文章编号：0253-374X(2025)12-1898-06

DOI：10. 11908/j. issn. 0253-374x. 24258

基于滑模信息融合的内置式永磁同步电机退磁故障诊断策略

陈少峰[1,2,3]，林国斌[1,2,3]，韩耀飞[1,2,3]，马志勋[1,2,3]

(1. 同济大学 高速磁浮运载技术全国重点实验室，上海 201804；2. 国家铁路局 磁浮技术铁路行业重点实验室，上海 201804；
3. 同济大学 交通学院，上海 201804)

摘要：提出了一种基于滑模信息融合的永磁同步电机退磁故障诊断策略。首先，构建了永磁同步电机的退磁故障模型；其次，提出了一种基于滑窗均值误差的电机退磁故障监测方法，利用电流数据构造出监测指标。再次，提出了一种基于滑模信息融合的退磁故障诊断方法，集成电流滑模指标，实现对退磁故障的定位。最后，在基于硬件在环的电机实验平台上对所提方法进行了验证，结果表明，该策略能够快速准确地诊断出在不同运行状态下的退磁故障。

关键词：永磁同步电机；退磁故障；故障监测；故障诊断

中图分类号：TP29；U266. 2　　**文献标志码**：A

Demagnetization Fault Diagnosis Strategy for Interior Permanent Magnet Synchronous Motors Based on Sliding-Mode Information Fusion

CHEN Shaofeng[1,2,3], *LIN Guobin*[1,2,3], *HAN Yaofei*[1,2,3], *MA Zhixun*[1,2,3]

(1. State Key Laboratory of High-Speed Maglev Transportation Technology, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Key Laboratory of Railway Industry of Maglev Technology, National Railway Administration of People's Republic of China, Shanghai 201804, China; 3. College of Transportation, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: This paper proposes a demagnetization fault diagnosis strategy based on sliding mode information fusion for permanent magnet synchronous motors. First, a demagnetization fault model for interior permanent magnet synchronous motor is developed. Next, a motor demagnetization fault monitoring method based on the sliding window mean error is proposed, utilizing monitoring indicators constructed from current data. Finally, a demagnetization fault diagnosis method based on sliding mode information integration is introduced, integrating multiple sliding mode indicators to locate demagnetization faults. The proposed method is validated on a hardware-in-the-loop motor experimental platform. The result shows that this strategy can quickly and accurately diagnose demagnetization faults under different operating conditions.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; demagnetization fault; fault detection; fault diagnosis

近年来，永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor，PMSM)已成为轨道交通的新一代动力源[1-2]。其中，内置式永磁同步电机(interior permanent magnet synchronous motor，IPMSM)因其高扭矩密度和优良的效率特性，在电动汽车中得到了广泛应用[3-4]。然而，由于IPMSM长期运行在结构紧凑、散热不佳的环境中，高温和振动的双重作用使其易于发生退磁故障[5-6]。这种退磁故障会直接引起永磁电机参数的变化，尤其是定子电阻和磁通。而电动汽车牵引系统的运行效率依赖于电机精确的电气参数，而退磁故障的出现不仅会降低系统效率，严重时甚至可能导致灾难性事故[7]。因此，准确诊断IPMSM的退磁故障对于保障电动汽车的安全运行至关重要。

现有的故障诊断方法主要包括基于模型的诊断方法和数据驱动的诊断方法[8-9]。其中，基于模型的诊断方法通过建立电机的数学模型来监测和诊断故障；而数据驱动的诊断方法则依赖机器学习和人工

收稿日期：2024-08-08
基金项目：国家自然科学基金(52377067)
第一作者：陈少峰，博士生，主要研究方向为轨道交通牵引控制，电机及电磁控制等。
E-mail：chenshaofeng@tongji. edu. cn
通信作者：林国斌，研究员，工学硕士，主要研究方向为磁浮车辆与直线驱动等。E-mail：12154@tongji. edu. cn

论文拓展介绍

智能算法，从大量历史数据中提取特征并进行故障预测[10]。然而，这些方法在实际应用中仍然存在一些问题。基于数据驱动的诊断方法需要大量的标注数据，且对算法的鲁棒性和泛化能力要求较高。目前，基于模型的诊断方法仍是退磁故障诊断方向的主流。有一些研究通过监测电机实时参数对退磁故障进行诊断[11-17]。例如，Zhang 等[11]提出了一种基于滑模观测器的永磁电机参数估算算法，实时跟踪系统扰动，得出相应的电机参数。梅柏杉等[12]考虑到磁路饱和与交叉耦合影响，采用注入高频电压信号的算法，提高了在低速和零速运行时的参数辨识精度。Han 等[13]通过电流分析法从总扰动中提取与磁通退磁相关的扰动量，从而计算出电机退磁故障时的实际磁通。这些方法虽然能获得电机的参数但是都需要额外的观测器或是信号注入，增加了控制系统算法的难度。Moon 等[14]提出了一种基于电感分析的磁通退磁故障诊断方法，该方法考虑了磁通变化下的磁饱和效应，结合最小二乘法实现退磁故障诊断，但这种算法忽视了其他参数退磁带来的影响，可能存在误诊断。Hang 等[15] 则根据电压畸变的定义，提出了新的故障特征信号，并定义了对参数失配不敏感的故障指示器，实现了电阻退磁故障的诊断。

综上所述，可以看出对 IPMSM 退磁故障诊断的研究仍存在不足。现有的诊断算法都是在电机高斯稳态运行时进行的，而电动汽车运行在多变的环境中，在动态或低速行驶过程中诊断退磁故障仍是一个值得研究的课题。为此，本文提出一种基于滑窗均值误差的电机退磁故障监测方法。该方法基于电机的模型信号，无须复杂的逻辑运算，能更快监测到电机的退磁故障。该方法集成了电机的电流滑模指标，无须实时观测电机的退磁参数；所提方法在基于硬件在环的平台上进行了验证。实验结果显示，所提方法可以准确诊断电机的电阻退磁故障和磁链退磁故障。

1　IPMSM 的健康模型和退磁故障模型

1.1　IPMSM 的健康模型

为了方便研究，首先建立健康状态下永磁同步电机的 d–q 轴数学模型，如下所示：

$$\frac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t}=-\frac{R_\mathrm{s}}{L_d}i_d+pw\frac{L_q}{L_d}i_q+\frac{u_d}{L_d} \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t}=-\frac{R_\mathrm{s}}{L_q}i_q-pw\frac{L_d}{L_q}i_d-pw\frac{\psi_\mathrm{r}}{L_q}+\frac{u_q}{L_q} \tag{2}$$

式(1)、(2)中：i_d 和 i_q 分别为 IPMSM d 轴、q 轴的定子电流；L_d 和 L_q 分别为 IPMSM d 轴、q 轴的电感；ψ_r 为电机的磁通；R_s 为电机的定子电阻；p 为电机的极对数；w 为电机转速；u_d 和 u_q 分别为 IPMSM d 轴、q 轴的定子电压。

1.2　IPMSM 的退磁故障模型

由于电动汽车长时间运行在复杂的路况下，会存在如行驶路面不平导致的震动和热损耗导致的内部高温等现象，这些都会加速电动汽车牵引系统的退磁，特别是其核心部件牵引电机的退磁。退磁故障最直接的影响就是相关电气参数发生变化，如电感、定子电阻和磁通等。考虑到电机电感本身易受到运行工况的影响无法直接根据此参数诊断退磁故障，本文将重点研究电机退磁后带来的电阻和磁通变化。

为此，根据式(1)、(2)，可以将 IPMSM 的退磁故障模型设计为

$$\frac{\mathrm{d}i_{d\_\mathrm{ag}}}{\mathrm{d}t}=-\frac{R_\mathrm{s}+\Delta R_\mathrm{s}}{L_d}i_{d\_\mathrm{ag}}+pw\frac{L_q}{L_d}i_{q\_\mathrm{ag}}+\frac{u_d}{L_d} \tag{3}$$

$$\frac{\mathrm{d}i_{q\_\mathrm{ag}}}{\mathrm{d}t}=-\frac{R_\mathrm{s}+\Delta R_\mathrm{s}}{L_q}i_{q\_\mathrm{ag}}-pw\frac{L_d}{L_q}i_{d\_\mathrm{ag}}-pw\frac{\psi_\mathrm{r}+\Delta\psi_\mathrm{r}}{L_q}+\frac{u_q}{L_q} \tag{4}$$

式(3)、(4)中：i_{d_ag} 和 i_{q_ag} 分别为永磁同步电机在退磁故障状态下 d 轴、q 轴的定子电流；ΔR_s 和 $\Delta\psi_\mathrm{r}$ 分别为永磁同步电机定子电阻和磁通在退磁故障状态下的变化值。

2　基于滑模信息融合的 IPMSM 退磁故障诊断策略

2.1　基于滑窗均值误差的电机退磁故障监测方法

通过整合电机状态的采集数据，计算电流估算微分值和实际微分值，构造了电流微分的滑窗均值误差，作为退磁监测的评价指标。

根据 IPMSM 的健康模型，可以计算出牵引电机电流的第 k 时刻 d–q 轴电流的基准微分信号 $\frac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t}(k)$ 和 $\frac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t}(k)$。此时根据牵引电机的电流采集信号可以计算出实际的 d–q 轴电流微分信号 $\frac{\mathrm{d}i_{dt}}{\mathrm{d}t}(k)$ 和 $\frac{\mathrm{d}i_{qt}}{\mathrm{d}t}(k)$。

$$\frac{\mathrm{d}i_{dt}}{\mathrm{d}t}(k)=\frac{i_d(k)-i_d(k-1)}{T_\mathrm{s}} \tag{5}$$

$$\frac{\mathrm{d}i_{qt}}{\mathrm{d}t}(k)=\frac{i_q(k)-i_q(k-1)}{T_s} \tag{6}$$

式(5)、(6)中:$i_d(k)$、$i_q(k)$分别为第k时刻电机d轴、q轴的定子电流采集值;$i_d(k-1)$、$i_q(k-1)$分别为第$k-1$时刻d轴、q轴的定子电流采集值;T_s为采样间隔。

结合牵引电机的基准微分信号和实际微分信号,可构建电流退磁误差信号$D(k)$,如下所示:

$$D(k)=\left|\frac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t}(k)-\frac{\mathrm{d}i_{dt}}{\mathrm{d}t}(k)\right|+\left|\frac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t}(k)-\frac{\mathrm{d}i_{qt}}{\mathrm{d}t}(k)\right| \tag{7}$$

根据式(7),设计牵引电机的退磁故障监测指标$D_E(k)$为

$$D_E(k)=D(k)-\frac{1}{\varpi}\sum_{\delta=k-\varpi}^{k-1}D(\delta) \tag{8}$$

式中:$D_E(k)$为第k时刻退磁故障的检测指标;$D(\delta)$为第δ时刻电流退磁误差信号;ϖ为从$k-\varpi$时刻到$k-1$时刻的时刻总量。

定义退磁故障监测功能为

$$\nabla_{ag}(k)=\begin{cases}1, D_E(k)>A_g\\ 0, D_E(k)\leqslant A_g\end{cases} \tag{9}$$

式中:A_g为电机退磁故障诊断的阈值,可根据电机实际情况具体设置。若$\nabla_{ag}(k)=1$,说明牵引电机存在退磁故障,若$\nabla_{ag}(k)=0$,说明牵引电机运行正常。

2.2 基于滑模信息的退磁故障诊断方法

本节提出了一种基于滑模信息的电机退磁故障诊断方法,该算法集成了包含退磁故障IPMSM的d-q轴电流误差滑模面变化特性,并基于滑模趋近律建立了IPMSM退磁定位(电机电阻或磁通变化定位)的诊断机制。

电机d-q轴的电流误差表达式如下:

$$e_d(k)=i_{dr}(k)-i_{dt}(k) \tag{10}$$

$$e_q(k)=i_{qr}(k)-i_{qt}(k) \tag{11}$$

式中:$e_d(k)$、$e_q(k)$分别为第k时刻d轴、q轴电流的误差信号,$i_{dr}(k)$、$i_{qr}(k)$分别为第k时刻牵引系统中d轴、q轴电流的控制参考信号。

根据式(10)和式(11),d-q轴电流的滑模面设计如下:

$$S_d(k)=e_d(k)+c_d\int e_d(k)\mathrm{d}\tau \tag{12}$$

$$S_q(k)=e_q(k)+c_q\int e_q(k)\mathrm{d}\tau \tag{13}$$

式中:$S_d(k)$和$S_q(k)$分别为d轴、q轴电流在第k时刻的滑模面;c_d、c_q为滑模面参数。

d-q轴电流变化特性公式可写为

$$L(k)=\left|k_{1d}\mathrm{sgn}(S_d(k))+k_{2d}S_d(k)\right|+\left|k_{1q}\mathrm{sgn}(S_q(k))+k_{2q}S_q(k)\right| \tag{14}$$

式中:$L(k)$为第k时刻的故障诊断系数;k_{1d}、k_{2d}、k_{1q}和k_{2q}为滑模趋近律的系数。

IPMSM退磁故障定位的诊断指标如下:

$$D_L(k)=L(k)-\frac{1}{p}\sum_{\varsigma=k-P}^{k-1}L(\varsigma) \tag{15}$$

由式(15)可知,IPMSM的退磁定位诊断功能如下:

$$A_L(k)=\begin{cases}1, D_L(k)\geqslant\Delta_L\\ 0, D_L(k)<\Delta_L\end{cases} \tag{16}$$

式中:Δ_L为电机退磁定位诊断的阈值。当$A_L(k)=1$时,电机定子电阻存在退磁故障,而当$A_L(k)=0$时,磁通存在退磁故障。

3 实验验证

3.1 实验平台设置

本文提出的诊断策略通过基于硬件在环(hardware-in-loop)的平台进行了验证,该平台由电机控制板,驱动板,dSPACE®实时模拟器,直流电源和电脑主机组成。其中实时模拟器由德国dSPACE公司制造。电机的退磁故障通过改变模型的相关参数实现。具体的实验平台如图1所示,实验所用的电动汽车牵引电机IPMSM参数如表1所示。

3.2 实验结果

为验证所提算法在动态及低速运行条件下的有效性,设置3种不同的实验条件。每种条件下,退磁故障的监测阈值是根据电机的正常运行数据及早期退磁数据,通过统计分析方法确定的。阈值的设置旨在最大限度地减少假正和假负结果,确保退磁诊断的精度。

(1) 实验1:电阻退磁故障诊断。在该实验中,模拟电机在升速过程中经历电阻退磁。实验监测到电机的定子电阻由初始的0.07 Ω增加至0.10 Ω。当实验电机运行在升速过程时,其三相电流和转速特性如图2所示。可以看出退磁故障在电机这两项状态上表现并不明显。为此,采用本文算法对电机退磁故障进行监测和诊断。图3为实验电机的退磁监测指标及监测结果。从图3可以看出,随着电动汽车牵引退磁故障的发生,监测指示器会及时触发退磁故障的监测阈值,监测出在0.5 s时牵引电机发生了退磁故障。同时,进一步诊断退磁故障类别,如图4所示,可以诊断出牵引电机发生了电阻退磁故障。

(2) 实验2:磁通退磁故障诊断。在本实验设置

图1　基于硬件在环的实验平台示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the HIL-based platform

表1　IPMSM参数

Tab. 1　Parameters of IPMSM

参数	数值	单位
定子电阻R_s	0.07	Ω
极对数p	4	
转子磁链ψ_r	0.626	Wb
d轴电感L_d	3.7	mH
q轴电感L_q	9.6	mH
转动惯量J	0.01	
额定转速	2 000	r·min^{-1}
额定电流	150	A

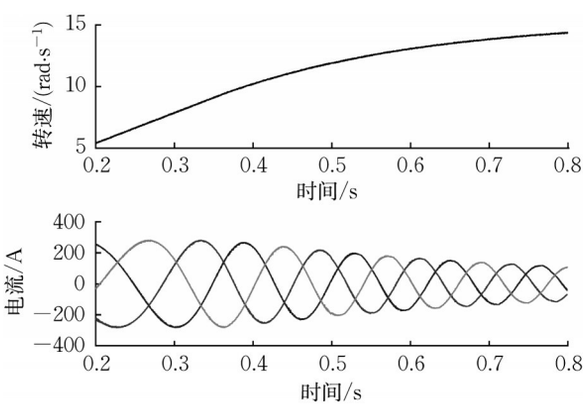

图2　实验1的电机三相电流及转速状态

Fig. 2　Three-phase current and speed state of IPMSM in Case 1

中，电机在升速过程中发生了磁通的退磁，磁链由初始的0.626 Wb降低到0.600 Wb。实验电机继续运行在升速过程时，其三相电流和转速特性如图5所示。为此采用本文算法对其进行监测和诊断。从图6可以看出，随着电动汽车牵引退磁故障的发生，监测指示器在0.5 s时触发了退磁故障的监测阈值，监测出牵引电机退磁故障。如图7所示，进一步诊断退磁故障类别，由于电机退磁诊断指标始终没有超过诊断阈值，由此可以判断出牵引电机发生了磁通退磁故障。

（3）实验3：低速稳态下的退磁故障诊断。前两个实验验证了本文算法在动态过程下的适用性和准

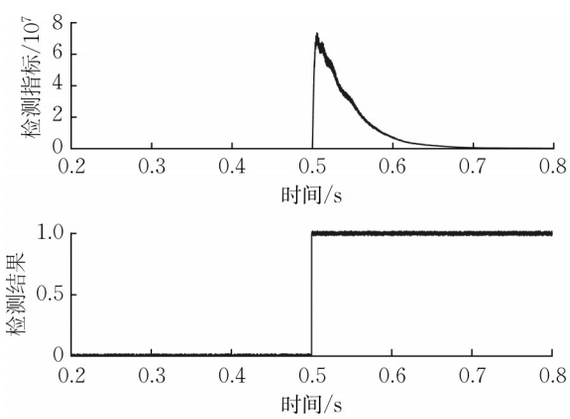

图3　实验1的牵引电机退磁监测指标

Fig. 3　Demagnetization-detection indicator of IPMSM in Case 1

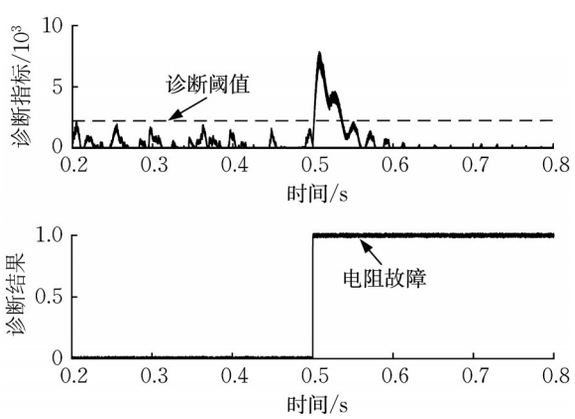

图4　实验1的牵引电机退磁诊断指标

Fig. 4　Demagnetization-diagnosis indicator of IPMSM in Case 1

确性，体现了本文算法的优越性，最后通过实验3测试本文算法的稳态性能。

本实验设置电机在升速过程中发生磁通退磁，磁链由初始的0.626 Wb降低到0.600 Wb。电机在稳态运行下的三相电流和转速特性如图8所示。采用本文算法对其进行监测和诊断。从图9可以看出，随着电动汽车牵引退磁故障的发生，监测指示器

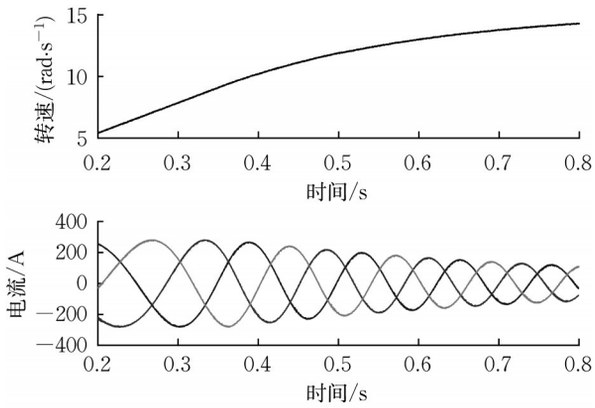

图5 实验2的电机三相电流及转速状态图

Fig. 5 Three-phase current and speed state diagram of IPMSM in Case 2

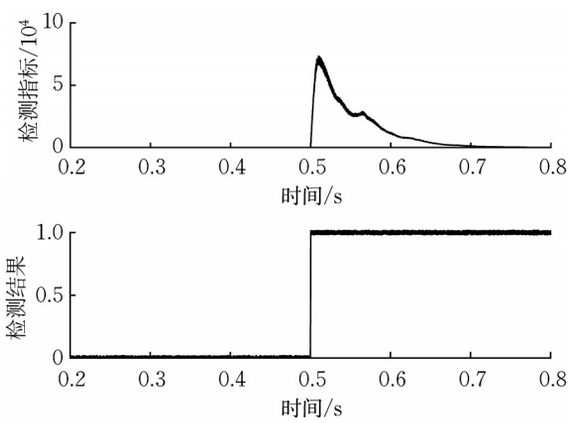

图6 实验2的牵引电机退磁监测指标

Fig. 6 Demagnetization-detection indicator of IPMSM in Case 2

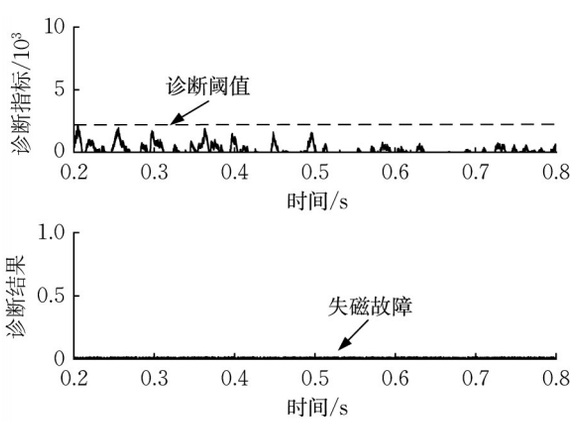

图7 实验2的牵引电机退磁诊断指标

Fig. 7 Demagnetization-diagnosis indicator of IPMSM in Case 2

在5 s时触发了退磁故障的监测阈值,监测出牵引电机退磁故障。如图10所示,进一步诊断退磁故障类别,由于电机退磁诊断指标基本为0,由此可以判断牵引电机发生了磁通退磁故障。

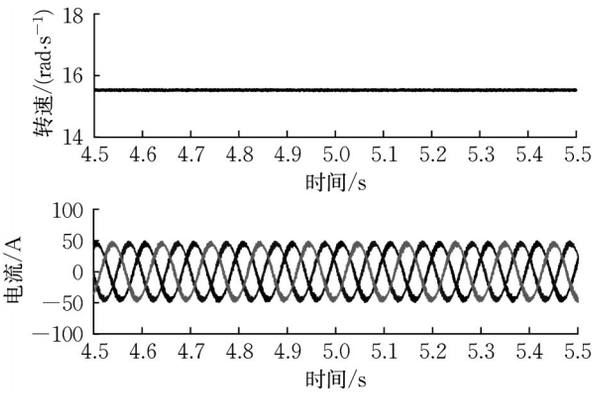

图8 实验3下的电机三相电流及转速状态图

Fig. 8 Three-phase current and speed state diagram of IPMSM in Case 3

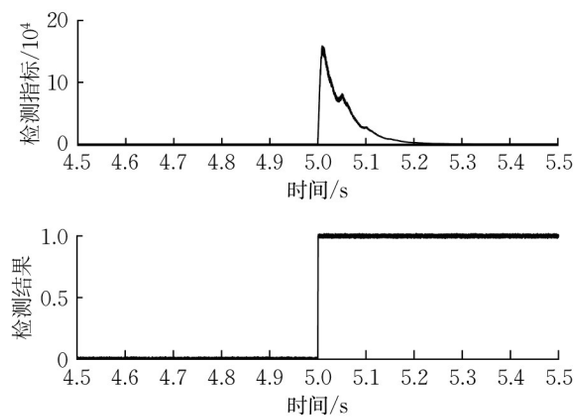

图9 实验3的牵引电机退磁监测指标

Fig. 9 Demagnetization-detection indicator of IPMSM in Case 3

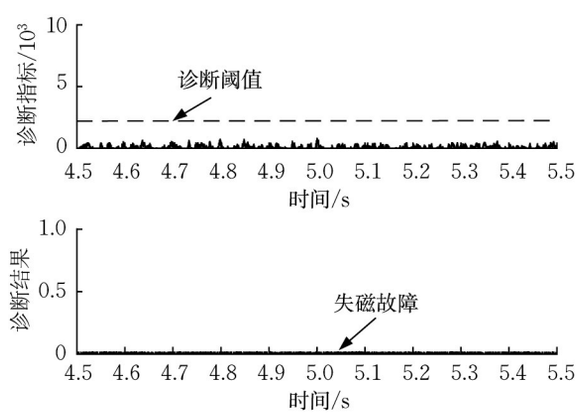

图10 实验3的牵引电机退磁诊断指标

Fig. 10 Demagnetization-diagnosis indicator of IPMSM in Case 3

4 结语

本文提出了一种基于滑模信息融合的电动汽车用IPMSM退磁故障诊断策略。首先,提出了一种基于滑窗均值误差的电机退磁故障监测方法,利用电

机电流数据构造了退磁故障的监测指标。其次，提出了一种基于滑模信息的退磁故障诊断方法，集成电流滑模指标，对退磁故障进行具体的定位。最后，在基于硬件在环的实验平台上对所提方法进行了验证，在动态及低速状态下都能精确诊断出电机退磁故障。所提出的方法在不同运行工况下具有一定的可靠性，同时也表现出良好的泛化能力。

作者贡献声明：

陈少峰：研究设计，数据处理，模型构建，分析与论文撰写。

林国斌：提出研究思路，审阅及修订论文。

韩耀飞：指导研究方案和论文撰写，论文润色。

马志勋：指导研究方案和论文撰写，论文润色。

参考文献：

[1] 吴彩秀，李红佗，庄舜雄. 地铁列车节能技术应用研究[J]. 现代城市轨道交通，2022(8)：33.
WU Caixiu，LI Hongtuo，ZHUANG Shunxiong. Research on application of energy saving technology for subway trains[J]. Modern Urban Transit，2022(8)：33.

[2] 熊嘉阳，沈志云. 中国高速铁路的崛起和今后的发展[J]. 交通运输工程学报，2021，21(5)：6.
XIONG Jiayang，SHEN Zhiyun. Rise and future development of Chinese high-speed railway [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering，2021，21(5)：6.

[3] 谢颖，辛尉，蔡蔚，等. 内置式永磁同步电机不同转子拓扑结构的电磁性能及电磁振动噪声分析[J]. 电机与控制学报，2023，27(1)：110.
XIE Ying，XIN Wei，CAI Wei，*et al*. Electromagnetic performance and electromagnetic vibration noise analysis of different rotor topologies of interior permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Machines and Control，2023，27(1)：110.

[4] 陈丽香，潘敬涛，孙宁. 新能源汽车用永磁转子结构分析[J]. 电机与控制应用，2019，46(2)：117.
CHEN Lixiang，PAN Jingtao，SUN Ning. Rotor structure analysis of permanent motor for new energy automobile[J]. ElectricMachines and Control Application，2019，46(2)：117.

[5] 李红梅，陈涛，姚宏洋. 电动汽车PMSM退磁故障诊断及故障模式识别[J]. 电工技术学报，2017，32(5)：1.
LI Hongmei，CHEN Tao，YAO Hongyang. Demagnetization fault diagnosis and fault mode recognition of PMSM for EV[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2017，32(5)：1.

[6] 梁得亮，褚帅君，贾少锋，等. 高温高速永磁电机关键技术研究综述[J]. 西安交通大学学报，2022，56(10)：31.
LIANG Deliang，CHU Shuaijun，JIA Shaofeng，*et al*. Overview of research on key technology of high-temperature and high-speed permanent magnet machine[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University，2022，56(10)：31.

[7] 彭忆强，芦文峰，邓鹏毅，等. 新能源汽车"三电"系统功能安全技术现状分析[J]. 西华大学学报，2018，37(1)：54.
PENG Yiqiang，LU Wenfeng，DENG Pengyi，*et al*. Analysis of state of the art for new energy vehicle functional safety technologies[J]. Journal of Xihua University，2018，37(1)：54.

[8] 闫军志. 永磁同步电机在线故障诊断策略研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2020.
YAN Zhijun. Research on on-line fault diagnosis strategy of permanent magnet synchronous motor [D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2020.

[9] FAIZ J，NEJADI-KOTI H. Demagnetization fault indexes in permanent magnet synchronous motors—an overview [J]. IEEE Transactions on Magnetics，2016，52(4)：1.

[10] 刘闯. 数据驱动的电机故障诊断与预测系统的设计与实现[D]. 青岛：青岛大学，2020.
LIU Chuang. Design and implementation of data-driven motor fault diagnosis and prediction system [D]. Qingdao：Qingdao University，2020.

[11] ZHANG X，LI Z. Sliding-mode observer-based mechanical parameter estimation for permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Power Electronics，2015，31(8)：5732.

[12] 梅柏杉，张鹏. 基于高频信号注入的内置式永磁同步电机电感参数辨识[J]. 微特电机，2019，47(12)：52.
MEI Boshan，ZHANG Peng. Inductance identification of interior permanent magnet synchronous motor based on high-frequency signal injection [J]. Small and Special Electrical Machines，2019，47(12)：52.

[13] HAN Y，CHEN S，GONG C，*et al*. Accurate SM disturbance observer-based demagnetization fault diagnosis with parameter mismatch impacts eliminated for IPM motors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics，2023，38(5)：5706.

[14] MOON S，LEE J，JEONG H，*et al*. Demagnetization fault diagnosis of a PMSM based on structure analysis of motor inductance[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics ，2016，63(6)：3795.

[15] HANG J，ZHANG J，DING S，*et al*. A model-based strategy with robust parameter mismatch for online HRC diagnosis and location in PMSM drive system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics ，2020，35(10)：10917.

[16] 吴春，赵宇纬，孙明轩. 采用测量电压的永磁同步电机多参数在线辨识[J]. 中国电机工程学报，2020，40(13)：4329.
WU Chun，ZHAO Yuwei，SUN Mingxuan. Multiparameter online identification for permanent magnet synchronous machines using voltage measurements[J]. Proceedings of the CSEE，2020，40(13)：4329.

[17] 马铱林，袁浩，尹威，等. 考虑等效电磁损耗电阻偏移的永磁同步电机直流信号注入在线参数辨识方法[J]. 电工技术学报，2023，38(22)：6015.
MA Yilin，YUAN Hao，YIN Wei，*et al*. DC-signal-injection-based online parameters identification for permanent magnet synchronous machine considering variation of equivalent electromagnetic loss resistance [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2023，38(22)：6015.