 BPMSM 常用于半导体工业中的高温流体运输,长时间连续工作于高温环境,霍尔传感器的检测信号可能出现故障,影响电机稳定运行^[8]。因此,研究永磁同步电机驱动系统的霍尔位置传感器失效故障容错技术,成为当前相关领域重要的研究方向之一。

国内外学者对霍尔位置传感器的故障诊断^[9-14]及永磁同步电机的传感器容错控制^[15-20]进行了深入研究。霍尔位置传感器的故障诊断方案可分为直接检测法与间接判断法,其中直接检测法根据霍尔信号的不同电气特征来判别故障类型。文献[10]采用一种基于脉冲边缘预测的霍尔传感器故障诊断方案,利用相邻数个脉冲边缘预测下一边缘到来时刻,与实际信号相比即可检测到霍尔位置传感器故障。文献[11]利用冗余霍尔位置传感器输出值间的数值关系进行故障诊断,该方法相对简单且故障检测时间较短,但增加了系统的成本与复杂度。文献[12]按照故障霍尔元件的个数对传感器故障进行分类,根据故障后的霍尔信号总结出不同故障类型下相应的传感器故障诊断方案。文献[13]利用电机转速方程构建动态加速度系数,使故障诊断算法在电机转速突变的过程中也能实时检测霍尔位置传感器故障情况。间接判断法利用传感器故障下电机转矩、电流等特征信号的变化诊断转子位置传感器的故障情况,通常算法较为复杂、故障诊断花费时间较长。文献[14]选取转矩、相电流、磁链和转速作为故障诊断依据,利用神经网络对位置传感器在不同故障情况下的数据样本进行训练学习,实现位置传感器的故障诊断。

为实现传感器故障诊断后永磁同步电机保持稳定运行,合理设计位置传感器的容错控制系统就变得格外关键。文献[15]提取出定子电流中由位置传感器故障引起的脉动分量,通过故障模式识别完成传感器故障的在线诊断,并基于位置误差的实时计算实现自适应容错控制。文献[16]通过转速预测对故障霍尔信号进行重构与补偿,实现了传感器容错控制。文献[17]提出一种基于霍尔矢量跟踪观测器的容错控制方法,利用谐波消除的方法消除了霍尔反馈信号中的干扰,提升了电机在位置传感器故障情况下的动态性能。文献[18]利用扩展卡尔曼滤波方法对电机的转速进行估计,在识别出传感器故障后,用无位置算法的输出代替位置传感器的测量值。文献[19]利用二阶广义积分器代替传统基于高频注入的无位置检测方案中使用的滤波器,实现转速自适应,加快了容错切换过程中转子位置的收敛速度。文献[20]提出一种高性能永磁同步电动机位置传感器故障容错控制系统,构建了两个分别基于反电势观测和扩展卡尔曼滤波的无位置传感器,并利用极大似然估计获得电机位置与速度信息,实现永磁同步电机的容错控制。然而上述方法设计较复杂,计算量大,且对采样的数据精度要求较高,难以适用于 BPMSM 系统。因此,开展 BPMSM 位置传感器故障诊断及其容错控制研究具有重要意义。

本文提出一种基于正负序分离的 BPMSM 位置传感器容错控制方案,实现了位置传感器故障情况下 BPMSM 的稳定运行。首先结合电机数学模型分析位置传感器故障对 BPMSM 转矩系统和悬浮系统的影响,并提出一种基于过零点检测的故障诊断函数实时监测传感器信号故障。其次分离出霍尔信号中的正序分量,利用正交锁相环获得其中的转子位置信息,实现 BPMSM 容错运行。最后,基于一台无轴承永磁同步实验样机对所提方案的有效性进行了充分的仿真与实验验证。

1 BPMSM 位置检测系统

1.1 BPMSM 数学模型

BPMSM 的转子不采用轴承支撑,而是在原本的转矩磁场上叠加一个可实时控制的悬浮磁场,通过改变悬浮绕组中的电流来控制径向电磁力,并根

据转子的偏心情况实时调节悬浮力,实现转子在任意情况下的悬浮。在BPMSM驱动系统中,准确的转子位置信号是实现系统稳定运行的关键。传感器测得的转子位置决定了转矩电流和悬浮电流的相位,位置检测存在误差将导致电机控制系统为转子提供的切向磁拉力和径向悬浮力方向错误,使电机稳定悬浮旋转受到影响。图1为BPMSM传感器安装位置示意图。

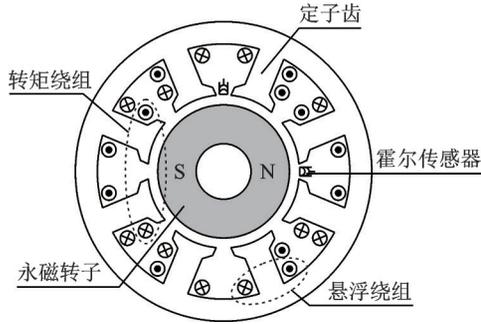


图1 传感器安装位置示意图

Fig.1 Diagram of sensor position

BPMSM的数学模型包含转矩子系统和悬浮子系统两部分^[5]。转矩子系统的数学模型由电压方程、转矩方程和机械运动方程构成

$$U_T = R_T I_T + L_T \frac{d}{dt} I_T + e_T \quad (1)$$

$$T_e = \frac{P}{\omega_r} = \frac{e_{Ta} i_{Ta} + e_{Tb} i_{Tb}}{\omega_r} \quad (2)$$

$$T_e = J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r + T_L \quad (3)$$

式中: U_T 、 I_T 、 e_T 分别为转矩绕组相电压、电流、反电动势矩阵; R_T 、 L_T 分别为转矩绕组相电阻、电感矩阵; T_e 为电磁转矩; P 为转矩绕组功率; e_{Ta} 、 e_{Tb} 分别为转矩绕组A、B相反电动势; i_{Ta} 、 i_{Tb} 分别为转矩绕组A、B相电流; ω_r 为机械角速度; J 为转动惯量; B 为摩擦转矩系数; T_L 为负载转矩。

BPMSM悬浮子系统在径向两自由度采用主动悬浮,在轴向和扭转3个自由度采用被动悬浮,其数学模型由电压方程、径向可控悬浮力方程和机械运动方程构成^[9],有

$$U_L = R_L I_L + L_L \frac{d}{dt} I_L \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = k W_L \begin{bmatrix} A_{PM} & W_T i_{Tq} \\ W_T i_{Td} & -A_{PM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$m \frac{d^2}{dt^2} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} + k_s \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{zx} \\ F_{zy} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$k = \frac{n^2 \mu_0 r h}{2\pi \delta_0^2 p_T p_L} \quad (7)$$

$$k_s = \frac{n^2 \mu_0 r h}{2\pi \delta_0^3 p_T^2} W_T^2 I_{Tfm}^2 \quad (8)$$

式中: U_L 、 I_L 分别为悬浮绕组相电压、电流矩阵; R_L 、 L_L 分别为悬浮绕组相电阻、电感矩阵; F_x 、 F_y 分别为径向两自由度可控悬浮力; W_L 、 W_T 分别为悬浮绕组匝数、转矩绕组匝数; i_{Ld} 、 i_{Lq} 分别为悬浮绕组dq轴定子电流; i_{Td} 、 i_{Tq} 分别为转矩绕组dq轴定子电流; A_{PM} 为永磁体磁势幅值; m 为转子质量; x 、 y 分别为径向两自由度位移; F_{zx} 、 F_{zy} 分别为径向两自由度被动悬浮力; n 为电机相数; μ_0 为真空磁导率; r 为转子半径; h 为电机轴向长度; δ_0 为转子无偏心时的等效气隙长度; p_L 、 p_T 分别为悬浮绕组、转矩绕组极对数; I_{Tfm} 为永磁体等效励磁电流和转矩绕组电流合成的等效电流幅值。

1.2 BPMSM位置检测系统

线性霍尔传感器根据BPMSM正常运行过程中转子磁场的变化,测得包含转子位置信息的正弦电压信号。其中一个霍尔传感器的安装位置与BPMSM转矩绕组的A相轴线重合;另一霍尔传感器与其相隔90°电角度放置如图2所示,此时输出的两相正交信号即为转子位置的正弦和余弦函数值。

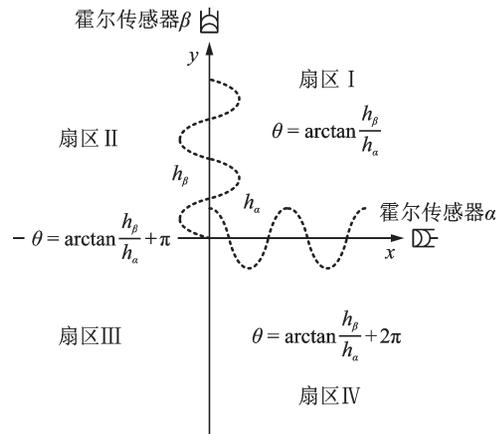


图2 霍尔传感器输出信号

Fig.2 Output signals of linear Hall sensors

线性霍尔传感器输出的两相正交信号通过反正切运算可以求出转子位置

$$\begin{cases} \theta = \arctan \frac{h_\beta}{h_\alpha} & h_\alpha \geq 0, h_\beta \geq 0 \\ \theta = \arctan \frac{h_\beta}{h_\alpha} + \pi & h_\alpha < 0 \\ \theta = \arctan \frac{h_\beta}{h_\alpha} + 2\pi & h_\alpha \geq 0, h_\beta < 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: θ 代表转子位置角; h_α 、 h_β 分别代表线性霍尔传感器 α 和 β 的输出信号。当霍尔传感器发生故障时,反正切函数将无法解算出正确的转子位置。

2 位置传感器故障分析

2.1 位置信号故障分析

对于BPMSM系统,错误的转子位置将会影响电机的转矩系统和悬浮子系统。BPMSM转矩子系统采用“ $i_d=0$ ”控制,图3所示为转子位置误差对BPMSM转矩系统的影响,当负载转矩保持恒定,转子位置存在误差 $\Delta\theta$ 时,输出电磁转矩可表示为

$$T_e = p_T |i_T| \phi_f \cos \Delta\theta \quad (10)$$

式中: $|i_T|$ 为转矩输出电流幅值; ϕ_f 为转子永磁磁链。由式(10)可知,当电机负载保持不变时,转子位置出现误差将会导致输出电流增大,以保证电机维持转速。如图3(b)所示,当线性霍尔传感器 β 发生故障时,计算转子位置将固定在0和 π 位置,当实际转子位置在 -0.5π 到 0.5π 时,计算转子位置为0;当实际转子位置在 0.5π 到 1.5π 时,计算转子位置为 π 。定子绕组产生的转矩电流在实际 q 轴的投影恒大于零,在故障发生后将始终为转子提供正向转矩,电机转速将超过给定值并持续上升,直至转子撞边,因此霍尔传感器故障时BPMSM无法保持正常运行。

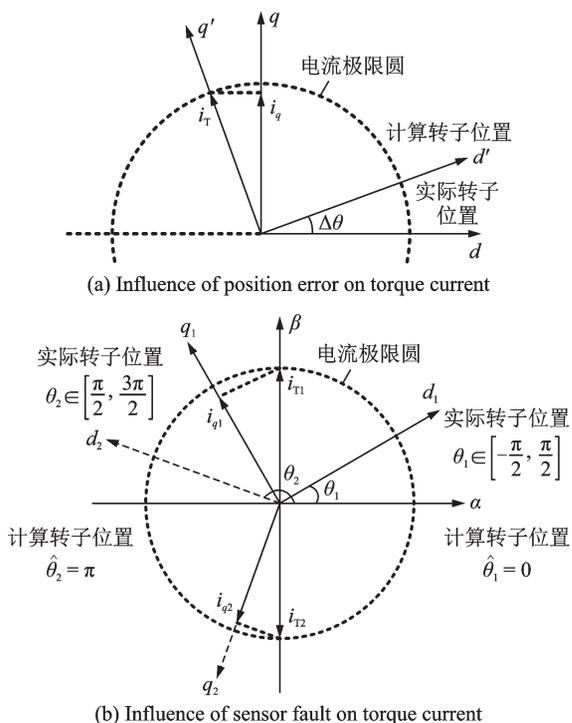


图3 转子位置误差对电机转矩子系统的影响

Fig.3 Influence of rotor position error on motor torque subsystem

当霍尔传感器发生故障时,错误的转子位置信号同样会影响悬浮子系统,当电机所受外力一定时,悬浮子系统会根据转子的径向位移信息给定合适大小的主动悬浮力,用于平衡外力保持转子稳定

悬浮于定子的几何中心。而根据式(5),主动悬浮力的方向由测得的转子位置决定,当转子所受外力一定且存在转子位置误差 $\Delta\theta$ 时,输出的主动悬浮力可表示为

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = k W_L \begin{bmatrix} A_{PM} & W_T i_{Tq} \\ W_T i_{Tq} & -A_{PM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |i_{Ld}| \\ |i_{Lq}| \end{bmatrix} \quad (11)$$

如图4所示,当BPMSM转子悬浮在定子几何中心 o 点时,沿 x 轴和 y 轴的负方向分别受到大小为 F_x^* 和 F_y^* 的外力,悬浮子系统需要为转子提供大小相同,方向沿 xy 轴正方向的主动悬浮力以保持转子的悬浮位置不变,而当转子位置信号存在误差 $\Delta\theta$ 时,根据式(11)悬浮绕组提供的主动悬浮力大小保持不变,方向与 xy 轴存在角度 $\Delta\theta$,即为图4中的 F'_x 和 F'_y ,实际给定的悬浮力在 xy 轴上的投影为 F_x 和 F_y ,不能平衡转子所受到的外力,因此转子将会在合力的作用下偏离悬浮位置,影响BPMSM的稳定悬浮运行。

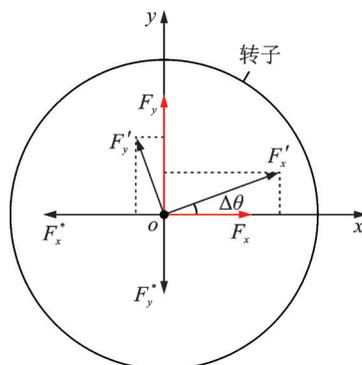


图4 转子受力示意图

Fig.4 Diagram of forces on the rotor

2.2 位置信号故障诊断

故障发生后,线性霍尔信号不再根据电机转子位置改变而改变,而是维持在零电压状态。两相霍尔传感器同时故障概率较小,且无法继续获得转子位置信息,需要采用无位置检测技术进行补偿。因此本文中对霍尔位置传感器功能失效故障的研究仅针对单相霍尔传感器故障。本节依据故障诊断函数的变化情况进行总结归纳,提出一种单相霍尔信号故障诊断方法。

定义故障诊断函数为

$$S(t) = 2\text{sign}(h_\alpha) + \text{sign}(h_\beta) \quad (12)$$

其中,将符号函数定义为

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (13)$$

为准确诊断位置传感器的故障,利用符号函数

将两相线性霍尔信号分为4个扇区, $h_a > 0, h_\beta > 0$, $h_a < 0, h_\beta > 0$, $h_a < 0, h_\beta < 0$, $h_a > 0, h_\beta < 0$ 。在电机无故障运行过程中, 转子转动一圈时, 每个扇区对应一组霍尔状态, $\text{sign}(h_a)$ 和 $\text{sign}(h_\beta)$ 会有4组不同的信号值出现; 而传感器故障后, $\text{sign}(h_a)$ 和 $\text{sign}(h_\beta)$ 在转子转动一圈时只有两组不同的信号值。将霍尔状态按照式(12)的方式编码, 即可通过故障诊断函数确定故障的霍尔传感器。

图5为BPMSM正转时发生单相霍尔故障后, 诊断函数 $S(t)$ 的变化情况。电机在无故障状态下正转时, $S(t)$ 的变化序列应该是 $3 \rightarrow 1 \rightarrow 0 \rightarrow 2$, 在转子旋转一周时共有4个状态值。根据图5的变化情况能够看出, 电机发生单相霍尔故障后, 此时的故障诊断函数 $S(t)$ 分别只剩下了 $3 \rightarrow 1$ 和 $3 \rightarrow 2$ 两个状态值。因此, 该函数值可以作为位置信号故障诊断的依据, 只要检测多个循环的相同序列, 就能够找出与其对应的霍尔故障类型。

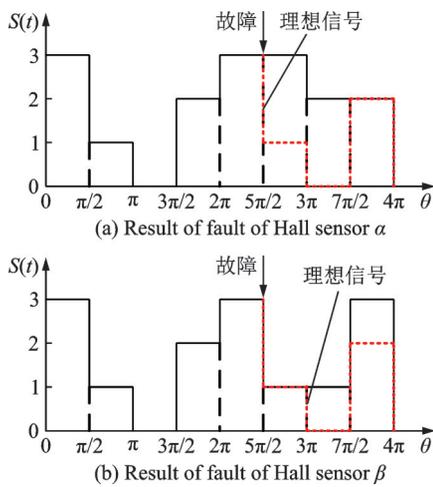


图5 故障诊断函数

Fig.5 Results of fault diagnosis function

图6为位置信号故障诊断的流程图, 首先利用故障诊断函数对采样得到的线性霍尔传感器信号

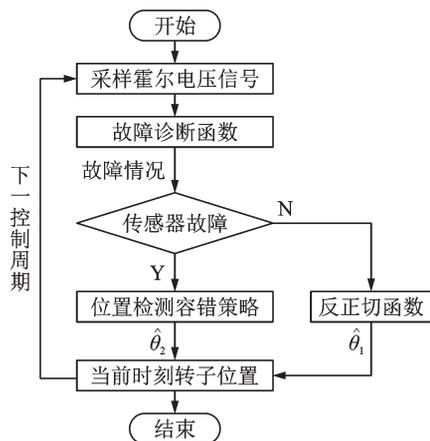


图6 位置信号故障诊断流程图

Fig.6 Flow chart of fault diagnosis of position signal

实时监测, 判断传感器是否故障, 然后依据故障信息选择反正切函数或位置检测容错策略为控制系统提供转子位置和速度信息。

3 传感器容错控制策略

单相线性霍尔传感器检测信号中的正负序分量在旋转坐标系下分别为交流量和直流量, 将单相霍尔信号进行反向 park 变换, 在旋转坐标系下分离出其中的正序分量, 并通过正交锁相环实现输出转子位置估计值对单相霍尔检测信号中正序分量相位的无静差追踪, 完成单相霍尔传感器故障情况下的转子位置检测, 实现 BPMSM 的容错运行。

3.1 基于正负序量分离的位置检测方案

采用线性霍尔传感器检测转子位置时, 当一相霍尔传感器发生故障, 对另一相正常的霍尔电压信号进行归一化处理后可得, 以 h_β 故障为例

$$h_a = \cos \theta = \frac{1}{2} \cos \theta + \frac{1}{2} \cos(-\theta) \quad (14)$$

$$h_\beta = 0 = \frac{1}{2} \sin \theta + \frac{1}{2} \sin(-\theta)$$

式中 θ 为电机转子位置。将式(14)表示为正序分量和负序分量之和

$$\begin{bmatrix} h_a \\ h_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{a+} + h_{a-} \\ h_{\beta+} + h_{\beta-} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} h_{a+} \\ h_{\beta+} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} h_{a-} \\ h_{\beta-} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \cos(-\theta) \\ \sin(-\theta) \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中: h_{a+} 、 $h_{\beta+}$ 、 h_{a-} 、 $h_{\beta-}$ 分别为单相霍尔信号的正负序分量。在 $\alpha\beta$ 坐标系下, 正序分量和负序分量的轨迹为半径相等旋转方向相反的圆, 将其进行反向 park 变换, 在旋转坐标系下正负序分量分别为二倍频交流量和直流量

$$\begin{bmatrix} h_d \\ h_q \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \cos 2\theta \\ \sin 2\theta \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

使用高通滤波器对 h_d 、 h_q 进行交直流分离, 将其中的交流量用正交锁相环处理, 鉴相输出为

$$e = \sin 2\theta \cos 2\hat{\theta} - \cos 2\theta \sin 2\hat{\theta} = \sin(2\theta - 2\hat{\theta}) \quad (19)$$

式中 $\hat{\theta}$ 为经过正交锁相环处理后电机转子位置的估计值。

经过正交锁相环的调节作用使相位差 e 尽可能小, 当系统达到稳定时, 鉴相器的输出为 $e = \sin(2\theta - 2\hat{\theta}) \approx 2(\theta - \hat{\theta})$, 转子位置估计值收敛至 BPMSM 实际转子位置, 检测方案结构框图如图7所示。图中, HPF 表示高通滤波器。

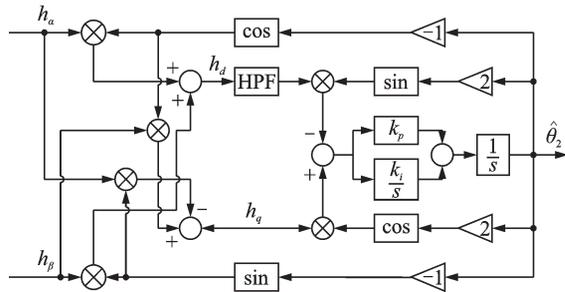


图 7 基于正负序分量分离的位置检测方案结构

Fig.7 Principle diagram of position detecting scheme based on separation of positive and negative sequences

同理, h_a 故障时, 霍尔信号的正负序分量为

$$\begin{bmatrix} h_\alpha \\ h_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} - \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \cos(-\theta) \\ \sin(-\theta) \end{bmatrix} \quad (20)$$

该信号也可以通过正负序分量分离的方法, 得到其中的正序分量, 并用于转子位置的计算。

3.2 BPMSM 容错控制系统

当 BPMSM 的驱动系统正常运行时, 线性霍尔传感器实时检测转子位置和速度信息, 为转矩控制子系统提供实时转速和转矩电流的相位, 帮助悬浮控制子系统确定对转子施加悬浮力的方向; 当

BPMSM 发生位置传感器失效故障时, 控制系统将转子位置输入值切换至基于正负序量分离的位置检测容错方法, 通过对霍尔信号中正序分量的分离, 实现利用单相霍尔信号解算转子位置和速度, 确保电机在传感器故障情况下无扰运行, 系统的控制框图如图 8 所示。

图 8 中: $i_{Ld}^*, i_{Lq}^*, i_{Td}^*, i_{Tq}^*$ 分别代表悬浮子系统和转矩子系统 dq 轴电流的参考值; $i_{Ld}, i_{Lq}, i_{Td}, i_{Tq}$ 分别代表悬浮子系统和转矩子系统 dq 轴电流; $u_{Ld}, u_{Lq}, u_{Td}, u_{Tq}$ 分别代表悬浮子系统和转矩子系统 dq 轴电压; $u_{L\alpha}, u_{L\beta}, u_{T\alpha}, u_{T\beta}$ 分别代表悬浮子系统和转矩子系统 $\alpha\beta$ 轴电压; ω^*, ω 分别代表转速的参考值和检测值; \hat{h}_d, \hat{h}_q 分别代表 dq 坐标系下的霍尔信号交流分量。本文采用两套位置检测系统, 其中一套是基于反正切函数的传统位置检测方法; 另一套是基于正负序量分离的位置检测容错方法。两个系统并行运行, 当线性霍尔传感器正常工作时, 容错系统空运行, 利用反正切函数得到的转子位置作为电机控制系统的反馈; 当故障诊断函数判别霍尔传感器故障后, 由容错方案取代传统方法, 从而实现系统的容错控制, 提高 BPMSM 运行的可靠性。

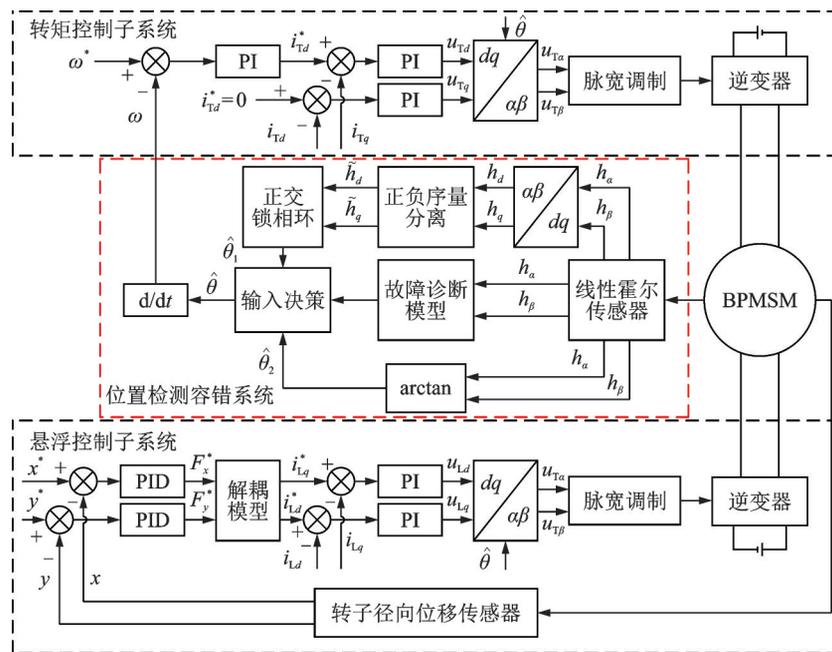


图 8 BPMSM 系统控制框图

Fig.8 Control block diagram of BPMSM

4 仿真与实验

为了验证本文所提出的基于正负序量分离的 BPMSM 位置检测容错方法的有效性, 利用 MATLAB/Simulink 对该方案进行仿真验证, BPMSM 的参数如表 1 所示。

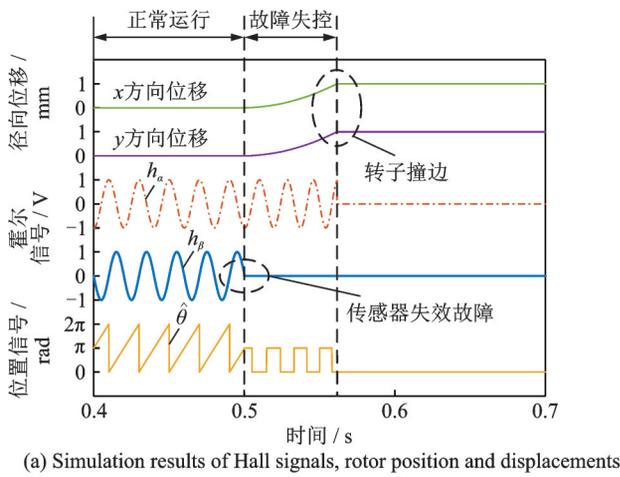
以位置传感器在 $t=0.5$ s 时, 霍尔传感器 β 发

生故障为例, 图 9 为空载运行、给定转速 $n=3000$ r/min 时的 BPMSM 位置传感器发生完全失效故障前后霍尔信号、位置信号、位移信号和转速的仿真波形。当霍尔传感器发生故障时, 传统转子位置检测方案无法求出正确的转子位置, 位置信号仅有 0 和 π 两个输出值, 转速检测信号为 0, 导致转矩子系统对转子持续输出正向磁拉力, 同时悬浮子系统失

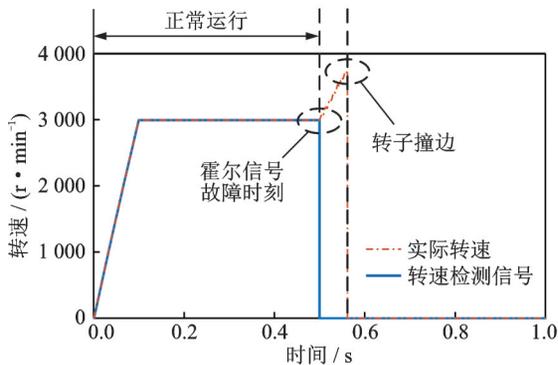
表1 BPMSM 参数

Table 1 BPMSM parameters

参数	数值
母线电压/V	48
开关频率/kHz	10
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000
转子质量/kg	0.5
额定功率/W	150
永磁体极对数	1
转矩绕组极对数	1
悬浮绕组极对数	2
转矩绕组等效电阻/Ω	0.2
转矩绕组等效电感/mH	1
悬浮绕组等效电阻/Ω	0.5
悬浮绕组等效电感/mH	4.5



(a) Simulation results of Hall signals, rotor position and displacements



(b) Simulation result of motor speed

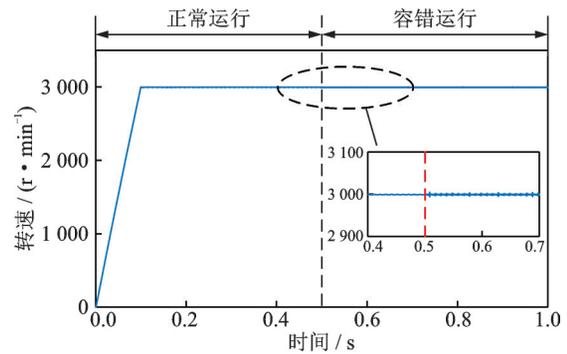
图9 故障状态下的仿真波形结果

Fig.9 Simulation results under fault condition

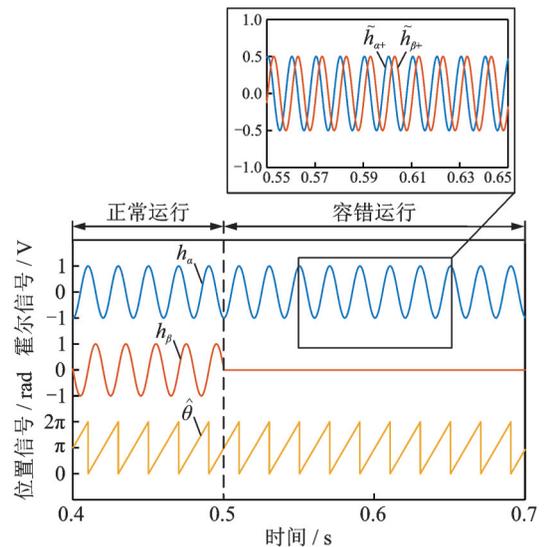
控,电机转速持续升高直至转子撞边。

图10为BPMSM在位置传感器故障容错控制下的仿真波形。图10(a)为位置传感器故障发生前后的转速曲线,在0.5s发生传感器故障后,系统输出的转子位置切换到容错方案。由于切换时间短,转子的径向位移偏移量小,不会影响电机的稳定运行。由图10(a)的局部放大图可知,在切换到基于正序分量分离的位置检测方案时,转速的波动增大,但误差仍在10 r/min内,可以忽略不计。

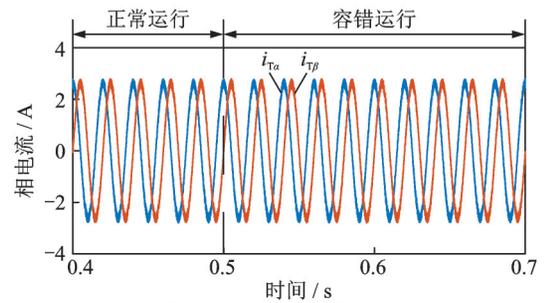
图10(b)为传感器故障前后的霍尔信号及转子位置信号波形图,霍尔传感器在0.5s发生故障后,电机进入容错状态运行,本方案从仅剩的一相霍尔信号中分离出其中幅值相等、相位正交的正序分量,并以此计算转子位置信号,由图可知故障发生前后转子位置信号的波动较小。图10(c)为传感器故障前后BPMSM转矩相电流的波形图,由图可知,在系统切换到容错方案后,BPMSM相电流对比故障前的状态波动较小,表明在容错控制下位置传感器故障不影响电机正常运行。



(a) Simulation result of motor speed



(b) Simulation results of hall signals and rotor position



(c) Simulation results of phase currents

图10 容错控制下的仿真波形结果

Fig.10 Simulation results under fault-tolerant control

图11为转速突变时BPMSM位置检测容错系统的运行效果,由图可知在位置传感器容错控制系统的运行过程中,当电机的转速发生变化时,转子

的位置信号和相电流基本能够保持稳定,转速的变化对容错系统解算的位置信号稳定性影响较小,表明在霍尔传感器发生故障的容错控制下BPMSM能够完成正常的升降速。

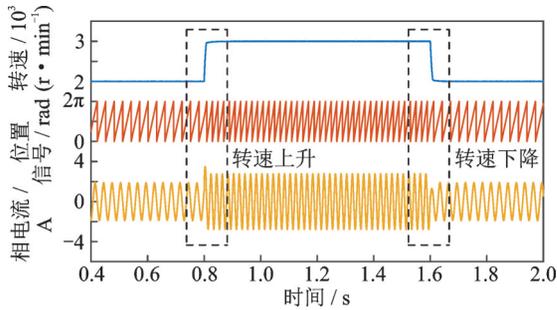


图 11 转速变化时容错算法的仿真波形

Fig.11 Simulation results of fault-tolerant algorithm under speed variation

图 12 为转子径向位移曲线,由图可知,系统在 0.5 s 发生霍尔传感器故障并进入容错控制的情况下,转子的径向位移波动较小,最大径向偏移量在 0.02 mm 内,远小于 BPMSM 转子可移动范围 ± 1 mm。在电机切换到容错控制方案后,主动悬浮力维持对转子径向偏移的约束,转子的悬浮位置保持在定子几何中心,此时 BPMSM 依然具有较好的悬浮特性。

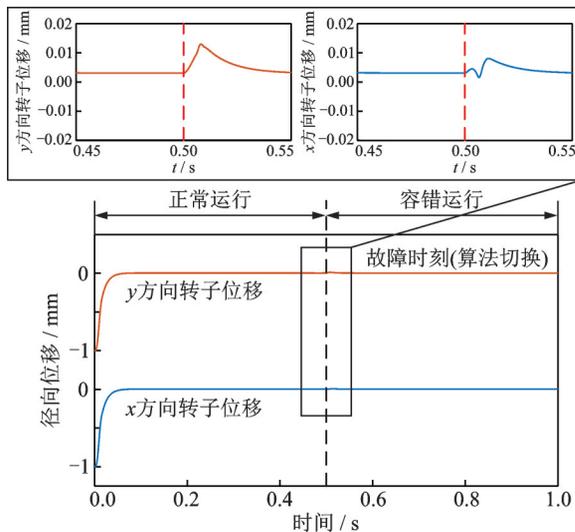


图 12 转子径向位移仿真波形结果

Fig.12 Simulation results of rotor radial displacement

本文利用自主研发的BPMSM驱动系统进行实验,进一步验证所提出的基于正负序量分离的BPMSM位置检测容错方法的有效性,电机的实验参数与仿真参数一致。

图 13 为空载运行、给定转速 $n=3\ 000$ r/min 时启用 BPMSM 位置检测容错算法的霍尔信号、位置

信号和相电流实验波形。由图可知,容错系统解算的转子位置信号与故障未发生时近似保持不变。图 13 中的电流波形表明,正常运行状态下转矩相电流幅值约为 2.5 A,呈正弦型,当霍尔传感器发生故障,控制系统切换到容错方案后,相电流对比故障前的状态波动较小,仍为正弦曲线且幅值保持不变。通过故障前后波形对比可知,在霍尔传感器发生故障后,电机仍能保持稳定运行,实验结果与仿真结果一致。

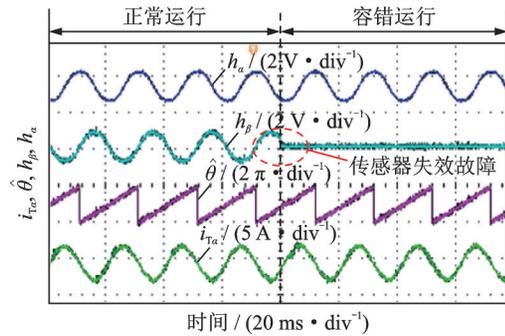


图 13 容错控制下的实验波形结果

Fig.13 Experimental results under fault-tolerant control

图 14 为单相霍尔信号及其旋转坐标系下的正序分量,对未故障的单相霍尔信号 h_a 进行反向 Park 变换,得到旋转坐标系下的信号 h_d, h_q ,分离出其中的交流分量 \tilde{h}_d, \tilde{h}_q ,即为旋转坐标系下霍尔信号的正序分量 $\tilde{h}_{\alpha+}, \tilde{h}_{\beta+}$ 。得到的这两相信号幅值相等,相位正交且等于原霍尔信号,其频率为原信号的两倍,以此解算转子位置信号可保证当霍尔位置传感器故障发生后,BPMSM 仍能保持稳定运行。

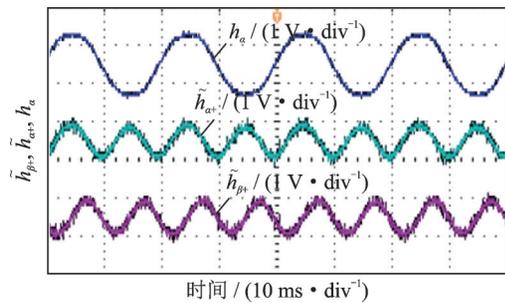


图 14 单相霍尔信号及其旋转坐标系下的正序分量

Fig.14 Single phase Hall signal and its positive sequence component in rotating coordinate system

图 15 为转速变化时 BPMSM 位置检测容错系统运行的实验结果,由图可知,当电机的转速发生变化时,容错方法计算出的转子位置信号和相电流能够保持稳定,转速变化对控制系统稳定性影响较小,与仿真结果一致,表明在霍尔传感器发生故障的容错控制下电机能够完成正常的升降速。

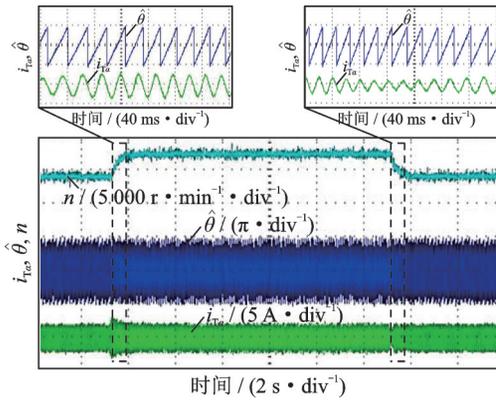


图15 转速变化时容错方案实验结果

Fig.15 Experimental results of fault-tolerant scheme under speed variation

图16为BPMSM正常运行时及位置检测容错方法运行时的转子运动轨迹。由图可知,与正常运行情况下相比,容错运行时的转子发生轻微抖动,但是远小于转子可移动范围 $\pm 1\text{ mm}$,本方法能够实现BPMSM转子的稳定悬浮。实验结果均与仿真结果一致,因此本文所提出的基于正负序量分离的BPMSM位置检测容错方法可以在单相霍尔传感器故障情况下,保证BPMSM的平稳运行,具有可行性。

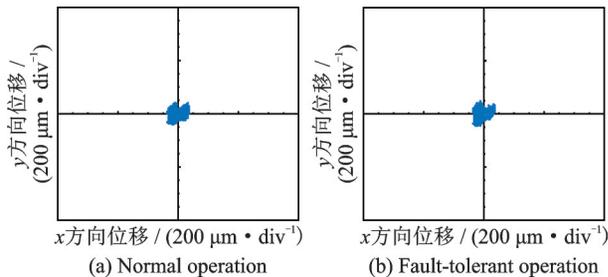


图16 转子运动轨迹

Fig.16 Rotor trajectory

5 结 论

为避免用于检测转子位置的线性霍尔传感器故障影响BPMSM的正常运行,本文提出一种基于正负序量分离的BPMSM位置检测容错方法。在一相位置传感器故障的情况下,利用另一相线性霍尔检测信号,基于正负序量分离的思想提取其中的正序分量,并通过正交锁相环实现输出转子位置估计值对单相霍尔检测信号中正序分量相位的无静差追踪,实现BPMSM转子位置及速度检测。通过仿真和实验验证,所提方法具有良好的容错控制效果,能有效避免BPMSM位置传感器故障对电机悬浮和旋转造成影响,提高了BPMSM运行的安全性和可靠性。

参考文献:

- [1] 王晓琳, 邓智泉, 严仰光. 一种新型的五自由度磁悬浮电机[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(2): 210-214.
WANG Xiaolin, DENG Zhiquan, YAN Yangguang. Innovative motor with five-degree magnetic suspension [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 36(2): 210-214.
- [2] CHEN Jiahao, ZHU Jingwei, SEVERSON E L. Review of bearingless motor technology for significant power applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(2): 1377-1388.
- [3] ZAD H S, KHAN T I, LAZOGLU I. Design and analysis of a novel bearingless motor for a miniature axial flow blood pump[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(5): 4006-4016.
- [4] 丁强, 王晓琳, 邓智泉, 等. 大气隙磁通切换无轴承永磁电机径向力绕组设计与比较[J]. 电工技术学报, 2018, 33(11): 2403-2413.
DING Qiang, WANG Xiaolin, DENG Zhiquan, et al. Design and comparison of radial force winding configurations for wide air-gap flux-switching bearingless permanent-magnet motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(11): 2403-2413.
- [5] 廖启新. 无轴承薄片电机基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
LIAO Qixin. Fundamental research on bearingless slice motor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [6] 刘刚, 肖烨然, 宋欣达. 永磁同步电机用线性霍尔位置检测的误差补偿[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(8): 36-42.
LIU Gang, XIAO Yeran, SONG Xinda. Error compensation of rotor position detection for permanent magnetic synchronous motor based on linear hall sensors[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(8): 36-42.
- [7] 严乐阳, 叶佩青, 张勇, 等. 圆筒型永磁直线同步电机用线性霍尔位置检测的误差补偿[J]. 电工技术学报, 2017, 32(5): 26-32.
YAN Leyang, YE Peiqing, ZHANG Yong, et al. Error compensation of linear hall based position detection for tubular permanent magnetic linear synchronous motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(5): 26-32.
- [8] RAGGL K, WARBERGER B, NUSSBAUMER T, et al. Robust angle-sensorless control of a PMSM bearingless pump[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(6): 2076-2085.

- [9] BAO Xucong, WANG Xiaolin, SHI Tengrui, et al. Levitation force analysis of bearingless motor based on coordinate transformation[C]//Proceedings of the 2022 25th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Chiang Mai, Thailand: IEEE, 2022.
- [10] SHAO Jie, DENG Zhiqian, GU Yu. Fault-tolerant control of position signals for switched reluctance motor drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3): 2959-2966.
- [11] AQIL M, HUR J. A direct redundancy approach to fault-tolerant control of BLDC motor with a damaged hall-effect sensor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(2): 1732-1741.
- [12] 赵勇. 永磁同步电机低精度位置传感器矢量控制系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
ZHAO Yong. Research on permanent magnet synchronous motor vector control system with low-precision position sensor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [13] EBADPOUR M, AMIRI N, JATSKEVICH J. Fast fault-tolerant control for improved dynamic performance of hall-sensor-controlled brushless DC motor drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(12): 14051-14061.
- [14] 杨泽斌, 许婷, 孙晓东, 等. 基于BPNN的无轴承异步电机传感器故障诊断及容错控制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(11): 4218-4227.
YANG Zebin, XU Ting, SUN Xiaodong, et al. Sensor fault diagnosis and fault-tolerant control of a bearingless induction motor based on BPNN[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11): 4218-4227.
- [15] 李红梅, 姚宏洋, 王萍. PMSM 驱动系统位置传感器故障在线诊断与自适应容错控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(S2): 228-235.
LI Hongmei, YAO Hongyang, WANG Ping. Position sensor online fault diagnosis and adaptive fault-tolerant control of PMSM drive system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(S2): 228-235.
- [16] 张希, 林辉. 无刷直流电机霍尔传感器故障诊断与补偿策略[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(6): 1278-1284.
ZHANG Xi, LIN Hui. Fault diagnosis and compensation strategy of hall sensor in brushless dc motor[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(6): 1278-1284.
- [17] 董亮辉, 刘景林. 霍尔传感器故障下的永磁无刷电机容错控制及其动态性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3602-3611.
DONG Lianghai, LIU Jinglin. Research on the fault tolerant control and its dynamic performance of brushless permanent magnet motor with faults in hall sensor[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3602-3611.
- [18] FOO G, ZHANG X N, VILATHGAMUWA D M. A sensor fault detection and isolation method in interior permanent-magnet synchronous motor drives based on an extended Kalman filter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8): 3485-3495.
- [19] 杜思宸, 全力, 朱孝勇, 等. 基于高频注入的永磁同步电机零低速下位置传感器失效故障容错控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(10): 3038-3046.
DU Sichen, QUAN Li, ZHU Xiaoyong, et al. Fault-tolerant control of position sensor failure for PMSM at zero and low speed based on high frequency injection[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(10): 3038-3046.
- [20] AKRAD A, HILAIRET M, DIALLO D. Design of a fault-tolerant controller based on observers for a PMSM drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1416-1427.

(编辑:孙静)