

基于混合驱动的动车组 IGBT 维修任务决策方法研究

裴春兴^{1,2}, 刘建强¹, 王伟², 李娜²

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044; 2. 中车唐山机车车辆有限公司, 河北 唐山 063035)

摘要: 该研究提出一种基于 FMEA - RCM - PHM 混合驱动的维修任务决策方法。依据 EN 50126 标准构建 FMEA 故障风险评估模型, 从故障严重度、故障发生频度、故障探测度三个维度实现故障风险量化与等级判定; 以可靠性为中心开展 RCM 维修分析, 完成重要维修项点筛选、功能故障分析、故障影响分类与维修任务逻辑决断, 形成规范化维修任务; 结合 PHM 故障预测与健康管理技术, 依据故障影响与发生频次矩阵完成维修策略优化, 筛选 PHM 建设候选项并确定优先级, 最终构建“风险评估-可靠性决策-智能健康管理”一体化维修决策体系。以牵引系统核心部件 IGBT 模块为实例开展全流程验证, 结果表明: 该方法可将 IGBT 模块风险等级由“不可接受”降至“可接受”, 并将三级修里程由 120 万公里延长至 160 万公里, 可显著提升运维经济性与智能化水平。该混合驱动决策方法通过构建 FMEA-RCM-PHM-RCM' 递进驱动闭环, 实现三者以统一风险量化值为纽带的一体化融合, 可为轨道车辆牵引系统修程修制优化、智能运维体系建设提供理论支撑与工程实践参考。

关键词: 轨道车辆; 牵引系统; 维修决策; 修程修制

中图分类号: U260.13

文献标志码: A

Research on IGBT Maintenance Task Decision-Making Method for EMUs Based on Hybrid Drive

Pei Chunxing^{1,2}, Liu Jianqiang¹, Wang Wei², Li Na²

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. CRRC Tangshan Co., Ltd., Tangshan Hebei 063035, China)

Abstract: This study proposes a maintenance task decision-making method that integrates FMEA, RCM, and PHM. An FMEA failure risk assessment model is established in accordance with EN 50126 to quantify failure risks and determine risk grades across three dimensions: failure severity, occurrence frequency, and detectability. Reliability-centered maintenance analysis is implemented to screen critical maintenance items, analyze functional failures, classify failure impacts, and make logical decisions about maintenance tasks, thereby forming standardized maintenance tasks. Combined with PHM technology, maintenance strategies are optimized based on a matrix of failure impact and occurrence frequency; candidate items for PHM construction are selected with priority defined; and an integrated maintenance decision-making system covering risk assessment, reliability decision, and intelligent health management is ultimately established. Full-process verification is performed with the IGBT module, the core component of traction systems, as the research object. The results reveal that the proposed method reduces the risk level of IGBT modules from unacceptable to acceptable and extends the tertiary maintenance mileage from 1.2 million km to 1.6 million km, effectively improving the economic efficiency and intelligence of equipment operation and maintenance. The hybrid-driven decision-making methodology establishes a progressive closed-loop framework of FMEA - RCM - PHM - RCM. By leveraging a unified risk quantification value as the linking bridge, it achieves the integrated fusion of the three approaches. This provides both theoretical support and practical engineering reference for optimizing maintenance systems and constructing intelligent operation and maintenance frameworks for railway vehicle traction systems.

Key words: rail vehicle; traction system; maintenance decision-making; maintenance regime optimization

绝缘栅双极型晶体管(IGBT)作为牵引变流器核心功率开关器件,承担着电能变换与功率调控的关键任务^[1],其性能优劣直接决定着牵引系统的可靠性、工作效率与服役寿命。IGBT 长期工作于高频开关、大电流通断、高电压阻断及强热循环等极端电热应力环境下^[1],键合线脱落、焊层疲劳、栅氧化层退化等封装与芯片层面的老化失效问题难以避免^[2]。研究表明,牵引变流器中 IGBT 模块的故障率约占牵引系统总故障的 30%以上^[3],是牵引系统中最薄弱的环节之一^[4]。

朱伟等^[5]提出了一种基于模糊集的 FMEA 评估方法,即基于模糊集的 FMEA 定量分析工具用于维护策略的分析和诊断。王文军等^[6]将 FMEA 分析结果转换为故障源-测试依赖矩阵,并设置需执行的仿真分析及提取的特征响应。李浩宇^[7]围绕可靠性分析的维修展开探究,并针对地铁车辆各系统可靠性评估及优化周期提出了相关建议。高明亮等^[8]提出基于 RCM、PHM(故障预测与健康管理)和数据挖掘算法相融合的方法来构建系统的维护决策模型。陈依新^[9]基于对连续采集的 RAMS 数据的分析,进行现场车辆维护的辅助决策,明确中期维护工作的重点,全面提高车辆维护维修的质量。陶瑞等^[10]提出了以健康管理功能链路为主线的正向设计框架,构建了从全机功能架构、子系统功能定义到组件级物理实现的分层设计路径。殷培强等^[11]提出了一种改进的 PHM 系统架构,李娟^[12]实现了普速铁路线路设备故障预测与健康管理系统。

文献研究可看出,现有研究可归为三类技术路径:一是聚焦 PHM 单点技术的研究,如 IGBT 剩余寿命预测与故障诊断^[3,16,17],在状态感知层面具有深度,但缺少预测结果向维修决策的转化机制;二是 FMEA+RCM 组合研究^[5,7,13,14],在维修任务逻辑决断层面较为成熟,但维修任务一经确定便相对固定,缺少基于在线状态数据的动态反馈优化;三是 PHM 系统架构与平台设计研究^[10-12,15],在系统层面有较完整规划,但普遍缺少风险底线约束,未回答“哪些故障模式必须优先建设 PHM 如何在有限成本下排定优先级”等问题,易造成监测系统建设的盲目性。

从工程实践看,当前动车组 IGBT 模块修程修制优化面临部件级 RAMS 定量评估手段缺失、修程延长论证缺少标准化风险评估流程、各动车段修程优化依赖经验而缺少统一方法论支撑等痛点。近年来,赖伟等^[16]基于失效演化模拟建立 IGBT 解析寿命模型,实现电热应力下剩余寿命量化;王欢^[17]等综述机器学习在牵引系统故障诊断中的应用,指出多源数据融合与智能预测是发展方向。然而,现有研究尚未将风险阈值约束、标准化维修决断、在线状态预测三者纳入统一决策框架——以 FMEA 风险矩阵确立安全性底线,以 RCM 逻辑决断形成标准化维修任务,以 PHM 动态反馈实现闭环优化,形成从风险识别到任务决策再到智能监测的全链条一体化方法。

本文提出 FMEA-RCM-PHM 混合驱动维修任务决策方法,与现有两两融合研究(FMEA+RCM、RCM+PHM 等)不同,本文通过构建 FMEA→RCM→PHM→RCM 递进驱动闭环,实现三者一体化融合:FMEA 回答“管哪些”的风险识别与优先级排序,RCM 回答“怎么管”的维修任务类型与周期确定,PHM 回答“如何智能管”的在线监测与健康管理,并反向优化 RCM 维修策略。三者以统一风险量化值 H (故障后果出现的可能性综合值(取值范围 1~30))为“共同语言”贯通全链路,通过三项标准化接口实现信息贯通与闭环反馈,形成从风险识别到任务决策再到智能监测优化的完整闭环体系。以牵引变流器核心器件 IGBT 模块为实例,结合真实历史故障数据开展全流程验证,为牵引系统修程修制改革与智能运维建设提供技术支撑。

1 基于 FMEA 故障风险分析

FMEA 分析遵循 EN 60812 方法标准,在 EN 50126 轨道交通 RAMS 管理框架下开展。本文利用 FMEA 方法,在三个维度进行量化评估,从故障严重度、频度、探测度分别评估检修阶段和运行阶段的发现概率。将概率加权综合得到综合探测度,最后计算故障后果出现可能性,从而判断风险等级,不可接受或需关注的故障模式纳入后续 RCM 分析。

1.1 故障严重度评估

评估指数 B (故障严重度指数,表征故障后果严重等级)代表故障后果的严重性,表明故障可能造成的后果。故障影响从安全要求、用户、环境和系统功能行为方面进行评价。严重度评估分 5 个层级,见表 1。

表 1 严重度 (B)

Tab.1 Severity (B)

评估等级	重要性 B	等级
灾难性的	故障导致多起事故死亡和/或重伤和/或严重的环境损害如脱轨、碰撞、火灾、车上安全设施的破坏等	5
严重的	故障导致单起事故死亡和/或受伤和/或值得一提的环境损害	4
中度的	铁路运营中故障没有导致与安全相关的事件,但导致车辆停止运营	3
不重要的	铁路运营中故障没有导致与安全相关事件,但限制车辆可用性	2
无关紧要的	故障对车辆的状态没有重大影响	1

1.2 故障发生频度评估

评估指数 A (故障发生频度指数,表征故障发生概率等级)代表故障出现可能性,对频度的评估需考虑故障发生的频率、运行和使用条件等。频度评估被分为 6 个层级,见表 2 所示。频率无硬性量化规定,只需给出出现可能性的等级,可根据具体系统或部件实际情况进行定义。

表 2 频度 (A)

Tab.2 Occurrence (A)

故障概率 $A^{[19]}$		
频繁	故障出现频繁,发生的可能性一直存在 (每个运营单位每年发生故障 ≥ 0.1)	6
可能	故障会多次出现,故障会经常出现 (每个运营单位每年发生的故障 ≥ 0.01)	5
偶然	故障可能会多次发生,故障会多次发生	4
罕见	故障可能会在生命周期内发生 (每个运营单位每年发生的故障 ≥ 0.001)	3
不太可能	故障不太可能出现,但也有可能 (每个运营单位每年发生的故障 $\geq 0.000\ 1$)	2
难以想象	故障极其不可能出现 (每个运营单位每年发生的故障 $\leq 0.000\ 001$)	1

1.3 故障探测度和评价

评估指数指故障后果出现前被发现的可能性,评估指数分为两种:① 评估指数 (E_{is} (定期检修阶段发现故障的概率等级))是指在检修阶段发现相关故障的可能性;② 评估指数 (E_{isis} (两次计划检修之

间发现故障的概率等级))是指在两个计划的检修阶段之间发现故障可能性。探测度评估分为5个层级,见表3。

表3 探测度 (E_{is}) 和 (E_{isis})

Tab.3 Detectability (E_{is}) and (E_{isis})

检修阶段发现故障概率 E_{is}	探测度	两次检修之间发现故障概率 E_{isis}	探测度
肯定会被发现, 概率大于 99%	1	肯定会被发现, 概率大于 99%	1
故障通常会被发现, 概率 80%到 90%	2	通常会被发现, 概率 80%到 90%	2
不是每次都被发现, 概率 50%到 79%	3	不是每次都被发现, 概率 50%到 79%	3
难以被发现, 概率 20%到 49%	4	难以被发现, 概率 20%到 49%	4
几乎不能被发现, 概率 0%到 19%	5	几乎不能被发现, 概率 0%到 19%	5

1.4 故障风险矩阵建立

在风险矩阵基础上^[19], 结合修程改进风险评估结果, 制定修程改进风险矩阵, 见表4。通过对故障后果严重程度(B)及故障后果出现可能性(H)二维矩阵进行评估, 得出风险等级。故障后果出现可能性(H)由修程改进FMEA中的 E_{is} 和 E_{isis} 的值综合得出。计算公式如下

$$H=E\times A$$

式中: E 为(综合探测度单变量, 融合检修、运行双阶段探测能力)综合探测度(取值范围1~5)。

$$E=(5\times E_{isis}+1\times E_{is})/6$$

式中: 系数5和1分别为运行期间与检修阶段权重系数; 6: 权重求和分母常量。依据EN 50126轨道交通RAMS管理框架对故障检测时机与安全后果关联性的要求, 根据EN 60812标准及轨道交通工程实践经验, 动车组运行期间通过车载诊断或司机巡检发现故障, 可在后果发生前及时干预, 属“预防性”探测; 而定期检修阶段发现的故障多为已发生的退化累积结果, 属“确认性”探测, 对后果预防边际贡献较低。同时, IGBT键合线疲劳、焊层老化等隐蔽退化可通过 $V_{ce(sat)}$ (IGBT集电极-发射极饱和压降下标参数, 用于表征芯片老化退化程度), 即IGBT集电极-发射极饱和压降、结温等参数在运行阶段实现早期预警, 将发现时机前移。5:1权重比例来源于我国CRH系列动车组牵引系统FMEA工程实践与专家评审共识, 反映两个阶段探测手段在后果预防有效性上的量级差异。该权重可根据不同车型及运维模式灵活调整, 因此基于CRH系列动车组运维特征取值为5:1。

根据故障后果严重程度以及故障后果出现可能性的值可从风险矩阵中得出风险等级。风险可分为可忽略、可接受、需关注及不可接受^[19-20], 见表4所示。

表4 风险矩阵

Tab.4 Risk Matrix

			故障后果严重程度评估 (重要性 B)				
			1 可忽略	2 小型	3 适度	4 关键性	5 灾难性
故障后	$25 \leq H < 30$	频繁	意外	不可接受	不可接受	不可接受	不可接受
果出现	$20 \leq H < 25$	可能	可接受	需关注	需关注	不可接受	不可接受

			故障后果严重程度评估（重要性 B ）				
			1 可忽略	2 小型	3 适度	4 关键性	5 灾难性
可能性	$15 \leq H < 20$	偶然	可接受	可接受	需关注	需关注	不可接受
计算结果	$10 \leq H < 15$	罕见	可忽略	可接受	可接受	需关注	需关注
果(H)	$5 \leq H < 10$	极罕见	可忽略	可忽略	可忽略	可接受	可接受
	$1 \leq H < 5$	难以想象	可忽略	可忽略	可忽略	可忽略	可忽略

1.5 FMEA 与 RCM 衔接

FMEA 输出风险等级与故障模式清单，是 RCM 分析维修项点筛选与故障影响分类的核心输入。关系如下：

1) 风险等级作为重要维修项点（MSI）筛选依据：FMEA 风险矩阵中评定为“不可接受”或“意外”等级的故障模式，优先纳入 RCM 分析的重要维修项点筛选范围。

2) 严重度等级指导故障影响分类：FMEA 中的严重度 B 等级直接映射至 RCM 故障影响类别，为后续逻辑决断提供输入。

3) 故障模式清单支撑功能故障分析：FMEA 识别的潜在故障模式是 RCM 功能故障分析的基础，避免重复识别。

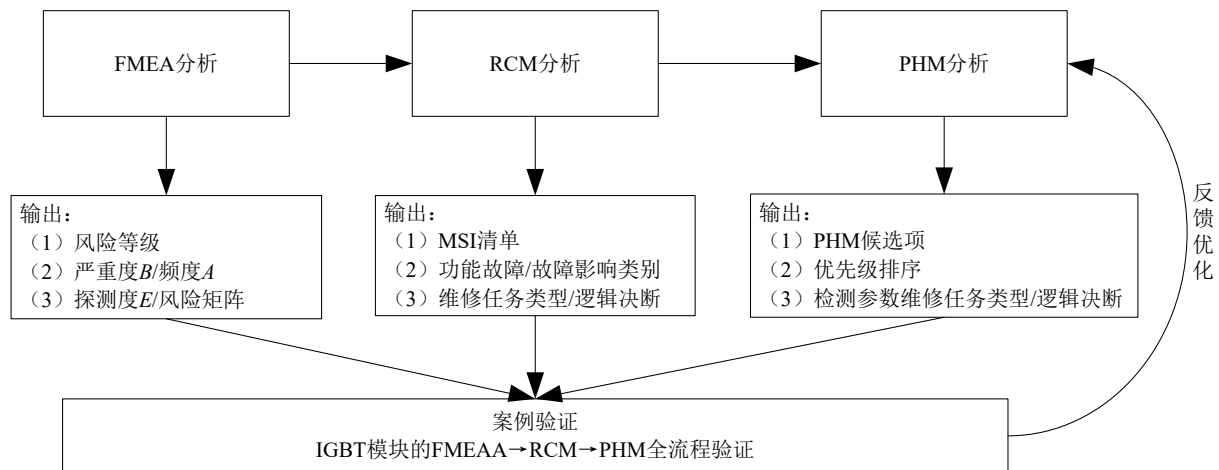


图 1 混合驱动维修决策方法融合流程

Fig.1 Fusion Process of Hybrid-Driven Maintenance Decision-Making Method

通过上述联系，FMEA 风险量化结果会在 RCM 维修任务逻辑决断中直接利用，形成从“风险识别”到“任务决策”的连续链路。

2 基于 RCM 的维修任务分析

可靠性为中心的维修分析（RCM）是一种确定装备预防性维修需求、优化维修制度的一种系统工程方法。通过实施系统功能、功能故障、故障影响与故障原因分析，针对每个故障原因，采用规范化逻辑决断，确定各类故障原因的维护策略，系统 RCM 分析工作流程见图 2。

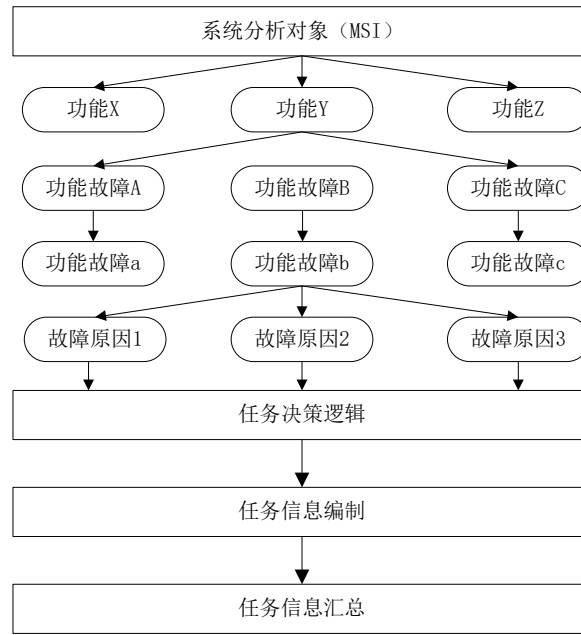


图2 系统 RCM 分析工作流程

Fig.2 Working Flow of System RCM Analysis

2.1 重要维修项点选择

采用自上而下方式，进行 MSI 选择判断，按如下三个问题筛选：

问题 1：故障对操作人员（司机）是否无法发现或不易察觉？

问题 2：故障是否影响车辆的安全、秩序？

问题 3：故障是否会影响使用/经济？

结合轨道车辆系统功能分类号^[18]筛选，并在合适的层级确定 MSI，MSI 选择流程见图 3。

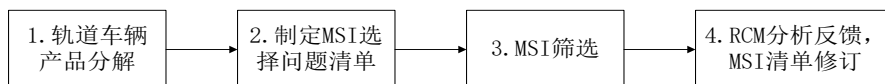


图3 MSI 选择流程

Fig.3 MSI Selection Process

2.2 功能故障分析

功能故障分析涵盖 MSI 功能、功能故障、故障影响及故障原因，内容包括① 功能：一个部件正常工作所需要的属性；② 功能故障：系统在规定的条件内不能履行其指定的功能；③ 故障影响：功能故障后果是什么；④ 故障原因：为什么发生此功能故障。

2.3 故障原因分析

故障原因分析目的是为制定适用且有效的任务，以预防故障的发生，从而维持车辆高可靠性水平。故障原因分析遵循 RCM 标准逻辑决断链：先区分故障为明显/隐蔽，再按安全、秩序、经济划分故障影响类别；针对每类故障依次校验润滑保养、功能检测、修复、报废 4 类任务的适用性，输出标准化维修策略；高频率安全隐蔽故障直接转入 PHM 优先监测清单，超高频次安全故障标记为设计优化项。

故障影响类别分为 6 类，分别为：类别 1：明显，安全相关；类别 2：明显，秩序相关；类别 3：明显，使用/经济相关；类别 4：隐蔽，安全相关；类别 5：隐蔽，秩序相关；类别 6：隐蔽，使用/经济相关。

针对功能故障原因分析结果制定维修任务时,均采用润滑及保养(LUB/SVC)、检查与功能检查(GVI/DET/SDI/FNC)、检修恢复(RST)、报废(DIS)等四种处理方式。

2.4 故障影响分析

通过确定 MSI 功能故障的影响后果,制定适用且有效的维修任务。将故障影响分为明显安全、明显秩序、明显使用/经济、隐蔽安全、隐蔽秩序、隐蔽使用/经济六类。分析逻辑见图 4。

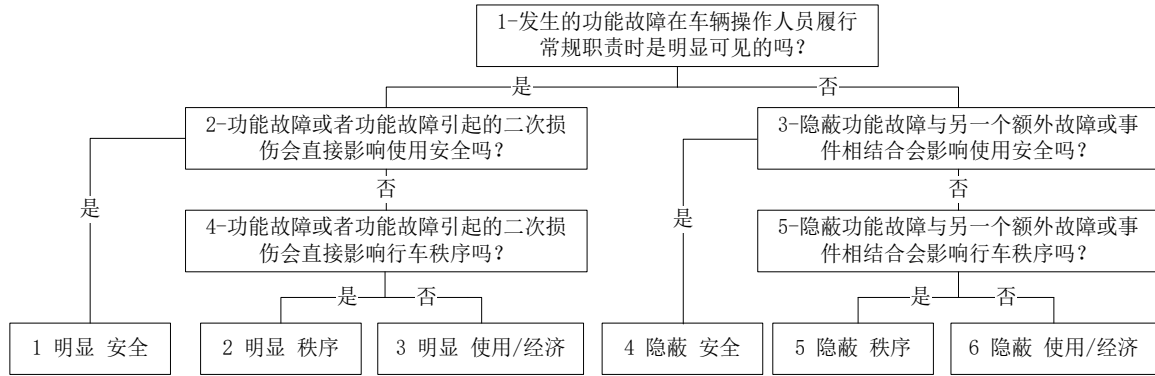


图 4 功能故障影响分析逻辑

Fig.4 Logic of Functional Failure Impact Analysis

2.5 RCM 与 PHM 衔接

RCM 分析结果是 PHM 候选项评估与优先级排序的直接依据。关系如下:

1) 维修任务类型指导 PHM 适用性判断: RCM 逻辑决断中确定为“检查/功能检查”或“组合任务”的故障原因(如键合线疲劳检测),若具备可监测的物理特征参数(如饱和压降 $V_{ce(sat)}$ 、热阻),则优先纳入 PHM 候选项评估。

2) 故障影响类别与发生频次决定 PHM 优先级:依 RCM 输出故障影响类别与发生频次,按矩阵确定维修策略,排定 PHM 建设优先级。

3) RCM 任务可被 PHM 任务替代或补充:对适用 PHM 故障模式,可采用“混合任务”(人工检查为主,PHM 为辅)或“替代任务”(PHM 完全取代人工检查)形式优化原 RCM 维修任务。

3 基于 PHM 的维修任务评估

针对故障原因进行任务决断,按检修任务的适用性与有效性,选择适用且有效检修任务,汇总系统、结构、区域 RCM 分析结果,开展 PHM 候选项评估。

基于 RCM 维修分析结果,选择适用监控探测技术,识别部件故障征兆,从 PHM 预测的及时性、有效性、任务完整性角度出发,对 RCM 任务进行补充或替换,以 RCM 人工任务为主,PHM 任务为辅;对于特定故障模式,选择 PHM 任务取代 RCM 任务,即:机器检查取代人工检查,PHM 建设候选项定性评估方法是基于 RCM 分析结果与工程 FMECA,通过 RCM 分析获取影响运行安全和行车秩序的检修任务,结合 FMECA 的分析结果,获取该任务所涉及部件的故障模式及故障发生概率。PHM 候选项评估如下图 5 所示。

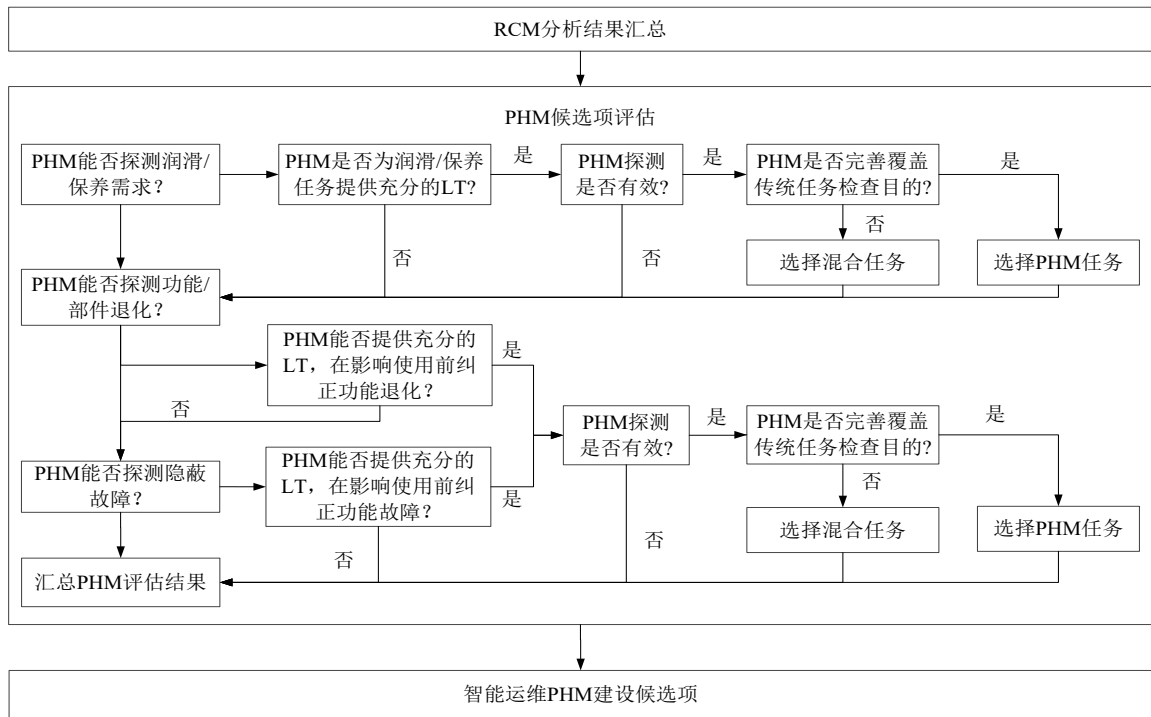


图 5 智能运维 PHM 项点评估

Fig.5 Evaluation of PHM Items for Intelligent Operation and Maintenance

为方便 PHM 候选项的筛选, 结合轨道车辆现有的维修技术水平, 建立故障影响、发生频次与维修策略的对应关系。如: 故障影响严重且故障发生频次高的检修任务, 建议从设计源头进行设计改进; 故障影响一般且故障发生频次低的检修任务, 建议采用状态修与故障修策略; 仅对故障影响严重发生频次低与故障影响高的检修任务, 推荐采用 PHM 系统进行故障预测与健康管理。

在限定成本使用情况下, 为 PHM 候选项排定优先级, 将有限成本投入更重要系统上, 为此, 结合维修策略, 给出 PHM 建设优先级, 具体见表 5。

表 5 PHM 建设候选项优先级

Tab.5 Priority of PHM Construction Candidates				
故障频次	RCM 分析故障影响	维修策略	PHM 建设候选项	优先级
频次高	安全、秩序类	设计更改	否	
频次低	安全、秩序类	预防修+预测修	是	优先
频次高	使用、经济类	状态修+预防修	是	视情
频次低	无影响类	故障修+状态修	否	

注: 表中频次高低是相对值, 可根据 FMECA 中故障率与风险矩阵对应关系进行评价;

基于 RCM 分析结果, 结合 PHM 候选项的评估流程, 考虑各系统的工作原理, 识别监控参数, 可得出 PHM 候选项。

4 维修任务决策方法验证

4.1 牵引系统 IGBT 的 FMEA 分析

以某线路运营的动车组在 5 年运营间故障数据为依据, IGBT 故障共计 47 起, 故障分类见图 6。同时基于数据开展频度分析, 每年故障次数满足 $47 \div 5 \approx 9.4$ 次/年, 大于表 2 规定的 0.1 次/年阈值, 故障频度 A 应为 6 (频繁)。

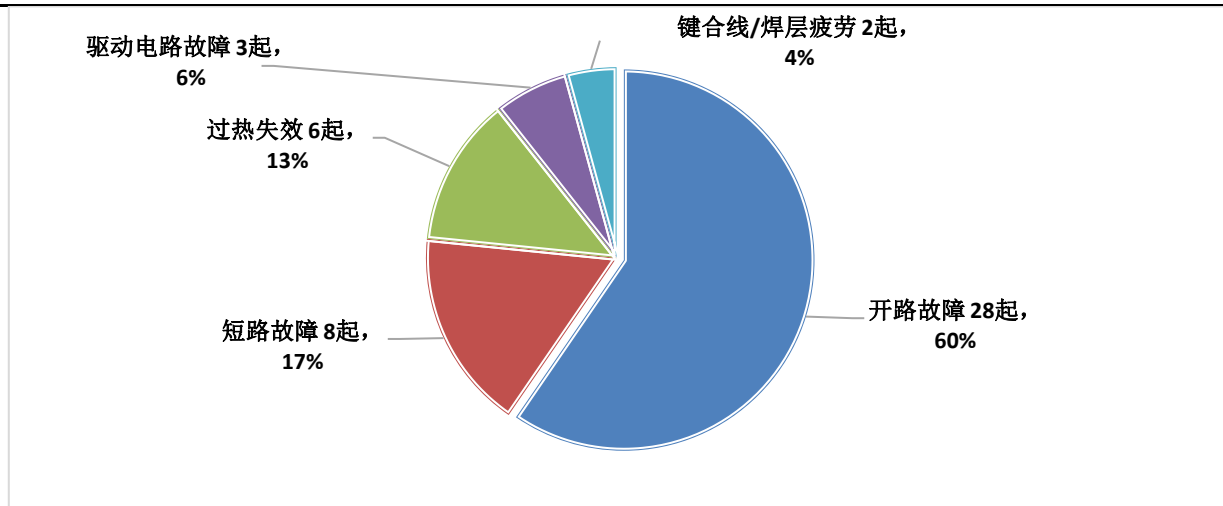


图 6 故障模式分类统计

Fig.6 Classification Statistics of Failure Modes

1) FMEA 分析表

基于 4.1 节方法内容，开展 IGBT 模块的 FMEA 分析，具体见表 6。

表 6 IGBT 模块的 FMEA 分析

Tab.6 FMEA Analysis of IGBT Modules

序号	栏目	内容
1	现有检修措施	(1) 二级修：车下设备舱外观检查 (2) 三级修：IGBT 外观检查、电气参数测试、冷却系统检查 (3) 车载诊断系统实时监测
2	质量要求	(1) 外观：无烧蚀、裂纹、炸损痕迹、无灰尘油污堆积 (2) 电气参数：IGBT 饱和压降不得超过标准参考值的 120%；栅极阈值电压需落在规定标准区间内 (3) 冷却系统：无堵塞、风机运转正常 (4) 车载诊断无故障报警
3	检修周期	三级修：120 万公里
4	潜在故障	开路故障、短路故障、过热失效、驱动电路故障、键合线/焊层疲劳
5	故障影响	局部影响：IGBT 所在桥臂功能丧失，逆变器输出畸变； 高一层次影响：变流器输出异常，牵引电机缺相运行或转矩波动； 最终影响：列车牵引力下降或丧失，导致运营中断；严重时可能引发二次故障，危及行车安全

2) 修程优化前风险评估

IGBT 开路故障可能导致牵引力丧失，在坡道启动或紧急制动工况下导致列车溜逸、碰撞等事故，属于“多起事故死亡和/或重伤和/或严重的环境损害”，事故严重度 B 符合 5 级灾难性水平。

根据动车组牵实际检修情况，进行 IGBT 三级修时，需拆解变流器方可进行检查，但因检修时间较短，难以保证每次都可全面检测潜在缺陷；二级修检查同样难以发现电气性能退化， E_{is} 处在 50%-79%，为 3

级。同理，车辆运行期间，车载诊断系统可基于温度、过流等数据评估 IGBT 状态，但开路故障诊断覆盖不全，难以发现隐性故障， E_{isis} 处在 80%-90%，为 2 级。从而计算 IGBT 故障被发现可能性 E

$$E = (5 \times E_{\text{isis}} + 1 \times E_{\text{is}}) / 6 = (5 \times 2 + 1 \times 3) / 6 \approx 2.17$$

根据 E 计算故障后果出现的可能性

$$H = E \times A = 2.17 \times 6 = 13.02$$

根据 H 和 E 数值，基于表 4，可发现 $B = 5$ （灾难性）、 $H = 13.02$ ，对应风险矩阵“罕见”区间（10-15），风险等级为“需关注”。

3) 修程优化后风险评估

根据表 6，IGBT 修程优化包括两点，一是三级修间隔由 120 万 km 延长到 160 万 km，同时车辆增加诊断系统。评估修程优化后风险：IGBT 修程间隔延长比例 $(160 - 120) / 120 = 33.3\%$ ；因 IGBT 属于电子器件，故障分布属于耗散失效型，符合威布尔分布，经拟合得到威布尔分布形状参数 $\beta \approx 1.8^{[21]}$ ，既有动车组增加了故障诊断系统，可实现 IGBT 故障早期预警，评估其故障频度 A 由 6 降到 4；因增加了车载检测装置，检修通过读取诊断数据判断，发现概率提高至“通常会被发现”， E_{is} 降到 2，同时故障在途发现概率大大增加，其 E_{isis} 等级为 1。

根据上述参数计算

$$E = (5 \times 1 + 1 \times 2) / 6 = (5 + 2) / 6 \approx 1.17, H = 1.17 \times 4 = 4.68$$

根据表 4 风险矩阵，当 $B = 5$ 、 $H = 4.68$ 时，风险等级由“需关注”降至“可接受”，满足修程更改要求，但车辆须增加车载诊断系统。

基于 FMEA 维修优化流程和内容是可行的，上述评估方法已在动车组现有修程修制中实践与应用。

4.2 牵引变流器 IGBT 的 RCM 分析

根据历史故障数据开展 IGBT 的 RCM 分析。IGBT 功能可分为以下四个功能：

主要功能：1) 在规定电压（ $\leq 6500 \text{ V}$ ）、电流（ $\leq 750 \text{ A}$ ）和开关频率范围内，将直流母线电压转换为可控的三相交流电压；2) 接收并按 PWM 指令，规定时间内完成开通与关断。

保护功能：在过流（ $\geq 1500 \text{ A}$ ）、过压（ $\geq 6500 \text{ V}$ ）、过温（如 $\geq 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ）工况下，执行保护性关断。

指示/监视能：通过门极驱动单元向控制单元反馈 IGBT 状态。

次要功能：通过冷却单元将 IGBT 结温维持在安全工作温度范围内（ $\leq 125 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ）。

1) 功能故障确定

基于系统功能分析，其功能故障主要存在 10 项，功能故障清单见表 7。

表 7 IGBT 功能故障清单
Tab.7 List of IGBT Functional Failures

编号	功能故障	系统功能
1	IGBT 丧失电能转换能力，无输出电压	在规定电压、电流和开关频率范围内，将直流母线电压转换为可控的三相交流电压
2	IGBT 输出电压异常（畸变、不平衡、缺相）	
3	IGBT 开路故障	接收并按 PWM 指令，规定时间内完成开通与关断
4	IGBT 短路故障	

5	IGBT 开关时间异常（导通/关断延迟过大）	
6	IGBT 保护功能丧失，异常工况下不执行保护关断	在过流、过压、过温等工况下，执行保护性关断
7	IGBT 保护功能误动作，正常工况下错误关断	
8	IGBT 状态反馈信号丢失或错误	通过门极驱动单元向 TCU 反馈 IGBT 状态
9	散热效率下降，IGBT 模块结温持续偏高（ $\geq 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）	通过冷却单元将 IGBT 结温维持在安全工作温度范围内
10	冷却单元水流量或压力异常	

4) 故障逻辑分析

根据故障逻辑分析流程，以 IGBT 开路故障为例，开展故障逻辑分析，见表 8。

表 8 IGBT 开路故障和结温偏高故障逻辑分析

Tab.8 Logical Analysis of IGBT Open-circuit Fault and High Junction Temperature Fault									
功能故障	问题 1	问题 2	问题 3	问题 4	问题 5	类别	故障影响	故障原因	故障模式
开路故障	是	是	不适用	是	不适用	1 (明显安全)	开路导致输出不平衡，引发二次故障	芯片键合线老化脱落或焊层疲劳开裂	结构故障

5) RCM 内容确定

基于逻辑决断分析，从而确定状态修内容和流程，见表 9。

表 9 类别 1（明显安全）故障逻辑决断

Tab.9 Fault Logic Decision for Category 1 (Obvious Safety)		
逻辑决断问题	键合线脱落	焊层疲劳
1A 润滑/保养是否适用且有效？	否	否
1B 检查/功能检查是否适用且有效？	是（ $V_{ce(sat)}$ 检测）	是（热阻检测）
1C 恢复是否适用且有效？	否	否
1D 报废是否适用且有效？	是（寿命报废）	是
1E 组合任务是否适用且有效？	是	是

4.3 牵引系统 PHM 维修任务评估

1) 评估流程

基于 IGBT 故障 RCM 和 FMEA 分析，从效益角度评估 PHM 建设价值，为 PHM 建设提供候选项目清单及优先级建议。PHM 建设候选项定性评估流程如表 10 所示。

表 10 PHM 建设候选项定性评估

Tab.10 Qualitative Evaluation of PHM Construction Candidates		
步骤	工作内容	输出成果
第 1 步	梳理 RCM 结果中影响安全/秩序检修任务	候选任务清单
第 2 步	结合 FMEA 获取故障模式及发生概率	故障频次分级

步骤	工作内容	输出成果
第 3 步	基于故障影响与频次矩阵确定维修策略	维修策略分类
第 4 步	识别监控参数，确认 PHM 技术可行性	PHM 候选项清单
第 5 步	排定优先级，形成 PHM 建议	优先级排序表

2) 评估结果

融合 FMEA 和 RCM 分析的故障原因、影响、严重度、频度和风险级别等内容，对 IGBT 进行 PHM 候选项判定，以 IGBT 开路 and 结温偏高为例，具体见表 11。

表 11 PHM 候选项判定

Tab.11 Determination of PHM Candidates					
功能故障	故障原因	故障影响	频次	PHM 候选项	依据
开路	焊层疲劳	1（安全）	中	是，优先	安全类，频次中等，可预测
结温偏高	导热硅脂老化	4（安全）	中	是，优先	安全类，频次中等
开路	键合线脱落	1（安全）	高	否	频次高，设计更改
结温偏高	散热积尘	4（安全）	高	否	频次高，设计更改
结温偏高	冷却液泄漏	4（经济）	低	是，视情	频次低，既有维护覆盖

基于上表和 PHM 建设候选项优先级，焊层疲劳和导热硅脂老化影响列车安全，设为 PHM 建设项并将优先级设为高，键合线脱落和散热积尘故障是由 IGBT 设计质量导致，需进行设计更改。而冷却液泄漏只触发系统保护，对安全性影响较小，也可设为 PHM 建设项，但要视车辆和环境再确定。

根据 IGBT 物理特性和失效机理，以 IGBT 结温检测为例建立 PHM 维护任务见表 12。

表 12 候选项目 2-基于结温监测的散热健康管理

Tab.12 Candidate Project 2-Thermal Health Management Based on Junction Temperature Monitoring	
要素	内容
名称	IGBT 模块结温及散热系统 PHM 监测
关联故障	导热硅脂老化、冷却流量压差异常
监控参数	T_1 （芯片结温）、 T_2 （壳温）、冷却系统流量压力差
方法	基于热阻抗数据库焊料层健康诊断和冷却系统参数综合评估散热能力
预期效果	实时监测结温变化趋势，预警硅脂老化和冷却系统故障，提前安排维护

以某型动车组 IGBT 模块为工程实例，对 FMEA–RCM–PHM 混合驱动维修任务决策方法进行全流程验证。基于 5 年统计数据完 FMEA 分析，优化前严重度 $B = 5$ 、频度 $A = 6$ 、综合风险值 $H = 13.02$ ，风险等级为不可接受；通过引入 PHM 在线监测、优化检修周期与探测能力，频度 A 降至 4、综合风险值 $H = 4.68$ ，风险等级降至可接受，并实现三级修里程由 120 万公里延长至 160 万公里。结合 RCM 完成 IGBT 模块功能故障定义与维修任务逻辑决断，明确开路故障为明显安全类、结温偏高故障为隐蔽安全类，并确定对应检查、功能检测、保养及组合维修任务。依据故障影响与频次矩阵开展 PHM 候选项评估，将焊层疲劳、

导热硅脂老化列为优先建设项, 键合线脱落、散热积尘列为设计改进项。结果表明, 所提混合驱动决策方法可有效降低 IGBT 模块故障风险、优化修程修制并提升维修智能化水平, 具备工程适用性与可行性。

5 结论

该研究提出并验证了一种 FMEA-RCM-PHM 混合驱动维修任务决策方法, 形成从风险识别到任务决策再到智能监测优化的递进驱动闭环。以牵引 IGBT 模块为例开展全流程验证, 创新点与结论如下:

1) 构建了融合 EN 50126 的改进 FMEA 模型。依据 EN 50126 轨道交通 RAMS 管理框架, 对 EN 60812 传统 FMEA 评价维度进行适应性改进, 建立了综合考虑严重度 B 、频度 A 、综合探测度 E 的风险量化模型, 权重系数基于某型动车组运维经验及 FMEA 工程实践确定。该模型能定量刻画检修策略调整、在线监测系统投入带来的风险变化, 为修程延长提供风险评判依据, 弥补了 RAMS 评估手段的缺失。

2) 建立了 FMEA→RCM→PHM 递进式决策链路。与现有两两融合研究不同, 本文通过三项标准化接口实现三者机理融合与闭环贯通: FMEA 输出风险等级驱动 RCM 的 MSI 筛选, RCM 输出任务类型驱动 PHM 候项评估与优先级排序, PHM 引入后提升可探测度、降低风险值、反向优化 RCM 维修周期。该递进链路实现了风险底线约束、标准化维修决断、状态监测优化的统一, 克服了单一 RCM 缺少动态修正、单纯 PHM 缺少风险准入门槛的缺陷。

3) 形成了可推广标准化决策流程。通过 FMEA 风险矩阵确立安全底线、RCM 逻辑决断形成标准化维修任务、PHM 候选项评估排定建设优先级, 为动车修程修制优化提供了统一的方法论支撑。

4) 工程验证了方法的有效性。基于某型动车组 5 年运营故障数据完成全流程验证。优化后综合风险值 H 由 13.02 降至 4.68, 风险等级由“需关注”降至“可接受”, 三级修里程由 120 万 km 延长至 160 万 km, 拆解检测频次降低 25%, 以每列动车组上线运营日均营业额约 30 万元估算^[22-23], 单列减少库停损失约 60~90 万元。

需说明是, 本文工程验证基于单一线路、单一车型 5 年实际运营故障数据开展, 在数据广度方面存在一定局限。但该方法框架遵循 EN 50126 与 EN IEC 60812 标准化分析流程, 其通用性不依赖于特定数据集, 适用于不同车型与线路的应用场景, 仅需代入相应实际数据即可完成同样分析。后续将结合跨车型、跨线路数据进一步开展多场景对比验证, 持续完善方法的工程适用性。未来可进一步研究多部件耦合下的 PHM 任务协同优化, 以及基于数字孪生的动态维修决策方法。

参考文献:

- [1] 周勇. 地铁牵引系统 IGBT 失效实例分析及可靠性提升措施 [J]. 铁道车辆, 2021, 59 (3): 46-50.
Zhou Yong. Analysis of failure examples of IGBT of traction system for metros and reliability improvement measures [J]. Rolling Stock, 2021, 59 (3): 46-50.
- [2] 徐渊, 朱慷弘. 城市轨道交通列车牵引变流模块 IGBT 退化规律及检修策略研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26 (增刊 1): 64-68.
Xu Yuan, Zhu Kanghong. Urban rail transit train IGBT traction converter module degradation law and maintenance strategy [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26 (S1): 64-68.
- [3] Yang Xinyi, Hu Zhen, Bo Yizhi, et al. An integrated dynamic physics-based model for non-invasive health monitoring of IGBT bond wires [J]. Micromachines, 2026, 17 (1): 70.
- [4] 王志远. 牵引逆变器故障诊断及容错控制策略 [D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
Wang Zhiyuan. Traction inverter fault diagnosis and tolerant control strategies [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,

2015.

- [5] Zhu Wei, Li Chenyu, Xiao Xiaoyan, et al. Diagnosing urban rail transit vehicles with FMEA and fuzzy set [J]. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2015, 21 (3): 332-345.
- [6] WANG W J, LIN X G, LIN D J. Research on fault simulation technology of rail transit sensor based on FMEA analysis[C]// CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd. (China), 2021: DOI:10.1117/12.2602991.
- [7] 李浩宇. 关于地铁车辆可靠性评估与维修决策技术研究 [J]. 中国设备工程, 2023 (15): 50-52.
Li Haoyu. Research on reliability evaluation and maintenance decision technology of subway vehicles [J]. China Plant Engineering, 2023 (15): 50-52.
- [8] 高明亮, 高珊, 于闯, 等. 融合 RCM、PHM 和数据挖掘的城市轨道交通车辆维护决策技术研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24 (2): 64-68.
Gao Mingliang, Gao Shan, Yu Chuang, et al. Research on urban rail transit vehicle main-tenance decision-making technology in-tegrating RCM, PHM and data mining [J]. Urban Mass Transit, 2021, 24 (2): 64-68.
- [9] 陈依新. 可靠性、可用性、可维修性和安全性 (RAMS) 指标管理在上海轨道交通车辆维护保障中的应用 [J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22 (9): 156-159.
Chen Yixin. Application of RAMS index management in operation and maintenance of Shanghai metro vehicles [J]. Urban Mass Transit, 2019, 22 (9): 156-159.
- [10] 陶瑞, 陶良彦, 方志耕. 面向正向设计的民机 PHM 系统集成框架设计与验证路径研究 [J]. 现代信息科技, 2026, 10 (6): 169-174, 179.
Tao Rui, Tao Liangyan, Fang Zhigeng. Research on the design of integration framework and verification path for civil aircraft PHM systems oriented to forward design [J]. Modern Information Technology, 2026, 10 (6): 169-174, 179.
- [11] 殷培强, 张鹏, 张宝朋, 等. 基于 SOC 的列车牵引 PHM 系统研究与设计 [J]. 智慧轨道交通, 2026, 63 (2): 6-11.
Yin Peiqiang, Zhang Peng, Zhang Baopeng, et al. Research and design of a SOC-based PHM system for train traction [J]. Intelligent Rail Transit, 2026, 63 (2): 6-11.
- [12] 李娟, 吴霞, 郭心全, 等. 普速铁路线路设备 PHM 系统设计与实现 [J]. 铁路计算机应用, 2026, 35 (3): 47-53.
Li Juan, Wu Xia, Guo Xinquan, et al. Fault prognostics and health management system for track equipment on ordinary-speed railways [J]. Railway Computer Application, 2026, 35 (3): 47-53.
- [13] Younus H, Kabir S, Campean F, et al. AI- and ontology-based enhancements to FMEA for advanced systems engineering: current developments and future directions [J]. Applied Sciences, 2026, 16 (5): 2464.
- [14] Geisbush J, Ariaratnam S T. Reliability centered maintenance (RCM): literature review of current industry state of practice [J]. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2023, 29 (2): 313-337.
- [15] 肖乾, 李楷文, 周生通, 等. 基于 MR-DCA 的滚动轴承微弱故障诊断 [J]. 华东交通大学学报, 2024, 41 (1): 113-119.
Xiao Qian, Li Kaiwen, Zhou Shengtong, et al. Research on MR-DCA based diagnosis of weak faults of rolling bearings [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41 (1): 113-119.
- [16] 赖伟, 李涵锐, 李辉, 等. 基于失效演化模拟的电力机车用 IGBT 模块解析剩余寿命建模研究 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44 (20): 8189-8200.
Lai Wei, Li Hanrui, Li Hui, et al. Analytical remaining lifetime modeling for electric locomotive IGBT modules based on failure evolution simulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44 (20): 8189-8200.
- [17] Wang Huan, Li Yanfu, Ren Jianliang. Machine learning for fault diagnosis of high-speed train traction systems: a review [J]. Frontiers of Engineering Management, 2024, 11 (1): 62-78.
- [18] 中国铁路总公司. 运辆动车函[2016]299 号. [R]. 北京: 中国铁路总公司, 2016.
CHINA RAILWAY CORPORATION. Yunliang dongche han [2016] 299 [R]. Beijing: China Railway Corporation, 2016.
- [19] Standardization} E C F E. Railway applications —The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS): Part 1: generic RAMS process}: EN 50126-1: 2017/A1: 2024 [S]. CEN-CENELEC, 2017

- [20] EN IEC 60812:2018, System reliability analysis procedures using failure mode and effects analysis (FMEA)[S]. Brussels: IEC, 2018.
- [21] Li Lie, He Yigang, Wang Lei, et al. IGBT lifetime model considering composite failure modes [J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2022, 143: 106529.
- [22] 魏利亨, 赵鹏, 乔珂, 等. 高速铁路动车组运用优化研究综述 [J]. 北京交通大学学报, 2025, 49 (2): 1-13.
Wei Liheng, Zhao Peng, Qiao Ke, et al. Review of optimization research on high-speed railway EMU operation [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2025, 49 (2): 1-13.
- [23] 赵晓明. 动车组高级修检修停时优化研究 [J]. 中国铁路, 2020 (10): 62-65.
Zhao Xiaoming. Study of optimization of stopping time for high-level maintenance and inspection of EMUs [J]. China Railway, 2020 (10): 62-65.



通信作者: 裴春兴 (1961—), 男, 正高级工程师, 博士, 中车资深专家, 研究方向为轨道车辆智能运维和人工智能技术。