

基于反电动势的地铁牵引电机电流传感器 故障检测与容错控制^{*}

冯秋峰¹ 李小波¹ 张 煜²

(1. 上海工程技术大学城市轨道交通学院 上海 201620;

2. 上海地铁电子科技有限公司 上海 200233)

摘 要:针对地铁列车牵引系统电流传感器发生故障时给列车运行带来重大安全风险这一问题,提出了一种新型的故障监测与容错控制算法。首先,利用三相异步电机的静态数学模型结合转子磁链与反电动势的特定关系设计了电流滑模观测器。然后,将电流传感器的测量值与滑模观测器中的估计值进行对比并生成电流残差,通过修正的 Bayes 分类算法对电流传感器工作状态进行实时监测与定位。当故障发生时用观测器中的电流重构值代替故障值参与系统的控制。最后,利用仿真平台 MATLAB/Simulink 对其有效性进行验证并与另外 3 种典型的控制算法进行对比分析。研究表明,方案具有较高的精度和较强的鲁棒性,在对三相电流重构方面优于对比方案,其系统综合误差减小了 24.2%,具有更好的控制效果。

关键词:反电动势;滑模观测器;Bayes 算法;容错控制;电流传感器故障

中图分类号: TP206+.3;V241.7 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:** 460.4

Fault detection and fault tolerance control of subway traction motor current sensor based on counter electromotive force

Feng Qiufeng¹ Li Xiaobo¹ Zhang Yu²

(1. School of Urban Rail Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. Shanghai Metro Electronic Technology Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: Aiming at the problem of the major safety risks for the train operation caused by the fault of the current sensor in the subway train traction system, a new fault monitoring and tolerant control algorithm was proposed. Firstly, a current sliding mode observer was designed by using the static mathematical mode of the three-phase asynchronous motor and the specific relationship combined the rotor flux and the counter electromotive force of the motor. Secondly, the current residual was generated by comparing the measured value of the current sensor with the current estimation in the current sliding mode observer, and the working state of the current sensor was monitored and located by the modified Bayes classification algorithm in real time. When the fault occurred, the system was controlled by the current reconstruction value instead of the fault value in the original current sensor. Finally, the feasibility of the scheme was verified by the MATLAB/Simulink simulation platform, which was compared with other three typical fault-tolerant control algorithms. The research results show that the scheme has higher accuracy and stronger robustness, which is based on the counter electromotive theory of the three-phase asynchronous motor. In terms of three-phase current reconstruction, the comprehensive error is reduced by 24.2%, which has better control effect.

Keywords: counter electromotive force; sliding mode observer; Bayes algorithm; fault tolerant control; current sensor fault

收稿日期:2023-09-15

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(51907117)项目资助

0 引言

近年来,轨道交通建设的快速发展对地铁列车的健康管理提出了更高的要求^[1]。地铁列车牵引电机电流传感器在实际使用时易受制造工艺和环境等因素而导致测量精度下降甚至失效,从而发生故障误报和误保护,严重时会导致列车清客、救援。为了保证地铁车辆运行的安全性和稳定性,列车车载电流传感器的故障监测与容错控制成为最为关注的技术之一^[2]。

目前,针对电流传感器的故障容错控制研究仍处于发展阶段,按照控制策略的不同可分为3类:1)开环控制^[3];2)无电流传感器控制^[4-5];3)单相电流传感器控制^[6]。滕青芳等^[7]采用了一种扩张状态观测器的方法进行永磁同步电机的预测控制,将系统状态方程中的未知量扩充为一个新的变量构造ESO,但未考虑系统中电阻参数的易变性,缺少鲁棒性验证。申永鹏等^[8]利用直流母线SCS采样基本原理结合空间矢量脉宽调制(SVPWM)方案进行相电流重构,解决了电流滞环精度难以把握的问题,但此方法太过理想化,三相逆变器开关周期的控制存在困难。乔浩等^[9]在基于坐标变换检测电流传感器故障相的基础上结合二次分析法对故障传感器进行二次检测,此方法提高了检测精度,同时也解决了阈值选取的关键性问题,但在电流误差的产生机理没有给出合理的解释,同时在参数选取上,对定子、转子电阻的参数有严格要求,适用范围有限。罗鑫辉等^[10]采用理想电机模型结合扩展卡尔曼滤波算法(extended Kalman filtering, EKF)对三相电流进行重构,虽重构效果较好,但理想电机模型极易受到外界环境因素的干扰而导致控制发散。蒋颀^[11]在电流传感器发生故障时,先利用卡尔曼滤波算法对故障电流进行预处理,设计了单传感器控制算法,将预处理结果代入控制算法中可对故障相传感器的输出电流进行修正,此方法原理简单操作,但在对电流进行修正时采用了大量的估算值,增加了电流重构误差,导致控制性能不佳,出现非周期性脉冲尖峰。Tran等^[12]基于电机坐标变换和矢量控制基础上,通过设计故障矩阵及Luenberger状态观测器来实现电流冗余与故障容错,此方法受电机参数影响较小,检测结果精准,但Luenberger状态观测器对转子磁链的依赖性较高,鲁棒性略显不足。

为了减小电流传感器故障对地铁列车运行的影响,本文提出了一种新型的容错控制算法。先利用异步电机的静态数学模型对电机进行矢量分析,用修正的Bayes分类算法对系统中的电流传感器进行状态监测与故障隔离,再根据异步电机矢量控制原理中反电动势与转子磁链的特定微分关系设计了一种新型的电流滑模观测器。当故障发生时用观测器中的电流重构值代替故障传感器的测量值参与控制,最后通过方案对比验证了本文算法的可行性和有效性。

1 地铁牵引控制系统及矢量控制原理

1.1 带容错功能的地铁牵引控制系统

图1所示为牵引控制系统的原理框图^[13]。当电流传感器发生故障时,首先由故障监测与容错控制单元发现并定位出故障位置,随即将故障电流和故障标志F传递给牵引控制单元TCU,由TCU中状态观测器的电流重构值立即替换故障值以保证系统的正常运行^[14-15]。

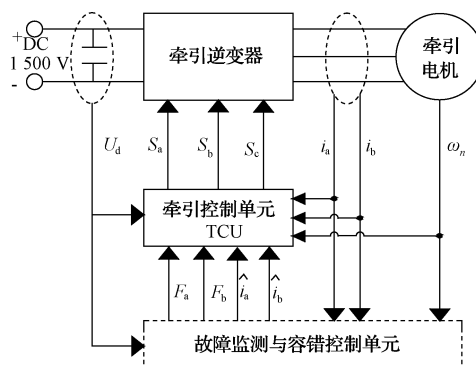


图1 带有容错控制的牵引控制系统原理

其中,TCU中具体容错框图如图2所示。

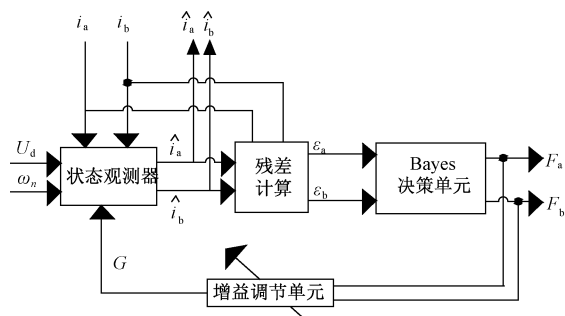


图2 容错控制框图

1.2 带转矩内环的转速、磁链闭环矢量控制系统

地铁列车牵引电机闭环矢量控制系统原理如图3所示,其中,ASR、ATR、ApsiR分别表示转速、转矩和磁链调节器,三者均是带输出限幅的PI调节器,并设置了磁链观测和电流变换环节。 $i_{sA}^*, i_{sB}^*, i_{sC}^*$ 分别表示三相电流的给定值,并通过电流滞环控制PWM逆变器控制电机定子的三相电流。

其中各参数间转换关系为:

$$\begin{cases} U_{sm} = R_s i_{sm} - \omega_1 \sigma L_s i_{st} \\ U_{st} = \omega_1 L_s i_{sm} + (R_s + \sigma L_s P) i_{st} \end{cases} \quad (1)$$

$$T_e = n_p \frac{L_m}{L_r} i_{st} \psi_r \quad (2)$$

$$\omega_s = \frac{L_m i_{st}}{T_r \psi_r} \quad (3)$$

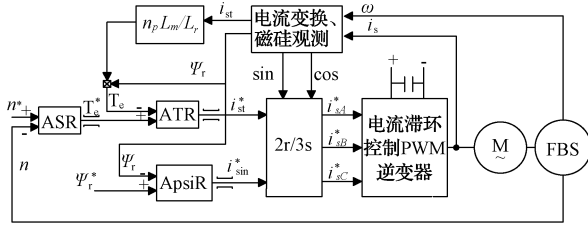


图3 闭环矢量控制系统原理

$$\phi_r = \frac{L_m}{T_r p + 1} i_{sm} \quad (4)$$

式中： U_{sm} 为电压的励磁分量； U_{st} 为定子电压的转矩分量； T_e 表示转矩的反馈信号； n_p 为电机的极对数； L_m 为两相坐标系中定子与转子间的绕组； L_r 是转子绕组的自感； T_r 为转子的电磁时间常数且 $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ ； ϕ_r 为转子磁链； σ 为磁漏系数，且 $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$ 。

2 故障监测与容错算法

2.1 三相异步电机静态数学模型

三相异步电机在两相静止坐标系下的数学模型可表示为^[16]：

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_a = \alpha_r \varphi_a + \omega_r \varphi_\beta - L_m \alpha_r i_a + \frac{L_r}{L_m} (V_a - R_s i_a) \\ \dot{\epsilon}_\beta = \alpha_r \varphi_\beta - \omega_r \varphi_a - L_m \alpha_r i_\beta + \frac{L_r}{L_m} (V_\beta - R_s i_\beta) \\ \dot{\varphi}_a = L_m \alpha_r i_a - \omega_r \varphi_\beta - \alpha_r \varphi_a \\ \dot{\varphi}_\beta = L_m \alpha_r i_\beta + \omega_r \varphi_a - \alpha_r \varphi_\beta \end{cases} \quad (5)$$

式中： i_a, i_β 为定子电流； L_m 为电机互感； φ_a, φ_β 为转子磁链； V_a, V_β 为定子电压； R_s 和 R_r 分别为定子和转子电阻； ω_r 为电机转速； L_s, L_r 分别为定子和转子电感。其中 $\epsilon = \delta \frac{L_s L_r}{L_m}$ ； $\delta = 1 - L_m^2 / L_s L_r$ ； $\alpha_r = R_r / L_r$ 。

又由异步电机反电动势与转子磁链的关系可得：

$$\begin{cases} e_a = \alpha_r \varphi_a + \omega_r \varphi_\beta - L_m \alpha_r i_a = -\dot{\varphi}_a \\ e_\beta = \alpha_r \varphi_\beta - \omega_r \varphi_a - L_m \alpha_r i_\beta = -\dot{\varphi}_\beta \end{cases} \quad (6)$$

故式(5)的数学模型可转化为：

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_a = e_a + \frac{L_r}{L_m} (V_a - R_s i_a) \\ \dot{\epsilon}_\beta = e_\beta + \frac{L_r}{L_m} (V_\beta - R_s i_\beta) \\ \dot{\varphi}_a = -e_a \\ \dot{\varphi}_\beta = -e_\beta \end{cases} \quad (7)$$

式中： e_a, e_β 为反电动势。

2.2 基于 Bayes 修正算法对电流传感器进行监测

当电流传感器发生故障时，需要及时发现并定位出故障相电流，并用滑模观测器中的电流重构值来替代故障值

参与闭合回路，以实现容错控制。故设计如下电流传感器故障监测方案。

令：

$$\begin{cases} \epsilon_a = \bar{i}_a - \hat{i}_a \\ \epsilon_b = \bar{i}_b - \hat{i}_b \end{cases} \quad (8)$$

式中： ϵ_a, ϵ_b 表示a相和b相电流传感器的采样值与估计值之差； $\bar{i}_a, \bar{i}_b$ 表示采样值； $\hat{i}_a, \hat{i}_b$ 表示估计值。

$$\zeta_\epsilon(\lambda) = \frac{1}{N_1} \sum_{j=1}^{N_1} \epsilon(\lambda - j) \quad (9)$$

$$\eta_{\epsilon^0}^2(\lambda) = \frac{1}{N_1 - 1} \sum_{j=1}^{N_1} [\epsilon(\lambda - j) - \epsilon^0]^2 \quad (10)$$

$$\eta_{\epsilon^2}^2(\lambda) = \frac{1}{N_1 - 1} \sum_{j=1}^{N_1} [\epsilon(\lambda - j) - \zeta_\epsilon(\lambda)]^2 \quad (11)$$

$$\mu_\epsilon(\lambda) = \frac{\eta_{\epsilon^0}^2(\lambda)}{\eta_{\epsilon^0}^2} - \ln \frac{\eta_{\epsilon^2}^2(\lambda)}{\eta_{\epsilon^0}^2} - 1 \quad (12)$$

当系统正常运行时，易得a、b相电流的残差 ϵ_a, ϵ_b 服从正态分布，即 $\epsilon \sim N(\epsilon^0, \eta_{\epsilon^0}^2)$ ，且 $\epsilon^0 = 0, \eta_{\epsilon^0}^2$ 则是根据传感器的动态性能来测定，经测定本文取 $\eta_{\epsilon^0}^2 = 3.3$ ； N 为数窗长度，一般取值1024。

当电流传感器发生故障时， $\zeta_\epsilon(\lambda)$ 将迅速显著偏离 $\epsilon^0, \eta_{\epsilon^0}^2(\lambda)$ 将迅速显著偏离 $\eta_{\epsilon^0}^2$ ，而 $\eta_{\epsilon^2}^2(\lambda)$ 的结果变化不大。由修正的Bayes优化算法可得知此故障的影响在式(12)中得到了加强放大，即式(12)中 $\mu_\epsilon(\lambda)$ 对与此故障较为敏感。

假设残差阈值取 $\Omega_\epsilon = 5$ 。式(12)生成的故障标志为 F ，由以上分析可得：

$$F = \begin{cases} 1, & \mu_\epsilon(\lambda) \geq \Omega_\epsilon \\ 0, & \mu_\epsilon(\lambda) \leq \Omega_\epsilon \end{cases} \quad (13)$$

式中：若 $F=1$ 表示传感器发生了故障； $F=0$ 表示传感器无故障。假设系统在8s时a相电流传感器发生故障，则其故障标志如图4所示。

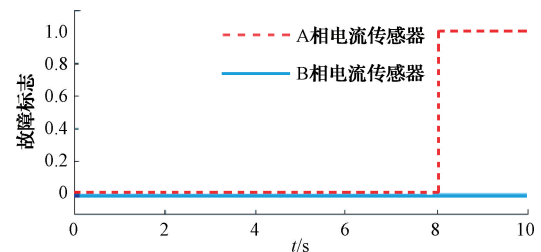


图4 故障标志

2.3 基于反电动势原理设计滑模观测器重构电流

当系统检测到电流传感器发生故障时，应及时将故障传感器断开并调用观测器中电流重构值来代替故障值以保证系统的正常运行。本文基于式(5)设计以下滑模观测器：

$$\begin{cases} \dot{\hat{\epsilon}}_{i_a} = \hat{e}_a + \frac{L_r}{L_m}(V_a - R_s i_a) + k_1 e_{ia} - g_{ia} \operatorname{sgn}(e_{ia}) \\ \dot{\hat{\epsilon}}_{i_\beta} = \hat{e}_\beta + \frac{L_r}{L_m}(V_\beta - R_s i_\beta) + k_2 e_{i\beta} - g_{i\beta} \operatorname{sgn}(e_{i\beta}) \\ \dot{\hat{\varphi}}_a = -\hat{e}_a - g_{\varphi a} \operatorname{sgn}(e_{ia}) \\ \dot{\hat{\varphi}}_\beta = -\hat{e}_\beta - g_{\varphi \beta} \operatorname{sgn}(e_{i\beta}) \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\hat{i}$ 表示 i 的估计值; $\hat{e}_a$ 和 $\hat{e}_\beta$ 分别表示 e_a 和 e_β 的估计值; $k_1, k_2, g_{ia}, g_{i\beta}, g_{\varphi a}, g_{\varphi \beta}$ 表示滑模观测器增益; e_{ia} 和 $e_{i\beta}$ 表示电流残差, 且 $e_{ia} = \hat{i}_a - i_a, e_{i\beta} = \hat{i}_\beta - i_\beta$, $\operatorname{sgn}()$ 是符号函数。

令滑模面 $Z_a = \operatorname{sgn}(\hat{i}_a - i_a)K$, 并将式(5)与(14)相减, 则误差的动态估计可用矩阵表示为:

$$\begin{cases} \dot{\epsilon} \dot{i} = A e_\varphi + K_i e_i + G_i Y_e \\ \dot{e}_\varphi = G_\varphi Y_e - A e_\varphi \end{cases} \quad (15)$$

其中, $e_{\varphi a} = \hat{\varphi}_a - \varphi_a, e_{\varphi \beta} = \hat{\varphi}_\beta - \varphi_\beta; A = \alpha I_2 - \omega_r J_2;$
 $e_i = [e_{ia} \ e_{i\beta}]^T; e_\varphi = [e_{\varphi a} \ e_{\varphi \beta}]^T; Y_e = [\operatorname{sgn}(e_{ia}) \ \operatorname{sgn}(e_{i\beta})]^T;$
 $G_i = \begin{bmatrix} g_{ia} & 0 \\ 0 & g_{i\beta} \end{bmatrix}; G_\varphi = \begin{bmatrix} g_{\varphi a} & 0 \\ 0 & g_{\varphi \beta} \end{bmatrix}; I_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; J_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; K_i = \begin{bmatrix} -k_1 & 0 \\ 0 & -k_2 \end{bmatrix}。$

在此滑模观测器中, 当 i_a 的观测电流 $\hat{i}_a$ 收敛到 i_a 时, $\hat{i}_\beta$ 也将收敛到实际值 i_β 。

当检测出电流传感器发生故障(以 a 相为例), 则传感器的输出将不可信, 此时在重构电流时, 采用 b 相电流传感器的检测输出值进行 Clark 变换, 利用两相静止坐标系下的 α, β 轴电流 i_a, i_β 以及电压 U_a, U_β , 通过式(7)得到 e_β 的观测值 $\hat{e}_\beta$, 再基于 e_a 和 e_β 的相位角关系来得到 e_a 的观测值 $\hat{e}_a$, 将得到的 $\hat{e}_a$ 重新代入到式(7)中则可以得到 i_a 和 i_β 的观测值 $\hat{i}_a$ 和 $\hat{i}_\beta$, 最后利用三相静止坐标系和两相静止坐标系的几何关系以及异步电机三相电流的数学关系 $i_a + i_b + i_c = 0$ 来得到三相电流的重构值 $\hat{i}_a, \hat{i}_b, \hat{i}_c$ 。该滑模观测器核心算法部分建模如图 5 所示。

3 研究结果分析

图 6 所示为某地铁车辆牵引箱局部图, 其中 LEM 霍尔型传感器即为本文研究对象。

因地铁牵引系统控制算法涉及列车启动、加速、恒速、制动等过程, 且车辆运行过程中上述工况处于频繁切换状态, 在实车上难以检验本文算法的控制效果, 故在 MATLAB 软件环境下进行实验验证, 求解器设置为 Ode23tb 模式。系统采用与某地铁列车牵引系统相同的带转矩内环的转速、电流双闭环矢量控制, 并且转速、转矩和磁链跟踪采用 PI 控制方式, 其 PI 调节器均带饱和和限幅功能, 结构如图 7 所示。

系统仿真模型如图 8 所示, 主电路由 DC 1 500 V 电

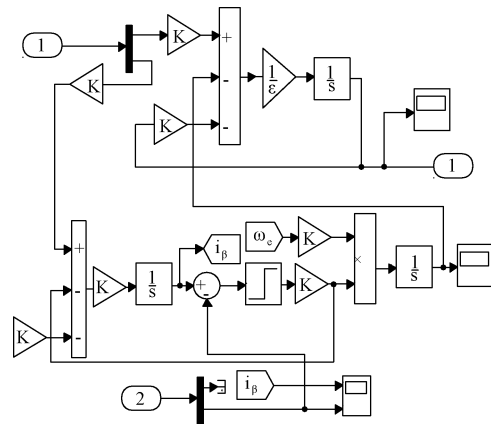


图 5 滑模观测器结构

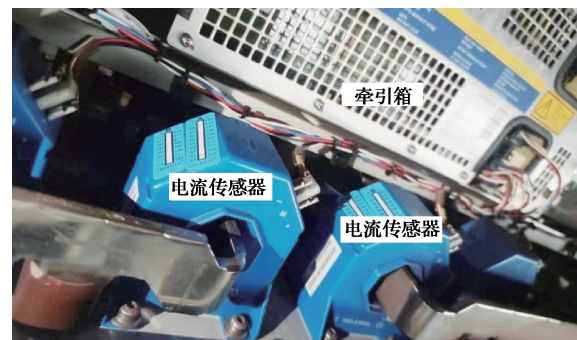


图 6 地铁牵引系统电流传感器实车

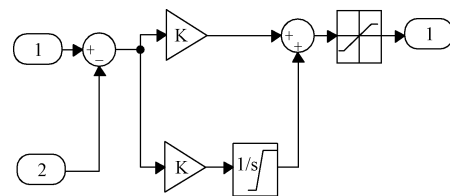


图 7 PI 调节器结构

源、逆变器、PWM 信号生成器、牵引电机及电路测量调节模块组成。其中, PWM 信号生成采用电流滞环形式^[17], 牵引电机采用三相鼠笼式异步电机, 其主要参数设置如表 1 所示^[18]。

3.1 正常工况下

正常工况下的运行结果如图 9 所示。由图 9 可知, 当给定转速设定在 1 500 r/min 时电机先空载启动, 约 5 s 时达到额定转矩 60 N·m。从波形可以看出, 由于采用的是双闭环矢量控制, 在电机启动后, 转速平稳上升, 约 3.5 s 后达到额定转速。在 5 s 电机加上负载时, 系统及时响应, 各项参数均发生变化。又因为本系统中的转速、转矩和磁链调节器 ATR、ASR 和 ApsiR 均是带限幅作用的 PI 调节器, 故在系统启动时, 电流、转速和转矩均平稳上升, 实现了恒电流启动。

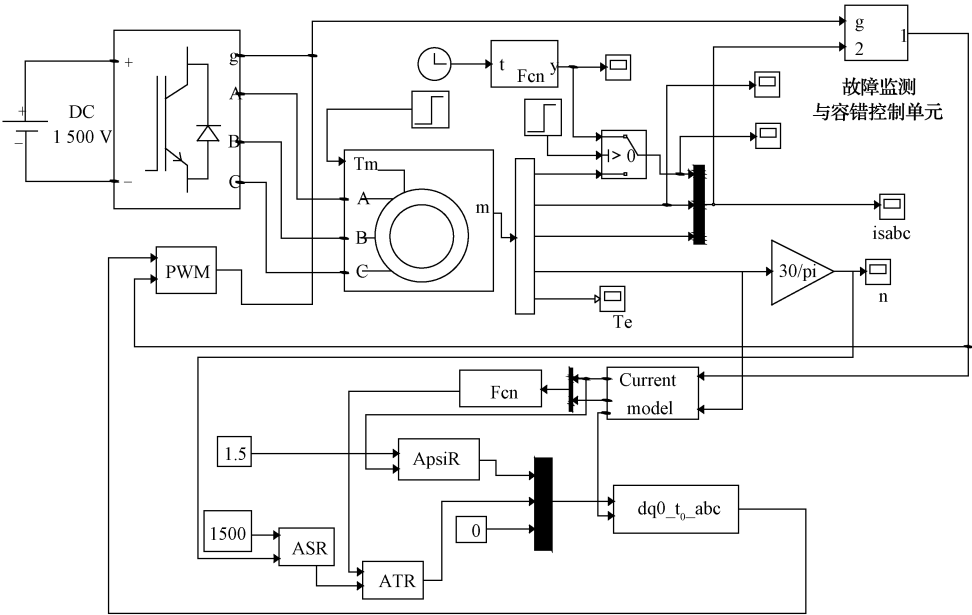


图8 系统仿真框图

表1 三相异步牵引电机参数设置			
参数名称	数值	参数名称	数值
额定功率/kW	190	额定电压/V	1 050
额定频率/Hz	60.9	极对数/Np	2
定子电阻/ Ω	0.435	定子漏感/mH	0.002
转子电阻/ Ω	0.816	转子漏感/mH	0.002
互感/mH	0.069	转动惯量/($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	0.19

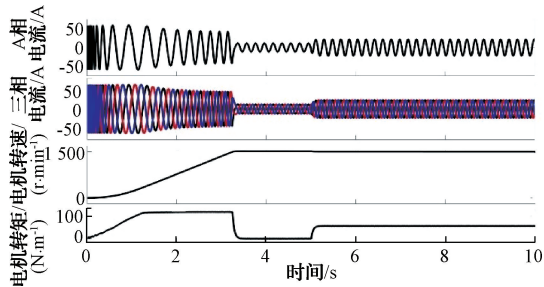


图9 正常工况下仿真结果

3.2 a相电流传感器发生故障且不加容错算法

假设在8 s时a相电流传感器发生故障,其输出为0,系统运行结果如图10所示。此时系统的三相电流、

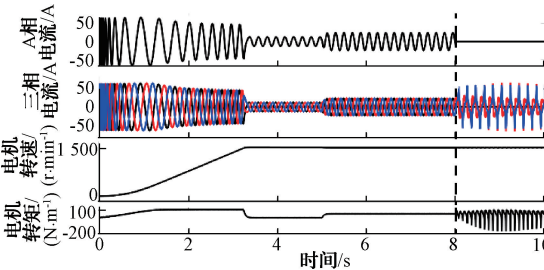


图10 a相电流传感器发生故障时仿真结果

转速、转矩等均与正常值发生较大偏离,控制迅速发散。

图11所示为电机的电流、转速和转矩在a相电流传感器发生故障发生前后的极限值,由此极限偏差值计算可得故障发生后,超调量分别达到167.5%、0.5%和457.2%,严重影响列车运行安全。

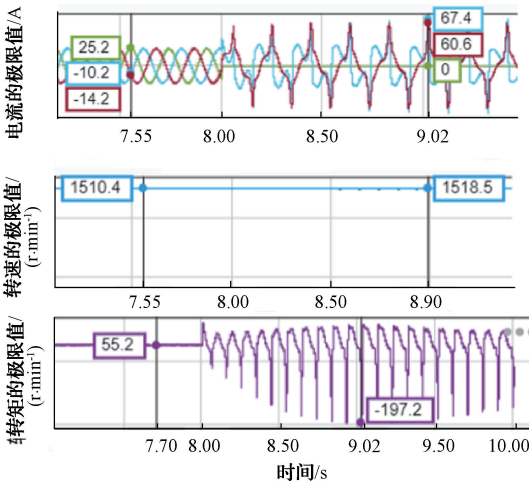


图11 a相电流传感器发生故障时的极限偏差值

3.3 a相电流传感器发生故障且加入本文算法

当电流传感器发生故障时,应及时用观测器中的电流重构值代替故障值参与系统控制。图12所示为a相电流传感器在8 s发生故障时,其采样值 i_a 和重构值 $\hat{i}_a$ 。

用重构的a相电流值 $\hat{i}_a$ 代替故障采样值 i_a 参与控制后,其容错前后系统的三相电流、电机转速和转矩对比如图13所示。

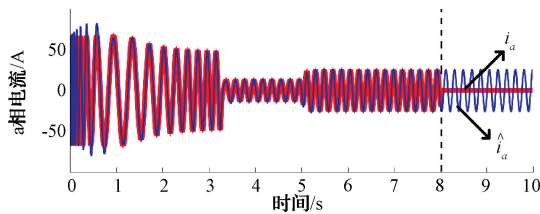
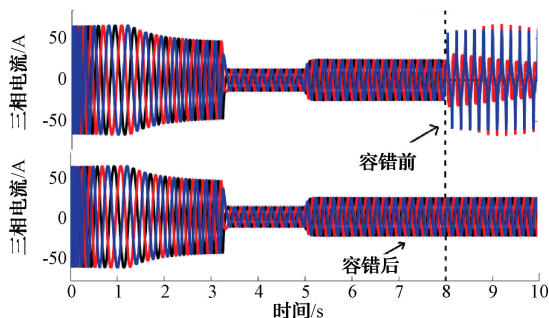
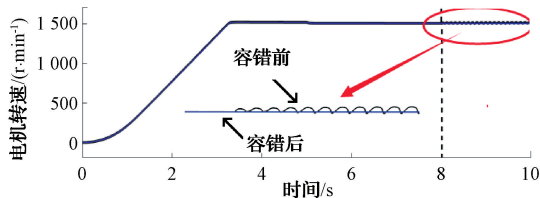


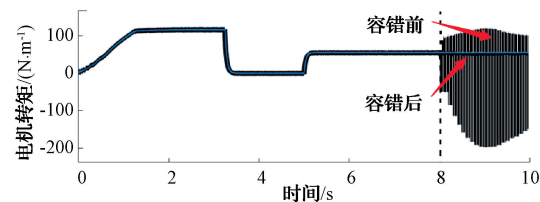
图12 a相电流故障值与重构值



(a) 容错前后三相电流对比



(b) 容错前后电机转速对比



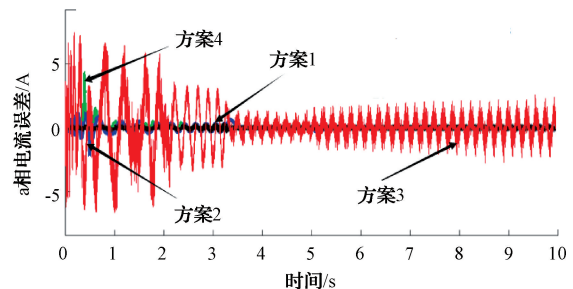
(c) 容错前后电机转矩对比

图13 a相电流传感器故障容错前后对比

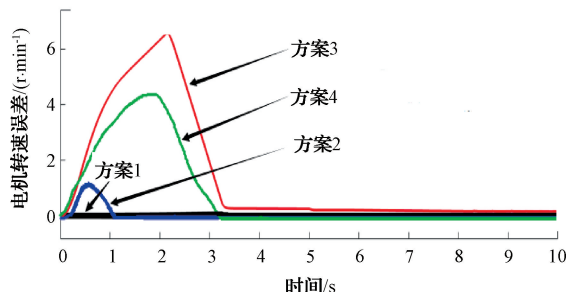
3.4 与现有容错算法对比

不同的电流容错控制方案会产生不同的重构效果,图14所示为4种不同容错方案的系统误差对比。其中,方案1采用的是本文算法,方案2采用直流母线+SVPWM方法,方案3采用理想电机模型+EKF,方案4采用的是传统龙伯格(Luenberger)观测器方案。图14(a)~(c)分别表示4种不同控制算法下的电机电流、转速和转矩的重构误差对比。

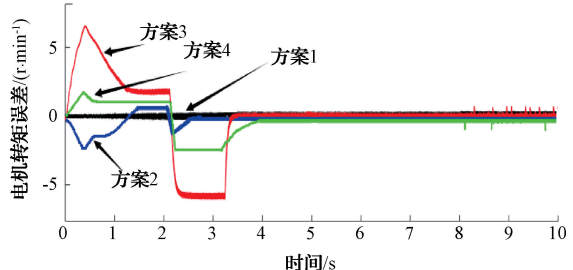
结果表明,本文所设计的新型滑模观测器方案对异步电机的容错控制效果相较于对比方案,其误差更小,观测效果更准确。经取点计算回归函数可得本文实验方案相较于对比算法,其电流、转速以及转矩误差分别减少了27.6%、4.8%和40.3%,综合误差减少了约24.2%,具有更好的控制效果。



(a) a相电流误差对比



(b) 电机转速误差对比



(c) 电机转矩误差对比

图14 4种容错控制算法的重构误差对比

4 结论

针对地铁列车牵引系统电流传感器故障时的容错控制,提出一种新型的故障监测与三相电流重构策略。利用异步电机中磁链与反电动势的关系设计了电流滑模观测器,基于修正的Bayes分类算法实现了传感器状态实时监测。当故障发生时,断开原传感器,用观测器中的重构值代替故障值参与系统控制。仿真结果表明,较之对比方案,本文方案鲁棒性好,控制精度有了进一步提高。

参考文献

- [1] ROSYIDI M, BISMANTOKO S, HARYONO A, et al. Predictive maintenance with PCA approach for multi automated railroad crossing system (ARCS) in the framework of prognostic and health management (PHM) planning[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2322(1): 920-945.
- [2] 郁明,李旺林,蓝盾. 基于优化自适应阈值的非线性机电系统传感器故障检测和主动容错控制[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(4): 26-37.

- [3] 刘杰,王邦继,周国祥,等.非零速启停的低功耗步进电机控制器研究[J].电子测量技术,2022,45(18):64-70.
- [4] LYU Y J, LIU Z W, SU T, et al. Research of sensorless vector control performance for induction motor at very low-speed and zero-speed [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 6095-6103, 6190.
- [5] 方成辉,陈昊,DEMIDOVA G,等.开关磁阻电机无电流传感器控制方法[J].电工技术学报,2023,38(2):365-374.
- [6] XIAO S X, SHI T N, LI X M, et al. Single-current-sensor control for PMSM driven by Quasi-z-source inverter) [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(7):7013-7024.
- [7] 滕青芳,崔宏伟,朱建国,等.基于无电流传感器的永磁同步电机系统模型预测控制[J].电机与控制学报,2019,23(5):119-128.
- [8] 申永鹏,王前程,王延峰,等.直流母线单电流传感器零点漂移误差自校正策略[J].电机与控制学报,2023,27(7):133-142.
- [9] 乔浩,何雅婷,罗世超.永磁同步电机驱动器电流传感器容错控制[J].组合机床与自动化加工技术,2023(7):37-40,45.
- [10] 罗鑫辉,戴邵武,戴洪德.基于改进自适应卡尔曼滤波的容错控制[J].信息与控制,2020,49(1):122-128.
- [11] 蒋岷.基于卡尔曼滤波的永磁同步电机容错控制研究[D].焦作:河南理工大学,2021.
- [12] TRAN C D, PALACKY P, KUCHAR M, et al. Current and speed sensor fault diagnosis method applied to induction motor drive[J]. IEEE Access, 2021, 9: 38660-38672.
- [13] 蒋奉兵.列车牵引系统过流故障在线诊断与处理技术研究[D].长沙:湖南大学,2022.
- [14] 李启明,李学明,黄庆,等.电机驱动系统电流传感器故障诊断与容错控制[J].科学技术与工程,2020,20(32):13265-13272.
- [15] 郁明,杨柳,杨荣立.电动代步车鲁棒故障检测与容错控制[J].电子测量与仪器学报,2022,36(3):38-46.
- [16] 杨淑英,丁大尉,李曦,等.基于反电动势滑模观测器的异步电机矢量控制[J].电机与控制学报,2016,20(10):23-30.
- [17] 李硕,孙四通.PWM方式控制能量输出问题研究[J].国外电子测量技术,2023,42(4):117-124.
- [18] 李敏华,郭昆丽,王鹏宇,等.基于MATLAB的地铁牵引控制系统仿真研究[J].国外电子测量技术,2020,39(3):35-39.

作者简介

冯秋峰,硕士研究生,主要研究方向为载运工具故障诊断与控制。

E-mail: 843376157@qq.com

李小波(通信作者),副教授,硕士生导师,主要研究方向为轨道车辆电气系统状态监测与寿命评估。

E-mail: lxbsues@126.com

张煜,工程师,主要研究方向为轨道车辆电气设备的可靠性。

E-mail: 240040134@qq.com