

BLDCM 霍尔传感器故障诊断与容错控制^{*}

王 凯, 刘细平, 张 云, 陈 苗

(江西理工大学 电气工程与自动化学院, 江西 赣州 341000)

摘 要: 为了提高无刷直流电机 (BLDCM) 运行的可靠性, 提出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。利用最小二乘法拟合曲线作为一阶泰勒算法的评价模型, 对电机的转子位置进行精确估算, 从而实现对有故障霍尔传感器的诊断。采用正常霍尔位置传感器跳变沿对霍尔传感器故障下丢失的跳变沿时间进行重构, 重新获得最小二乘法拟合曲线。该方法能实现霍尔传感器故障下的容错控制, 从而有效抑制机械安装偏差对霍尔传感器故障下位置估算错误的产生。试验结果表明, 提出的故障诊断方法能快速准确地识别故障霍尔传感器, 且提出的容错控制方法能够有效改善故障时的系统性能。

关键词: 无刷直流电机; 最小二乘法; 容错控制; 故障诊断; 霍尔传感器

中图分类号: TM 33 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)02-0084-07

doi: 10.12177/emca.2020.182

Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control of Hall Sensor of Brushless DC Motor^{*}

WANG Kai, LIU Xiping, ZHANG Yun, CHEN Miao

(School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: In order to improve the operating reliability of the brushless DC motor (BLDCM), a Hall sensor fault diagnosis and fault-tolerant control method based on the least square method is proposed. Using the least square fitting curve as the evaluation model of the first-order Taylor algorithm, the rotor position of the motor is accurately estimated, so as to realize the diagnosis of the faulty Hall sensor. The jump time lost under the fault of the Hall sensor is reconstructed by adopting the jump time of the normal Hall position sensor, and the least square fitting curve is obtained again. This method can realize the fault-tolerant control under the fault of Hall sensor, and effectively restrain the mechanical installation deviation to estimate the position error of the Hall sensor failure. The experimental results show that the proposed fault diagnosis method can quickly and accurately identify the fault Hall sensor, and the fault-tolerant control method can effectively ameliorate the system performance when the fault occurs.

Key words: brushless DC motor (BLDCM); least square method; fault-tolerant control; fault diagnosis; Hall sensor

0 引 言

无刷直流电机 (BLDCM) 具有效率高、体积

小、机械结构简单等优点, 已逐渐成为电机调速领域的热门研究对象。通常, 电机转子位置和转速多采用光电编码器、旋转变压器、磁编码器等进行

收稿日期: 2020-11-10; 收到修改稿日期: 2020-11-25

^{*} 基金项目: 江西省自然科学基金项目 (20181BAB206035)

作者简介: 王 凯 (1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机驱动与容错控制。

刘细平 (1976—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为稀土永磁电机设计与控制、新能源发电技术、智能电网技术。
(通信作者)

采集,但因体积较大,硬件成本高及接口线路复杂等因素制约了其在低成本驱动领域的发展。BLDCM 中使用成本较低及体积较小的霍尔传感器作为位置检测元件在一定程度可解决此问题,但其在恶劣情况下易受到损坏。因此,为了提高 BLDCM 驱动系统的安全及可靠性,开展霍尔传感器故障诊断及容错控制的研究具有十分重要的意义。

许多专家学者针对霍尔传感器故障诊断和容错控制的方法进行了深入的研究。文献[1]通过比较相邻 2 个霍尔换相区的时间段来实现霍尔传感器的故障诊断,但其在诊断时需等到后一轮霍尔换相产生才能进行,故障诊断效率较低。而在容错控制时,则利用正常霍尔传感器换相时间间隔替换故障时间间隔,其主要取决于上一轮换相时间,导致容错控制出现滞后。文献[2]提出基于线电压频谱分析进行诊断的方法,但复杂的离散傅里叶变换计算,影响故障诊断效率和容错控制效果。文献[3]通过对比反电动势观测器与霍尔传感器估算的转子位置来判断当前霍尔传感器故障情况,并进行容错控制,但系统复杂和成本较高,且霍尔传感器位置估算易受机械安装偏差的影响,导致对比差值过大而使故障诊断失效。文献[4]在电机加减负载情况下,通过加入时间补偿系数,比较 2 个相邻霍尔换相区的时间宽度,从而判断当前霍尔传感器的状态,但时间补偿系数依赖前期调参,系数无法随系统变化,因此易导致故障诊断失效。文献[5]提出了 3 种容错控制方法,其中基于外插法和闭环角度观测器的容错控制均会使估算角度出现明显滞后,而利用霍尔矢量跟踪观测器时矢量变换将会增大控制器运算时间。文献[6]通过试验对比 3 种改进的霍尔传感器故障补偿策略,其中基于降阶观测器补偿方法测试效果最佳,能有效地削弱因霍尔位置传感器机械偏差造成电机容错时转速波动的影响。文献[7]提出基于霍尔状态序列的故障检测和容错控制方法,其故障诊断效率较低,容错控制中位置估算存在较大波动。

基于上述研究,为了提高故障诊断速率和降低因机械安装导致霍尔传感器磁极检测偏差对位置估算的影响^[8],需深入研究 BLDCM 霍尔传感器故障诊断及容错控制技术。本文通过比较

最小二乘法拟合曲线与一阶泰勒算法两者估算的位置值,实时诊断霍尔传感器工作状态,有效提升诊断效率。在霍尔传感器出现故障时,利用正常霍尔传感器跳变沿的时间间隔对故障下的跳变沿时间实施重构,并重新建立坐标点及拟合曲线,利用重构后的拟合曲线对系统采取容错控制。理论分析和试验结果表明,该方法能够较好地实现 BLDCM 霍尔传感器的故障诊断及容错控制,有效改善故障下的系统性能。

1 BLDCM 驱动系统

1.1 基于霍尔传感器 BLDCM 驱动系统

图 1 所示为 BLDCM 驱动系统基本结构。主要由控制器、驱动器、BLDCM 及霍尔传感器等组成。BLDCM 转子位置信息的采集是其实现矢量控制的关键^[9],为整个驱动系统稳定的前提条件。通过霍尔传感器只能在每个电周期内采集 6 个离散的位置信号,将无法实现矢量控制。因此,需研究相应算法估算矢量控制所需的转子位置信息,并将估算结果进行微分处理以获取平均速度和二次微分后的平均加速度。然而转子速度及位置估算的精度将决定 BLDCM 矢量控制性能的优劣,进一步影响系统的稳定性。

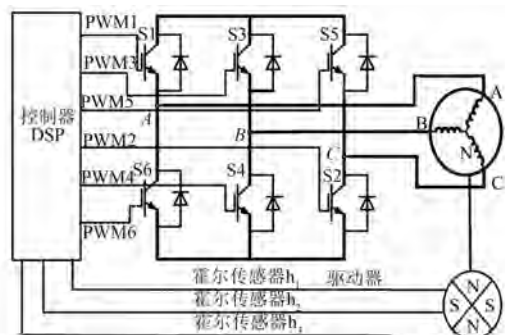


图 1 BLDCM 驱动系统的基本结构

1.2 基于一阶泰勒的位置估算法

利用线性外插法的位置估算基本原理为在一个霍尔扇区中电机转速恒定的前提下,只有保证霍尔扇区中转速恒定,才能实现估算转速与实际转速基本一致且估算位置偏差较小。若电机出现剧烈加减速,将导致转子位置估算出现严重偏差,且随偏差的不断累加,将会影响控制系统的稳定性。为此,通过对线性方程一阶泰勒展开可获得二阶导,引入加速度^[10],从而提高转子位置估算

精度。利用位置间隔 $\Delta\theta$ 和霍尔跳变沿相邻的 2 个时刻 $\tau(n)$ 和 $\tau(n-1)$, 可以估算电机平均速度 $\bar{\omega}(n)$:

$$\bar{\omega}(n) = \frac{\Delta\theta(n)}{\tau(n) - \tau(n-1)} \quad (1)$$

根据式(1)可估算相邻 2 个霍尔扇区的平均速度 $\bar{\omega}(n-1)$ 和 $\bar{\omega}(n-2)$, 通过采集相邻 2 个霍尔跳变沿时刻 $\tau(n)$ 和 $\tau(n-1)$, 可获得加速度 $a(n-1)$:

$$a(n-1) = \frac{\bar{\omega}(n-1) - \bar{\omega}(n-2)}{\tau(n) - \tau(n-1)} \quad (2)$$

利用式(1)和式(2)估算出平均速度 $\bar{\omega}(n-1)$ 和加速度值 $a(n-1)$, 通过读取控制器的寄存器当前时刻值 $t \in [\tau_n, \tau_{n+1}]$, 可估算当前的电机转子速度 $\bar{\omega}(t)$:

$$\bar{\omega}(t) = \bar{\omega}(n-1) + a(n-1)[t - \tau(n)] \quad (3)$$

根据式(3)估算当前位置的转子速度, 设转子初始位置为 $\theta_e(n)$, 则可估算当前转子位置 $\theta_m(t)$:

$$\theta_m(t) = \theta_e(n) + \bar{\omega}(n-1)[t - \tau(n)] + a(n-1)[t - \tau(n)]^2 \quad (4)$$

2 霍尔传感器故障诊断

当前霍尔传感器故障诊断的方法主要有: (1) 基于霍尔状态序列的故障诊断方法。其利用 1 个电周期内霍尔传感器固定 6 个状态顺序变化以实现故障诊断^[11]。(2) 利用霍尔跳变沿序列的故障诊断方法。霍尔的每个跳变沿均对应相应的转子位置, 通过判断 6 个跳变沿顺序, 能够判断是否存在故障。(3) 相邻霍尔扇区时间间隔比较法。通过对比相邻扇区时间是否超出了误差范围, 从而判定霍尔传感器当前状态。

上述霍尔传感器故障诊断方法易受因机械安装导致霍尔传感器磁极检测偏差对位置估算的影响, 且需在下一轮霍尔跳变沿产生才能进行故障诊断。为了解决此问题, 通过引入最小二乘法对转子位置进行拟合, 能够较大程度削弱机械安装对霍尔传感器磁极检测造成的偏差。通过利用 1 个电周期内 6 个跳变沿对应的时间间隔及边界位置进行插值, 可拟合成一个电机转子位置估算多项式。转子位置插值曲线如图 2 所示。利用最小二乘法拟合曲线作为与一阶泰勒算法的评价模

型, 对比两者位置估算的差值, 可实现霍尔传感器实时故障诊断。

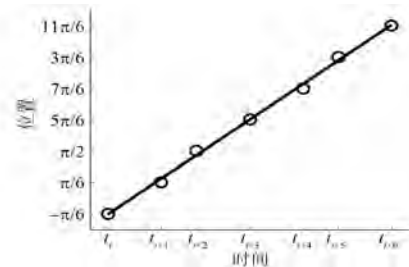


图2 转子位置插值曲线

将一阶泰勒展开式为二次多项式, 为了满足同等条件, 需利用最小二乘法拟合成二次多项式。根据最小二乘法二次多项式可得:

$$S(x) = b_0x^2 + b_1x + b_2 \quad (5)$$

式中: $Q_{\min}$ 为两者残差最小平方和; $S(x_i)$ 为二次多项式估算值; y_i 为一阶泰勒估算。

$$Q_{\min} = \sum_{i=1}^m [S(x_i) - y_i]^2 \quad (6)$$

式(6)为一个求极值的问题, 多元函数求极值是最小二乘法多项式必要条件, 对 $Q_{\min}$ 求偏导数后, 极值表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial b_0} = 2 \sum_{i=1}^m [S(x_i) - y_i] = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial b_1} = 2 \sum_{i=1}^m [S(x_i) - y_i] x_i = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial b_2} = 2 \sum_{i=1}^m [S(x_i) - y_i] x_i^2 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式(7)为关于 b_0, b_1, b_2 的线性方程组, 称为法方程^[12], 用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} 7 & \sum_{i=1}^7 x_i & \sum_{i=1}^7 x_i^2 \\ \sum_{i=1}^7 x_i & \sum_{i=1}^7 x_i^2 & \sum_{i=1}^7 x_i^3 \\ \sum_{i=1}^7 x_i^2 & \sum_{i=1}^7 x_i^3 & \sum_{i=1}^7 x_i^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^7 y_i \\ \sum_{i=1}^7 x_i y_i \\ \sum_{i=1}^7 x_i^2 y_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式(8)可证明, 系数矩阵为一个非奇异矩阵, 必然存在唯一的解 (b_0, b_1, b_2) 。通过求多元函数极值, 可推导出 b_0, b_1, b_2 系数为

$$\begin{cases} b_0 = \frac{\sum_{i=1}^7 y_i - b_1 \sum_{i=1}^7 x_i - b_2 \sum_{i=1}^7 x_i^2}{7} \\ b_1 = \frac{\sum_{i=1}^7 y_i x_i - b_0 \sum_{i=1}^7 x_i - b_2 \sum_{i=1}^7 x_i^3}{\sum_{i=1}^7 x_i^2} \\ b_2 = \frac{\sum_{i=1}^7 y_i x_i^2 - b_0 \sum_{i=1}^7 x_i^2 - b_1 \sum_{i=1}^7 x_i^3}{\sum_{i=1}^7 x_i^4} \end{cases} \quad (9)$$

求解 b_0, b_1, b_2 3 个系数需获取相应霍尔传感器跳变沿对应的时间间隔及边界位置, 横坐标 x_i 为霍尔跳变沿的时间间隔, 记为 $T_i \sim T_{i+5}$, y_i 为边界位置^[13]。插值点的坐标如表 1 所示。

表 1 插值点的坐标

i	x_i	y_i
1	0	$-\pi/6$
2	T_i	$\pi/6$
3	$T_{i+1} + T_i$	$\pi/2$
4	$T_i + T_{i+1} + T_{i+2}$	$5\pi/6$
5	$T_i + T_{i+1} + T_{i+2} + T_{i+3}$	$7\pi/6$
6	$T_i + T_{i+1} + T_{i+2} + T_{i+3} + T_{i+4}$	$3\pi/2$
7	$T_i + T_{i+1} + T_{i+2} + T_{i+3} + T_{i+4} + T_{i+5}$	$11\pi/6$

每产生 6 个霍尔跳变沿, 需对二次多项式重新拟合。设 $\theta_e(t)$ 是初始霍尔边界位置, $\theta_g(t)$ 为当前估算的位置。可推导出最小二乘法转子位置估算方程:

$$\theta_g(t) = \theta_e(t) + b_0 t^2 + b_1 t^2 + b_2 \quad (10)$$

当程序触发中断时, 通过寄存器获取当前时间, 依次代入一阶泰勒公式式(4)与最小二乘法二次多项式(10)中, 可得当前时刻估算的一阶泰勒位置值 $\theta_m(t)$ 与最小二乘法位置值 $\theta_g(t)$ 。通过预先设定差值 ε_{err} , 比较 2 个位置 $\theta_m(t)$ 和 $\theta_g(t)$, 判断当前霍尔传感器是否在位置估算范围内, 若

差值超出 ε_{err} ^[14], 可判定当前跳变沿的霍尔传感器出现故障。有:

$$|\theta_g(n) - \theta_m(n)| > \varepsilon_{err} \quad (11)$$

上述分析表明, 利用最小二乘法多项式作为一阶泰勒位置估算的评价模型, 可削弱机械安装给霍尔传感器故障检测造成的影响, 且不存在完成下一轮霍尔跳变沿才能进入故障诊断的问题, 可有效提高诊断效率及准确性。

3 基于最小二乘法的容错控制

当霍尔传感器出现故障时, 其输出信号将失效, 并导致控制器无法获取原有相邻跳变沿时间。此时需捕获正常霍尔传感器的跳变沿时间, 以便估算故障时的电机平均速度及加速度, 并由此推导跳变沿丢失处及其前一个跳变沿的时间间隔, 重新对最小二乘法二次多项式重构, 从而实现容错控制。下面分析单霍尔和双霍尔故障情况。

单霍尔故障情况如图 3 所示, 若 h_3 出现故障, 跳变沿将会丢失 P_2 和 P_5 , 一个电周期内, 有效霍尔跳变沿由原来的 6 个变成 4 个, $\Delta\theta(n-1)$ 和 $\Delta\theta(n+1)$ 对应位置间隔由正常的 $\Delta\theta = \pi/3$ 变成 $\Delta\theta = 2\pi/3$ 。其他 2 类单霍尔传感器 h_1, h_2 故障下的跳变沿丢失及位置间隔增大的情况与 h_3 故障类似。

双霍尔故障情况如图 4 所示, 若 h_2 与 h_3 发生故障, 跳变沿将会丢失 P_2, P_3, P_5 和 P_6 , 一个电周期内, 有效跳变沿由原来的 6 个变成 2 个, $\Delta\theta(n-1)$ 和 $\Delta\theta(n+1)$ 对应位置间隔由正常的 $\Delta\theta = \pi/3$ 变为 $\Delta\theta = \pi$ 。其他两类双霍尔传感器故障分别为 h_1 和 h_2, h_1 和 h_3 故障下跳变沿的丢失及位置间隔增大情况, 与 h_2, h_3 故障类似。

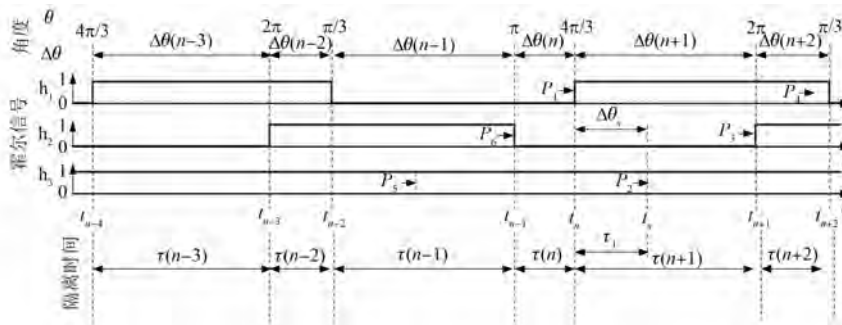


图 3 单霍尔故障情况

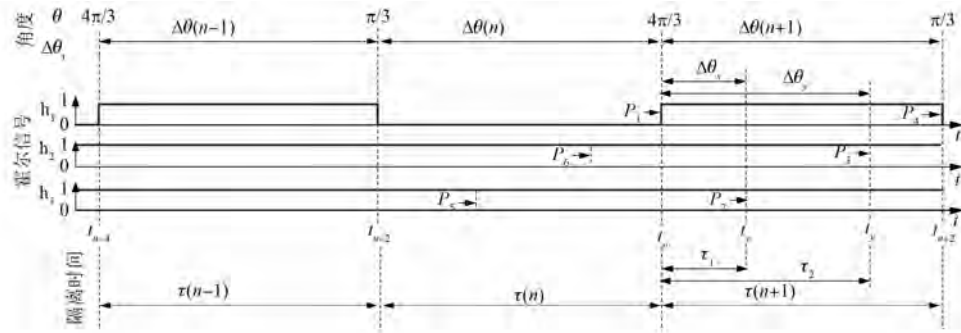


图4 双霍尔故障情况

若霍尔传感器出现故障,需在丢失跳变沿的前一个跳变沿 t_n 处估算出与 t_x 处丢失跳变沿之间的时间间隔,记为 τ_x 。 $\Delta\theta_x$ 为丢失跳变沿处与其前面相邻的跳变沿处之间的位置间隔。由式(3)和式(4)可得:

$$\tau_x = \frac{-\tilde{\omega}(n) + \sqrt{[\tilde{\omega}(n)]^2 + 2\eta(n)\Delta\theta_x}}{\eta(n)} \quad (12)$$

当电机加速度较小时,式(12)将导致估算的时间间隔出现较大偏差。当匀速运动时,加速度为零,时间间隔将会无穷大,这将导致程序中的寄存器溢出,需对式(12)进行转化:

$$\tau_x = \frac{2 \times \Delta\theta_x}{\tilde{\omega}(n) + \sqrt{[\tilde{\omega}(n)]^2 + 2\eta\Delta\theta_x}} \quad (13)$$

当 h_3 发生故障时,将不会产生跳变沿信号 P_2, P_2 跳变沿处与其前面相邻的跳变沿处之间的位置间隔记为 $\Delta\theta_x = \pi/3$,重构后的时间间隔记为 τ_1 。将 $\Delta\theta_x = \pi/3$ 代入式(13),可得:

$$\tau_1 = \frac{2 \times (\pi/3)}{\tilde{\omega}(n) + \sqrt{[\tilde{\omega}(n)]^2 + 2\eta \times (\pi/3)}} \quad (14)$$

通过式(14)可估算出时间间隔 τ_1 ,重新获得单霍尔故障下的插值表,如表2所示。

表2 单霍尔故障插值坐标表

i	x_i	y_i
1	0	$-\pi/6$
2	τ_1	$\pi/6$
3	$\tau_1 + T_{i+1}$	$\pi/2$
4	$\tau_1 + T_{i+1} + T_{i+2}$	$5\pi/6$
5	$\tau_1 + T_{i+1} + T_{i+2} + \tau_x$	$7\pi/6$
6	$\tau_1 + T_{i+1} + T_{i+2} + \tau_1 + T_{i+4}$	$3\pi/2$
7	$\tau_1 + T_{i+1} + T_{i+2} + \tau_1 + T_{i+4} + T_{i+5}$	$11\pi/6$

类似地,在双霍尔故障的情况下,正常的霍尔跳变沿仅有2个,与单霍尔故障相比,跳变沿丢失

了一倍。若 h_2 和 h_3 双霍尔故障发生后,则需在丢失跳变沿的前一个跳变沿 t_n 处分别估算出与 t_x 和 t_y 处丢失的2个跳变沿之间的时间间隔,分别记为 τ_1 和 τ_2 。时间间隔 τ_1 对应的位置间隔仍然为 $\Delta\theta_x = \pi/3$,而时间间隔 τ_2 对应的位置间隔为 $\Delta\theta_y = 2\pi/3$,其计算式为

$$\tau_2 = \frac{2 \times (2\pi/3)}{\tilde{\omega}(n) + \sqrt{[\tilde{\omega}(n)]^2 + 2\eta(n) \times (2\pi/3)}} \quad (15)$$

通过式(14)和式(15)可估算出时间间隔 τ_1 和 τ_2 ,建立双霍尔故障下的插值表,如表3所示。

表3 双霍尔故障插值坐标表

i	x_i	y_i
1	0	$-\pi/6$
2	τ_1	$\pi/6$
3	$\tau_1 + \tau_2$	$\pi/2$
4	$\tau_1 + \tau_2 + T_{i+2}$	$5\pi/6$
5	$\tau_1 + \tau_2 + T_{i+2} + \tau_1$	$7\pi/6$
6	$\tau_1 + \tau_2 + T_{i+2} + \tau_1 + \tau_2$	$3\pi/2$
7	$\tau_1 + \tau_2 + T_{i+2} + \tau_1 + \tau_2 + T_{i+5}$	$11\pi/6$

通过控制器诊断当前霍尔传感器故障类别,利用剩余正常霍尔传感器重新建立插值坐标,重构单霍尔故障及双霍尔故障的最小二乘法二次多项式。利用该容错控制方法可缩短容错时间及削弱机械安装导致霍尔传感器磁极检测偏差对位置估算的影响。

4 试验平台搭建与试验结果分析

为了验证上文提出的霍尔传感器故障诊断方法的有效性,搭建了BLDCM控制系统的试验平台,由BLDCM、控制器、驱动器、直流电源及台架组成。

通过 TMS320F28335 实现电机驱动算法、霍尔传感器故障诊断及容错控制,利用示波器和 Labview 开发的上位机软件进行数据采集。BLDCM 主要参数如表 4 所示。BLDCM 控制系统试验平台如图 5 所示。

表 4 BLDCM 主要参数

参数名称	参数值
额定功率/W	500
额定电压/A	11
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 500
霍尔安装方式/(°)	120
额定转矩/(N·m)	20
极对数	8



图 5 BLDCM 控制系统试验平台

图 6(a)、图 6(b) 分别为单霍尔传感器故障及双霍尔传感器故障的波形图。由图 6(a) 可知,霍尔传感器 h_1 在 68 ms 时出现故障,控制器对故障霍尔传感器进行诊断后,切换成容错控制,75 ms 恢复至正常波形。当霍尔传感器 h_1 和 h_3 分别在 32 ms 和 38 ms 处出现故障时,电流波动时间比单霍尔故障持续时间更长;诊断出故障后切换至容错控制,在 42 ms 时 A 相电流波动较明显,52 ms 恢复至正常波形。试验结果表明故障诊断后系统能够快速切换至容错控制,并迅速恢复至正常状态。

图 7(a) 为电机在 750 r/min 正常运行的转子位置曲线,未出现明显转速波动。图 7(b) 为霍尔传感器 h_1 有故障的转子位置曲线,霍尔传感器 h_1 在 88 ms 处出现故障,转速波动约为 15 r/min,在 95 ms 处恢复至正常。图 7(c) 为霍尔传感器 h_1 和 h_3 故障时的转子位置曲线,2 个霍尔传感器分别在 82 ms 及 87 ms 处出现故障,转速波动约为 25 r/min,经过故障诊断及容错控制后,102 ms 处

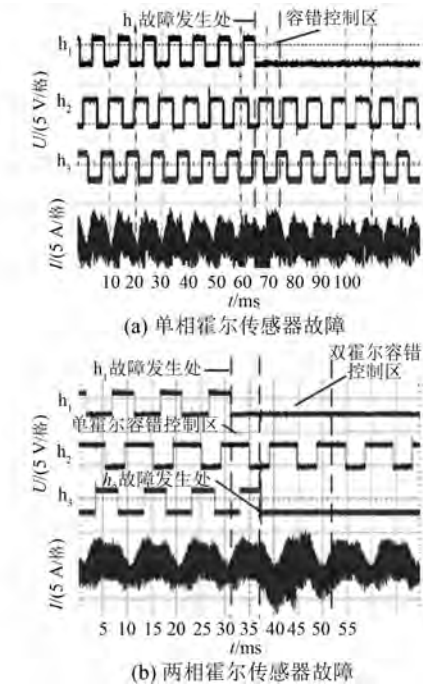


图 6 单相及两相霍尔传感器故障

位置曲线恢复至正常。试验结果验证了基于最小二乘法的容错控制方法能较好地克服因机械安装导致霍尔传感器磁极检测偏差对位置估算的影响。

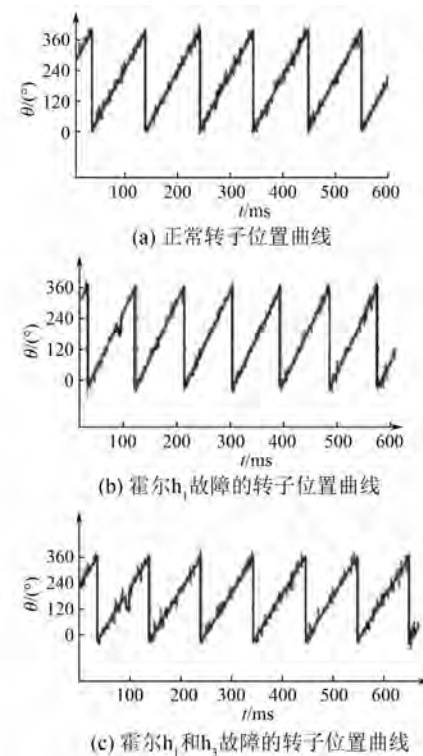


图 7 转子位置曲线

图 8 为电机空载情况下的相电流和线电流波形。图 8 中,相电流为正弦波,线电流经滤波后为马鞍波,验证了电机在矢量控制方式下能正常运行。图 9(a)和图 9(b)分别为霍尔传感器 h_1 和 h_3 在故障时的加减负载试验的相电流波形。从图 9 可以看出,电流波动较小,验证了转子估算位置与转子真实位置偏差较小,系统稳定性较强。

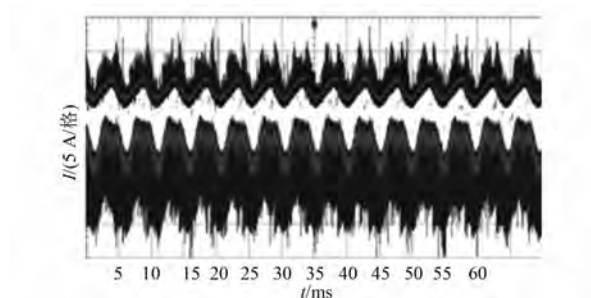


图 8 电机正常运行 A 相相电流和 AB 相线电流

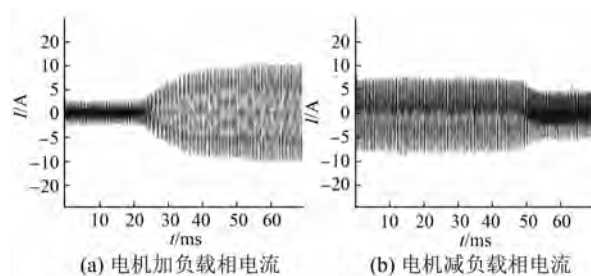


图 9 电机加减负载相电流

5 结 语

本文提出了一种基于最小二乘法的 BLDCM 霍尔传感器故障诊断及容错控制的方法。在 BLDCM 加载平台上验证了该算法的正确性和有效性,得出以下结论:

(1) 基于最小二乘法与一阶泰勒位置估算比较的诊断方法,能够快速、有效地对霍尔传感器进行实时诊断。

(2) 基于最小二乘法的容错控制方法,对故障下丢失的跳变沿时间进行重构,重新获得最小二乘法拟合曲线,对转子位置进行估算。可以有效克服因机械安装导致霍尔传感器磁极检测偏差对位置估算的影响。

综上所述,本文提出的霍尔传感器故障诊断及容错控制策略可应用于 BLDCM 矢量控制系统。

【参考文献】

- [1] 李自成,刘新芝,曾丽,等. BLDCM 转子位置传感器故障诊断及容错策略[J]. 微电机,2014,47(4):59.
- [2] TASHAKORI A, EKTESABI M. A simple fault tolerant control system for Hall effect sensors failure of BLDC motor[C]//2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2013.
- [3] JEONG Y S, SID S K, SCHULZ S E, et al. Fault detection and fault-tolerant control of interior permanent-magnet motor drive system for electric vehicle [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(1): 46.
- [4] 温嘉斌,刘子宁,赵红阳,等. 永磁 BLDCM 霍尔传感器故障诊断与容错运行新方法[J]. 黑龙江大学自然科学学报,2019,36(2):234.
- [5] 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.
- [6] 吕德刚,都泽源,李松. 永磁无刷电机霍尔位置传感器容错控制[J]. 电机与控制学报,2019,23(2):44.
- [7] SCALBA G, DE DONATO G, SCARCELLA G, et al. Fault-tolerant rotor position and velocity estimation using binary Hall-effect sensors for low-cost vector control drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(5):3403.
- [8] 都泽源. 交流伺服系统霍尔传感器故障诊断及容错控制策略研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2018.
- [9] 吕德刚,都泽源,姜彪,等. 交流伺服电机霍尔位置传感器关键技术综述[J]. 哈尔滨理工大学学报,2019,24(6):64.
- [10] 张亚光. 基于霍尔传感器的 BLDCM 矢量控制系统设计与研究[D]. 南京:东南大学,2016.
- [11] GAO Z, CECATI C, DING S X. A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques—Part I: fault diagnosis with model-based and signal-based approaches [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6):3757.
- [12] 高德欣,程捷,白剑飞. 最小二乘法在电机测试分析中的应用[J]. 微电机,2017,50(3):9.
- [13] 张幸浩. 永磁同步电机的低成本控制系统研究[D]. 杭州:浙江大学,2015.
- [14] 应黎明,杭翠翠,舒乃秋,等. 永磁同步电机传感器故障诊断及容错控制[J]. 电机与控制学报,2020,24(1):45.