

基于模糊故障树的有轨电车电子机械制动系统可靠性分析

苗峰¹ 王聪¹ 毛景禄¹ 姚懿笑¹ 胡婷婷²

(1. 中车制动系统有限公司, 266031, 青岛; 2. 中车青岛四方车辆研究所有限公司, 266031, 青岛)

摘要 [目的] 有轨电车电子机械制动系统的架构不同于有轨电车传统制动系统, 需要对其安全性进行分析并对薄弱环节进行针对性改进。[方法] 模糊故障树法通过试验数据分析能够得到顶事件发生概率的三角模糊数, 进而得到各个底事件的模糊重要度; 根据底事件的模糊重要度分析系统的薄弱环节, 进而对系统的薄弱环节进行针对性的改进与故障预防。[结果及结论] 通过基于模糊故障树的有轨电车电子机械制动系统可靠性的分析, 可使系统薄弱环节的安全性得到提升, 并有针对性地提出改进措施。这有助于提升电子机械制动系统的安全性和可靠性。

关键词 有轨电车; 电子机械制动; 可靠性; 模糊故障树分析法

中图分类号 U270.35:U482.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.09.036

Reliability Analysis of Tram Electro-mechanical Braking System Based on Fuzzy Fault Tree

MIAO Feng¹, WANG Cong¹, MAO Jinglu¹, YAO Yixiao¹, HU Tingting²

(1. Crrc Braking System Co., Ltd., 266031, Qingdao, China; 2. CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., 266031, Qingdao, China)

Abstract [Objective] The electro-mechanical braking system architecture of tram is different from that of the traditional braking system, so it is necessary to analyze the system safety and make targeted improvement to its weak links. [Method] Using fuzzy fault tree method can obtain the triangular fuzzy number of the top event occurrence probability through analysis of the test data, and then obtain the fuzzy importance of each bottom event. According to the fuzzy importance of the bottom events, the weak links of the system are analyzed and improved to realize the fault prevention. [Result & Conclusion] By analyzing the reliability of the tram electro-mechanical braking system based on fuzzy fault tree, the safety of the system weak links can be improved, and the corresponding improvement measures be put forward, helpful for improving the safety and

reliability of the electro-mechanical braking system.

Key words tram; electro-mechanical braking; reliability; fuzzy fault tree analysis

有轨电车的电子机械制动技术是通过电指令驱动电机进行制动动作, 整个动作过程摆脱了对流体传动介质的依赖, 实现了制动过程全电化。电子机械制动技术在航空、汽车领域表现优异, 在轨道车辆领域, 该技术尚处于起步阶段, 仍需结合理论分析、试验验证不断优化设计, 以实现最终实现批量工程化运用。

故障树是一种可靠的故障分析法, 以试验数据作为数据支撑, 通过故障树的定量分析针对性地发现系统的薄弱环节。本文采用模糊故障树法分析了有轨电车电子机械制动系统的故障模式和薄弱环节, 并有针对性地提出改进措施, 有助于提升系统的安全性与可靠性。

1 有轨电车电子机械制动系统的组成

有轨电车电子机械制动系统如图1所示, 主要包括制动控制单元、电机控制器、基础制动装置和其他附件等。

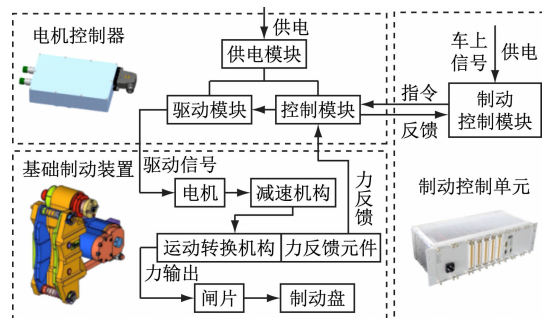


图1 电子机械制动系统基本工作原理

Fig.1 Basic working principle of electromechanical braking system

1) 制动控制单元接收车辆指令, 承担制动模式

管理、制动力计算及防滑控制、目标力下发、状态监测、故障处理和数据记录等功能。

2) 电机控制器接收制动控制单元的目标力指令,驱动电子机械制动夹钳输出夹紧力,并闭环控制,同时向制动控制单元反馈运行和故障状态。

3) 供电模块可在列车停车断电后提供电能,用于停放制动和列车发生解编等特殊情况时的夹钳供电。

4) 基础制动装置主要由电机、减速机构、制动杠杆、结构支撑件等部件组成。

5) 其他附件主要包括线缆、连接器和传感器、轴速传感器和载荷传感器等。

2 故障树分析

2.1 约定层级划分

如前所述,电子机械制动系统分为电子制动控制单元、电机控制器、供电模块和基础制动装置 4 个主要部件以及其他附件,由于电子机械制动系统的各个子系统功能较为独立,依据部件进行约定层次划分,系统的约定层级如图 2 所示。

2.2 故障树建立

电子机械制动系统的任意一个子系统出现故障都会造成总系统故障,所以在故障树分级中属于同级的或门关系。子系统继续向下划分,如供电模

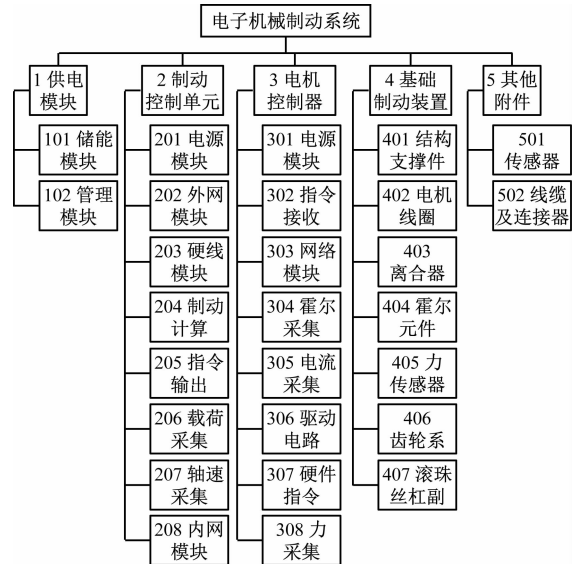


图 2 电子机械制动系统的约定层级

Fig. 2 Convention hierarchy of electromechanical braking system

块等,其中储能模块、管理模块任一故障都会造成供电模块的故障,所以在故障树分级中也属于同级的或门关系。

由此,从电子机械制动系统故障顶事件 T 开始由上而下可以划分为 8 个中间事件(代号 A 和 B)和 27 个基本事件(代号 C),具体的事件名称见表 1。

表 1 电子机械制动系统故障树事件列表

Tab. 1 List of fault tree events for electromechanical braking systems

代号	故障名称	代号	故障名称	代号	故障名称
T	电子机械制动系统故障	C_4	制动计算故障	C_{16}	力采集故障
A_1	控制系统故障	C_5	指令输出故障	C_{17}	结构支撑件故障
A_2	作动系统故障	C_6	载荷采集故障	C_{18}	电机线圈故障
A_3	其他附属系统故障	C_7	轴速采集故障	C_{19}	离合器故障
B_1	制动控制单元故障	C_8	内网模块故障	C_{20}	霍尔元件故障
B_2	电机制动控制器故障	C_9	电机控制器电源模块故障	C_{21}	力传感器故障
B_3	基础制动单元故障	C_{10}	指令接收故障	C_{22}	齿轮系故障
B_4	供电模块故障	C_{11}	网络模块故障	C_{23}	滚珠丝杠副故障
B_5	传感器故障	C_{12}	霍尔采集故障	C_{24}	储能模块故障
C_1	制动控制单元电源模块故障	C_{13}	电流采集故障	C_{25}	管理模块故障
C_2	外网模块故障	C_{14}	驱动电路故障	C_{26}	传感器故障
C_3	硬线模块故障	C_{15}	硬线指令故障	C_{27}	线缆断裂或短路

根据电子机械制动的系统层级划分,可以建立模糊故障树(见图 3—图 6)。如图 3—图 6 所示,电子机械制动系统的故障树可以表示为:

$$T = A_1 + A_2 + A_3 = B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5 = \sum_{i=1}^{27} C_i \quad (1)$$

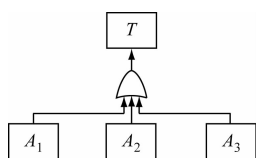


图3 电子机械制动系统故障树

Fig. 3 Fault tree of electromechanical braking system

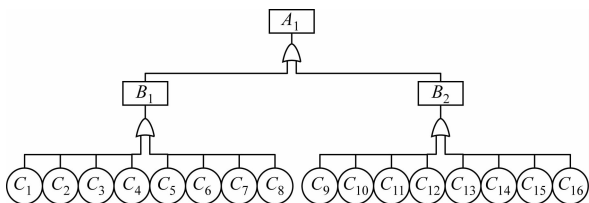


图4 控制系统故障树

Fig. 4 Fault tree of control system

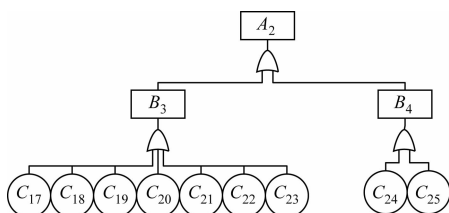


图5 作动系统故障树

Fig. 5 Fault tree of actuating system

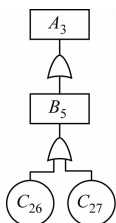


图6 其他附属系统故障

Fig. 6 Fault tree of other subsidiary systems

2.3 故障分析

2.3.1 底事件模糊概率

由于实际工程中系统的故障树底事件具有随机性和模糊性,单纯使用一组数据无法较为准确地描述底事件发生的概率,故对于顶事件的故障率计算有影响。例如,对于电机控制器故障,主要由 C_9-C_{16} 事件引起,但是由于工程应用中现场的复杂性,无法使用精准的数据对底事件发生的概率进行描述,但是可以根据不同的模糊规则,确定底事件发生的概率范围,所以应使用模糊故障树对系统进行故障的定量分析。

底事件的发生概率采用三角模糊数 $F = (m - \alpha, m, m + \beta)$ 表示。假设事件 Q 和事件 P 故障率的三角模糊数为:

$$F_Q = (m_1 - \alpha_1, m_1, m_1 + \beta_1) \quad (2)$$

$$F_P = (m_2 - \alpha_2, m_2, m_2 + \beta_2) \quad (3)$$

式中:

F_Q ——事件 Q 故障率的三角模糊数;

F_P ——事件 P 故障率的三角模糊数;

m_1 ——事件 Q 故障率的模糊数可能性的最大值(也称为中间值或峰值);

α_1 ——事件 Q 故障率的模糊数的可能性的最大值与下限的差值;

β_1 ——事件 Q 故障率的模糊数的可能性的最大值与上限的差值;

m_2 ——事件 P 故障率的模糊数可能性的最大值(也称为中间值或峰值);

α_2 ——事件 P 故障率的模糊数的可能性的最大值与下限的差值;

β_2 ——事件 P 故障率的模糊数的可能性的最大值与上限的差值。

则故障树的或门算子如下:

$$F_{P \cup Q} = F_P + F_Q - F_P \times F_Q = [m_1 - \alpha_1 + m_2 - \alpha_2 - (m_1 - \alpha_1)(m_2 - \alpha_2), m_1 + m_2 - m_1 m_2, m_1 + \beta_1 + m_2 + \beta_2 - (m_1 + \beta_1)(m_2 + \beta_2)] \quad (4)$$

式中:

$F_{P \cup Q}$ ——事件 P 或事件 Q 发生的三角模糊数。

若故障树是或门结构且底事件发生概率全部使用三角模糊数表示时,顶事件发生的概率为:

$$P_{\text{Top}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \quad (5)$$

式中:

P_{Top} ——顶事件发生的概率;

P_i ——第 i 个底事件发生的概率。

2.3.2 底事件模糊重要度

模糊重要度表示底事件概率发生变化对顶事件概率产生的影响,是综合了模糊集合理论和底事件概率重要度之后得到的重要参数。对于电子机械制动系统,根据各个底事件的模糊重要度的大小,可以快速直观地看出各个底事件对系统的不同影响,从而找到对系统影响最大的底事件,以指导系统设计,并针对系统的薄弱环节进行改进。

假设 F_{T_i} 为顶事件 F_T 不包含第 i 个底事件时的故障发生概率, V 表示 F_{T_i} 发生概率和 F_T 发生概率之间的差值。 V 的值越大表明第 i 个底事件对顶事件 T 的影响越大,有如下公式:

$$V(F_T, F_{T_i}) = (a_T - a_{T_i}) + (b_T - b_{T_i}) + (c_T - c_{T_i}) \quad (6)$$

式中:

$V(F_T, F_{T_i})$ —— F_{T_i} 发生概率和 F_T 发生概率之间的差值;

a_T, b_T, c_T ——包含第 i 个底事件的顶事件 T 的三角模糊数;

$a_{T_i}, b_{T_i}, c_{T_i}$ ——不包含第 i 个底事件的顶事件 T 的三角模糊数。

2.3.3 定量分析

电子机械制动样机在某有轨电车进行了实车装车试验。试验车安装了状态监测系统,将数据实时保存并记录各类故障,将实车故障设备、故障日期、故障原因进行统计归类和分析,作为评估定量分析故障树底事件概率的基础数据。根据不同的模糊规则,底事件造成顶事件发生的概率也不同。采用基于信心指数修正的专家调查法计算系统基本事件的模糊数(见表2)。

表2 电子机械制动系统基本事件模糊数及模糊重要度

Tab.2 Fuzzy number and fuzzy importance of basic events in electromechanical braking system

事件代号	模糊数/ 10^{-4}	模糊重要度/ 10^{-4}	事件代号	模糊数/ 10^{-4}	模糊重要度/ 10^{-4}	事件代号	模糊数/ 10^{-4}	模糊重要度/ 10^{-4}
C_1	(2.64, 4.32, 10.20)	16.510 0	C_{10}	(0.06, 0.82, 1.67)	2.447 0	C_{19}	(2.67, 3.69, 4.51)	10.485 9
C_2	(0.18, 0.32, 0.60)	1.058 0	C_{11}	(0.49, 1.43, 2.72)	4.460 3	C_{20}	(45.79, 50.64, 84.23)	175.258 2
C_3	(0.12, 0.27, 0.40)	0.760 3	C_{12}	(0.79, 1.59, 1.99)	4.210 1	C_{21}	(37.46, 46.59, 50.46)	130.403 3
C_4	(0.06, 0.45, 0.80)	1.258 0	C_{13}	(0.89, 1.29, 1.68)	3.721 3	C_{22}	(20.40, 21.67, 30.14)	69.828 5
C_5	(19.91, 27.25, 34.60)	79.058 0	C_{14}	(13.59, 22.62, 34.54)	68.312 9	C_{23}	(10.59, 28.33, 29.68)	66.253 0
C_6	(1.82, 2.38, 4.50)	8.379 0	C_{15}	(0.02, 0.58, 1.26)	1.784 2	C_{24}	(6.79, 8.57, 9.61)	24.113 8
C_7	(0.76, 1.49, 2.64)	4.705 4	C_{16}	(0.48, 1.30, 1.84)	3.483 6	C_{25}	(50.43, 67.42, 80.78)	192.894 0
C_8	(0.63, 0.82, 0.97)	2.334 5	C_{17}	(1.64, 2.49, 4.79)	8.587 2	C_{26}	(3.49, 6.24, 9.49)	18.519 0
C_9	(3.79, 5.18, 7.69)	16.063 0	C_{18}	(1.43, 1.59, 1.99)	4.834 6	C_{27}	(15.76, 28.29, 41.29)	82.444 7

中间事件的模糊数为该中间事件所有底事件的或门集合,根据式(1)、式(5)计算中间事件的模糊数。以中间事件 B_1 为例, B_1 的底事件为 $C_1—C_8$, 根据式(5), B_1 的模糊数为:

$$P_{B_1} = 1 - \prod_{i=1}^8 (1 - C_i) = \left\{ \left[1 - \prod_{i=1}^8 (1 - m_i + \alpha_i) \right], \left[1 - \prod_{i=1}^8 (1 - m_i) \right], \left[1 - \prod_{i=1}^8 (1 - m_i - \beta_i) \right] \right\} \quad (7)$$

式中:

C_i ——第 i 个底事件的三角模糊数;

m_i ——第 i 个底事件故障率的模糊数可能性的最大值(也称为中间值或峰值),具体数值见表2;

α_i ——第 i 个底事件故障率的模糊数可能性的最大值与下限的差值,具体数值见表2;

β_i ——第 i 个底事件故障率的模糊数的可能性的最大值与上限的差值,具体数值见表2。

根据式(7)中间事件的模糊数从 B_1 到 B_5 分别见表3。

根据式(5)能够得出电子机械制动系统顶事件的模糊数 P_T 的公式为:

表3 中间事件模糊数

Tab.3 Fuzzy number of intermediate events

事件代号	事件名称	模糊数/ 10^{-4}
B_1	制动控制单元故障	(26.106, 37.26, 54.6)
B_2	电机制动控制器故障	(20.09, 34.77, 53.31)
B_3	基础制动单元故障	(119.46, 154.10, 204.26)
B_4	供电模块故障	(57.18, 75.93, 90.31)
B_5	传感器故障	(19.24, 34.51, 50.74)

$$P_T = 1 - \prod_{i=1}^3 (1 - A_i) \quad (8)$$

式中:

A_i ——第 i 个二层事件的三角模糊数。

根据计算,电子机械制动系统顶事件的模糊数为 $(240.126 \times 10^{-4}, 332.615 \times 10^{-4}, 445.950 \times 10^{-4})$,结果表明基础制动单元的模糊故障率最高,该结果与装车试验的故障记录结果吻合。根据式(1)~式(8),计算求得各个底事件的模糊重要度。例如假设顶事件 T 不包含底事件 C_1 时的故障发生概率为:

$$V(F_T, F_{T_{C_1}}) = (a_T - a_{T_{C_1}}) + (b_T - b_{T_{C_1}}) + (c_T - c_{T_{C_1}}) \quad (9)$$

式中:

a_T, b_T, c_T ——包含底事件 C_1 、顶事件 T 的三角模糊数;

$a_{T_{C1}}, b_{T_{C1}}, c_{T_{C1}}$ ——不包含底事件 C_1 、顶事件 T 的三角模糊数。

其中, a_T, b_T, c_T 数值分别为 240.126×10^{-4} 、 332.615×10^{-4} 、 445.950×10^{-4} , $a_{T_{C1}}, b_{T_{C1}}, c_{T_{C1}}$ 数值分别为 237.548×10^{-4} 、 328.436×10^{-4} 、 436.195×10^{-4} 。

3 危害与失效分析

3.1 薄弱环节失效分析

由上述模糊故障树分析可得,由制动控制单元的指令输出模块、电机控制器的驱动电路模块、供电系统中的管理模块、基础制动装置中的霍尔元件和力传感器的模糊概率故障度最高,以上模块视为系统的薄弱环节。

制动控制单元负责输出制动力施加与缓解信号,作为制动力控制闭环系统的输入信号。制动控制单元的指令输出模块故障会造成系统无法得到输入信号,当车辆向系统发送制动信号之后,制动控制单元无法向电机控制单元发出指令,基础制动装置无法完成制动动作与缓解动作,因而造成电子机械制动系统级功能失效。

供电系统是指在每台电机控制器里设置由超级电容组成的供电模块,可在列车停车断电后提供电能,用于停放制动和列车发生解编等特殊情况时的供电。当供电系统中的管理模块发生故障,在列车断电时无法对系统进行供电监测,电子机械制动系统的供电系统无法进行电池管理,会造成备用供电失效,在车辆失电的工况下,造成系统级功能失效。

电机控制器使用驱动模块向电机发送指令,实现闭环输出制动力的功能。电机控制器的驱动电路模块发生故障会造成电机无法进行闭环控制,造成制动力无法输出或缓解,从而造成系统级失效。

电子机械制动系统需要实时得到制动力反馈信号,从而对制动力采取闭环实时控制。基础制动装置中的霍尔元件模块和力传感器模块分别进行电机位置状态反馈和输出力数值反馈。霍尔元件模块和力传感器模块这类反馈元件失效会使得闭环控制断开、系统制动力输出失稳,无法有效控制制动输出力,从而造成系统级失效。

3.2 故障导向策略

电子机械制动系统发生故障之后,会根据预先设定的导向策略对已发生的故障进行处理,根据电子机械制动系统原理和故障影响,制定各故障源和处理措施见表4。

表4 电子机械制动系统故障导向对比分析表

Tab.4 Fault oriented comparative analysis in eletromechanical braking system

故障名称	故障源	导向措施
反馈元件失效	力传感器、霍尔传感器	故障基础制动装置导向缓解
供电模块失效	供电管理模块	使用其他模块的备用供电
制动控制单元故障	制动控制单元无法输出制动力指令	故障转向架所有基础制动装置导向缓解;列车继续行驶
制动力输出转换部分故障	电机控制器电路故障	故障基础制动装置维持原状态,必要时辅助缓解

3.3 薄弱环节的设计改进

通过对试验数据的整合和模糊故障树数据的对比分析,找出了电子机械制动系统的薄弱环节,并针对性地改进系统设计,提升了电子机械制动系统的安全性和可靠性。

针对反馈元件失效,位置反馈和力反馈均采用双路冗余,双路传感器、双路采集电路和双路处理电路彼此完全独立,最大程度上提高了反馈信号的可信度。同时在维修维护层面上应加强对力传感器和霍尔传感器的功能检测与维修。

针对供电模块失效,可增大供电模块元器件的

设计余量,在设计层面上允许其他转向架上的供电模块向故障供电模块所属的转向架级电子机械制动系统供电,以保证车辆失电状态下转向架级别的电子机械制动系统供电功能正常。

针对制动控制单元指令输出与电机控制单元驱动电路模块故障,设计电路时应增加冗余,同时在上电自检的环节中增加指令输出模块和驱动电路模块的自检功能,以做到出现故障及时发现与维修。

在整车级故障安全设计中,采用列车级制动力

(下转第214页)

架与底架、端墙与顶棚、底架与侧墙和端墙的连接处。

2) 在本次低速脱轨事故中,除了头车与河道接触碰撞吸收较大的动能外,第2节车在与头车和第3节车的碰撞过程中也吸收了较大的动能,因此对于列车的耐撞性设计不仅只考虑单节车,应该从整个列车系统加以考虑。

参考文献

- [1] 卫亮, 康巍, 万平. 碰撞事故车辆车体结构破坏分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(9): 136.
WEI Liang, KANG Wei, WAN Ping. Analysis of vehicle body structure destruction in collision accident[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(9): 136.
- [2] 雷成, 王丽红, 吴敏. 基于显式有限元软件的地铁列车耐撞性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(6): 22.
LEI Cheng, WANG Lihong, WU Min. On the crashworthiness of metro train based on explicit finite element[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(6): 22.
- [3] 杨峰. 亦庄线一调试列车脱轨冲上公路[N]. 新京报. 2015-03-26(16).
YANG Feng. Yizhuang Line a derailment train rushed onto the road [N]. Beijing News. 2015-03-26(16).
- [4] 卫亮. 基于损伤断裂模型的地铁车辆碰撞事故仿真研究[D].

北京: 北京交通大学, 2021.

WEI Liang. Simulation study of subway vehicle collision based on damage and fracture model[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.

- [5] 张康隆, 卢翀, 卫亮, 等. 基于有限元的城市轨道交通列车钩缓装置压溃吸能仿真分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(3): 187.
ZHANG Kanglong, LU Chong, WEI Liang, et al. Simulation analysis of pressing-crack energy absorption of urban rail transit train coupler buffer device based on finite element[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(3): 187.
- [6] ZHU X, LU X Z, CHENG Q L, et al. Simulation of the running attitude of a train after derailment[J]. International Journal of Crashworthiness, 2020, 25(2): 213.
- [7] ALARCÓN G I, BURGELMAN N, MEZA J M, et al. The influence of rail lubrication on energy dissipation in the wheel/rail contact: a comparison of simulation results with field measurements[J]. Wear, 2015, 330: 533.

· 收稿日期:2022-05-30 修回日期:2022-09-06 出版日期:2024-09-10
Received:2022-05-30 Revised:2022-09-06 Published:2024-09-10
· 通信作者:卫亮,高级工程师, weiliang174@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 207 页)

重分配策略,发现转向架级电子机械制动系统失效时,其余转向架进行制动力重分配,在黏着限制前提下实现整车级无制动力损失。

4 结语

本文介绍了有轨电车电子机械制动的系统构成,通过模糊故障树分析了该系统的顶事件发生概率与底事件的模糊重要度,并筛选出了系统的薄弱环节;针对系统薄弱环节,增加冗余并预先确定故障导向策略,这可提升有轨电车电子机械制动系统的安全性和可靠性。

参考文献

- [1] 王永志, 孙超凡, 高明亮. 基于模糊故障树的动车组空调系统可靠性分析[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(2): 5.

WANG Yongzhi, SUN Chaofan, GAO Mingliang. Reliability analysis of EMU air conditioning system based on fuzzy fault tree[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2019, 38(2): 5.

- [2] 李兴运, 齐金平. 基于 T-S 模糊故障树的受电弓系统可靠性分析[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(1): 33.
LI Xingyun, QI Jinping. Reliability analysis of the pantograph system based on the T-S fuzzy FTA[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(1): 33.

· 收稿日期:2022-05-27 修回日期:2022-06-21 出版日期:2024-09-10
Received:2022-05-27 Revised:2022-06-21 Published:2024-09-10
· 第一作者:苗峰,高级工程师, miaofeng646@126.com
通信作者:王聪,工程师, 15966852285@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license