

中低速磁浮车辆悬浮控制器可靠性优化设计研究

陈启发^{1,2} 姜宏伟^{1,2} 罗华军^{1,2}

(1. 中车株洲电力机车有限公司, 412001, 株洲; 2. 磁浮交通车辆系统集成湖南省重点实验室, 412001, 株洲)

摘要 [目的] 悬浮控制器是中低速磁浮车辆的关键部件,其可靠性直接影响中低速磁浮车辆悬浮系统的稳定性及可靠性,需对悬浮控制器的可靠性进行优化。[方法] 以单个悬浮电磁铁(内含2个悬浮控制器)为研究对象,分析了悬浮控制器的可靠性,建立了悬浮控制器的可靠性模型,开展了悬浮控制器故障树分析,找出影响悬浮控制器的关键因素。提出了悬浮控制器的优化方案,将单个悬浮电磁铁内含的2个悬浮控制器优化为1个悬浮控制器,并对部分关键部件进行了冗余设计。基于优化后悬浮控制器的电路原理,建立了优化后悬浮控制器的可靠性模型及故障树模型,并对悬浮控制器优化前后的可靠性进行对比分析。[结果及结论] 与优化前单个悬浮电磁铁中2个悬浮控制器的总失效率($2.282 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$)相比,优化后单个悬浮电磁铁悬浮控制器的失效率为 $1.064 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$,失效率降幅为53.37%。优化后悬浮控制器的可靠度明显高于优化前悬浮控制器的可靠度。

关键词 城市轨道交通; 中低速磁浮车辆; 悬浮控制器; 可靠性模型; 故障树分析; 设备失效率

中图分类号 U266.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.09.055

Research on Design Optimization of Levitation Controller Reliability for Medium-low Speed Maglev Vehicles

CHEN Qifa^{1,2}, JIANG Hongwei^{1,2}, LUO Huajun^{1,2}

(1. CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd., 412001, Zhuzhou, China; 2. Key Laboratory of Maglev Vehicle System Integration of Hunan Province, 412001, Zhuzhou, China)

Abstract [Objective] Levitation controller is a key component of the medium-low speed maglev vehicle, and its reliability directly affects the stability and reliability of the vehicle's levitation system. Therefore, it is necessary to improve the reliability of the levitation controller. [Method] With a single levitation electromagnet containing two levitation controllers as the research object, through analyzing the reliability of the levitation controller, its reliability model is established, and a fault tree analysis is conducted to identify the key factors influencing the levitation controller. By transforming two levitation controllers in the single levitation electromagnet into one levitation

controller, an optimization scheme for the levitation controller is proposed, together with the redundant design for some key components. Based on the circuit principle of the optimized levitation controller, a reliability model and a fault tree model for the optimized levitation controller are established, and comparison analysis is conducted on the reliability of the levitation controller before and after the optimization. [Result & Conclusion] Compared with the levitation controller before optimization when a single levitation electromagnet contains two levitation controllers, the total failure rate of which is $2.282 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$, the rate of an optimized single levitation electromagnet levitation controller is $1.064 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$, a decrease of 53.37%. The reliability of the optimized levitation controller is significantly higher than that of the original one.

Key words urban rail transit; medium-low speed maglev vehicle; levitation controller; reliability model; fault tree analysis; equipment failure rate

随着长沙磁浮快线和凤凰磁浮观光快线的开通运营,中低速磁浮线路作为一种新型轨道交通制式备受关注。与传统轮轨列车相比,中低速磁浮列车具有噪声低、成本低、爬坡能力强、转弯半径小、建设周期短等优点,且线路选线灵活、安全环保,因此,该制式具有广阔的应用前景。

中低速磁浮列车运行时,列车与轨道之间无直接接触,悬浮系统是实现列车与轨道无直接接触的关键。悬浮控制器是悬浮系统的核心部件,调节悬浮电磁铁的电流,使悬浮电磁铁产生相应的吸力,以确保列车与轨道的悬浮间隙稳定在8~10 mm范围内。因此,研究悬浮控制器的可靠性,对提升磁浮列车的运行可靠性至关重要。

1 悬浮控制器的功能及结构原理

1.1 悬浮控制器功能

中低速磁浮列车每节车一般由20个悬浮点组成。每个悬浮点由悬浮控制器、悬浮传感器和半个悬浮电磁铁(2个悬浮点共用1个悬浮电磁铁)组

成。由单个悬浮电磁铁组成的悬浮系统结构如图 1 所示。

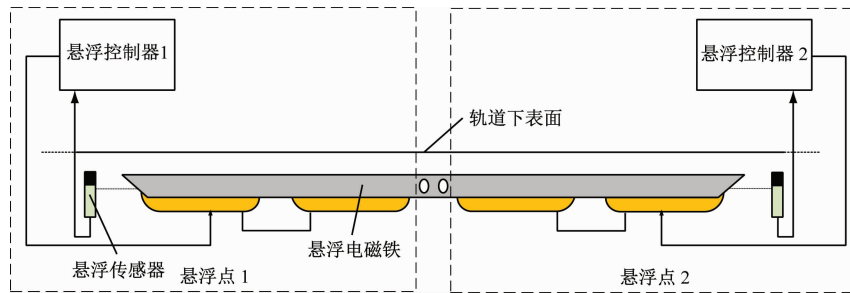


图 1 由单个悬浮电磁铁组成的悬浮系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of the levitation system composed of a single levitation electromagnet

悬浮控制器用于控制车辆的稳定悬浮,其主要功能为:

1) 接收并处理悬浮传感器的间隙信号和垂向加速度信号;

2) 根据载客量、间隙和加速度等信号调节输出电流,控制悬浮电磁铁与 F 形轨道间的电磁吸力,从而使悬浮电磁铁与 F 形轨道间的悬浮间隙保持在额定范围内。

1.2 悬浮控制器结构原理

悬浮控制器内部可以简单分为 3 个部分,分别为控制电源、悬浮控制电路及斩波器。

1) 控制电源的功能是将车载 DC 110 V 电压经 DC/DC 斩波转换为 24 V、 ± 15 V、15 V、5 V 电压等级,给悬浮控制电路、接触器等设备供电。

2) 悬浮控制电路是悬浮控制器的核心处理单元,其功能是接收并处理悬浮传感器传输过来的间隙信号及加速度信号,以及电压传感器、电流传感器采集得到的电压信号及电流信号,控制主电路接触器的开断,使电容充放电,并向斩波器输出 PWM (脉冲宽度调制) 信号。

3) 斩波器主要包括主电路接触器及 IGBT (绝缘栅双极型晶体管) 功率单元。主电路接触器根据悬浮控制系统指令控制接触器的开断,对支撑电容充放电;IGBT 功率单元根据 IGBT 驱动板输出的 PWM 信号控制 IGBT 的开断,从而调节悬浮电磁铁电流,以达到稳定悬浮间隙的目的。

悬浮控制器内部电路原理如图 2 所示。

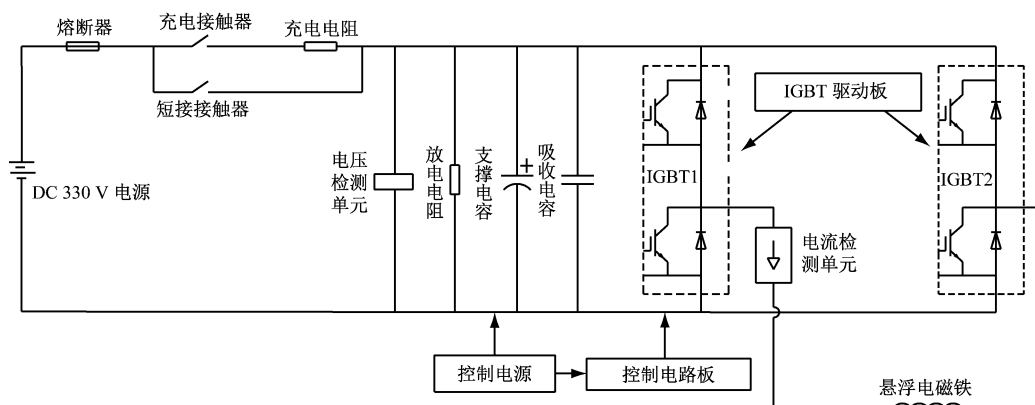


图 2 悬浮控制器内部电路原理

Fig. 2 Internal circuit principle of the levitation controller

2 悬浮控制器可靠性分析

本文以中低速磁浮车辆单个悬浮控制器为研究对象,基于悬浮控制器的结构原理及部件构成,建立了悬浮控制器的可靠性模型和故障树模型。

2.1 悬浮控制器可靠性模型

可靠性模型是对系统及其组成单元间可靠性/故障逻辑关系的描述,用以发现系统设计的薄弱环节,为设计决策提供依据。单个悬浮控制器的可靠性模型如图 3 所示。

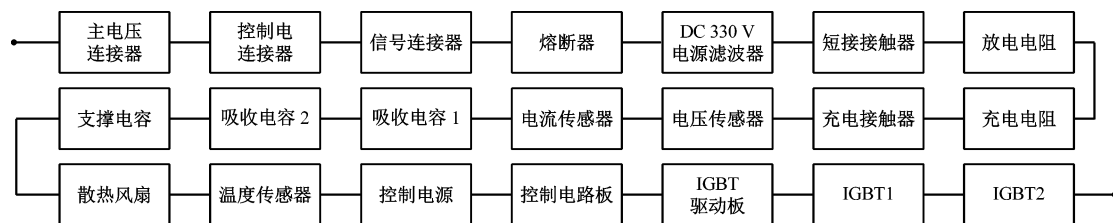


图3 单个悬浮控制器可靠性模型

Fig.3 Reliability model of a single levitation controller

悬浮控制器是串联模型,其内部任意1个部件故障,都可能引发悬浮控制器失效。悬浮控制器可靠性模型的表达式为:

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (1)$$

式中:

$R_s(t)$ ——悬浮控制器 t 时刻的整体可靠度;

$R_i(t)$ ——悬浮控制器 t 时刻第 i 个部件的可靠度;

n ——悬浮控制器内部部件总数。

悬浮控制器内部部件均为电子产品和机电产品,其可靠度一般都服从指数分布。由于串联模型中各部件均独立,且可靠度服从指数分布,因此悬浮控制器的整体可靠度也服从指数分布,即:

$$R_i(t) = e^{-\lambda_i t} \quad (2)$$

$$R_s(t) = e^{-\lambda_s t} \quad (3)$$

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (4)$$

式中:

λ_s ——悬浮控制器的整体失效率;

λ_i ——悬浮控制器第 i 个部件的失效率。

2.2 悬浮控制器故障树分析

2.2.1 确定顶事件和底事件

建立悬浮控制器故障树,首先需确定悬浮控制器的顶事件和底事件。顶事件位于故障树的顶端,是悬浮控制器不希望发生的或灾难性的事件。底事件是引起其他事件的原因事件,位于故障树的底端。

悬浮控制器发生故障可能会引起该悬浮点失效,此时列车依靠垂向滑橇来维持运行,并按规定的限速运行到车站,然后退出运营。将悬浮控制器故障引起悬浮点失效确定为顶事件 T 。由于悬浮控制器可靠性模型是串联模型,即任意子部件故障均会引发悬浮控制器失效,故将各子部件故障定为底事件。

2.2.2 建立故障树

查阅 GJB/Z 299C—2006《电子设备可靠性预计手册》,结合长沙磁浮快线运营的故障数据,得到悬浮控制器故障树底事件及其失效率,如表1所示。

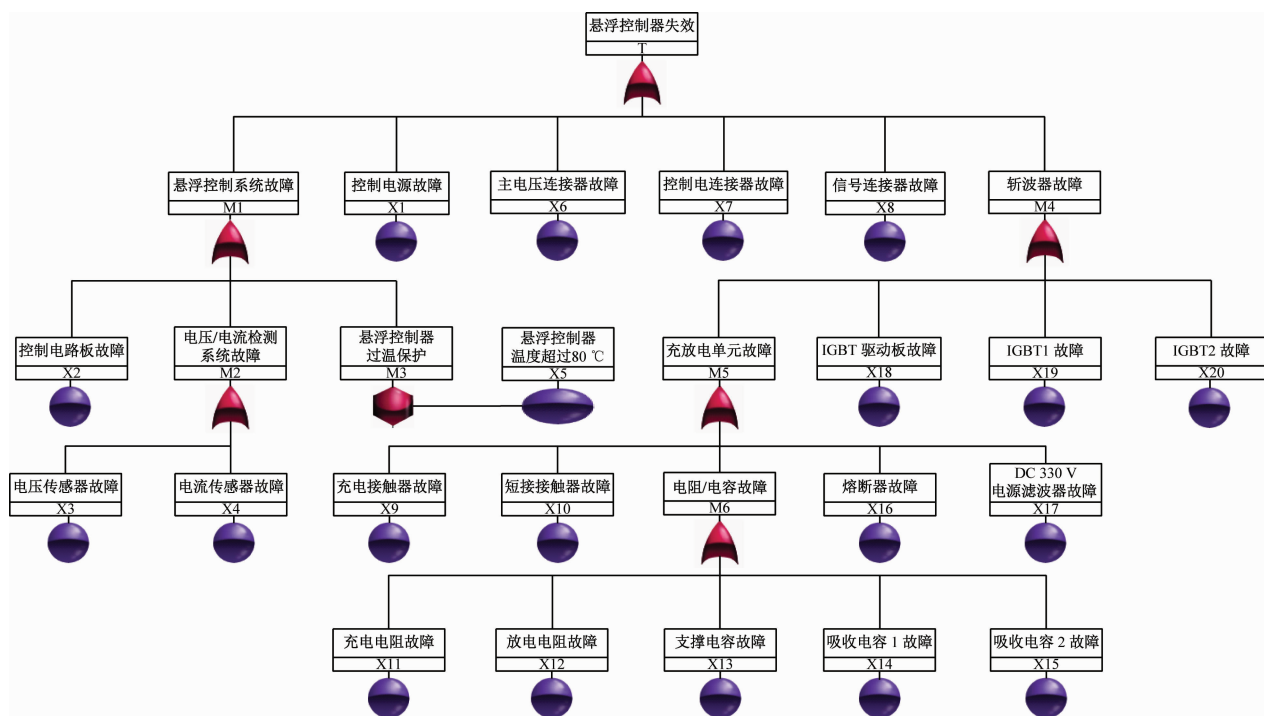
表1 悬浮控制器故障树底事件及其失效率

Tab.1 Fault tree bottom events and failure rate of the levitation controller

| 底事件序号 | 底事件 | 部件失效率/(10^{-6} h^{-1}) | 底事件序号 | 底事件 | 部件失效率/(10^{-6} h^{-1}) |
|-------|--------------|------------------------------------|-------|------------------|------------------------------------|
| X1 | 控制电源故障 | 0.137 0 | X11 | 充电电阻故障 | 0.066 0 |
| X2 | 控制电路板故障 | 0.184 0 | X12 | 放电电阻故障 | 0.045 0 |
| X3 | 电压传感器故障 | 0.020 0 | X13 | 支撑电容故障 | 0.063 0 |
| X4 | 电流传感器故障 | 0.020 0 | X14 | 吸收电容1故障 | 0.001 6 |
| X5 | 悬浮控制器温度超过80℃ | 0.031 5 | X15 | 吸收电容2故障 | 0.001 6 |
| X6 | 主电压连接器故障 | 0.008 8 | X16 | 熔断器故障 | 0.274 0 |
| X7 | 控制电连接器故障 | 0.001 1 | X17 | DC 330 V 电源滤波器故障 | 0.077 0 |
| X8 | 信号连接器故障 | 0.001 1 | X18 | IGBT 驱动板故障 | 0.046 0 |
| X9 | 充电接触器故障 | 0.032 0 | X19 | IGBT1 故障 | 0.050 0 |
| X10 | 短接接触器故障 | 0.032 0 | X20 | IGBT2 故障 | 0.050 0 |

注:“悬浮控制器温度超过80℃”包括散热风扇故障、温度传感器故障2种类型,这2种类型均可能导致悬浮控制器温度超过80℃,进而触发悬浮控制器过温保护。

悬浮控制器失效的故障树模型如图 4 所示。



注：T—顶事件；M—中间事件；X—底事件。

图 4 悬浮控制器失效的故障树模型

Fig. 4 Fault tree model of the levitation controller failure

2.2.3 悬浮控制器失效率

悬浮控制器失效率即故障树顶事件的发生概率，设 w 为底事件的总数，可得到悬浮控制器的失效概率为：

$$\lambda_s = \lambda_{x1} + \lambda_{x1} + \cdots + \lambda_{xw} \quad (5)$$

由于图 4 中 $w = 20$ ，由式(5)可计算得到 $\lambda_s = 1.141 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ 。

3 悬浮控制器可靠性的优化研究

悬浮控制器是串联模型，其可靠度等于内部各部件可靠度的乘积。部件越多，其可靠性越低。从设计方面考虑，提升悬浮控制器的可靠性，可从 3 个方面着手：①尽可能减少串联部件数量，简化设计；②提高部件的可靠度或采用可靠度更高的部件，降低其故障率；③采用冗余设计，对故障率高的部件进行冗余。

由表 1 可知，控制电源、控制电路板和熔断器等部件的故障率较高，是影响悬浮控制器可靠性的关键因素。提升悬浮控制器的可靠性，可对故障率较高的部件进行优化或进行冗余设计：①采用性能更优、可靠性更高的部件；②对熔断器、控制电路板等

故障率较高的部件进行冗余设计。

上述方法虽然能提升悬浮控制器的可靠性，但缺点也很明显：会导致成本大幅增加或悬浮控制器体积偏大、结构趋于复杂，这违背了中低速磁浮车辆轻量化、小型化的设计理念。

中低速磁浮车辆悬浮系统的控制策略为：当单个悬浮电磁铁上任意 1 个悬浮点故障时，另 1 个悬浮点悬浮控制器将自我保护，停止工作。可见单个悬浮电磁铁上 2 台悬浮控制器的可靠性是紧密关联的，故单个悬浮电磁铁模型为串联模型，其总失效率为 2 台悬浮控制器失效率之和。由于 $\lambda_s = 1.141 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ ，则单个悬浮电磁铁的总失效率为 $2.282 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ 。

将单个悬浮电磁铁上的 2 台悬浮控制器进行结构简化及功能整合，图 5 为优化后的悬浮控制器电路原理。如图 5 所示，将原有的 2 台悬浮控制器优化为 1 台悬浮控制器，该悬浮控制器可控制此悬浮电磁铁上的 2 个悬浮点，以大幅减少部件数量。再将部分关键部件进行冗余设计，以大幅提高悬浮控制器可靠性。

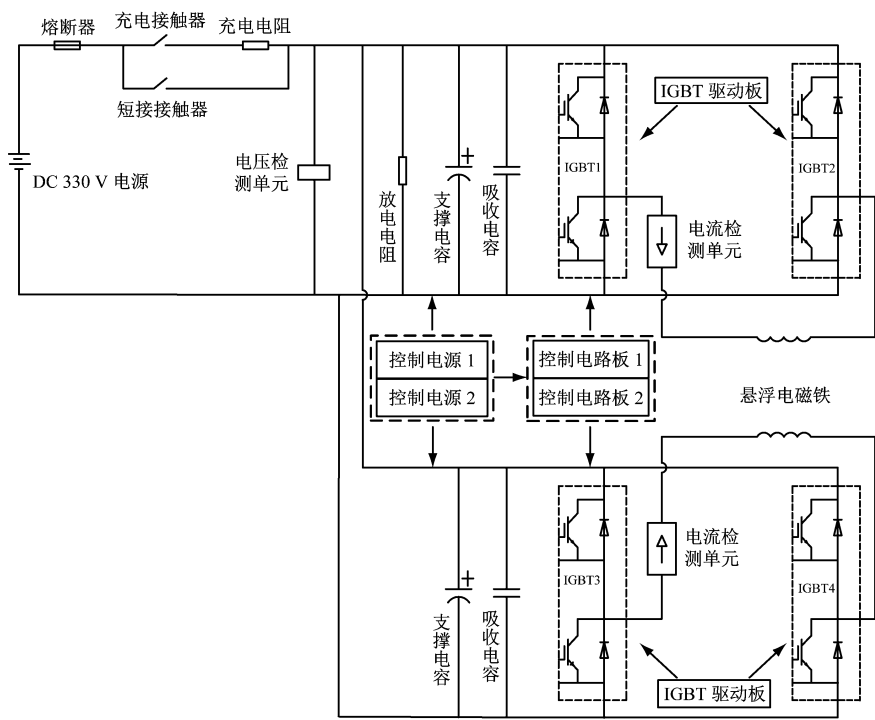


图 5 优化后的悬浮控制器电路原理

Fig. 5 Circuit principle of the optimized levitation controller

3.1 优化后的悬浮控制器可靠性模型

图 6 为优化后的悬浮控制器可靠性模型。优化后的悬浮控制器可靠性模型不再是串联模型,而是

串联和并联模型的组合。与优化前的可靠性模型相比,优化后可靠性模型的部件数量大幅减少,可靠性提升明显。

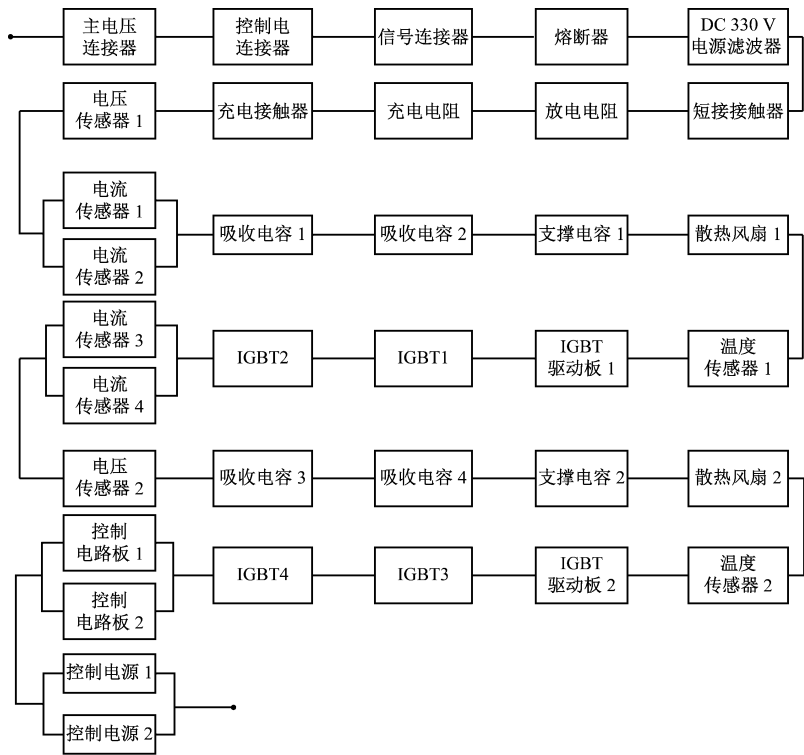


图 6 优化后的悬浮控制器可靠性模型

Fig. 6 Reliability model of the optimized levitation controller

基于图 6, 可得到优化后悬浮控制器可靠度的计算式为:

$$R_o(t) = \prod_{j=1}^p R_{s,j}(t) \prod_{k=1}^q R_{m,k}(t) \quad (6)$$

式中:

$R_o(t)$ ——优化后悬浮控制器 t 时刻的整体可靠度;

$R_{s,j}$ ——第 j 个串联单元 t 时刻的可靠度;

$R_{m,k}$ ——第 k 个并联单元 t 时刻的可靠度;

p ——优化后悬浮控制器串联部件的总数;

q ——优化后悬浮控制器并联部件的总数。

由图 6 可知, $p=24$, $q=4$ 。设 λ_j 为优化后悬浮控制器第 j 个串联部件的失效率, λ_k 为优化后悬浮控制器第 k 个并联部件的失效率, 则有:

$$R_o(t) = e^{-\sum_{j=1}^{24} \lambda_j t} \prod_{k=1}^4 [1 - (1 - e^{-\lambda_k t})^2] \quad (7)$$

3.2 优化后的悬浮控制器故障树分析

图 7 为优化后的悬浮控制器失效故障树模型。如图 7 所示, 优化后的悬浮控制器故障树顶事件为悬浮控制器失效, 底事件为各部件失效或故障。

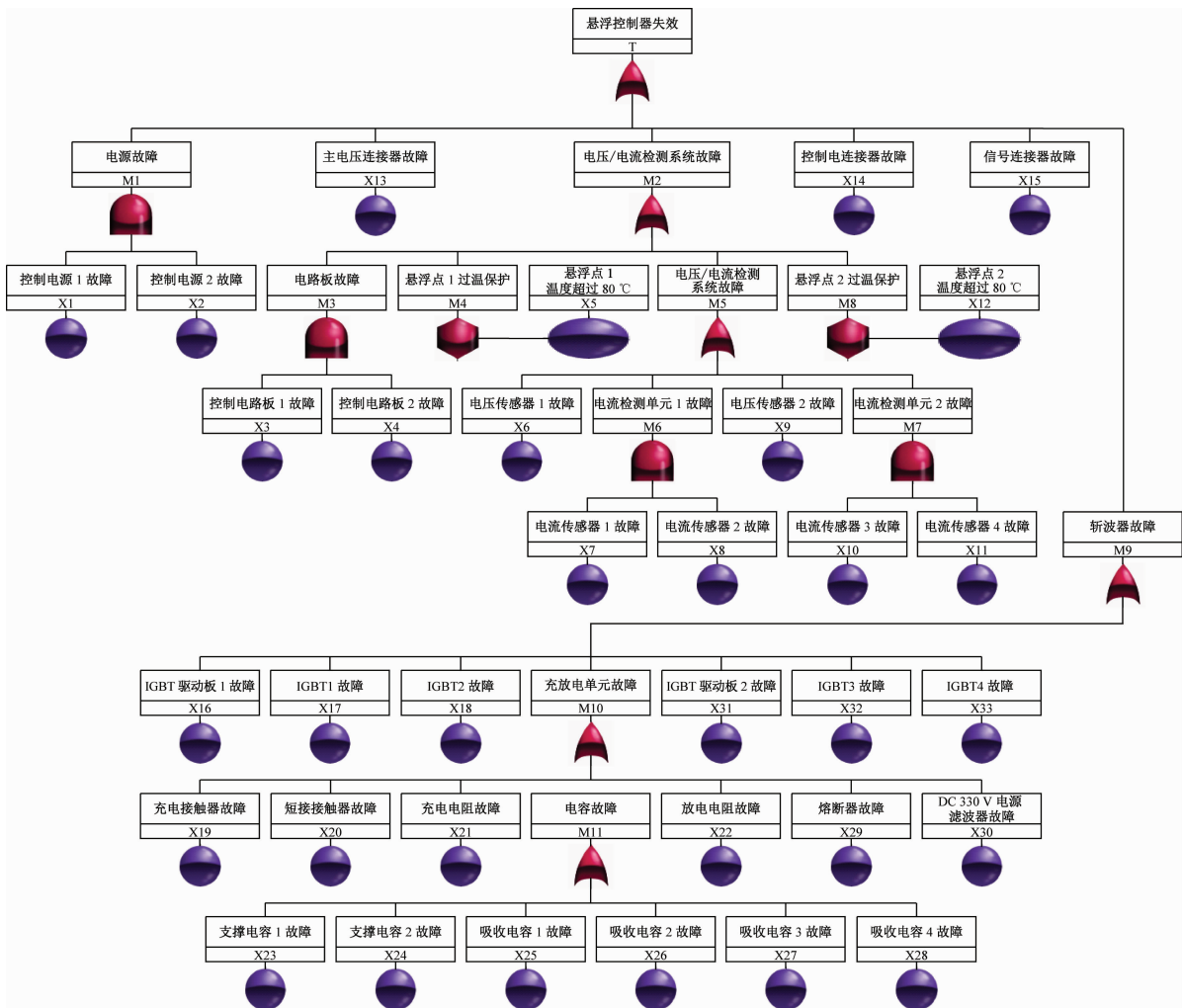


图 7 优化后的悬浮控制器失效故障树模型

Fig. 7 Fault tree model of the optimized levitation controller failure

图 6 中, $w=20$, 由式 (5) 计算得到优化后悬浮控制器的整体失效率为 $1.064 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ 。对比优化前单个悬浮电磁铁的 2 个悬浮控制器总失效率 ($2.282 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$), 优化后单个悬浮电磁铁的悬浮控制器失效率的降幅达 53.37%。

4 优化前后悬浮控制器可靠度对比分析

图 8 为优化前后悬浮控制器可靠度对比情况。由图 8 可以看出, 优化后的悬浮控制器可靠度明显高于优化前的悬浮控制器可靠度。

(下转第 316 页)

5 结语

基于深度学习法的地铁隧道衬砌缺陷智能检测系统具有高频率、可替代人工、检测监测一体化等优点。其作业速度为 10~15 km/h, 检出率大于 90%, 误检率小于 1%, 现场应用效果良好, 可以作为地铁隧道智能化检测的核心平台, 对地铁隧道各种缺陷进行有效检测。

但是, 裂纹缺陷和渗漏水缺陷的检测通常需要综合利用多种数据源, 如图像、振动等。如何有效地将这些多源数据进行融合, 提高检测的准确性和可靠性, 以达到地铁隧道巡检信息化、设备巡视智能化、地铁隧道运维科学化的目标, 是后续需要深化研究的问题。

参考文献

- [1] 刘渭宁, 李文锋, 李科, 等. 基于机器视觉的地铁隧道衬砌表面缺陷检测技术研究进展[J]. 公路交通技术, 2021, 37(3): 138.
- LIU Weining, LI Wenfeng, LI Ke, et al. Research progress of machinery visual-based tunnel lining apparent disease detection technology[J]. Technology of Highway and Transport, 2021, 37

- (3): 138.
- [2] 卢芳芳, 陈帅豪. 基于深度学习法的地铁隧道衬砌缺陷检测算法研究[J]. 信息技术与信息化, 2020(12): 231.
- LU Fangfang, CHEN Shuaihao. Research on tunnel lining disease detection algorithm based on deep learning[J]. Information Technology and Informatization, 2020(12): 231.
- [3] 张振海, 尹晓珍, 王阳萍, 等. 基于特征分析的图像式地铁隧道裂缝检测方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(11): 2791.
- ZHANG Zhenhai, YIN Xiaozhen, WANG Yangping, et al. Research on image-based crack detection method for subway tunnel based on feature analysis[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(11): 2791.
- [4] EVERINGHAM M, GOOL L. The pascal visual object classes (VOC) challenge[J/OL]. International Journal of Computer Vision, 2010, 88(2): 303 [2023-03-30]. https://www.pure.ed.ac.uk/ws/files/7879113/ijcv_voc09.pdf.

· 收稿日期:2023-04-28 修回日期:2023-07-19 出版日期:2024-09-10
Received:2023-04-28 Revised:2023-07-19 Published:2024-09-10
· 第一作者:张悦, 工程师, ysybyz@126.com
通信作者:韩静, 助理工程师, hanjing_1129@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 310 页)

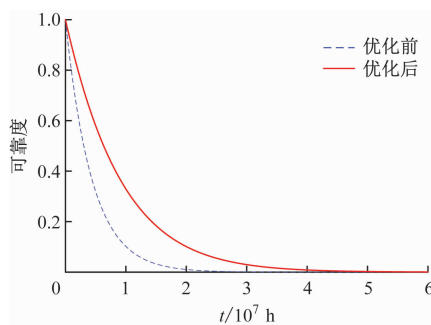


图8 优化前后悬浮控制器可靠度对比

Fig. 8 Reliability comparison of the levitation controller before and after optimization

5 结语

悬浮控制器是中低速磁浮列车稳定悬浮和安全运行的保证。本文对单个悬浮电磁铁的悬浮控制器进行可靠性分析和故障树分析, 明确了悬浮控制器优化设计方案, 这对于中低速磁浮车辆悬浮控制器可靠性的提升有一定的指导意义。本文分析的中低速磁浮车辆悬浮控制器可靠性结果可能存

在一定的偏差, 后续研究将结合现场故障数据, 进一步优化悬浮控制算法, 简化悬浮控制器主电路结构, 持续提升悬浮控制器的可靠性。

参考文献

- [1] 侯磊, 张文跃, 高峰, 等. 中低速磁浮列车悬浮控制系统可靠性分析及优化[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(7): 36.
- HOU Lei, ZHANG Wenyue, GAO Feng, et al. Reliability analysis and optimization of levitation control system of medium and low speed maglev trains[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(7): 36.
- [2] 李良巧. 可靠性工程师手册[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2012.
- LI Liangqiao. Handbook of certified reliability engineer[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2012.

· 收稿日期:2022-06-06 修回日期:2022-08-10 出版日期:2024-09-10
Received:2022-06-06 Revised:2022-08-10 Published:2024-09-10
· 通信作者:陈启发, 高级工程师, 41363102@qq.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