

基于霍尔位置传感器的永磁同步电机 改进容错控制方法研究

朱 叶^{1,2}, 赖 彬¹, 缪典佶¹, 储剑波^{1*}, 韩镇锚²

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016;

2. 中国航空工业集团公司金城南京机电液压工程研究中心, 江苏 南京 211106)

Research on Improved Fault-Tolerant Control Method for Permanent Magnet Synchronous Motors Based on Hall Position Sensors

ZHU Ye^{1,2}, LAI Bin¹, MIAO Dianji¹, CHU Jianbo^{1*}, HAN Zhenmiao²

(1. School of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. AVIC Jincheng Nanjing Engineering Institute of Aircraft System, Nanjing 211106, China)

Abstract: [Objective] Hall position sensors are prone to faults under harsh environments, mechanical vibrations, and electrical stress. In addition, installation deviations can significantly affect the motor's control accuracy and system stability. To enhance the reliability and fault tolerance of permanent magnet synchronous motor (PMSM) drive systems based on Hall position sensors, this study investigates fault diagnosis methods and fault-tolerant control strategies, aiming to address the limitations of traditional approaches in fault diagnostic efficiency and fault-tolerant control accuracy.

[Methods] To overcome the low efficiency and misjudgment issues of traditional feature-sequence-based fault detection methods, a novel fast fault diagnosis method based on pseudo-acceleration variation thresholds was proposed. This method compared the change in pseudo-acceleration method with a preset threshold at the Hall transition signal to rapidly detect faults. Furthermore, an improved fault-tolerant control method that integrated traditional fault-tolerant interpolation method with the fast diagnosis method was proposed to minimize the effect of Hall installation deviation. The method was combined with the designed adaptive notch angle observer to reduce the second-harmonic errors caused by Hall sensor misalignment, thereby improving fault-tolerant performance.

[Results] Experimental results showed that the proposed fast fault diagnosis method accurately identified both single-phase and dual-phase Hall sensor faults, significantly reducing diagnostic time and avoiding the delays and misjudgments of

traditional detection methods. The improved fault-tolerant interpolation method, combined with the adaptive notch angle observer, accurately estimated rotor position even in the presence of Hall sensor faults, effectively enhancing system stability and control precision. The method maintained excellent control performance particularly under different operating conditions. [Conclusion] The proposed fast fault diagnosis method based on pseudo-acceleration variation thresholds, along with the improved fault-tolerant control strategy, outperforms traditional methods in the case of single-phase Hall sensor faults, dual-phase Hall sensor faults, and under different operating conditions. It provides reliable technical support for the stable operation of motors under Hall sensor faults.

Key words: permanent magnet synchronous motor; Hall position sensor; fault diagnosis; fault-tolerant control; installation deviation

摘要: [目的] 霍尔位置传感器在恶劣环境、机械振动和电气应力等因素影响下容易发生故障,同时安装偏差也会显著影响电机的控制精度和系统稳定性。为了提高基于霍尔位置传感器的永磁同步电机(PMSM)驱动系统的可靠性和容错性能,对霍尔传感器的故障诊断方法和容错控制策略展开研究,旨在解决传统方法在故障诊断效率和容错控制精度方面的不足。【方法】针对传统基于特征序列的故障检测方法存在的效率低和误判问题,提出了一种基于伪加速度变化阈值的新型快速故障诊断方法,该方法在霍尔跳变沿时刻对伪加速度变化量与设定阈值进行比较,从而快速检测故障。此外,为减小霍尔安装偏差的影响,提出一种将传统容错插值法与快速故障

基金项目: 国家自然科学基金(52077100)

National Natural Science Foundation of China (52077100)

诊断相结合的改进容错控制方法。并将该方法与所设计的自适应陷波角度观测器相结合,以减小霍尔安装偏差带来的2次谐波误差,提高容错性能。【结果】试验结果表明,所提快速故障诊断方法能够准确识别单相霍尔和双相霍尔传感器故障,显著缩短诊断时间,避免了传统方法的滞后性和误判问题。改进容错插值法结合自适应陷波角度观测器,在霍尔传感器故障情况下,仍能实现对转子位置的精确估算,有效提高了系统的稳定性和控制精度。特别是在不同工况下,该方法能够保持良好的控制性能。【结论】本文所提基于伪加速度变化阈值的快速故障诊断方法和改进型容错控制策略,在单相霍尔和双相霍尔故障以及不同工况下的表现均优于传统方法,为霍尔传感器故障情况下的电机稳定运行提供了可靠的技术支持。

关键词: 永磁同步电机; 霍尔位置传感器; 故障诊断; 容错控制; 安装偏差

0 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)以其卓越的效率和控制性能,在工业自动化、电动汽车和航空等多个领域中得到广泛应用^[1-7]。PMSM的高性能运行离不开精确的转子位置。传统的转子位置检测方法依赖于高精度传感器,如编码器和旋转变压器,这些传感器虽然提供了准确的位置反馈,但往往伴随着高成本、大体积以及复杂安装等问题。而无位置传感器控制常依赖于电机模型和参数,对系统参数变化和非线性特性敏感,可能无法在全速域内提供可靠的性能^[8-11]。随着技术的发展,低成本、小型化的霍尔位置传感器逐渐成为高精度位置传感器的可行选择,尤其是对成本和安装空间有严格要求的应用场景^[12-15]。然而,由于环境恶劣、机械振动和电气应力等因素而导致的霍尔传感器故障^[16-18],以及人为安装不可避免的机械偏差,这些都将直接影响电机的控制精度和整个系统的稳定性。因此,研究霍尔位置传感器安装偏差的消除、故障诊断和容错控制策略对于确保PMSM系统的可靠性和安全性至关重要。

在霍尔位置传感器的故障诊断方面,文献[19]对霍尔传感器信号故障进行了全面分析,提出了基于霍尔信号跳变沿顺序的检测方法和方向敏感故障诊断方法,有效提高了故障检测效率,但

在双霍尔传感器故障的情况下,这两种方法仍然存在误判风险。为解决此问题,文献[20]提出了一种基于直接冗余的容错控制方法,通过使用额外的霍尔效应传感器提高故障检测速度,但增加了硬件成本和复杂性。文献[21]提出了一种基于边沿时刻预测的开关磁阻电机位置信号故障诊断方法,该方法通过分析位置信号的周期性变化,利用相邻三个边沿时刻预测第四个边沿时刻,并与实际边沿时刻进行对比来判断位置信号是否故障。文献[22]提出了一种时间阈值与状态预测相结合的开关磁阻电机霍尔位置信号故障诊断方法,该方法通过实时对比位置信号的实际状态值与预测状态值,并结合状态值转换时间进行阈值约束,从而检测出各种故障。

针对霍尔传感器安装偏差问题,国内外学者已经进行了大量的工作。文献[23]在霍尔矢量观测器的基础上通过带通频率跟踪滤波和锁相环提取霍尔矢量中两个正交分量的基波,以减小高频干扰,提高转速和位置估计的精度。但当电机运行转速很高时,对观测器带宽的要求较高。可能导致性能下降。文献[24]针对霍尔位置传感器安装偏差问题,提出了一种变参数陷波-比例积分锁相环位置估计方法,该方法通过优化陷波器和比例积分调节器参数,有效减小位置估计中的偶次谐波分量。文献[25]为解决交替极永磁电机中霍尔传感器的不对称性问题,提出了基于非对称霍尔矢量谐波模型的位置估算策略,通过滤除高次谐波实现了高精度估算。文献[26]提出了一种级联双龙伯格观测器的方法,有效抑制了由霍尔信号偏差产生的噪声。然而级联观测器参数设计与电机转速控制器之间的关系相对复杂,增加了设计难度。

此外,一些研究者也尝试通过不同的容错控制方法来提高控制系统的性能。文献[27]提出了一种基于最小二乘法的霍尔传感器故障诊断及容错控制方法,通过最小二乘法拟合曲线进行转子位置估算,并在霍尔传感器故障时通过重构正常霍尔传感器跳变沿的时间间隔实现容错控制。文献[28]提出了一种基于故障诊断过程和矢量跟踪观测器的改进容错控制方法,通过分析加速度估计和故障诊断结果来确定故障诊断过程的持续时间,在故障诊断期间,使用开环观测器控制,

以消除不希望的电流/转矩瞬态。然而,该方法在故障诊断的准确性和速度上存在局限性,尤其在故障类别复杂或系统动态变化时。文献[29]提出了一种基于置信加权学习熵的故障容错控制策略,结合有传感器和无传感器的控制,通过监测两个预测滤波器的权重增量来检测编码器故障,并快速响应。文献[30]深入研究了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,提出了基于角度外插估计法、闭环角度观测器和霍尔矢量跟踪观测器的容错控制方法,并在仿真和试验中验证了其有效性,但在实际应用中这些方法的计算复杂性较高、实时性较差。

综上所述,尽管现有研究在霍尔位置传感器的故障诊断和容错控制方面取得了一定的成果,但仍存在一些局限性。针对这些局限性,本文首先对霍尔位置传感器故障进行分类,提出一种基于伪加速度变化阈值的新型快速故障诊断方法,并将其与容错平均速度插值法结合,改善故障发生时的运行情况;然后,在改进容错插值的基础上提出一种自适应陷波角度观测器,减少霍尔位置传感器安装偏差对容错插值估计角度的影响;最后,通过试验验证了所提方法的有效性。

1 霍尔传感器故障诊断

1.1 霍尔故障分类

霍尔传感器失效可能由恶劣的环境、强烈的振动等多种因素引起,由于霍尔传感器及其后级的检测电路本质上是数字电路,其输出的检测结果通常只有高电平或低电平两种状态。

当霍尔传感器出现故障时,其输出的检测结果将不再随时间或位置变化,而是被锁定在一个固定的电平状态。根据发生故障的传感器数量和具体编号,可以将霍尔故障进行具体分类。故障类型 f_{type} 定义为

$$f_{type} = 4Fault_a + 2Fault_b + Fault_c \quad (1)$$

式中: $Fault_a$ 、 $Fault_b$ 和 $Fault_c$ 分别为 a、b 和 c 相故障标志,正常为 0,故障为 1。

霍尔传感器故障类型分类如表 1 所示。对于 3 个传感器同时失效的情况,需要借助间接检测技术即无位置传感器来估计转子位置,这种类型不在本文讨论范围之内。

此外,霍尔故障还可以根据故障发生的具体

时间或位置进一步细分。以各相霍尔间隔 120° 安装为例。故障角示意图如图 1 所示。图 1 中,实线为霍尔传感器实际输出的位置信号;虚线为在无故障情况下的理想位置信号; h_a 、 h_b 和 h_c 分别为 a、b 和 c 相霍尔电平状态; E_A 为实际信号发生故障的时间点; E_L 为理想信号跳变沿时间点; α 为 E_L 与 E_A 间的相位差,即故障角, $0^\circ < \alpha < 180^\circ$ 。 α 可以反映故障的严重程度。

表 1 霍尔传感器故障类型

Tab. 1 Types of Hall sensor failures

传感器状态	故障类型 f_{type}	故障相
正常情况	0	无
单相霍尔故障	1	c 相
	2	b 相
	4	a 相
双相霍尔故障	3	b、c 相
	5	a、c 相
	6	a、b 相

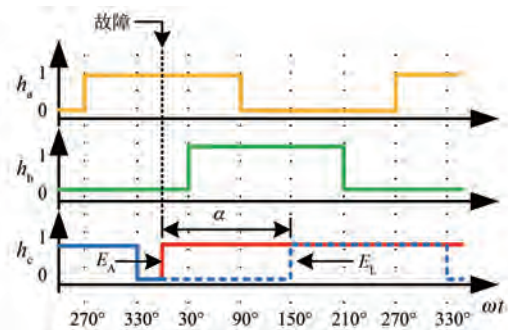


图 1 故障角示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fault angles

按照故障发生时刻即 α 的大小进一步细分。单相霍尔故障中,当 α 较大即 $60^\circ < \alpha < 180^\circ$ 时,霍尔状态序列的跳变顺序出现混乱,如果未能识别故障,角度校正将会产生较大偏差,对驱动系统造成的影响较大。当 α 较小即 $0^\circ < \alpha < 60^\circ$ 时,霍尔状态序列跳变顺序与预期相同,跳变角度与理想角度偏差较小,对系统的影响相对较小。双相霍尔故障可以分为双相霍尔同时故障和双相霍尔非同时故障,其中非同时故障可以看作两个单相霍尔分别故障,与单相霍尔故障类似,故不再细分。

1.2 传统基于特征序列的故障检测方法

为了方便分析三路位置信号的输出变化,将 3 个输出的二进制信号通过式(2)整合成一个状

态值 s :

$$s = 4h_a + 2h_b + h_c \quad (2)$$

在正常运行期间,霍尔状态值 s 可取 1~6 中任意一个整数,而 0 或 7 只在故障情况下出现。在正常运行期间, s 会产生一个固定重复的序列,按照逆时针或顺时针旋转的顺序变化,分别为 5→4→6→2→3→1→5 或 5→1→3→2→6→4→5,如图 2 所示。

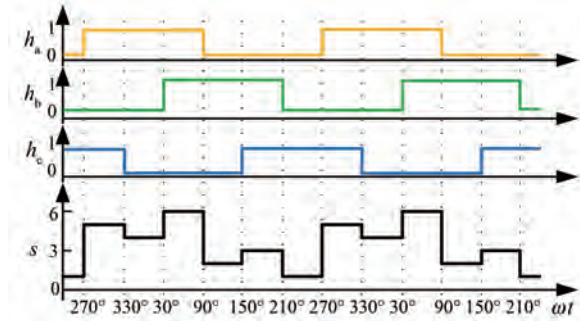


图 2 霍尔状态值变化序列

Fig. 2 Sequences of Hall state value changes

在故障情况下,传感器失效导致信号保持恒定,从而引起 s 序列的变化,通过对比不同故障类型的 s 序列,可以发现每种故障类型都对应着一个独特的、由三个状态值组成的特征序列。因此,通过记录最新的三个 s ,并在每个霍尔信号跳变沿时刻更新 s ,对比实际序列和故障特征序列,可以准确地识别出故障类型^[6]。例如,当 c 相发生单相高电平故障后, s 序列会变为 7→3→1→5→7,当检测到 7→3→1 时即可判定为 c 相故障。可以看出传统故障诊断方法需要等待至少三个状态值才能识别故障类型,存在一定的滞后性。

1.3 新型快速故障检测方法

霍尔扇区的转换持续时间是估计电机速度的关键。单扇区的持续时间为 $\tau(n)$,对应 π 弧度的三扇区持续时间为 $\tau_\pi(n)$,如图 3 所示。

当 $t=t_n$ 时发生单相霍尔或双相霍尔故障,扇区持续时间间隔也随之发生变化,如图 4 所示。此时,时间间隔 $\tau_\pi(n)$ 对应 $\pi-\alpha$ 弧度而不是 π 弧度。此时的实际平均角速度 $\bar{\omega}$ 和估计角速度 $\hat{\omega}$ 的关系为

$$\hat{\omega}(n) = \frac{\pi}{\tau_\pi(n)} > \frac{\pi - \alpha}{\tau_\pi(n)} = \bar{\omega}(n) \quad (3)$$

由式(3)可知, α 使 $\hat{\omega}$ 大于 $\bar{\omega}$,这在加速度估

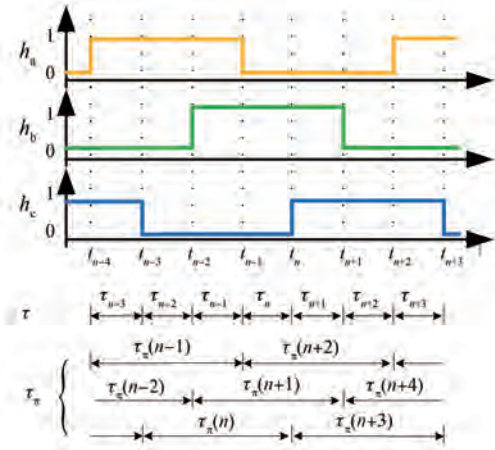


图 3 霍尔信号持续时间划分

Fig. 3 Division of Hall signal duration

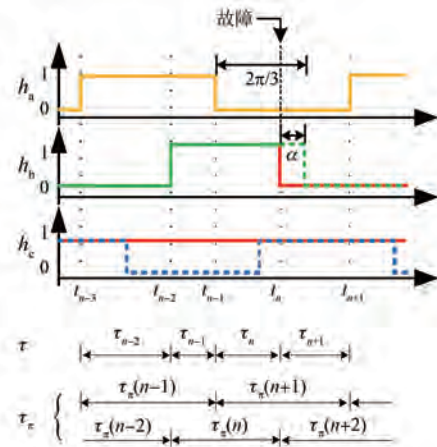


图 4 双相霍尔故障时持续时间示意图

Fig. 4 Schematic diagram of duration under dual-phase Hall sensor failure

计中更为明显。

为了简化,分析恒定速度下估计加速度变化量 $\Delta\hat{a}(n)$ 与 α 之间的关系。以图 4 中 $t=t_n$ 时刻发生的双相霍尔故障为例(b 相与 c 相非同时故障),在 $0 \leq \alpha < 2\pi/3$ 的范围内, $\bar{\omega}$ 为

$$\bar{\omega} = \frac{\pi - \alpha}{\tau_\pi(n)} = \frac{2\pi/3 - \alpha}{\tau(n)} = \frac{\pi}{\tau_\pi(n-1)} \quad (4)$$

此时, $\hat{\omega}$ 和 $\Delta\hat{a}(n)$ 为

$$\hat{\omega}(n) = \frac{\pi}{\tau_\pi(n)} = \frac{\pi}{\pi - \alpha} \bar{\omega} \quad (5)$$

$$\Delta\hat{a}(n) = \hat{a}(n) - a = \frac{\hat{\omega}(n) - \hat{\omega}(n-1)}{\tau(n)} - 0 =$$

$$\frac{\hat{\omega}(n) - \hat{\omega}(n-1)}{(2\pi/3 - \alpha)/\bar{\omega}} = \frac{\alpha}{(\pi - \alpha)(2\pi/3 - \alpha)} \bar{\omega}^2 \quad (6)$$

由式(6)可知,随着 α 变大, $\Delta\hat{a}(n)$ 增加,所以可以通过检测 $\Delta\hat{a}(n)$ 来反映 α 的大小。然而,不同的故障类型以及相同故障类型但不同故障时刻,都会影响 $\tau(n)$ 与 α 之间的关系。

例如发生上述双相霍尔故障(b相与c相非同时故障)时,假设 $0 \leq \alpha < 2\pi/3$,则:

$$\tau(n) = \frac{2\pi/3 - \alpha}{\bar{\omega}} \quad (7)$$

而当发生单相霍尔小角度故障时,假设 $0 \leq \alpha < \pi/3$,则:

$$\tau(n) = \frac{\pi/3 - \alpha}{\bar{\omega}} \quad (8)$$

这也就导致了在各种故障类型下 $\Delta\hat{a}(n)$ 和 α 的关系各不相同。为了统一各种故障类型下的阈值,简化算法,定义一个类似加速度的物理量:伪加速度 $\hat{\eta}(n)$,其表达式为

$$\hat{\eta}(n) = \frac{\hat{\omega}(n) - \hat{\omega}(n-1)}{\tau_{\pi}(n)} \quad (9)$$

在各种故障类型下,无论其发生的时刻,恒有:

$$\tau_{\pi}(n) = \pi - \alpha \quad (10)$$

故在任何情况下,伪加速度变化量为

$$\Delta\hat{\eta}(n) = \hat{\eta}(n) - 0 = \frac{\hat{\omega}(n) - \hat{\omega}(n-1)}{\tau_{\pi}(n)} = \frac{\alpha}{(\pi - \alpha)(\pi - \alpha)} \bar{\omega}^2 \quad (11)$$

如果 α 设置为 $\pi/6$,对于所有故障情况,可以计算伪加速度变化阈值 $\Delta\eta_{th}$ 为

$$\Delta\eta_{th} = \frac{2}{5\pi} \bar{\omega}^2 \quad (12)$$

当 α 大于 $\pi/6$ 时,计算出的 $\Delta\hat{\eta}(n)$ 将在故障发生瞬间超过 $\Delta\eta_{th}$ 。因此,条件 $\Delta\hat{\eta}(n) > \Delta\eta_{th}$ 可以用来判别霍尔故障。

需要注意的是,式(12)中的 $\Delta\eta_{th}$ 是假设恒速下计算得到的,如果速度变化, $\Delta\eta_{th}$ 也会受到影响,由于此影响可忽略, $\Delta\eta_{th}$ 仍然可以用于动态操作。

通过比较 $\Delta\hat{\eta}(n)$ 与 $\Delta\eta_{th}$ 可以实现 α 大于设定的检测故障角的故障诊断。但当 α 小于设定的检测故障角时, $\Delta\hat{\eta}(n)$ 较小,无法检测出故障,而且由于该相故障后,故障信号保持不变,后续也无法通过阈值比较判别该相是否故障。所以本文考

虑将 $\Delta\eta_{th}$ 检测方法与传统的故障序列检测方法相结合来实现完整的霍尔故障诊断。新型快速故障诊断策略流程如图5所示。



图5 新型快速故障诊断策略流程图

Fig. 5 Flowchart of novel fast fault diagnosis strategy

2 快速故障诊断结合容错插值法

当霍尔位置传感器发生故障时,传统的固定 60° 扇区划分不再适用,使得基于扇区的传统插值法失效,需调整故障类型扇区范围和边界,增加了算法的复杂度。为此,本文采用一种容错的平均速度插值法,该方法摒弃了对三相霍尔信号看成整体进行信号处理,转而通过测量三个霍尔传感器各自在 180° 电角度范围内的高低电平持续时间,计算电机在半个电气周期内的平均角速度。利用此平均角速度积分得到估计角度 θ_{est} ,并通过跳变沿进行角度更新以及切换各相估计转速 n_{est} ,实现对转子位置的实时精确估算。持续时间定义以及跳变沿起始角度如图6所示。

θ_{est} 可以表示为

$$\theta_{est} = \int_{t_i}^t \frac{\pi}{T_i} dt + \theta_i, i = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (13)$$

式中: θ_i 为第 i 个跳变沿对应的理想角度; t_i 为第 i 个跳变沿起始时刻; T_i 为前 180° 的持续时间。

例如,在b相霍尔信号上升沿时刻,通过b相前 180° 的持续时间可以计算出b相的平均速度,通过该跳变沿校正 θ_{est} ,清零计时时间, n_{est} 为由c

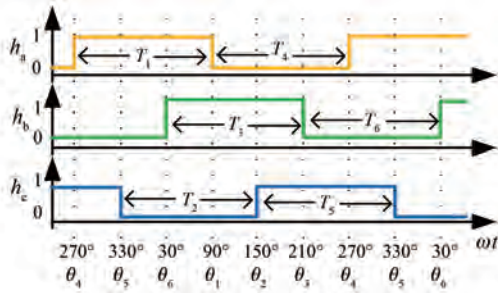


图 6 跳变沿起始角度及持续时间示意图

Fig. 6 Schematic diagram of starting angle of signal edge and duration

相切换到 b 相的平均速度。此时, θ_{est} 可以表示为

$$\theta_{est} = \int_{t_6}^t \frac{\pi}{T_6} dt + \theta_6 \quad (14)$$

如果此时 a 相霍尔正常,其下降沿正常到来,则 θ_{est} 和 n_{est} 就会由 b 相的计时更新到 a 相,通过 a 相的计时更新转速和校正角度。如果此时 a 相霍尔传感器发生置 1 故障, a 相霍尔信号一直维持高电平,其下降沿时间将丢失,此时非故障相的计时将不受故障的影响, θ_{est} 将继续由 b 相通过式(14)计算得到,直到 c 相上升沿到来进行新一轮的更新。

因此,在单相霍尔或双相霍尔传感器故障的情况下,式(13)依旧能有效估计转子角度,只是估计精度会受到影响。该容错插值法不需要对霍尔信号进行复杂地重构或者根据故障状态对扇区进行调整,方法简单高效,而且不需要故障诊断,也可实现霍尔的带故障运行。

但如果仅采用该容错插值法进行电机控制,不进行故障诊断,在故障发生时刻, θ_{est} 和 n_{est} 都存在突变,导致电流产生较大波动,如图 7 所示。

为解决上述问题,提出一种改进策略,将容错插值法与所提新型快速故障诊断方法相结合,其流程如图 8 所示。

当故障发生时,新型快速故障诊断策略可以立即诊断出故障相,从而舍弃当前故障相对 θ_{est} 和 n_{est} 的更新。避免了传统故障检测方法因为诊断滞后而采用故障相运行带来的影响。采用改进容错插值法的单相霍尔故障仿真控制效果如图 9 所示。

3 针对霍尔安装偏差的容错控制

尽管改进容错插值法能够使电机在霍尔传感

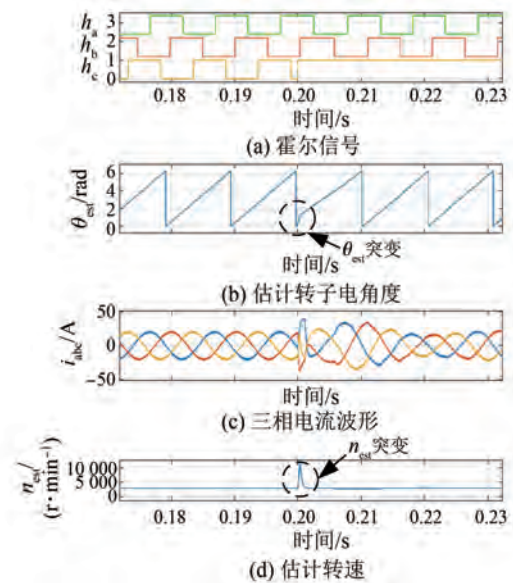


图 7 传统容错插值法控制效果

Fig. 7 Control performance of traditional fault-tolerant interpolation method

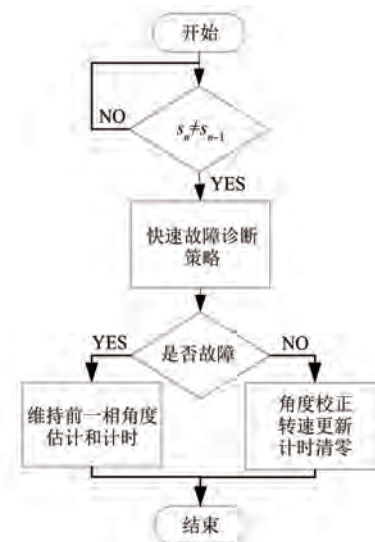


图 8 改进容错插值法流程图

Fig. 8 Flowchart of improved fault-tolerant interpolation method

器故障时继续运行,但此方法存在一些局限性。其一, α 较小时,故障相的识别存在延迟,在诊断期间无法避免采用故障相跳变沿校正 θ_{est} ,导致角度突变影响电机正常运行;其二,当霍尔传感器发生故障,有效的跳变信号减少,使得 θ_{est} 更容易受到霍尔安装误差的影响。因此,有必要对改进容错插值法进行优化,以提高角度估计的准确性和系统的稳定性。

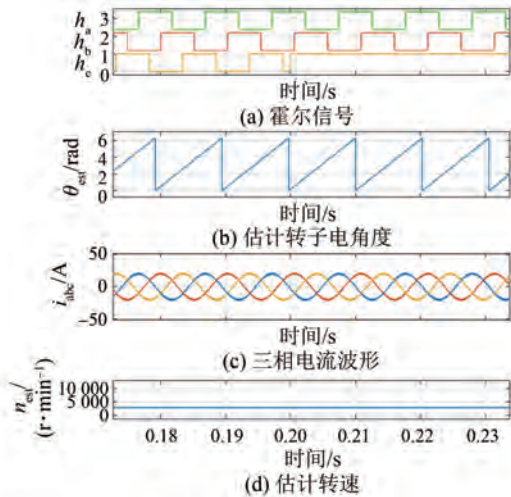


图 9 改进容错插值法控制效果

Fig. 9 Control performance of improved fault-tolerant interpolation method

3.1 霍尔安装偏差分析

人为安装不可避免会导致霍尔安装位置产生偏差,假设三相霍尔安装偏差分别为 θ_{errHa} 、 θ_{errHb} 和 θ_{errHc} ,其中 a、b 相霍尔超前, c 相霍尔滞后。以电机逆时针转动为正,如图 10 所示。

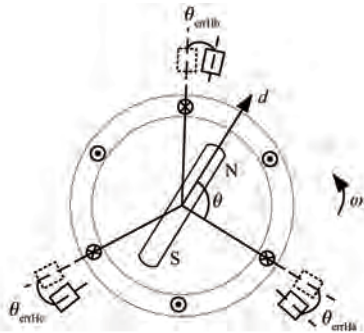


图 10 霍尔安装偏差示意图

Fig. 10 Schematic diagram of Hall sensor installation deviation

霍尔传感器的安装偏差角如图 11 所示。由图 11 可知,霍尔信号跳变沿对应实际角度和理想安装角度存在一个固定的偏差角,这个偏差角度导致基于理想安装角度平均速度法估计出来的角度偏离实际角度,且偏差角随着转子转动周期出现。

假设电机估计转速完全正确,即仅考虑霍尔安装偏差对估计角度偏差的影响。真实角度 θ_{real} 与估计角度 θ_{est} 只存在由霍尔安装偏差角导致的角度偏差 θ_{err} ,表达式为

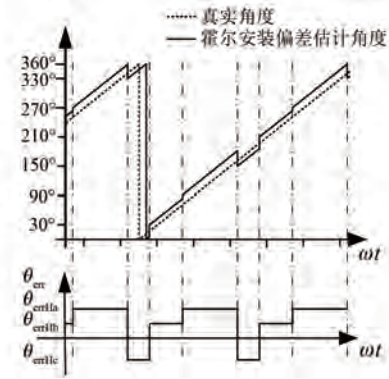


图 11 霍尔传感器的安装偏差角

Fig. 11 Installation deviation angle of Hall sensors

$$\theta_{err}(\omega t) = \theta_{est}(\omega t) - \theta_{real}(\omega t) \quad (15)$$

由于各扇区的安装偏差角固定不变,且和转子所在扇区有关,角度偏差是一个频率为电机转子电频率 2 倍的周期信号,如图 11 所示。 θ_{err} 可进一步表示为

$$\theta_{err}(\omega t) = \begin{cases} \theta_{errHa}, & \pi/2 + n\pi \leq \omega t < 5\pi/6 + n\pi, n = 1, 2, 3, \dots \\ \theta_{errHb}, & 5\pi/6 + n\pi \leq \omega t < 7\pi/6 + n\pi, n = 1, 2, 3, \dots \\ \theta_{errHc}, & 7\pi/6 + n\pi \leq \omega t < 3\pi/2 + n\pi, n = 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (16)$$

对式(16)进行傅里叶展开,可得:

$$\theta_{err}(\omega_e t) = \theta_{offset} + \sum_{n=0}^{\infty} [a_n \cos(2n\omega_e t) + b_n \sin(2n\omega_e t)] \quad (17)$$

式中: ω_e 为电机电角速度; θ_{offset} 、 a_n 和 b_n 为系数,其表达式分别为

$$\theta_{offset}(\theta_{errHa}, \theta_{errHb}, \theta_{errHc}) = \frac{1}{\pi} [\theta_{errHa}^2 + \theta_{errHb}^2 + \theta_{errHc}^2 - \theta_{errHa}\theta_{errHb} - \theta_{errHb}\theta_{errHc} - \theta_{errHc}\theta_{errHa}] + \frac{1}{3}(\theta_{errHa} + \theta_{errHb} + \theta_{errHc}) \approx \frac{1}{3}(\theta_{errHa} + \theta_{errHb} + \theta_{errHc}) \quad (18)$$

$$a_n(\theta_{errHa}, \theta_{errHb}, \theta_{errHc}) = \frac{1}{n\pi} \left\{ (\theta_{errHa} - \theta_{errHc}) \sin \left[2n \left(\frac{\pi}{3} + \theta_{errHa} - \theta_{errHc} \right) \right] + (\theta_{errHc} - \theta_{errHb}) \sin \left[2n \left(\frac{2\pi}{3} + \theta_{errHa} - \theta_{errHb} \right) \right] \right\} \quad (19)$$

$$b_n(\theta_{errHa}, \theta_{errHb}, \theta_{errHc}) = \frac{1}{n\pi} \left\{ (\theta_{errHc} - \theta_{errHa}) \cos \left[2n \left(\frac{\pi}{3} + \theta_{errHa} - \theta_{errHc} \right) \right] + (\theta_{errHb} - \theta_{errHc}) \cos \left[2n \left(\frac{2\pi}{3} + \theta_{errHa} - \theta_{errHb} \right) \right] \right\} \quad (20)$$

通过分析式(18)~式(20),霍尔传感器的安装偏差可以转化为一个具有频率特性的误差函数。这个函数表明安装偏差所引起的转子位置估计误差主要由直流偏置和若干偶次谐波信号叠加而成。这些谐波分量的幅值与霍尔传感器的安装偏差角相关,并且随着谐波频率的增加而线性减少^[24]。

3.2 改进容错插值结合自适应陷波角度观测器

霍尔传感器的安装偏差会在插值法估算的角度信号中引入2次谐波误差。当霍尔传感器故障时,该结论依然有效,只是故障相的安装偏差被视作零。因此,本文提出一种改进容错插值法结合自适应陷波的角度观测器,观测器整体结构框图如图12所示。

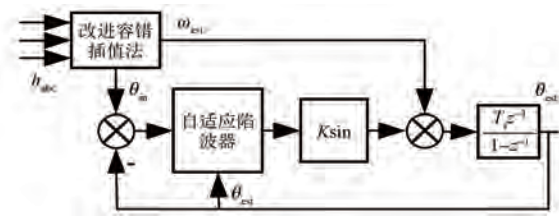


图12 带自适应陷波器的角度观测器结构框图

Fig. 12 Block diagram of structure of angle observer with adaptive notch filter

由于基波频率随电机转速变化而变化,需要动态调整陷波器系数,以满足滤波需要。本文采用自适应陷波器,通过观测器估计的电机角度反馈解耦,无需额外调整陷波器参数即可自适应滤除2次谐波,其结构如图13所示。

图13中, $w_1(t)$ 、 $w_2(t)$ 为陷波器的中间状态量; $\Delta e(t)$ 为输入信号; $\Delta \hat{e}(t)$ 为陷波处理后信号; $y_1(t) = w_1(t) \cos(2\theta)$ 、 $y_2(t) = w_2(t) \sin(2\theta)$; σ 为品质因数的倒数,其决定了陷波器的滤波深度。

根据图13可知:

$$w_1(t) = \sigma \int [\Delta \hat{e}(t) \cos(2\theta)] dt = \sigma \int [\Delta \hat{e}(t) \cos(2\omega t)] dt = \frac{\sigma}{2} \int [\Delta \hat{e}(t) (e^{j2\omega t} + e^{-j2\omega t})] dt \quad (21)$$

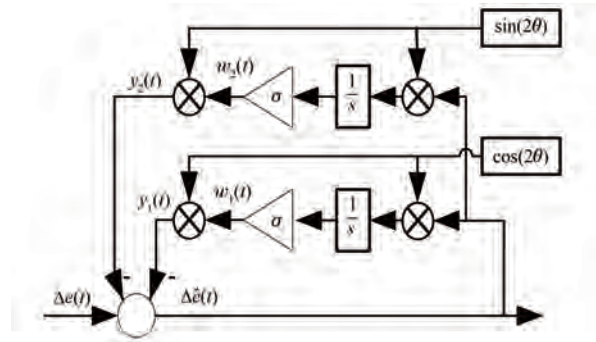


图13 自适应陷波器结构框图

Fig. 13 Block diagram of structure of adaptive notch filter

对式(21)进行拉普拉斯变换,可得:

$$W_1(s) = \frac{\sigma}{2s} [\Delta \hat{e}(s + j2\omega) + \Delta \hat{e}(s - j2\omega)] \quad (22)$$

对 $y_1(t)$ 进行拉普拉斯变换,可得:

$$Y_1(s) = \frac{1}{2} [W_1(s + 2j\omega) + W_1(s - 2j\omega)] = \frac{\sigma}{4(s + 2j\omega)} [\Delta \hat{e}(s) + \Delta \hat{e}(s + 4j\omega)] + \frac{\sigma}{4(s - 2j\omega)} [\Delta \hat{e}(s) + \Delta \hat{e}(s - 4j\omega)] \quad (23)$$

同样地,对 $y_2(t)$ 进行拉普拉斯变换,可得:

$$Y_2(s) = \frac{\sigma}{4(s + 2j\omega)} [\Delta \hat{e}(s) - \Delta \hat{e}(s + 4j\omega)] + \frac{\sigma}{4(s - 2j\omega)} [\Delta \hat{e}(s) - \Delta \hat{e}(s - 4j\omega)] \quad (24)$$

因此 $\Delta \hat{e}(t)$ 对应的拉普拉斯函数 $\Delta \hat{E}(s)$ 可表示为

$$\Delta \hat{E}(s) = \Delta E(s) - Y_1(s) - Y_2(s) = \Delta E(s) - \frac{\sigma s}{s^2 + 4\omega^2} \Delta \hat{E}(s) \quad (25)$$

式中: $\Delta E(s)$ 为 $\Delta e(t)$ 对应的拉普拉斯函数。

故该滤波系统的闭环增益为

$$H(s) = \frac{\Delta \hat{E}(s)}{\Delta E(s)} = \frac{s^2 + 4\omega^2}{s^2 + \sigma s + 4\omega^2} \quad (26)$$

式(26)与传统的二阶陷波器完全相同,其增益在 $s = j2\omega$ 时为0,在 $s \neq j2\omega$ 时接近1。因此,由霍尔安装偏差引起的2次谐波分量被滤除,同时保留了有效信号。图14为额定转速时 σ 不同取值对应的自适应陷波器波特图。

不同转速下,角度观测器的幅频特性曲线如

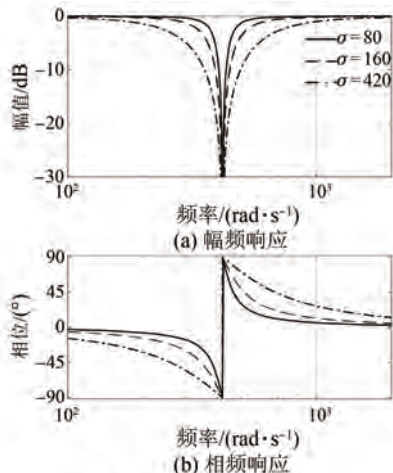


图 14 σ 不同取值对应的自适应陷波器波特图
 Fig. 14 Bode plots of adaptive notch filters with different σ values

图 15 所示。可以看出角度观测器能跟随转速的变化, 较好滤除位置信号中的 2 次谐波, 且保留有效的角度信息。

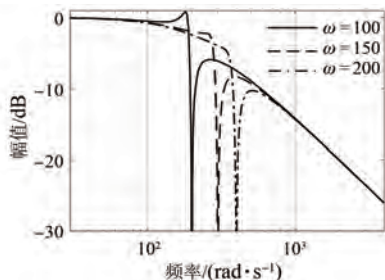


图 15 角度观测器幅频特性曲线
 Fig. 15 Amplitude-frequency characteristic curves of angle observer

4 试验验证

为进一步验证本文所提角度观测器算法有效性, 搭建基于 TMS320F28335 微控制器的矢量控制试验平台。主要包括电机驱动器、辅助电源、示波器和由两台表贴式 PMSM 构成的对拖平台, 如图 16 所示。电机参数如表 2 所示。

表 2 PMSM 参数

Tab. 2 PMSM parameters

参数名称	参数值	参数名称	参数值
极对数 p	2	转子磁链 ψ_r/Wb	0.014 28
定子电阻 R/Ω	0.61	母线电压 V_{dc}/V	24
相电感 L/mH	3	开关频率 f_s/kHz	10
额定功率 P/W	70	额定转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	3 000



图 16 试验平台

Fig. 16 Experimental platform

4.1 故障诊断对比

在电机额定转速 3 000 rpm 下进行各类故障的诊断对比试验。图 17(a) 为 c 相霍尔发生小角度故障的情况。可以看出, 新型故障诊断方法在 c 相故障跳变沿时刻立即检测出故障角大于故障阈值, 判定出 c 相故障; 而传统的特征序列故障检测方法由于故障发生时刻, 并没有影响正常的霍尔状态值序列, 所以在故障发生时刻依旧认为三相霍尔都正常, 滞后 12 ms 检测出符合 c 相故障的特征序列才诊断出 c 相故障。

图 17(b) 为 c 相霍尔发生大角度故障的情况。由于故障角较大, 对于新型故障诊断方法来说, 其检测出的伪加速度变化量明显, 在 c 相故障跳变沿时刻就诊断出 c 相霍尔故障; 而对于传统的特征序列故障诊断方法, 由于霍尔状态序列符合 a 相和 b 相双相霍尔故障的特征序列, 故在故

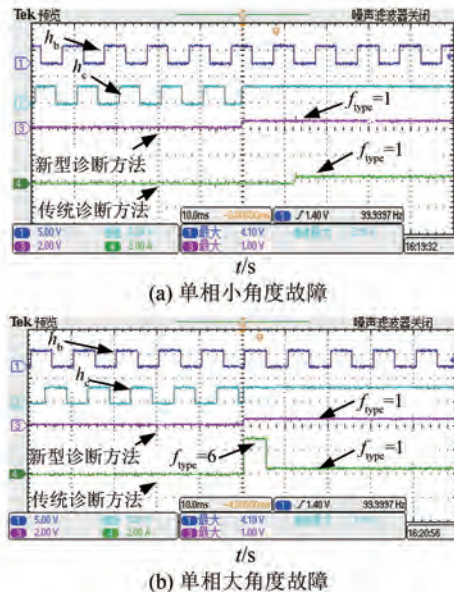


图 17 单相霍尔故障诊断对比
 Fig. 17 Comparison of single-phase Hall sensor fault diagnosis

障发生时刻,误判为 a 相和 b 相双相霍尔故障,滞后 6 ms 才更正为 c 相单相霍尔故障。

图 18 为 b 相和 c 相都发生故障的诊断试验对比。图 18(a) 为 b 相和 c 相同时故障的情况。新型快速诊断方法不再将霍尔信号视作一个整体,而是每相跳变沿都各自进行伪加速变化量的检测,因此即便是同时故障,在故障时刻也能立即检测出 b 相和 c 相霍尔故障。传统故障诊断方法则滞后约 8 ms 才诊断出 b 相和 c 相霍尔故障,而且因为两相霍尔故障,有效的跳变沿减少,扇区间隔持续时间变长,传统的故障检测所需的时间进一步拉长。

图 18(b) 为 c 相先发生故障,而后 b 相也发生故障的情况。新型快速故障诊断方法在 b 相和 c 相故障跳变沿都立即检测出故障;而传统故障诊断方法,因为 c 相故障角度较小没有立即检测出故障,在 b 相故障时刻,误判为 a 相和 c 相双相霍尔故障,滞后 10 ms 更新为 b 相和 c 相霍尔故障。

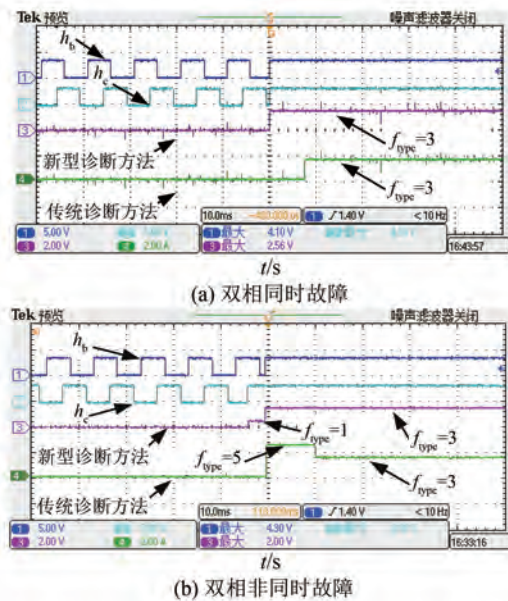


图 18 双相霍尔故障诊断对比

Fig. 18 Comparison of dual-phase Hall sensor fault diagnosis

4.2 容错控制试验

在额定转速 3 000 rpm 和负载 0.1 N·m 的条件下,设定 a 相、b 相和 c 相的安装偏差角分别为 4° 、 -3° 和 -2° ,对改进容错插值法、改进容错插值法结合自适应陷波角度观测器两种容错运行方法

的效果进行对比。

图 19(a) 为 c 相发生单相小角度故障时,仅使用改进容错插值法的容错控制情况。由于故障角较小,系统未能即时识别出故障相,错误地利用故障相的跳变沿校正角度,导致估计角度发生突变。同时扇区持续时间缩短,估计转速增加,进而在 b 相下降沿到来之前,估计角度持续存在较大偏差,引发控制电流畸变。在 b 相下降沿处,角度估计重新校正,电流恢复正常。

图 19(b) 为 c 相发生单相小角度故障时,采用改进容错插值法结合自适应陷波角度观测器的容错控制情况。在故障发生时,角度估计没有发生突变。尽管估计转速增加导致故障期间估计角度的斜率增大,估计角度误差也随之增大,但整体角度误差仍小于仅使用改进容错插值法的情况。因此,故障电流的畸变较小。此外,由于减小了安装偏差的影响,故障前后的电流波形都更加接近理想的正弦波形。

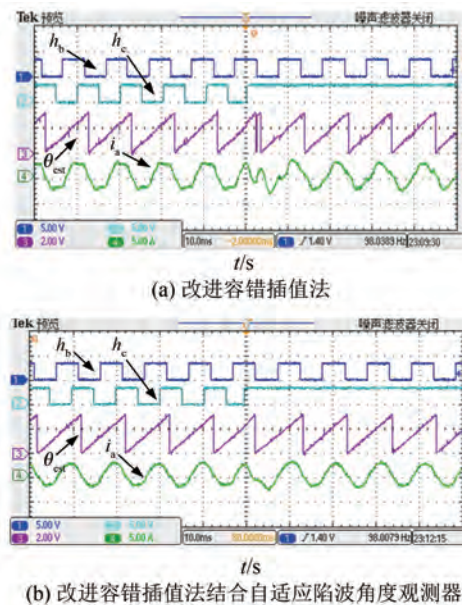


图 19 单相霍尔小角度故障时容错控制对比

Fig. 19 Comparison of fault-tolerant control under single-phase Hall small-angle fault

图 20 为 c 相发生单相大角度故障时两种方法的容错控制效果对比。由于故障角度较大,新型快速故障诊断方法能够迅速识别出故障相,从而避免了故障相跳变沿对估计角度的影响,使得两种诊断方法的估计角度均未出现突变,电流也相对稳定。然而,从图 20(a) 中可以观察到,故障

发生后电流的畸变程度比故障前更为明显,表明故障后估计角度更容易受到霍尔传感器安装偏差的影响。由图 20(b)可知,通过应用自适应陷波角度观测器,无论是故障前还是故障后,电流的畸变情况相较于仅使用改进容错插值法都得到了显著改善。

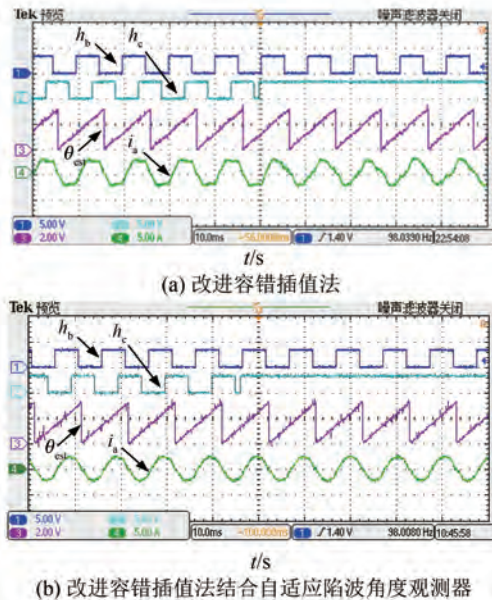


图 20 单相霍尔大角度故障时容错控制对比
 Fig. 20 Comparison of fault-tolerant control under single-phase Hall large-angle faults

图 21、图 22 分别为 b 相和 c 相同时故障、非同时故障的容错控制对比,可见两种方法都能实现双相霍尔故障下电机的持续运行。通过应用自适应陷波角度观测器,故障前后的电流控制效果都优于仅使用改进容错插值法。

为了验证容错控制方法的动态性能,通过试验分析了加减速过程中发生单相故障时的容错控制情况。图 23(a)为电机从 2 000 rpm 加速到 3 000 rpm 过程中,c 相霍尔发生故障的情况。图 23(b)为电机从 3 000 rpm 减速到 2 000 rpm 过程中,c 相霍尔发生故障的情况。可以看出所提改进容错插值法结合自适应陷波角度观测器方法在加减速过程中能较好地实现容错控制。

5 结语

针对传统基于特征序列的故障检测方法存在的效率低和误判问题,提出了一种基于伪加速度变化阈值的快速故障诊断方法。试验结果表明,

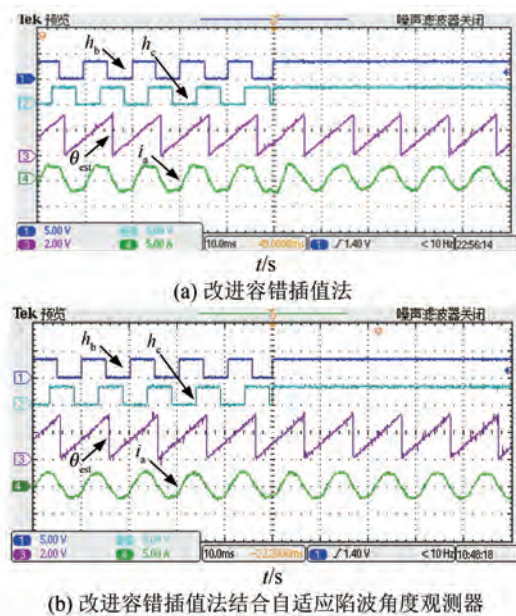


图 21 双相霍尔同时故障时容错控制对比
 Fig. 21 Comparison of fault-tolerant control under simultaneous dual-phase Hall faults

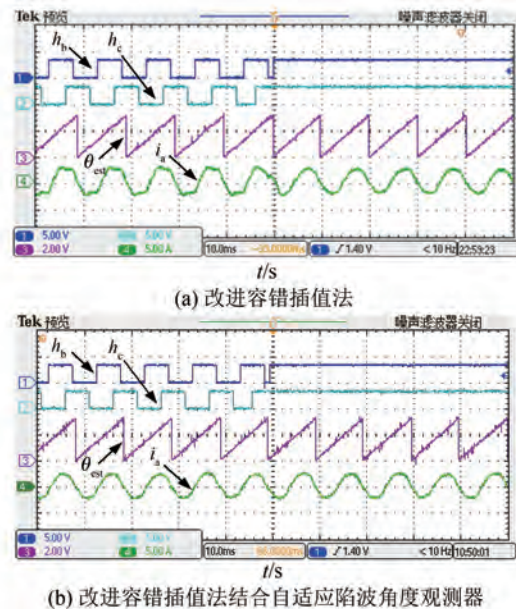


图 22 双相霍尔非同时故障时容错控制对比
 Fig. 22 Comparison of fault-tolerant control under non-simultaneous dual-phase Hall faults

所提方法能够准确识别单相霍尔和双相霍尔故障,其与容错插值法结合能够在故障发生时快速响应,有效避免了故障对电机运行性能的影响。同时结合所设计的自适应陷波角度观测器,能够很好地减小霍尔安装偏差的影响,实现对电机的转子位置的精确估计,确保了电机控制的稳定性

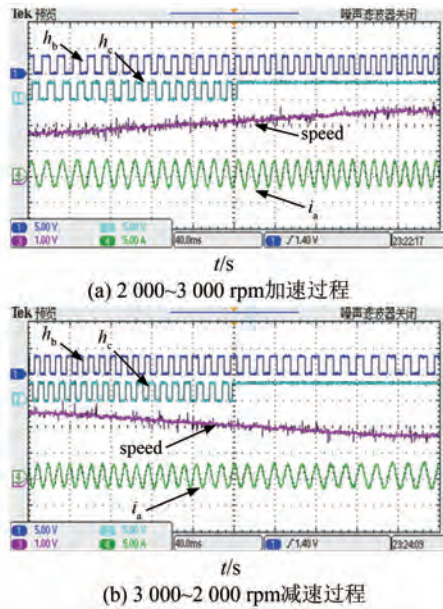


图 23 加减速过程中单相霍尔故障容错控制效果

Fig. 23 Fault-tolerant control performance during acceleration and deceleration process with single-phase Hall fault

和可靠性。相比于传统方法,本文所提故障诊断和容错控制方法在检测效率和系统稳定性方面均有显著提升。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

朱叶和赖彬进行了方案设计、试验研究、内容总结与论文撰写,缪典佶和韩镇锚在研究过程中提供了协助,储剑波参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, experimental research, content summary, and paper writing were carried out by Zhu Ye and Lai Bin. Research assistance was provided by Miao Dianji and Han Zhenmiao. The manuscript was reviewed and revised by Chu Jianbo. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

[1] 钱轶群, 张孜乐, 杨依林, 等. 基于改进经验小波

变换的永磁同步电机故障诊断策略[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(1): 12-21.

QIAN Y Q, ZHANG Z L, YANG Y L, et al. Fault diagnosis strategy for permanent magnet synchronous motors based on improved empirical wavelet transform [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(1): 12-21.

[2] 程梦坤, 储剑波. 基于分数阶扩展滑模扰动观测器的PMSM无模型控制算法研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(10): 51-63.

CHENG M K, CHU J B. Research on model-free control algorithm for PMSM based on fractional-order extended sliding mode disturbance observer [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(10): 51-63.

[3] 赵金涛, 郭凯凯, 高雄, 等. 基于电流矢量分析的PMSM系统开路故障诊断方法[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(1): 64-73.

ZHAO J T, GUO K K, GAO X, et al. Open-circuit fault diagnosis method for PMSM systems based on current vector analysis [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(1): 64-73.

[4] 张琳元, 张清艺, 张志锋. 基于非线性观测器的永磁同步电机位置估计算法研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(3): 79-85.

ZHANG L Y, ZHANG Q Y, ZHANG Z F. Research on position estimation algorithm of permanent magnet synchronous motor based on nonlinear observer [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(3): 79-85.

[5] 陈勇志, 张立嘉, 刘旭东. 基于时变扰动观测器的永磁同步电机预设性能滑模控制[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(2): 148-158.

ZHANG Y Z, ZHANG L J, LIU X D. Research on position estimation algorithm of permanent magnet synchronous motor based on nonlinear observer [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(2): 148-158.

[6] 李耀华, 种国臣, 郭伟超, 等. 一种永磁同步电机模型预测转矩控制简化策略研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(9): 42-50.

LI Y H, CHONG G C, GUO W C, et al. Study on a simplified strategy for model predictive torque control of permanent magnet synchronous motors [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(9): 42-50.

- [7] 张国强, 杜锦华. 永磁同步电机无位置传感器控制技术综述[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(1): 1-13.
ZHANG G Q, DU J H. Review of position sensorless control technology for permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(1): 1-13.
- [8] 时隋翔, 刘瀚文, 王玉彬. 基于 EKF 的 IPMSM 无位置传感器控制估计误差补偿方法[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(8): 20-29.
SHI S X, LIU H W, WANG Y B. Estimation error compensation method for sensorless control of interior permanent magnet synchronous motors based on extended Kalman filter [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(8): 20-29.
- [9] 黄玲林, 王爽, 李志伟. 基于单直流母线电流采样的永磁同步电机无位置传感器控制研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(9): 51-59.
HUANG L L, WANG S, LI Z W. Research on sensorless control of permanent magnet synchronous motor based on single DC bus current sampling [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(9): 51-59.
- [10] 米彦青, 袁兵, 邹成智. 电动飞机电推进用永磁同步电机无传感器控制技术综述[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(1): 60-76.
MI Y Q, YUAN B, ZOU C Z. Review on sensorless control technology of permanent magnet synchronous motor for electric aircraft propulsion system [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(1): 60-76.
- [11] 郭伟, 罗力成, 陆江燕, 等. 基于线性自抗扰控制的永磁同步电机无传感器控制[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(8): 1-8.
GUO W, LUO L C, LU J Y, et al. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor based on linear active disturbance rejection control [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(8): 1-8.
- [12] 荀倩, 王培良, 蔡志端, 等. 霍尔转子位置预估方法及其误差校正[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 145-155.
XUN Q, WANG P L, CAI Z D, et al. Hall rotor position estimation method and its error compensation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 145-155.
- [13] 赵远洋, 韩邦成, 陈宝栋. 基于霍尔矢量相位跟踪的永磁同步电机转子位置与速度估算方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(15): 3147-3157.
ZHAO Y Y, HAN B C, CHEN B D. Speed and rotor position estimation for PMSM based on Hall vector phase-tracking [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(15): 3147-3157.
- [14] 蔡炯炯, 张亚成, 蒋丽君, 等. 基于马鞍形磁场的永磁直线电机位置解算方法[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(9): 46-52.
CAI J J, ZHANG Y C, JIANG L J, et al. A method to calculate the position of permanent magnet linear motor based on saddle-shaped magnetic field [J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(9): 46-52.
- [15] 赵德堂, 张懿, 魏海峰. 永磁同步电机多传感器组合全闭环矢量控制方法[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(3): 6-10.
ZHAO D T, ZHANG Y, WEI H F. Multi-sensor combination full closed-loop vector control method of permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(3): 6-10.
- [16] 张余超, 迟颂, 李雪, 等. 基于霍尔元件的永磁同步电机转子位置辨析[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(8): 19-23+85.
ZHANG Y C, CHI S, LI X, et al. Rotor position analysis of permanent magnet synchronous motor based on Hall-effect sensors [J]. Electric Machines & Control Application, 2018, 45(8): 19-23+85.
- [17] 朱孟美, 张云, 解兆延, 等. 基于霍尔位置传感器的电动汽车用永磁同步电机的控制[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(11): 23-27.
ZHU M M, ZHANG Y, XIE Z Y, et al. Controlling of permanent magnet synchronous motor in electric vehicle with Hall position sensors [J]. Electric Machines & Control Application, 2016, 43(11): 23-27.
- [18] 张新荣, 林莲, 张东升, 等. 基于磁场定向控制理论的无刷直流电机控制[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(11): 25-29+81.
ZHANG X R, LIN L, ZHANG D S, et al. Brushless DC motor control based on field oriented control theory [J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(11): 25-29+81.

- [19] DONG L H, JATSKEVICH J, HUANG Y W, et al. Fault diagnosis and signal reconstruction of Hall sensors in brushless permanent magnet motor drives [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2016, 31(1): 118-131.
- [20] 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.
- [21] 胡荣光, 邓智泉, 蔡骏, 等. 一种开关磁阻电机位置信号故障诊断与容错控制方法[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(7): 104-113.
- HU R G, DENG Z Q, CAI J, et al. Fault diagnosis method and fault-tolerant control of position signals for switched reluctance motors [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(7): 104-113.
- [22] 邵杰, 王业超. 开关磁阻电机霍尔位置信号的故障诊断方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(1): 43-52.
- SHAO J, WANG Y C. Methods for diagnosing fault in Hall position signals of switched reluctance motors [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(1): 43-52.
- [23] 李垣江, 苗奎星, 魏海峰, 等. 基于带通频率跟踪滤波器的永磁同步电机转子位置与速度估算[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(21): 5402-5413.
- LI Y J, MIAO K X, WEI H F, et al. Permanent magnet synchronous motor rotor position and speed estimation methodology based on band-pass frequency tracking filter [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(21): 5402-5413.
- [24] 廖勇, 李蓬威, 林豪, 等. 一种变参数 N-PI 型 PLL 的霍尔位置传感器 PMSM 转子位置估计方法[J]. *电机与控制学报*, 2020, 24(11): 27-36+47.
- LIAO Y, LI P W, LIN H, et al. Hall sensor PMSM rotor position estimation method with variable parameter N-PI PLL [J]. *Electric Machines and Control*, 2020, 24(11): 27-36+47.
- [25] 张涵, 王凯, 李健, 等. 基于开关型霍尔的交替极永磁电机位置估算策略[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(7): 2377-2384+2416.
- ZHANG H, WANG K, LI J, et al. Position estimation strategy of consequent-pole PM machine based on binary Hall sensor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(7): 2377-2384+2416.
- [26] 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.
- [27] 王凯, 刘细平, 张云, 等. BLDCM 霍尔传感器故障诊断与容错控制[J]. *电机与控制应用*, 2021, 48(2): 84-90.
- WANG K, LIU X P, ZHANG Y, et al. Fault diagnosis and fault-tolerant control of Hall sensor of brushless DC motor [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2021, 48(2): 84-90.
- [28] DONG L H, HUANG Y W, JATSKEVICH J, et al. Improved fault-tolerant control for brushless permanent magnet motor drives with defective Hall sensors [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2016, 31(2): 789-799.
- [29] NOVAK Z. Confidence weighted learning entropy for fault-tolerant control of a PMSM with a high-resolution Hall encoder [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(5): 5176-5186.
- [30] 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+3689.
- DONG L H, LIU J L. 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+3689.

收稿日期:2025-03-07

收到修改稿日期:2025-04-10

作者简介:

朱叶(1988-),男,硕士研究生,研究方向为永磁同步电动机控制,zhuye19881027@126.com;

*通信作者:储剑波(1972-),男,博士,副教授,研究方向为电力电子与电力传动,永磁同步电机/异步电机控制,yubo_chu@nuaa.edu.cn。