

# 基于结构分析法的塞拉门驱动传动系统故障诊断

张振, 姜能惠, 洪诚, 黄妍慧

安徽机电职业技术学院汽车与轨道学院, 安徽 芜湖 241002

**摘要:**为有效诊断塞拉门驱动传动系统故障,对系统关键故障进行参数化表征,建立塞拉门驱动传动系统故障模型,通过结构分析法中的 Dulmage-Mendelsohn(DM)分解和故障隔离矩阵分析可知 3 个关键故障均可检测但均不可隔离。为实现故障可隔离,考虑配置传感器的可实施性和经济性,确定 3 种传感器配置方案,分析可得配置电枢电流传感器后所有故障均可检测和可隔离。基于结构最小型超定方程集,采用解析冗余法和标准观测器设计 4 组残差,在软件 MATLAB/Simulink 中建立故障检测隔离系统仿真模型,4 组残差的仿真观测输出响应均与理论分析结果一致,结构分析法应用在塞拉门驱动传动系统故障诊断中可行、有效且正确。

**关键词:**结构分析法;塞拉门;故障诊断;DM 分解;残差

**中图分类号:**U279.3

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-0032(2024)04-0126-08

**引用格式:**张振,姜能惠,洪诚,等.基于结构分析法的塞拉门驱动传动系统故障诊断[J].山东交通学院学报,2024,32(4):126-133.

ZHANG Zhen, JIANG Nenghui, HONG Cheng, et al. Fault diagnosis of the sliding plug door drive transmission system based on structural analysis method[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2024, 32(4): 126-133.

## 0 引言

城市轨道交通的塞拉门主要由驱动传动系统、承载导向系统、锁闭系统、操作系统、电气控制系统和基础部件系统等组成<sup>[1]</sup>。塞拉门作业频繁,驱动传动系统易出现故障,影响城市轨道交通的运营安全。驱动传动系统是结构复杂的机电系统,故障模式、故障原因较复杂。现有的故障检测方法和诊断技术难以实现对塞拉门驱动传动系统故障的有效检测和隔离性分析,无法实时监测系统数据对复杂故障动态行为的响应。

结构分析法能全面、快速地分析复杂机电系统的故障原因与故障隔离问题,故障诊断系统设计过程简洁、逻辑性强,可有效提高故障诊断准确率<sup>[2]</sup>。Zhang 等<sup>[3]</sup>基于结构分析法设计电动汽车永磁同步电机驱动系统的故障诊断系统,通过解析冗余关系设计结构化残差,通过实车试验验证方法的有效性。Gomathi 等<sup>[4]</sup>基于结构分析法检测水泥工业热处理部分的传感器故障,采用结构化传感器模型和实时测量数据分析残差,验证结构分析法的有效性。陈奇等<sup>[5-7]</sup>分别以液力变矩器、汽车防抱死制动系统和汽车电动助力转向系统为研究对象,采用结构分析法对系统进行故障可检测性和可隔离性分析及评估,在软件 MATLAB 中搭建故障诊断系统模型,验证结构分析法可行性和有效性。陈昌雄<sup>[8]</sup>提出基于结构分析法的传感器优化配置方法,以四水箱稳定系统为例,通过添加传感器增强系统的故障可隔离性,满足特定的诊断要求。学者多采用故障树、故障模式影响分析等方法研究塞拉门驱动传动系统的故障,故障识别和诊断效果较差,采用结构分析法诊断城市轨道交通塞拉门驱动传动系统故障的研究较少。

**收稿日期:**2023-11-09

**基金项目:**安徽高校自然科学研究项目(KJ2021A1517);安徽省质量工程项目(2023jyxm1327,2023kcsz012)

**第一作者简介:**张振(1989—),男,安徽界首人,工学硕士,主要研究方向为故障诊断理论与应用,E-mail:mediazhangzhen@126.com。

本文将塞拉门驱动传动系统关键故障进行参数化表征,建立驱动传动系统故障模型,基于结构分析法设计简单、易观测的残差,在软件 MATLAB/Simulink 中搭建仿真模型,验证结构分析法在塞拉门驱动传动系统故障诊断中的有效性和正确性,为塞拉门驱动传动系统在线故障预警与诊断提供理论依据。

## 1 塞拉门驱动传动系统故障模型构建

### 1.1 塞拉门驱动传动系统的组成

塞拉门驱动传动系统组成如图 1 所示。驱动传动系统安装在车厢顶箱维护罩内,为左、右门扇的开关动作提供动力。门单元接收到开、关门信号后,控制直流无刷电机运转,电机经行星齿轮箱实现减速增扭,通过同步带带动丝杆,丝杆两端分别由左旋、右旋螺纹组成,丝杆转动时带动螺母副做左、右平移运动,螺母副通过柔性连接携门架,带动塞拉门的左、右门扇实现平移运动和摆动。

### 1.2 故障模型建立

根据塞拉门驱动传动系统故障发生的形式、特点和性质,将故障特征转化为参数化变量。塞拉门驱动传动系统的主要故障为无刷直流电机定子绕组绝缘故障、位置传感器参数漂移故障和同步带带齿磨损故障<sup>[9-10]</sup>,故障变量依次为  $f_{R_a}$ 、 $f_{y_\theta}$ 、 $f_{k_1}$ ,故障类型分别为完全失效、偏差、增益。

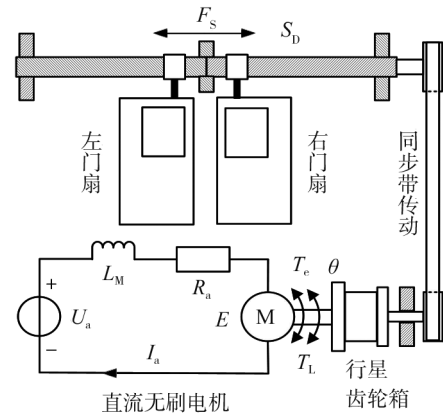
经合理的简化、等效<sup>[11-13]</sup>,构建塞拉门驱动传动系统故障模型,建立故障方程集  $\{e_1, e_2, \dots, e_8\}$ ,公式为:

$$\begin{cases} e_1: L_M \frac{dI_a(t)}{dt} = U_a - I_a(t)R_a f_{R_a} - E(t) \\ e_2: E(t) = K_E \omega(t) \\ e_3: T_c(t) = K_T I_a(t) \\ e_4: J \frac{d\omega(t)}{dt} = T_c(t) - f_{k_1} T_L(t) - B\omega(t) \\ e_5: \omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \\ e_6: T_L(t) = F_s K_L \\ e_7: S_D(t) = K_D \theta(t) \\ e_8: y_\theta = \theta(t) - f_{y_\theta} \end{cases}, \quad (1)$$

式中:  $t$  为时间,  $K_E$  为反电动势常数,  $\omega$  为电机转子角速度,  $K_T$  为转矩常数,  $J$  为等效转动惯量,  $B$  为阻尼系数,  $K_L$  为从  $F_s$  到  $T_L$  的转换系数,  $K_D$  为从  $\theta$  到  $S_D$  的转换系数,  $y_\theta$  为位置传感器测量结果。

## 2 塞拉门驱动传动系统故障诊断系统构建

在结构分析法中,采用 Dulmage-Mendelsohn(DM)分解技术和故障隔离矩阵分析故障的可检测性和可隔离性,通过分析传感器配置、获取结构最小型超定方程集和设计残差构建故障诊断系统<sup>[14-16]</sup>。



$F_s$ —左、右门扇开关所需的力;  $S_D$ —左、右门扇开关位移;  
 $L_M$ —定子三相绕组等效电感;  $R_a$ —定子三相绕组等效电阻;  
 $U_a$ —相电压;  $\theta$ —电角度;  $I_a$ —电枢电流;  $E$ —感应电动势;  
 $T_L$ —负载转矩;  $T_c$ —直流无刷电机电磁转矩。

图1 塞拉门驱动传动系统组成

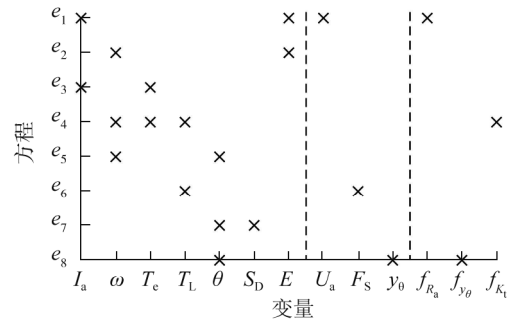
## 2.1 故障模型结构表征图

采用关联矩阵将式(1)中的已知变量、未知变量、故障变量与故障方程建立关联关系。已知变量集为 $\{U_a, F_s, y_\theta\}$ ,未知变量集为 $\{I_a, \omega, T_e, T_L, \theta, S_D, E\}$ ,故障变量集为 $\{f_{R_a}, f_{y_\theta}, f_{K_t}\}$ 。塞拉门驱动传动系统故障模型的结构表征图如图2所示。

## 2.2 塞拉门驱动传动系统故障分析

通过DM分解技术分析故障的可检测性<sup>[17]</sup>。DM分解将系统故障方程集 $\{e_1, e_2, \dots, e_8\}$ 和未知变量集 $\{I_a, \omega, T_e, T_L, \theta, S_D, E\}$ 的列、行重新排列,得到形似上三角矩阵。矩阵区域分为结构欠定部分 $M^-$ 和结构正定部分 $M^0$ 、结构超定部分 $M^+$ 。当且仅当故障变量和其所在的方程位于结构超定部分 $M^+$ 时,故障可检测<sup>[18]</sup>。塞拉门驱动传动系统故障模型的DM分解结果如图3所示。由图3可知:所有故障均位于 $M^+$ ,所有故障均可检测。

通过故障隔离矩阵分析故障的可隔离性<sup>[17,19]</sup>。塞拉门驱动传动系统故障模型的故障隔离矩阵如图4所示。由图4可知故障模型中的所有故障均不可隔离。



注:“x”表示方程与对应变量存在关联关系<sup>[14]</sup>。

图2 塞拉门驱动传动系统故障模型的结构表征图

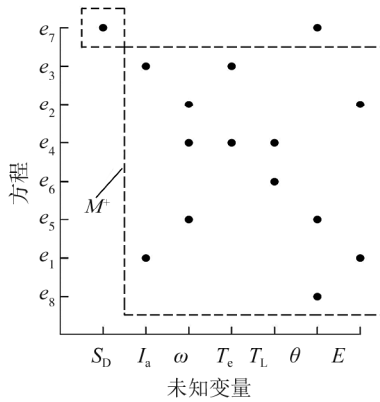


图3 系统故障模型的DM分解结果

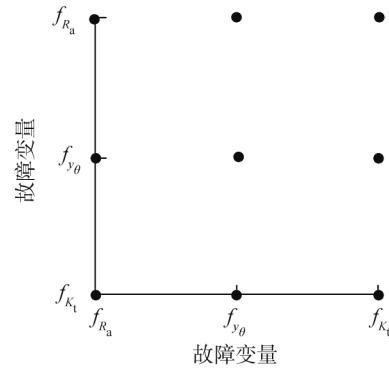


图4 系统故障模型的故障隔离矩阵

## 2.3 传感器最优化配置分析

在故障模型中增加传感器,实现故障可检测和可隔离。

分析式(1)中的未知变量,考虑配置传感器的可实施性、经济性,确定3种传感器配置方案。

1)增加电枢电流传感器,定义故障变量为 $f_{I_a}$ ,故障类型为增益,在式(1)中增加故障方程

$$e_9: y_{I_a} = I_a(t) f_{I_a},$$

式中 $y_{I_a}$ 为电枢电流传感器测量结果。

2)增加电机转子角速度传感器,定义故障变量为 $f_{y_\omega}$ ,故障类型为偏差,在式(1)中增加故障方程

$$e_{10}: y_\omega = \omega(t) - f_{y_\omega},$$

式中 $y_\omega$ 为电机转子角速度传感器测量结果。

3)增加位移传感器,定义故障变量为 $f_{S_D}$ ,故障类型为偏差,在式(1)中增加故障方程

$$e_{11}: y_{S_D} = S_D(t) - f_{S_D},$$

式中 $y_{S_D}$ 为位移传感器测量结果。

不同传感器配置方案下塞拉门驱动传动系统故障模型的DM分解结果和故障隔离矩阵分别如图5、6所示。

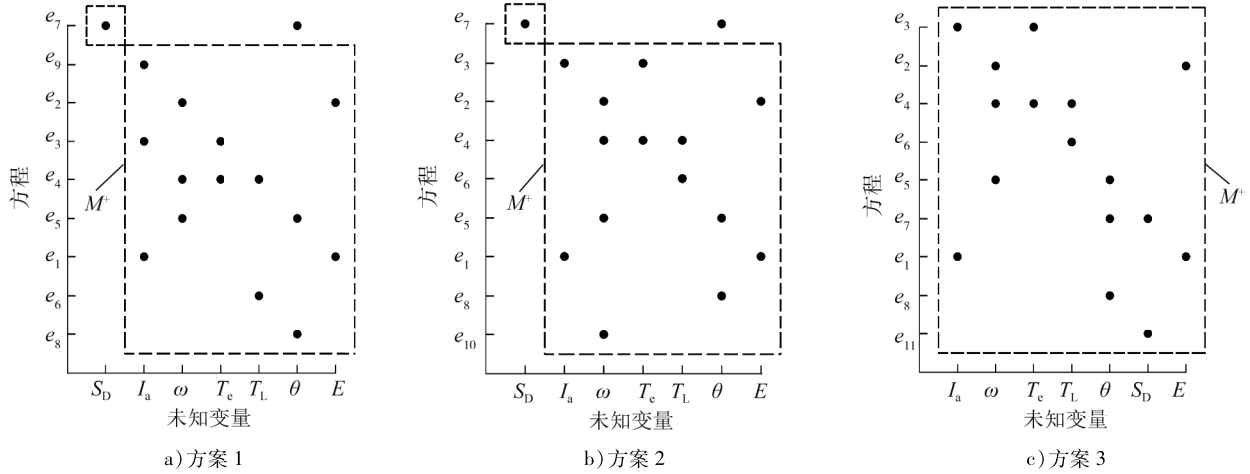


图5 不同传感器配置方案下塞拉门驱动传动系统故障模型的DM分解结果

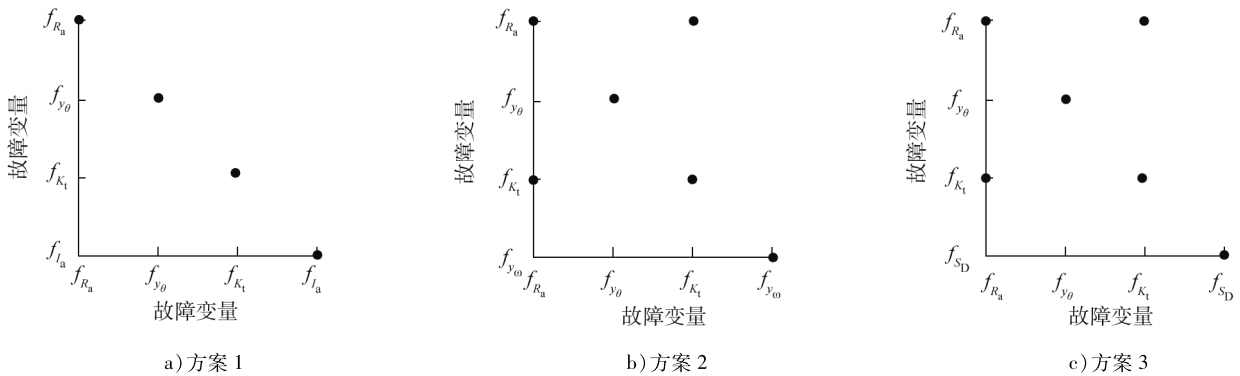


图6 不同传感器配置方案下塞拉门驱动传动系统故障模型的故障隔离矩阵

由图5、6可知:3种传感器配置方案均能检测塞拉门驱动传动系统的所有故障,方案1的所有故障可隔离,方案2、3各有2个故障不可隔离。配置电枢电流传感器可实现塞拉门驱动传动系统故障诊断的可检测性和可隔离性。

### 2.4 结构最小型超定方程集获取

从结构超定部分  $M^+$  中获取结构最小型超定方程集(minimal structurally overdetermined sets, MSO sets),可有效简化残差设计过程,以残差生成器产生的残差响应判断塞拉门驱动传动系统是否发生故障<sup>[20]</sup>。

根据文献[7]中的算法,获取配置电枢电流传感器后的塞拉门驱动传动系统的MSO sets,结果如表1所示。

表1 塞拉门驱动传动系统故障模型的MSO sets

| 编号   | MSO sets 包含方程                       | 故障检测情况    |                |           |           |
|------|-------------------------------------|-----------|----------------|-----------|-----------|
|      |                                     | $f_{R_a}$ | $f_{y_\theta}$ | $f_{k_1}$ | $f_{I_a}$ |
| MSO1 | $e_3, e_4, e_5, e_6, e_8, e_9$      | ○         | ●              | ●         | ●         |
| MSO2 | $e_2, e_1, e_5, e_8, e_9$           | ●         | ●              | ○         | ●         |
| MSO3 | $e_2, e_1, e_4, e_6, e_3, e_9$      | ●         | ○              | ●         | ●         |
| MSO4 | $e_2, e_1, e_4, e_6, e_3, e_8, e_5$ | ●         | ●              | ●         | ○         |

注:●表示故障可检测,○表示故障不可检测。

### 3 残差设计与仿真实证

#### 3.1 残差设计

采用残差分析、判断系统故障是否发生<sup>[17]</sup>。表1中有4组MSO sets,可设计4组残差用于故障检测隔离系统。

1)MSO1包含6个方程,将 $e_3、e_5、e_6、e_8、e_9$ 代入 $e_4$ 后得到1个解析冗余关系,设计残差 $R_1$ ,公式为:

$$J\ddot{y}_\theta + B\dot{y}_\theta - K_T y_{I_a} + F_S K_L = (p + \beta)^2 R_1, \quad (2)$$

式中: $p$ 为微分算子; $\beta$ 为与系统稳定性相关的参数,为保证残差的稳定性, $\beta > 0$ 。

式(2)左边的最高微分阶数不大于 $(p + \beta)$ 的指数。

取状态变量 $X_1 = (R_1 - Jy_\theta \quad \dot{R}_1 + 2\beta R_1 - J\dot{y}_\theta - By_\theta)^T$ ,对状态空间输入 $U_1 = (y_\theta \quad y_{I_a} \quad F_S)^T$ ,残差 $R_1$ 的状态空间表达式为:

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = \begin{pmatrix} -2\beta & 1 \\ -\beta^2 & 0 \end{pmatrix} X_1 + \begin{pmatrix} B - 2\beta J & 0 & 0 \\ -\beta^2 J & -K_T & K_L \end{pmatrix} U_1 \\ R_1 = (1 \quad 0) X_1 + (J \quad 0 \quad 0) U_1 \end{cases}$$

2)MSO2包含5个方程,将 $e_2、e_5、e_8、e_9$ 代入 $e_1$ 可产生1个解析冗余关系,设计残差 $R_2$ ,公式为:

$$-U_a + L_M \frac{dy_{I_a}(t)}{dt} + R_a y_{I_a}(t) + K_E \frac{dy_\theta(t)}{dt} = (p + \beta) R_2。$$

取状态变量 $X_2 = -R_2 - L_M y_{I_a} - K_E y_\theta$ ,对状态空间输入 $U_2 = (U_a \quad y_{I_a} \quad y_\theta)^T$ ,残差 $R_2$ 的状态空间表达式为:

$$\begin{cases} \dot{X}_2 = -\beta X_2 + (1 \quad -R_a + \beta L_M \quad K_E) U_2 \\ R_2 = -X_2 + (0 \quad L_M \quad K_E) U_2 \end{cases}$$

3)MSO3包含6个方程,因方程 $e_1、e_4$ 含微分项,不能采用解析冗余方法设计残差,改用标准观测器方法<sup>[7]</sup>。取状态变量 $X_3 = (I_a \quad \omega)^T$ ,状态空间输入 $U_3 = (U_a \quad F_S)^T$ ,残差 $R_3$ 的状态空间表达式为:

$$\begin{cases} \dot{X}_3 = A\dot{X}_3 + B_3 U_3 + L R_3 \\ \hat{y}_3 = C X_3 \\ R_3 = y_{I_a} - \hat{y}_3 \end{cases},$$

式中: $\hat{X}_3$ 为状态变量估计量; $A、B_3、C$ 为系数矩阵, $A = \begin{pmatrix} -R_a/L_M & -K_E/L_M \\ K_T/J & -B/J \end{pmatrix}$ , $B_3 = \begin{pmatrix} 1/L_M & 0 \\ 0 & -K_L/J \end{pmatrix}$ ,

$C = (1 \quad 0)$ ;  $\hat{y}_3$ 为 $y_{I_a}$ 的估计量; $L$ 为观测器反馈系数矩阵。

4)MSO4包含7个方程,因方程 $e_1、e_4、e_5$ 含微分项,采用标准观测器方法设计残差 $R_4$ 。取状态变量 $X_4 = (I_a \quad \omega \quad \theta)^T$ ,状态空间输入 $U_4 = (U_a \quad F_S)^T$ ,残差 $R_4$ 的状态空间表达式为:

$$\begin{cases} \dot{X}_4 = A'\dot{X}_4 + B_4 U_4 + L' R_4 \\ \hat{y}_4 = C' X_4 \\ R_4 = y_{I_a} - \hat{y}_4 \end{cases},$$

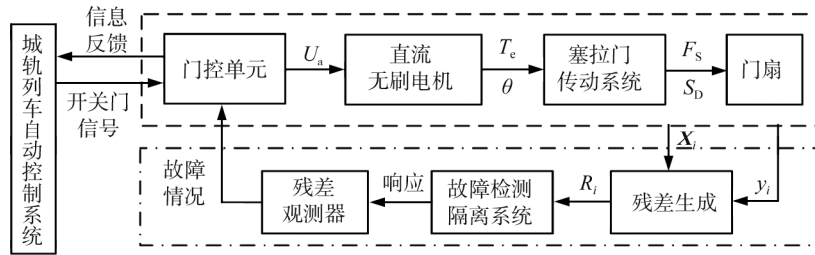
式中: $\hat{X}_4$ 为状态变量估计量; $A'、B_4、C'$ 为系数矩阵, $A' = \begin{pmatrix} -R_a/L_M & -K_E/L_M & 0 \\ K_T/J & -B/J & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$ , $B_4 =$

$\begin{pmatrix} 1/L_M & 0 \\ 0 & -K_L/J \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ , $C' = (0 \quad 0 \quad 1)$ ;  $\hat{y}_4$ 为 $y_\theta$ 的估计量; $L'$ 为观测器反馈系数矩阵。

### 3.2 故障检测隔离系统设计与仿真验证

#### 3.2.1 故障检测隔离系统设计

根据塞拉门驱动传动系统的故障模型,结合4组残差,设计故障检测隔离(fault detection and isolation, FDI)系统,其设计原理示意图如图7所示。



注: $X_i$ 为第*i*组状态变量, $i=1,2,3,4$ ;  $y_i$ 为第*i*组观测量; $R_i$ 为第*i*组残差。

图7 FDI系统设计原理示意图

塞拉门正常开、关门时间为2~4 s,为分析系统发生故障时 FDI 系统的响应,设定仿真时间为4 s。且仅考虑在同一时刻4个故障只发生1个故障的情况。

在 Simulink 中搭建 FDI 系统仿真模型,设定每组 MSO sets 对应的故障信号发生时间,如图8所示。

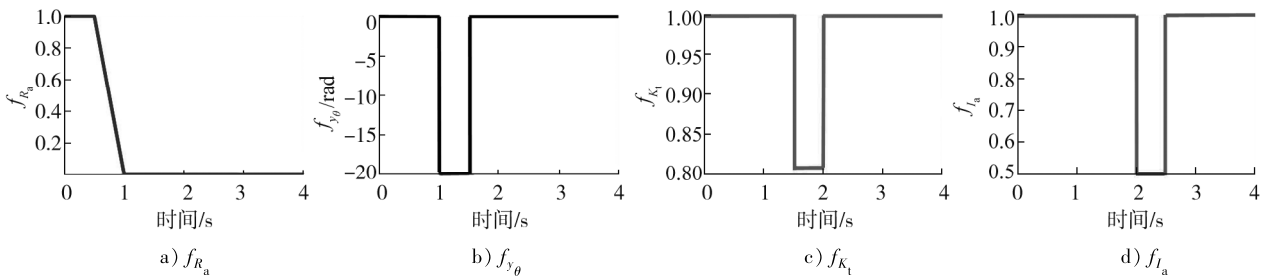


图8 故障信号发生时间

#### 3.2.2 仿真验证

设定故障后,在软件 MATLAB/Simulink 中仿真 FDI 系统,通过残差观测器获得残差  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  和  $R_4$  的输出响应,如图9~12所示。

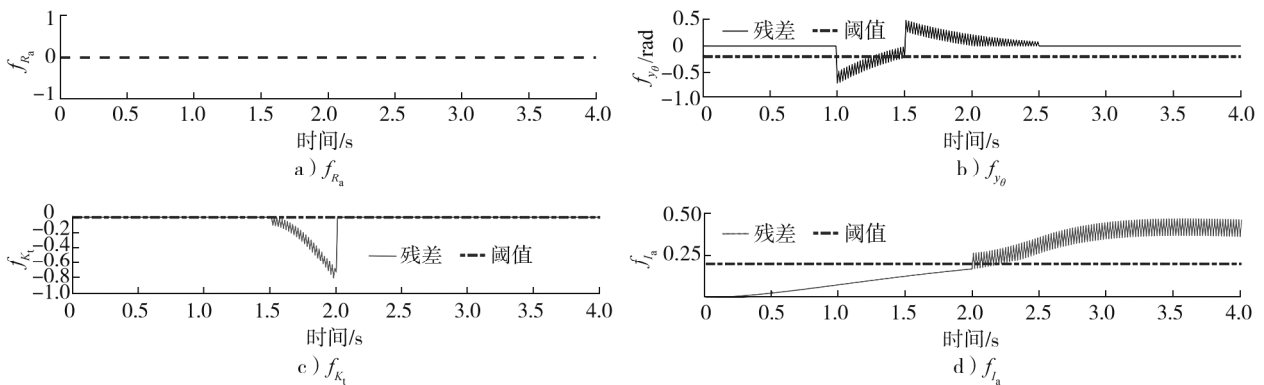
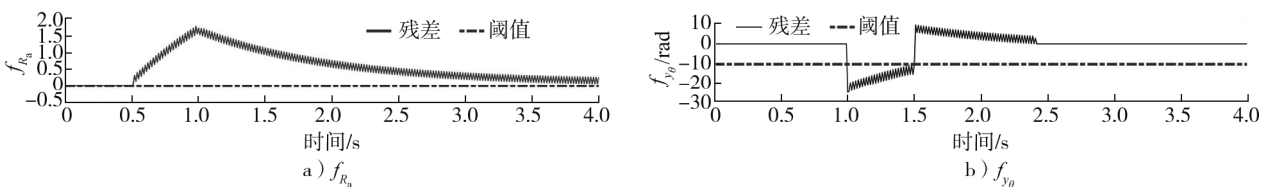
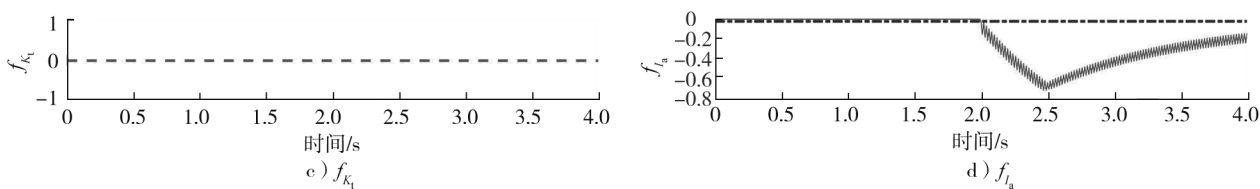
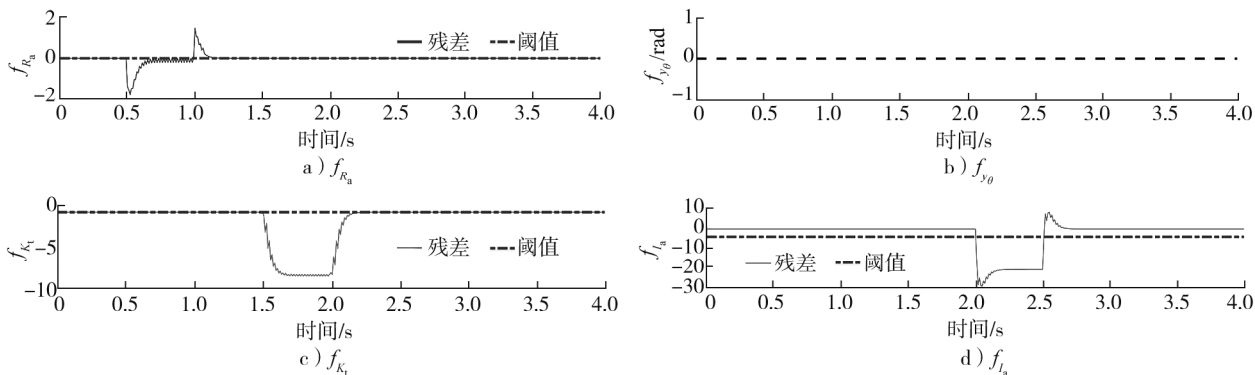
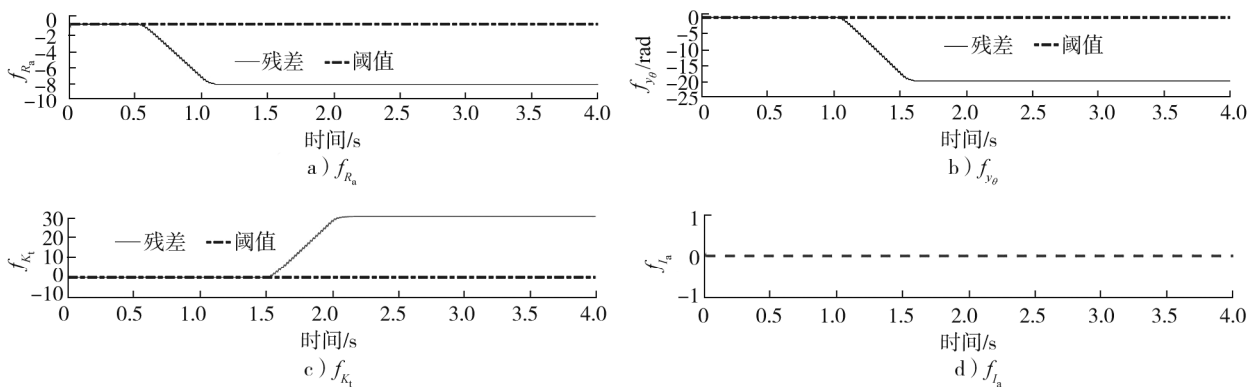


图9 残差  $R_1$  观测输出响应



图10 残差  $R_2$  观测输出响应图11 残差  $R_3$  观测输出响应图12 残差  $R_4$  观测输出响应

由图9~12可知:残差  $R_1$  在第1.0、1.5、2.0秒处能检测到  $f_{y_\theta}$ 、 $f_{K1}$  和  $f_{I_a}$  3个故障,在第0.5秒处不能检测到  $f_{R_a}$  故障;残差  $R_2$  在第0.5、1.0、2.0秒处能检测到  $f_{R_a}$ 、 $f_{y_\theta}$  和  $f_{I_a}$  3个故障,在第1.5秒处不能检测到  $f_{K1}$  故障;残差  $R_3$  在第0.5、1.5、2.0秒处能检测到  $f_{R_a}$ 、 $f_{K1}$  和  $f_{I_a}$  3个故障,在第1.0秒处不能检测到  $f_{y_\theta}$  故障;残差  $R_4$  在第0.5、1.0、1.5秒处能检测到  $f_{R_a}$ 、 $f_{y_\theta}$  和  $f_{K1}$  3个故障,在第2.0秒处不能检测到  $f_{I_a}$  故障。

4组残差的仿真观测输出响应结果与表1分析结果一致,说明结构分析法在塞拉门驱动传动系统故障诊断中的应用可行、有效且正确。

## 4 结论

1) 基于结构分析法诊断塞拉门驱动传动系统的故障,通过结构分析法中 Dulmage-Mendelsohn 分解技术和故障隔离矩阵分析塞拉门驱动传动系统故障模型中3个关键故障的可检测性和可隔离性,结果表明所有故障均可检测,但均不可隔离。

2) 针对系统故障不可隔离问题,提出3种传感器配置方案,结果显示增加电极电流传感器后,所有故障均能实现可检测和可隔离。

3) 根据获取的4组结构最小型超定方程集,采用解析冗余和标准观测器方法设计4组残差,设计故障检测隔离系统。结合设定的故障信号模拟类型和故障发生时间,在 Simulink 中建立故障检测隔离系统

仿真模型。经仿真验证与分析,4组残差的仿真观测输出响应与分析结果一致。采用结构分析法诊断塞拉门驱动传动系统故障可行、有效且正确,为后续塞拉门在线故障预警与诊断技术研究奠定了基础。

### 参考文献:

- [1] 李尚港. 轨道车辆塞拉门力学分析及运动轨迹优化[D]. 长春: 长春工业大学, 2023.
- [2] EBRAHIMI S H, CHOUX M, HUYNH V K. Diagnosis of sensor faults in PMSM and drive system based on structural analysis[C]//2021 International Conference on Mechatronics. Kashiwa, Japan: IEEE, 2021: 1-6.
- [3] ZHANG J Y, YAO H Y, RIZZONI G. Fault diagnosis for electric drive systems of electrified vehicles based on structural analysis[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(2): 1027-1039.
- [4] GOMATHI V, SRINIVASAN S, RAMKUMAR K, et al. Structural analysis based sensor measurement fault diagnosis in cement industries[J]. Control Engineering Practice, 2017, 64: 148-159.
- [5] 陈奇, 姚志刚, 陈无畏, 等. 基于模型的液力变矩器故障诊断系统的设计与校验[J]. 汽车工程, 2018, 40(10): 1246-1253.
- [6] 陈奇, 姚志刚, QADDER A, 等. 基于结构分析法的汽车 ABS 故障诊断和识别系统设计与校验[J]. 汽车工程, 2018, 40(11): 1354-1363.
- [7] 陈奇, 汪金成, QADDER A, 等. 基于模型的汽车电动助力转向系统故障诊断[J]. 汽车工程, 2019, 41(7): 839-850.
- [8] 陈昌雄. 基于结构分析的故障诊断系统设计方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- [9] 张振, 姜能惠, 王爱国. 基于 FMECA 的客室车门驱动传动系统关键故障分析[J]. 内燃机与配件, 2022(13): 41-45.
- [10] 张振, 马玲, 姜能惠, 等. 基于模糊 RPN 的塞拉门驱动传动系统危害性分析[J]. 内燃机与配件, 2022(15): 78-82.
- [11] 郭易扬. 无位置传感器 BLDC 控制策略优化及绕组不对称故障下的容错控制策略研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2023.
- [12] 郑笑咏. 基于改进 Kalman 滤波的 BLDC 无位置传感器控制算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [13] 刘芮伶. 电动汽车 BLDC 驱动系统位置传感器容错控制研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2021.
- [14] 张振. 基于模型的 6 速自动变速器(6AT)故障诊断研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [15] 谭水平. 基于功能安全标准的 EMCVT 故障诊断系统开发[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2022.
- [16] SCHMID M, GEBAUER E, ENDISCH C. Structural analysis in reconfigurable battery systems for active fault diagnosis[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021(36): 8672-8684.
- [17] 杨新桦, 谭水平. 基于结构分析法的 EMCVT 故障诊断与容错控制[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(8): 134-145.
- [18] CHEN C X, CHEN L P, CHENG X J. An efficient method for determining fault isolability properties based on an augmented system model[J]. European Journal of Control, 2021, 58: 90-100.
- [19] ZUNIGA G P, PEREZ R R, SOTOMAYOR J, et al. Fault detection and isolation system based on structural analysis of an industrial seawater reverse osmosis desalination plant[J]. Processes, 2020, 8(9): 1100.
- [20] CHEN C X, CHEN L P, CHENG X J. A new method for identifying redundant sensors based on completely consistent fault isolability properties[J]. European Journal of Control, 2023, 70(3): 1-12.

## Fault diagnosis of the sliding plug door drive transmission system based on structural analysis method

ZHANG Zhen, JIANG Nenghui, HONG Cheng, HUANG Yanhui

College of Automobile and Rail, Anhui Technical College of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhu 241002, China

**Abstract:** To effectively diagnose faults in the sliding plug door drive transmission system, key faults are parameterized and characterized. A fault model of the sliding plug door drive transmission system is established. Using the Dulmage - Mendelsohn ( DM ) decomposition and fault isolability matrix in structural analysis , it is

(下转第 142 页)