DOI: 10.13382/j.jemi.B2306909

开关磁阻电机霍尔位置信号的故障诊断方法*

邵 杰 王业超
(曲阜师范大学 日照 276826)

摘 要:开关磁阻电机(SRM)驱动系统的可靠运行,需要位置传感器提供可靠的位置信号。因此针对霍尔位置传感器时常故障影响电机正常工作的问题,研究一种有效的位置信号诊断方法对于提高系统工作可靠性是有重要意义的。本文提出了一种时间阈值与状态预测相结合的故障诊断方法。首先分析了位置传感器故障的类型和发生位置;其次对所提出的基于时间阈值结合状态预测的方法作了理论分析,该方法将 3 个位置信号组合的实际状态值与预测状态值作实时比对,结合状态值转换时间进行阈值约束从而检测出各种故障并达到快速准确的效果;最后,为了验证所提方法的有效性,以三相 12/8 结构电机作为研究对象,对该方法进行了实验验证。实验结果证明了该方法在故障检测中的可行性和有效性。另外,该方法无需复杂的计算和额外硬件即可实现,可推广到无刷直流电机(BLDC)等驱动系统使用。

关键词: 开关磁阻电机;霍尔位置传感器;故障诊断;状态预测
中图分类号: TM352 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 470.40

Methods for diagnosing fault in Hall position signals of switched reluctance motors

Shao Jie Wang Yechao
(Qufu Normal University, Rizhao 276826, China)

Abstract: The reliable operation of a switched reluctance motor (SRM) drive system requires the position sensor to provide reliable position signals. Therefore, given the problem that the Hall position sensor fails from time to time, which affects the normal operation of the motor, it is of great significance to study an effective position signal diagnosis method to improve the reliability of the system operation. In this paper, a fault diagnosis method combining time threshold and state prediction is proposed. Firstly, the type and location of position sensor faults are analyzed; secondly, the proposed method based on time threshold combined with state prediction is theoretically analyzed, which compares the actual state values of the three position signal combinations with the predicted state values in real time, and threshold constraints are applied in combination with the state value transition time to detect various kinds of faults and achieve fast and accurate results; finally, to validate the proposed method, a three-phase 12/8 structure is used to diagnose faults with a three-phase 12/8 structure. Finally, to verify the effectiveness of the proposed method, an experimental validation of the method is carried out with a three-phase 12/8 structure motor as the research object. The experimental results prove the feasibility and effectiveness of the method in fault detection. In addition, the method can be realized without complex calculations and additional hardware and can be extended to be used in drive systems such as brushless DC motors (BLDC).

Keywords: switched reluctance motor; Hall position sensors; diagnosis of fault; condition prediction

0 引 言

开关磁阻电机(switched reluctance motor, SRM)凭借简单的定转子结构、成本低、起动转矩大和容错能力强等诸多优势,已经被广泛应用于家用电器、航空航天、电动汽车等重要领域[1-3]。SRM 依靠霍尔位置传感器提供转子位置信息进行旋转。霍尔位置传感器通常与电机本体

收稿日期: 2023-09-20 Received Date: 2023-09-20
*基金项目:山东省自然科学基金面上项目(ZR2022ME136)资助

安装在一起,电机长期处在潮湿、高温、多粉尘环境下,这就导致霍尔位置传感器经常发生故障。故障后的传感器会影响转子位置信息的准确性,不能提供正确的驱动信号,电机缺相而产生严重后果。因此,为了提高 SRM 控制系统的可靠性和应用潜力,研究位置传感器的故障诊断具有重要意义。

近年来国内外学者对 SRM 控制系统的故障诊断和容错控制进行了大量的研究。文献[4-5]对电机本体、功率变换器、电流传感器和位置传感器等故障分析,综述了故障的诊断和容错方法。在现有 SRM 驱动系统的故障诊断和容错控制研究中,功率变换器的故障诊断和容错控制一直是国内外专家研究的热点[6-9]。而位置传感器故障的诊断和容错控制研究较少,文献[10]介绍了位置传感器的 3 种故障诊断方法,这些方法都可以有效检测故障但诊断效率不高。文献[11]引入霍尔标量值来比对故障前后的差异来确定故障,但是并没有给出检测双霍尔故障的具体方法。文献[12]提出了借助两个额外的辅助传感器来进行诊断和容错,此方法同样不依赖电机结构和传感器安装位置,但成本有所增加。针对位置传感器机械位置偏移故障,文献[13]提出了一种以相对偏移度为特征量,利用支持向量机进行位置传感器机械偏移故障诊断与容错控制的方案。文献[14-15]提出一种利用正常位置信号脉冲预测下一脉冲时刻到来与实际时刻对比判断信号故障的方法,该方法可以独立诊断多相故障,并且不受电机齿槽比的影响,不过受转速影响较大。文献[16-19]分析了故障时跳变沿的状态,提出了基于位置信号跳变沿顺序检测结合相邻跳变沿角度差的诊断方法,但在某些特殊故障位置不能及时诊断。文献[20]以位置脉冲信号及其互补信号为参考信号,对实际信号进行积分运算并与参考信号积分值对照,也可以检测出故障并确定故障类型,但计算量稍加复杂。文献[21]提出了一种基于预测模型的诊断方法和基于电感拐点的容错控制方法,但是该方法适用于匀速状态,受转速波动影响较大。

目前针对开关磁阻电机霍尔位置传感器的故障研究,更侧重于预测未来边沿的跳变时刻或检测实际位置脉冲信号的发生顺序等研究方案,而这些方法在某些故障位置存在诊断速度慢的问题,并且不太适用于电机变加速状态。为了弥补上述缺陷,实现对霍尔位置信号故障的快速定位检测,提出了一种基于时间阈值与状态预测相结合的故障诊断方案。引入标量状态数将实际信号的状态数与预测信号的状态数作比对可以有效的发现故障,并且在比对过程中又设置了时间阈值加以状态转换约束,可以确保某些特殊故障也可以检测到。此方案不需要额外的硬件和复杂的算法,可以在稳态和动态等不同状态下快速有效地诊断故障。

1 位置信号故障类型

1.1 位置信号的产生

如图 1 所示,开关磁阻电机驱动系统主要包括电机本体,三相不对称半桥功率变换器和 DSP 数字控制器,另外还有各类检测传感器为控制器提供必要转子等信息以构成闭环调速控制。

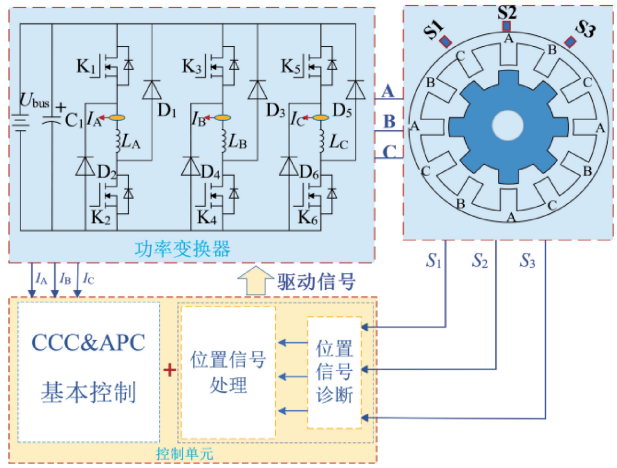


图 1 开关磁阻电机驱动系统图

Fig. 1 Switched reluctance motor drive system diagram

开关磁阻电机的位置传感器种类很多,例如电磁式、光电式和霍尔式,考虑到 SRM 长期工作在恶劣环境下,对传感器也应该有运行可靠、抗干扰能力强等诸多要求,本文采用了霍尔位置传感器。

开关磁阻电机的位置传感器安装夹角 θ_g 可由式(1)决定:

$$\theta_g = k\,\tau_r + \theta_{step} = \left(k + \frac{1}{m}\right)\tau_r \tag{1}$$

式中:τ_r 为转子的角周期,m 为电动机的相数,θ_{step} 为步距角。由于 12/8 结构的三相开关磁阻电机的齿极和凹槽数相同且尺寸设计相等,齿极和凹槽角度各占 22.5°,则整个转子角周期 45°,取 k = 1, m = 3,故确定将 3 个霍尔传感器依次相隔夹角 60°安装,如图 2 所示给出了结构为 12/8 开关磁阻电机位置传感器安装实物图。当转子的凹槽经过霍尔传感器附近时,输出一定的电压值,相反当齿极经过时,输出信号则被截止无电压信号。这样转子的位置信息通过电压信号有无而间接获取,并通过霍尔位置调理电路将无规则的模拟电压信号转换成有规则跳变的方波电压信号。

图 3 给出了开关磁阻电机的位置信号与三相电感关系曲线图。可以看出,位置脉冲信号 S1、S2、S3 波形保持一致,均为周期性变化的方波,且两个相邻脉冲边沿间隔

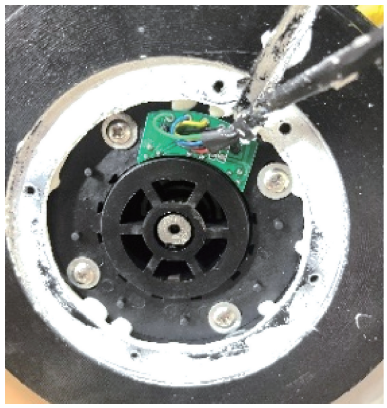


图 2　霍尔传感器安装图

Fig. 2　Installation of Hall sensors

15°的相位差。绕组电感变化和位置信号存在相对关系，每个脉冲信号的跳变时刻都对应于各自相绕组电感达到最大或最小值状态，如图以 A 相为例可以说明，当位置信号 S1 发生上升沿跳变时，A 相的电感达到最大值，A 相应该关闭，相反当位置信号 S1 产生下降沿跳变时，A 相的电感达到最小值，说明此时的 A 相绕组应该通电。其余两相与 A 相相同。这样 DSP 控制器实时对位置信号跳变进行捕获，计算正确的角度来发出正确的驱动信号使转子转动。

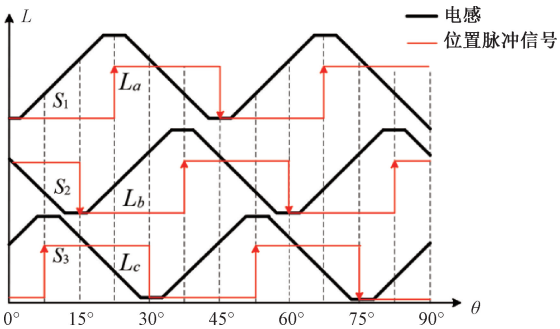


图 3　位置信号与电感变化曲线关系图

Fig. 3　Position signal versus inductance change curve

为了能够获得完整的转子位置信息，根据固定的齿槽角度，即两个相邻边沿间隔角度为 22.5°，DSP 只要通过记录连续边沿的间隔计数值，就能得到转子每转 1°的计数值 AngleRpm，这样可以通过设定定时器周期对角度进行加计数，以便得到转子的实时转动角度 θ 和转速 n。

1.2　位置信号故障类型

根据可能出现故障的个数，本文将故障主要分为单个传感器故障和两个传感器故障，这也是研究的主要故障个数。由于一个传感器故障时立刻进行了诊断和容错，当第 2 个传感器故障时大部分情况下已经修复了前一个的故障问题，故单个传感器故障相较于两个传感器故障更容易存在。而对于 3 个传感器全部同时失效的情况，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。其次根据故障信号最终稳定输出状态分析可存在两种，即恒高电平和恒低电平状态。

为了能够清楚表示所有可能产生的故障，对传感器 $S_i(i=1,2,3)$ 定义状态变量 $F_i(i=1,2,3)$，当故障状态 $F_i=1$ 时，代表传感器 S_i 出现高电平故障，当状态变量 $F_i=0$ 时，则代表传感器 S_i 出现低电平故障。表 1 整理列举出了全部可能发生的故障种类。

表 1　故障种类表

Table 1　Various fault types

	故障类型(f_{type})	传感器状态
单个故障	1	$F_1=1$
	2	$F_2=1$
	3	$F_3=1$
	4	$F_1=0$
	5	$F_2=0$
	6	$F_3=0$
两个故障	7	$F_1=F_2=1$
	8	$F_2=F_3=1$
	9	$F_1=F_3=1$
	10	$F_1=1,F_2=0$
	11	$F_1=1,F_3=0$
	12	$F_2=1,F_3=0$
	13	$F_1=0,F_2=1$
	14	$F_1=0,F_3=1$
	15	$F_2=0,F_3=1$
	16	$F_1=F_2=0$
	17	$F_2=F_3=0$
	18	$F_1=F_3=0$

根据故障发生的时刻或位置不同，又可以细分为多种。例如图 4，其中实线是实际的位置信号，虚线是理想的位置信号，E_A 表示实际信号最后的跳变沿时刻，与它对应的理想信号跳变时刻记为 E_L，E_A 与 E_L 之间的角度记为 $\varphi(0°<\varphi<45°)$，这个角度反应了理想脉冲与故障脉冲的偏移量，偏移量的大小体现了故障的严重程度，故将其称为故障角度。

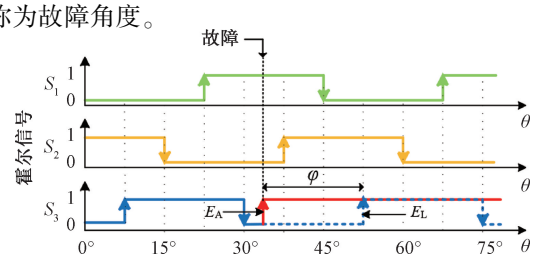


图 4　高电平故障类型 1

Fig. 4　High-level fault class one

1) 单霍尔故障

首先以传感器 S_3 出现高电平故障 $f_{type}=3$ 情况为例，具体可以分为 4 种情况。如图 4 所示，当故障角度发生在 $15°<\varphi<22.5°$ 时，故障霍尔信号 S_3 的 E_A 发生在此区间，此时虽然 E_A 偏离理想状态跳变沿 E_L 一定的角度，但是跳变沿顺序并没有发生改变，故障角度较大，故对驱动系统造成的影响最大。

当故障角度发生在 $7.5° < \varphi < 15°$ 区间时，如图 5 所示直接造成了跳变沿顺序的混乱，随后位置信号 S_3 的跳变沿全部消失，故障状态和图 4 情况相同。

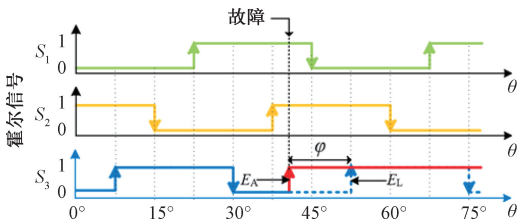


图 5 高电平故障类型 2

Fig. 5 High-level fault class two

当故障位置角度发生在 $0°<\varphi<7.5°$ 区间时，如图 6 所示，故障角度最小，故障产生的状态值与预期的状态值相同，但是超越了 S_3 理想信号的上升沿，之后再无任何跳变，稳态后故障情况和图 4 保持一致。由于故障角度最小，故在此区间产生的故障对驱动系统影响较小。

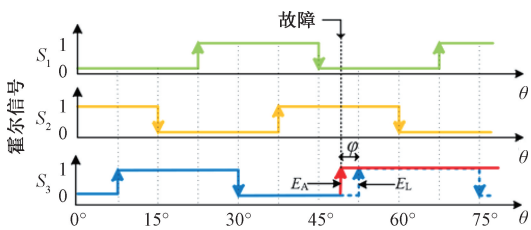


图 6 高电平故障类型 3

Fig. 6 High-level fault class three

如图 7 所示，当高电平故障发生在高电平区间时，在这种情况下，由于理想信号原来输出的是高电平，故实际信号最后的跳变沿 E_A 并不会出现在此区间，会一直持续到下个转子周期才引起跳变沿顺序混乱，进入故障稳态阶段，对驱动系统造成危害。

同样地，对于其他单个传感器故障即（$f_{type}=2,3,4,5,6$）也有着相同的故障情况和故障发生位置，本文不再一一赘述。

2) 双霍尔故障

两个霍尔传感器故障可分为全部恒高、全部恒低和一高一低故障，本文将双霍尔故障按照故障发生位置分为两类，第 1 类故障如图 8 所示，两个霍尔信号同时刻发生高电平故障。类似的还有同时发生低电平、一高一低

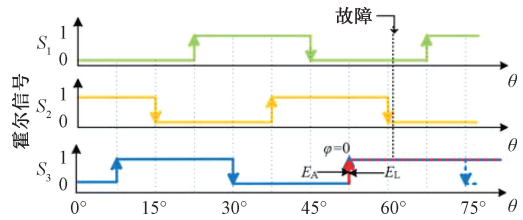


图 7 高电平故障类型 4

Fig. 7 High-level fault class four

故障形式，这些故障的产生都是任意位置的。第二类故障是两个传感器的故障不同时刻发生，如图 9 所示。

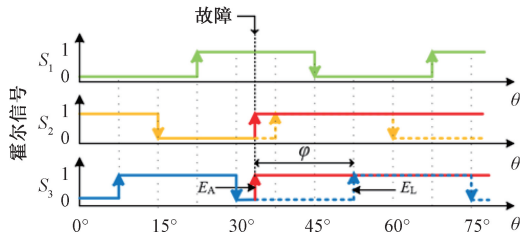


图 8 两个传感器故障类型 1

Fig. 8 Double sensors fault class one

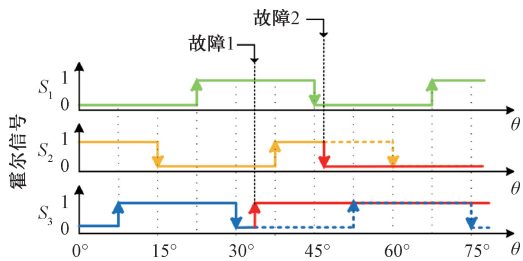


图 9 两个传感器故障类型 2

Fig. 9 Double sensors fault class two

2 故障诊断方法

2.1 信号的定义

为了能够清楚地表述本文提出的故障诊断方法，需要定义几个信号变量。如图 10 所示，当霍尔传感器正常工作时，经调理电路后输出 0 和 1 的二进制信号，将 3 个霍尔传感器 P、Q、R 输出信号定义为 S_1，S_2 和 S_3。图中的箭头方向则代表电机转动方向，本文中默认电机顺时针（CW）方向旋转。

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下式整合成一个状态值，记为 S。

$$S = 4S_1 + 2S_2 + S_3$$

假设在电机顺时针旋转方向不变，位置信号正常情况下，霍尔状态值 S 会产生一个固定重复的序列，即 $2\rightarrow3\rightarrow1\rightarrow5\rightarrow4\rightarrow6$，当出现某种故障后，其状态值 S 会从正常序列变到异常序列。另外我们需要记 $S(n)$ 为此时

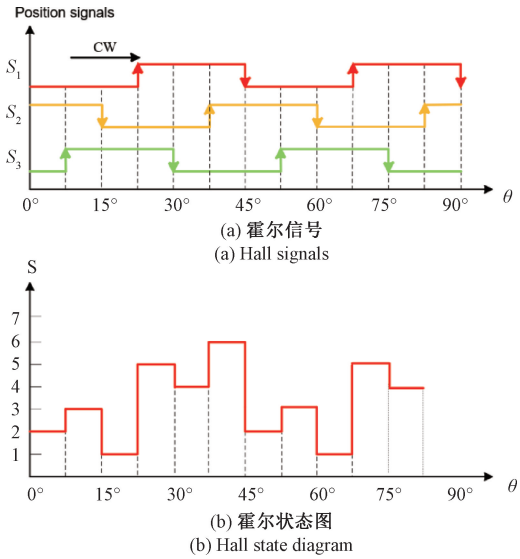


图 10　霍尔信号和霍尔状态图

Fig. 10　Hall signals and state diagram

的状态值，$S(n-1)$ 为上一次的状态值，$S_e(n)$ 为根据上一个状态值 $S(n-1)$ 确定的本次理想状态值。

利用霍尔状态变量 S 转换时间间隔可以用下式来估计速度和转子位置：

$$\hat{\omega}_n = \frac{\theta_n - \theta_{n-1}}{\tau_n} = \frac{\Delta\theta}{t_n - t_{n-1}} = \frac{\pi}{4(t_n - t_{n-1})} \tag{2}$$

式中：$\Delta\theta$ 是两个状态信号转换固定间隔角度，τ_n 是两个状态变化的间隔时间，从而可以估计出每转一度所需要的时间。θ_n 是当前状态 n 时的角度，那么在旋转过程中实时角度 θ_r 可由式(3)表示，

$$\theta_r = \theta_{n-1} + \int_{t_{n-1}}^{t_r} \hat{\omega}_n \mathrm{d}t \tag{3}$$

在该方法中，为了能快速诊断各种故障，需要采用更高的采样频率对霍尔状态变量进行采样，它要比正常的边沿捕获频率更高。基于 DSP 控制器的快速采样和捕获的功能，采样的同时利用快速计数器 T 对状态信号计数，计数值记为 k。当变量 S 的值发生转换时，则当前计数值 k 被重置重新开始对下一个新状态值计数，Δk 代表状态转换的间隔计数值。这样通过计数值可以间接获取到状态发生变化的时间间隔 τ_n，代入式(2)中，可以求得此间隔内的平均角速度 $\hat{\omega}_n$。

为了实现快速性，根据前面得到的相邻 3 个间隔的平均速度，依据下式可粗略估算出下一个换相间隔应该保持的平均速度，记为 $\bar{\omega}_n$。

$$\bar{\omega}_n = \frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3} \hat{\omega}(n-i) \tag{4}$$

代入式(2)中，得到下一次换相的预估时间间隔 $\bar{\tau}_n$。然而考虑到正常情况下，电机的速度也会出现瞬间加速或减速等小波动，实际时间间隔 τ_n 与预估 $\bar{\tau}_n$ 有一定偏差，因此需要设置一个合适的阈值系数 ε，即满足：

$$\tau_{\min} < \bar{\tau}_n < \tau_{\max}$$

其中，$\tau_{\min} = \varepsilon\bar{\tau}_n$，$\tau_{\max} = \bar{\tau}_n/\varepsilon$，阈值系数 $\varepsilon < 1$，通过对阈值系数设置合理范围，可以在某些特殊位置的故障也能实现快速诊断的效果。

2.2　阈值的选择

由于转矩脉动的影响，在匀速状态下相邻电周期转速也不能维持稳定，故相邻间隔时间不相同，需要引入阈值来避免误判。另外，其阈值大小设定必须同时满足电机的加速、减速和匀速 3 种基本运行状态。本文中根据 SRM 样机的实际运行通过实验决定 ε 的取值范围，一般情况下取 $0.85 \leqslant \varepsilon \leqslant 0.95$ 效果最佳。

2.3　具体的诊断流程分析

针对第 1 种可能发生故障的位置，当任意一个传感器发生故障时，导致理想状态值 $S_e(n)$ 与实际状态值 $S(n)$ 不一致，并且故障发生的时间早于预估的最小时间间隔 $\tau_{\min}$。于是，此故障同时满足了 $S_e(n) \neq S(n)$ 和 $\tau_n < \tau_{\min}$ 两种诊断条件，判断为故障。通过 $S(n-1)$ 和 $S(n)$ 查询故障序列表，可以确定具体的故障类型。如图 11 所示，霍尔传感器 S_3 发生了故障，并一直保持为“1”，根据诊断条件和诊断序列表，检测到故障并确定了故障类型。

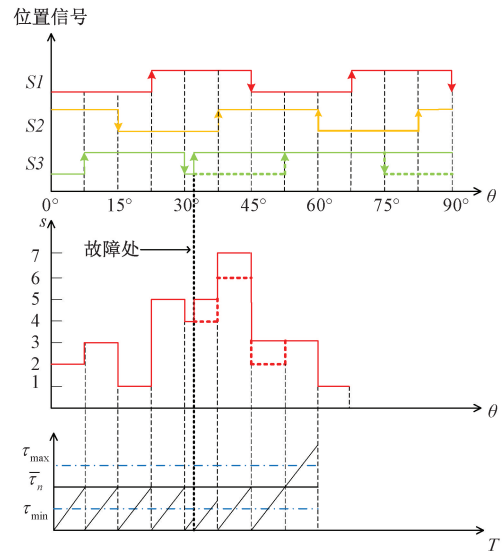


图 11　第 1 类故障

Fig. 11　Fault case one

针对第 2 种可能发生故障的位置，当其中一个传感器在另一个传感器正常换相附近或换相时产生，同样会导致理想状态值 $S_e(n)$ 与实际状态值 $S(n)$ 不一致，但是实际采样的时间与预估时间间隔 τ_n 偏差不大，在上述满足的阈值范围内。这种情况满足了故障存在条件的

$S_e(n) \neq S(n)$，故判断为故障。如图 12 所示，故障在 7.5°<φ<15°区间突然发生，其状态值 S 迅速改变，即 $S_e(n) \neq S(n)$，但是该时刻能够满足上述理想的时间范围 $\tau_{\min} < \tau_n < \tau_{\max}$。故满足故障条件的其中之一，判定为故障。通过查询故障序列表 2 得到具体故障类型。

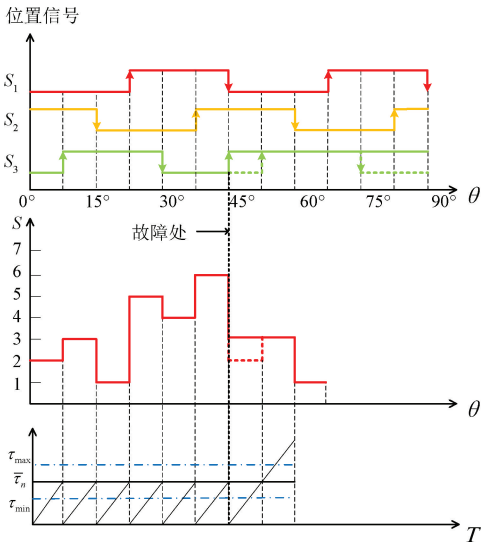


图 12 第 2 类故障

Fig. 12 Fault case two

表 2 单电平诊断序列表

Table 2 Single-level fault sequence table

故障类型	状态序列
1	5→4→6→7→5
2	6→2→3→7→6
3	5→7→3→1→5
4	1→0→2→3→1
5	0→1→5→4→0
6	4→6→2→0→4

针对第 3 种可能发生故障的位置，如图 13 所示，状态数变化要比预期换相时刻要快，但是这不会改变其状态值 S，即 $S_e(n)=S(n)$，反而其实际时间间隔小于预估间隔，即 $\bar{\tau}_n < \tau_{\min}$。由于不满足时间阈值的范围，故可认为发生故障。

针对第 4 种，此类故障特点是发生故障时刚好与理想输出状态相同，并一直保持到下一换相时刻，瞬时状态值不会发生改变，即 $S_e(n)=S(n)$，所以利用状态序列不能对其检测，只有等到下一次换相状态序列才会异常。因此需要利用时间阈值准则，当计数器持续增计数直到 $\bar{\tau}_n > \tau_{\max}$，满足诊断条件，确定故障存在。以传感器 S_3 发生高电平故障为例，如图 14 所示，信号 S_3 提前出现边沿跳变，跳变后的实际值与理想状态相同，因此 DSP 没有检测到状态值变化，没有换相动作故计数器 T 仍持续

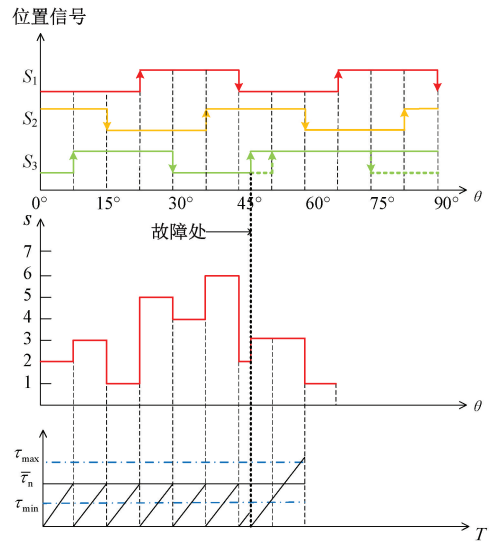


图 13 第 3 类故障

Fig. 13 Fault case three

增计数直到满足 $\bar{\tau}_n > \tau_{\max}$ 认为其故障。

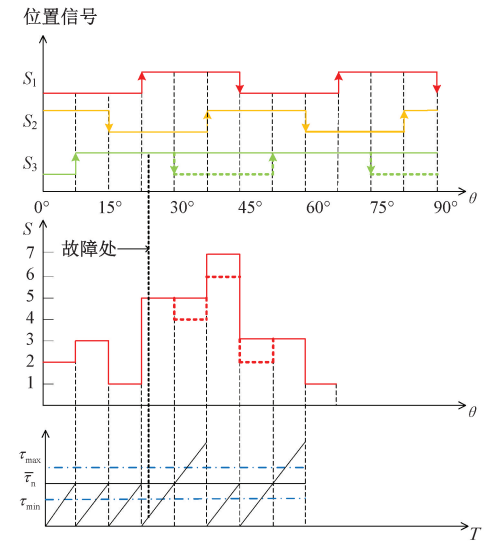


图 14 第 4 类故障

Fig. 14 Fault case four

对于同时发生的双电平故障，该方法可以事先检测出故障是否存在，但是不能立即准确定位到哪一个传感器故障，需要通过查询信号状态数 S 的特征序列表 3 来确定具体故障类型和故障传感器。而对于不同时刻的双电平故障，首先通过上述的单电平诊断流程诊断出第 1 个故障，接着查表 3 确定第 2 个故障存在和故障类型。

3 实验验证

为了验证该方法的有效性，并且可以实现诊断一或

表 3　双电平诊断序列表

Table 3　Double-level fault sequence table

故障类型	状态序列
7	7→6→7
8	7→3→7
9	7→5→7
10	5→4→5
11	6→4→6
12	6→2→6
13	3→2→3
14	3→1→3
15	5→1→5
16	0→1→0
17	0→4→0
18	0→2→0

两个传感器故障的效果,用自复位按钮模拟霍尔传感器故障,在一台 12/8 结构的开关磁阻电机为研究对象的平台上进行了实验验证。

实验平台如图 15 所示,由 TMS320F2812 的 DSP 控制器、功率变换器、霍尔位置传感器以及电压、电流传感器构成。功率变换器采用三相不对称半桥结构,霍尔传感器经过接口电路连接到 DSP 的 CAP 捕获单元,电压和电流传感器经过对应的调理电路反馈给控制器构成了驱动系统的外围电路。

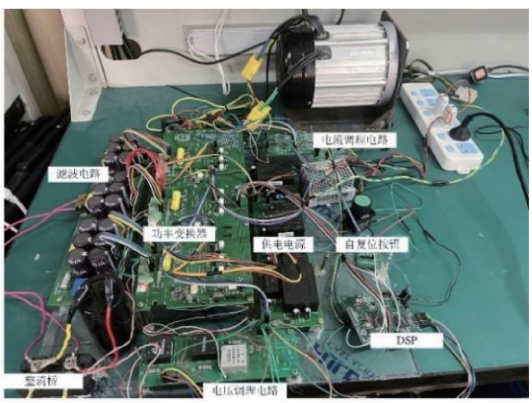
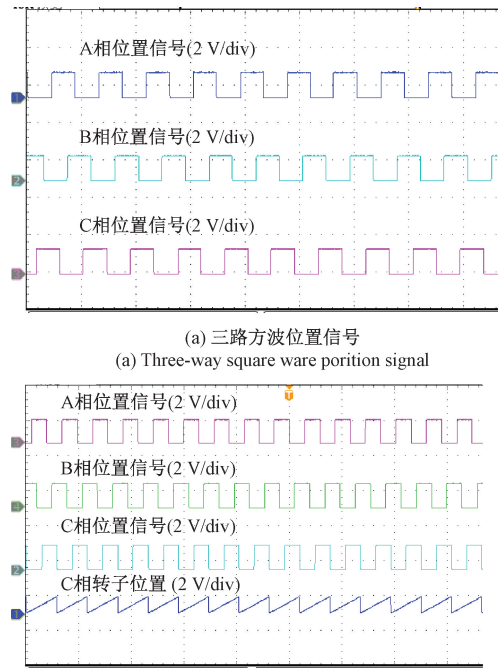


图 15　实验平台

Fig. 15　Experimental platform

图 16 所示为正常霍尔传感器信号经过调理电路输出的三路方波位置信号和 C 相转子位置角,可以观察到三路位置信号呈现周期循环,角度分辨率可达 15° 的特点,即认为正常位置输出信号就是理想输出信号。

图 17(a)是电机处于稳定状态的转速波动图,可以看出转速基本趋于平稳,但也存在小的波动。图 17(b)~(d)依次是阈值 $\varepsilon=0.1$,$\varepsilon=0.3$,$\varepsilon=0.4$ 的测试结果,可以看出由于转矩脉动影响而存在故障误判。图 17(e)为在电机加速状态下对阈值选取是否得当的测试。最终可以确定 ε 选取在 $0.85\leqslant\varepsilon\leqslant0.95$ 范围内效果最佳,可以满足不同运行状态。



(a) 三路方波位置信号

(a) Three-way square ware porition signal

(b) C相转子位置角

(b) C-phase rotor pasition angle

图 16　正常霍尔信号与转子位置角度图

Fig. 16　Standard Hall signals and rotor position angle

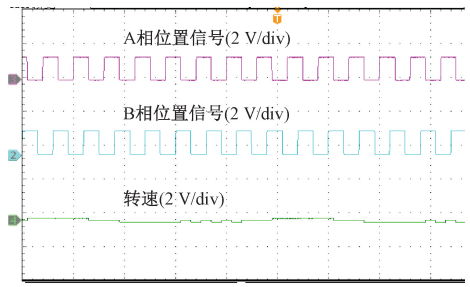
以 C 相位置传感器发生高电平故障为例,给定 SRM 直流母线电压 25 V,在 APC 基本控制方式下,使电机维持运行在 1 200 r/min 左右,用自复位开关分别在 4 个不同位置模拟了故障并测试,最后实验验证了该方法的有效性。如图 18、19 所示是模拟 C 相传感器分别发生高、低电平故障后的实验图,可以看出故障后该方法能够及时诊断故障。

图 18(a)是故障发生在区间 $15°<\varphi<22.5°$ 内,此区间内状态数 S 会立即改变,故障标志 F 则在故障位置准确产生了一个上升沿。

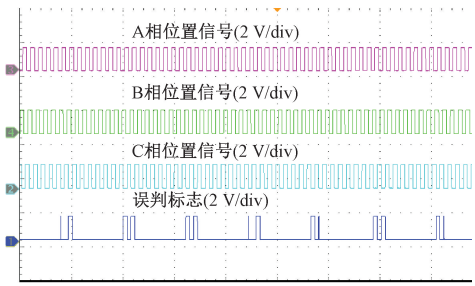
图 18(b)是故障发生在区间 $7.5°<\varphi<15°$ 内,此区间内状态数 S 也会立即改变,导致与预测的状态不同,可以立即检测到故障。经过实验验证也可看出在故障发生瞬间立刻产生了一个故障标志 F 产生了跳变。

图 18(c)是故障发生在区间 $0°<\varphi<7.5°$ 内,此区间内由于 $\bar{\tau}_n < \tau_{\min}$ 而不满足时间阈值准则进而判断故障。从图像中可看出产生的故障标志 F 与故障发生位置非常接近。

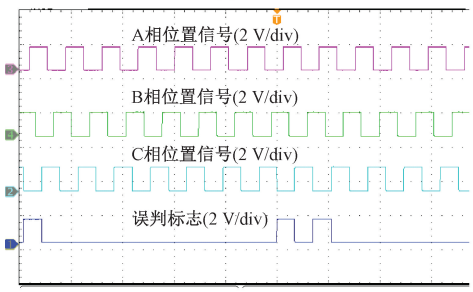
图 18(d)是故障发生在高电平区间内,此区间内由于 $\bar{\tau}_n > \tau_{\max}$ 不满足时间阈值准则而判定为故障,实验结果可看出故障标志 F 立刻在故障接近位置产生跳变。



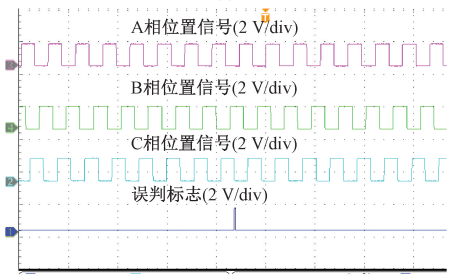
(a) 转速波动图
(a) Speed fluctuation



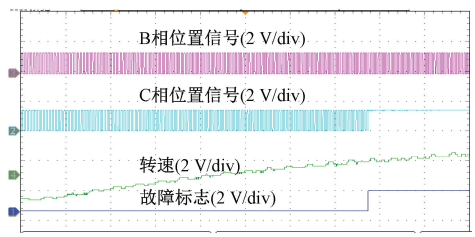
(b) ε=0.1



(c) ε=0.3



(d) ε=0.4

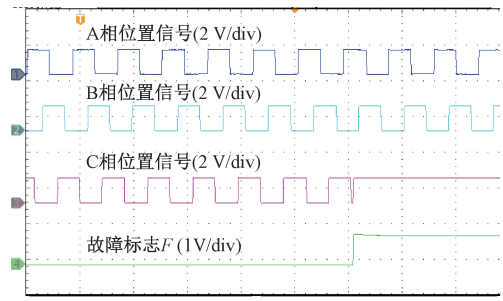


(e) 电机加速状态下测试
(e) Test under motor acceleration

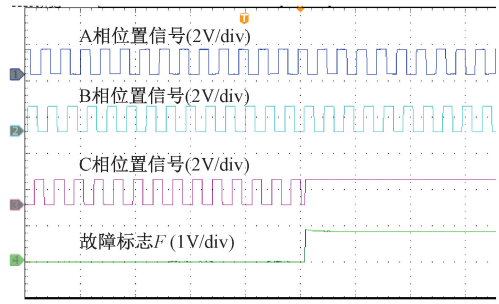
图 17 选取不同阈值的诊断结果

Fig. 17 Diagnostic results for selecting different thresholds

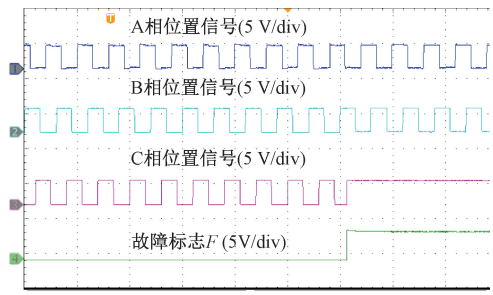
图 19(a)~(d)所示又从可能发生故障的 4 个位置分别模拟了一个 C 相传感器低电平的故障。同样在 APC 传统控制方式下,使 SRM 维持在 1 500 r/min 左右,



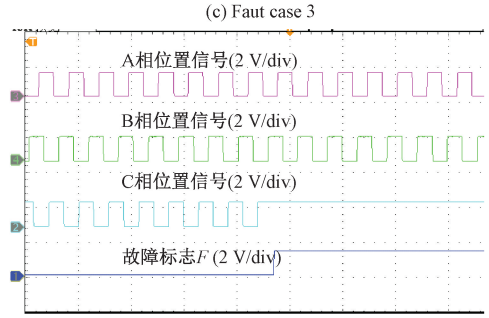
(a) 故障案例1
(a) Faut case 1



(b) 故障案例2
(b) Faut case 2



(c) 故障案例3
(c) Faut case 3



(d) 故障案例4
(d) Faut case 4

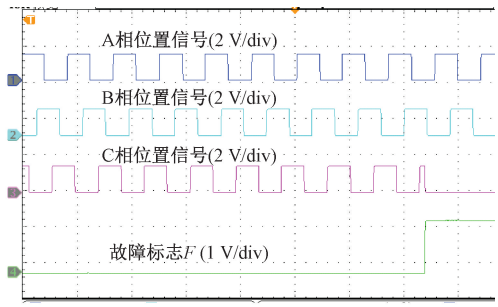
图 18 高电平故障诊断实验结果

Fig. 18 Test results of high-level fault diagnosis

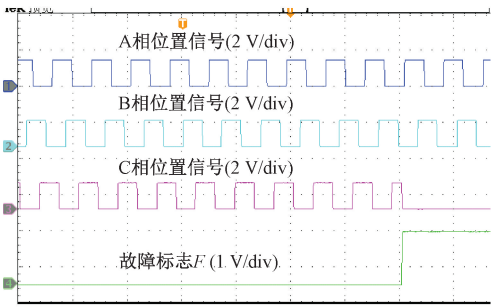
验证了该方法在诊断低电平故障时也可以做到快速有效。

4 结 论

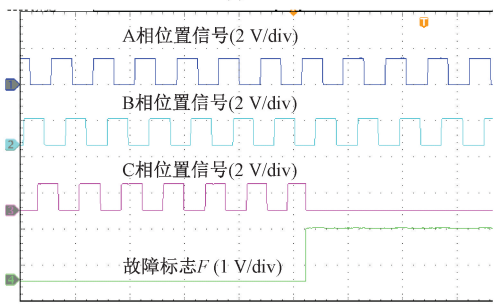
本文针对开关磁阻电机的霍尔位置传感器故障影响电机正常工作的问题,提出了一种基于时间阈值结合状



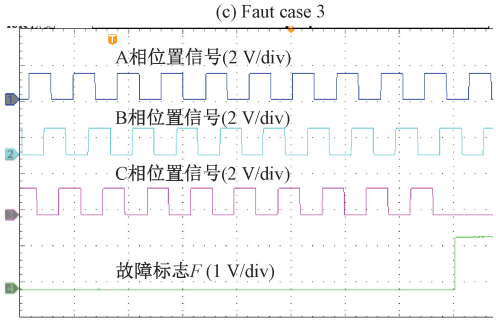
(a) 故障案例1
(a) Faut case 1



(b) 故障案例2
(b) Faut case 2



(c) 故障案例3
(c) Faut case 3



(d) 故障案例4
(d) Faut case 4

图 19　低电平故障诊断实验结果

Fig. 19　Test results of low-level fault diagnosis

态预测的 SRM 霍尔位置传感器故障诊断方案。此方案不需要额外的硬件和复杂的算法,可以在稳态和动态不同阶段快速有效诊断故障。经过理论分析和实验验证,验证了该方案可以快速有效的检测故障。此方案原理简单且实用性强,可以广泛应用。

参考文献

[1] 王刚,程勇. 开关磁阻电机调速系统综述[J]. 工业仪表与自动化装置,2014(4):16-18.
WANG G, CHENG Y. Review on switched reluctance motor control system[J]. Industrial Instrumentation and Automation, 2014(4):16-18.

[2] 徐萌,周玉祥,徐海,等. 基于改进粒子群算法的开关磁阻电机本体优化[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(4):131-141.
XU M,ZHOU Y X, XU H, et al. Ontology optimization of switched reluctance motor based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(4):131-141.

[3] 周大林,陈昊,MOHAMED O,等. 一种前端级联 DC/DC 变换器的开关磁阻电机驱动拓扑[J]. 电子测量与仪器学报, 2022,36(9):45-52.
ZHOU D L, CHEN H, MOHAMED O, et al. Switched reluctance motor drive topology with front-end cascaded DC/DC converter[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022,36(9):45-52.

[4] 孙德博,胡艳芳,牛峰,等. 开关磁阻电机调速系统故障诊断和容错控制方法研究现状及展望[J]. 电工技术学报, 2022,37(9):2211-2229.
SUN D B, HU Y F, NIU F, et al. Status and prospect of fault diagnosis and tolerant control methods for switched reluctance motor drive system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022,37(9):2211-2229.

[5] GAN C, CHEN Y, QU R, et al. An overview of fault diagnosis and fault-tolerance techniques for switched reluctance machine systems[J]. IEEE Access, 2019, 7(99):174822-174838.

[6] 王熔基,刘勇智,管振水. 基于电流斜率的 SRM 功率变换器故障诊断[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2020,21(5):29-35.
WANG R J, LIU Y ZH, GUAN ZH SH. A fault diagnosis of SRM power converter based on current slope[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020,21(5):29-35.

[7] 肖丽,范书瑞,王博文,等. 基于电流分析的开关磁阻电机功率变换器故障检测方法[J]. 电机与控制学报, 2018,22(4):67-74.
XIAO L, FAN SH R, WANG B W, et al. Fault detection method of power converter for switched reluctance motor[J]. Electric Machines and Control, 2018,22(4):67-74.

[8] 蔡燕,文武平,别文轩,等. 开关磁阻电机功率变换器故障在线诊断方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021,35(9):119-128.

CAI Y, WEN W P, BIE W X, et al. Research on online fault diagnosis method of power converter for switched reluctance motor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021,35(9):119-128.

[9] 张竞文,熊立新,夏强,等. 基于改进变分模态分解的 SRM 功率变换器故障诊断方法[J]. 微电机,2022,55(4):53-58.
ZHANG J W, XIONG L X, XIA Q,et al. Fault diagnosis of SRM power converter based on improved varitational mode decomposition[J]. Micromotors, 2022, 55(4): 53-58.

[10] DONG L H, JATSKEVICH J, HUANG Y, 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.

[11] ZHANG Q, FENG M. Fast fault diagnosis method for Hall sensors in brushless DC motor drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 34(3): 2585-2596.

[12] CHEN H, MENG X J, XIAO F, et al. Fault-tolerant control for switched reluctance motor drive[C]. IEEE 28th Annual Conference of The Industrial Electronics Society, 2002: 1050-1054.

[13] 戴聪,刘勇智,李杰. 开关磁阻电机位置传感器机械偏移故障诊断和容错控制[J]. 电子测量与仪器学报,2018,32(9):12-19.
DAI C, LIU Y ZH, LI J. Mechanical deviation fault diagnosis and tolerant control on position sensor in switched reluctance motor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018,32(9):12-19.

[14] 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(07):104-113.
HU R G, DENG ZH 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.

[15] CAI J, DENG Z, HU R G. Position signal faults diagnosis and control for switched reluctance motor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(9):1-11.

[16] 许培林,邓智泉,陈小元,等. 开关磁阻电机位置信号的故障检测与容错控制[J]. 中国电机工程学报,2011,31(33):123-130.
XU P L, DENG ZH Q, CHEN X Y, et al. Fault diagnosis method and fault-tolerant control of position signals for switched reluctance motors[J]. Proceedings of The CSEE, 2011,31(33):123-130.

[17] 张迁,任开春,秦恺,等. 开关磁阻电机位置信号的容错控制研究[J]. 机电工程,2014,31(7):908-911.
ZHANG Q, REN K CH, QIN K, et al. Fault-tolerant control of switched reluctance motor position signal[J]. Journal of Mechanical and Electrical Engineering, 2014, 31(7):908-911.

[18] 周近,莫晓晖. 开关磁阻电机位置传感器故障的实时诊断与容错控制研究[J]. 电机与控制应用,2015,42(6):77-84.
ZHOU J, MO X H. Research on fault real-time diagnosis and fault-tolerant control of position sensors for switched reluctance motors[J]. Electric Machines Control Application, 2015,42(6):77-84.

[19] 韩思聪,刘勇智,戴聪,等. 一种位置传感器的故障诊断和容错方法[J]. 电力电子技术,2018,52(12):37-41.
HAN S C, LIU Y ZH, DAI C, et al. A method on fault diagnosis method and fault-tolerant control for position sensor[J]. Power Electronics, 2018,52(12):37-41.

[20] CAI J, ZHAO X. Synthetic hybrid-integral-threshold logic-based position fault diagnosis scheme for SRM drives[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 70: 1-8.

[21] SUN X D, XIONG Y F, YAO M, et al. High fault-tolerance evaluation on position signal for switched reluctance motor drives[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(3): 1844-1853.

作者简介

邵杰(通信作者),2017 年于南京航空航天大学获得博士学位,现为曲阜师范大学副教授,主要研究方向为开关磁阻电机驱动系统。
E-mail: shaoj1018@qfnu.edu.cn

Shao Jie (Corresponding author) received her Ph. D. degree in electrical engineering from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2017. Now she is an associate professor at Qufu Normal University. Her main research interest includes the switched reluctance motor drive system.

王业超,2021 年于青岛科技大学获得学士学位,现为曲阜师范大学硕士研究生,主要研究方向为开关磁阻电机位置传感器故障诊断和容错技术。
E-mail: 15610333095@163.com

Wang Yechao received his B. Sc. degree from Qingdao University of Science and Technology in 2021. Now he is a M. Sc. candidate in Qufu Normal University. His main research interests include fault diagnosis and fault tolerance techniques for position sensors of switched reluctance motors.