

HXD1 型牵引变流器模块检修数据研究及运用

杨胜芳 代良志 黄剑龙

国能朔黄铁路发展有限责任公司机辆分公司 062350

【摘要】HXD1型电力机车牵引变流器是机车运行的核心部件，其可靠性直接影响列车运行安全。以某铁路公司近三年的变流器模块检修数据为切入点，通过故障数据挖掘分析，揭示了IGBT元件失效、驱动板振动损坏、网压波动等主要故障机理。研究表明，故障发生集中在运行里程120万-200万公里区间，占比达75.6%。针对关键问题，提出了基于振动优化的驱动板线束改进方案、网压波动保护策略以及检修周期优化建议。本研究旨在提升牵引变流器检修质量，延长设备使用寿命，为同类机车检修策略优化提供参考依据。

【关键词】牵引变流器；检修数据；故障分析；IGBT；维护优化

Research and application of maintenance data of HXD 1 traction converter module

Yang Shengfang Dai Liangzhi Huang Jianlong

Energy Shuohuang Railway Development Co., LTD. Machinery Branch 062350

【Abstract】The traction converter of HXD 1 electric locomotive is the core component of locomotive operation, and its reliability directly affects the safety of train operation. Taking the maintenance data of converter module of a railway company in recent three years as the starting point, through the fault data mining analysis, the main failure mechanism of IGBT element failure, drive plate vibration damage and network pressure fluctuation is revealed. The research shows that the failure is concentrated in the running mileage range of 1.2 million to 2 million kilometers, accounting for 75.6%. According to the key problems, the improvement scheme of drive plate wire harness based on vibration optimization, network pressure fluctuation protection strategy and maintenance cycle optimization suggestions are put forward. The study aims to improve the maintenance quality of traction converter, prolong the service life of equipment and provide reference for the optimization of maintenance strategies of similar locomotives.

【Key words】traction converter; maintenance data; fault analysis; IGBT; maintenance optimization

机车牵引变流器作为控制机车牵引动力的核心装置，其性能和可靠性直接影响列车运行效率和安全。目前，国内HXD1型机车普遍面临变流器模块检修周期不合理、故障预测能力不足等问题。现有研究多集中在单一故障分析，缺乏对检修数据的系统挖掘与应用。基于某铁路公司2020—2023年检修数据统计，变流器故障导致的机车停运时间占总停运时间的38.2%，其中IGBT器件失效和驱动系统故障占比最高。针对这一现状，从故障数据特征分析入手，结合失效机理研究，建立预防性维护体系，制定差异化检修策略，对提升机车运行可靠性具有重要实践意义。

一、变流器模块结构与原理

（一）系统组成及功能

HXD1型机车牵引变流器模块由功率单元、驱动控制电路及冷却系统构成复杂的集成系统。功率单元采用先进的IGBT功率器件，搭载双极性晶体管与金属氧化物场效应管，实现大功率开关控制。驱动控制电路内置智能控制芯片，配备过流保护、过压保护及短路保护等多重防护机制，确保变流器安全稳定运行。冷却系统采用强制风冷方式，通过热管散热技术维持器件工作温度在85℃以下^[1]。变流器模块在机车运行过程中承担着交一直—交电能转换重任，输入侧将机车受流系统的交流电转换为直流电，输出侧再将直流电逆变为适应牵引电机运行要求的交流电。模块内部集成的电流、电压传感器实时监测运行参数，为故障诊断提供数据支持。

（二）整流逆变工作机制

HXD1型机车牵引变流器采用四象限整流逆变技术，实现双向能量流动控制。如图1四象限整流原理图所示，整流过程中，变流器将来自接触网的25kV交流电经过主变压器降压后，通过IGBT构成的整流桥电路（S1-S4）转换为直流电。整流桥采用PWM控制策略，通过调节IGBT导通角实现输入电流正弦波形，使功率因数达到0.99以上。直流母线电压稳定在2800V左右，经中间直流回路储能电容CD滤波后输送至逆变单元。在逆变阶段，变流器依据牵引计算要求，采用SVPWM调制技术将直流电转换为频率可调的三相交流电，驱动牵引电机。逆变单元输出电压频率范围为0-120Hz，满足机车不同工况需求。制动工况下，牵引电机切换为发电模式，逆变器转为整流工作状态，将再生制动能量回馈至接触网，提升系统能量利用效率。

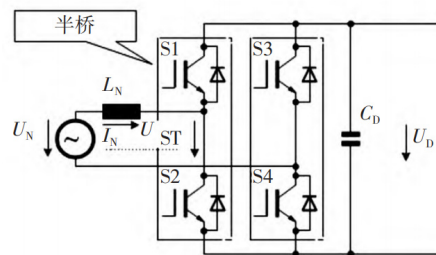


图1 四象限整流原理图

（三）监测保护技术体系

牵引变流器模块配备多层次监测保护体系，确保设备安

全稳定运行。变流器控制系统通过分布式架构，在 IGBT 驱动电路层面实现过流、短路等故障的快速检测与保护。驱动板检测到异常信号后，在微秒级响应时间内切断 IGBT 栅极信号，同时将故障信息通过光纤传输至脉冲分配板^[2]。脉冲分配板接收故障信号后立即封锁其他功率单元的触发脉冲，并向传动控制单元（DCU）发送故障代码。DCU 根据故障类型和严重程度，执行相应的保护策略，包括单个模块隔离、整架封锁或全车保护等级联动。系统还设置了电流互感器、电压传感器等多重检测单元，实时监控运行参数，形成完整的数据采集与诊断分析链路。

二、故障数据特征分析

（一）数据采集处理方法

本研究从 HXD1 型机车变流器检修档案系统中提取了完整的故障维修记录，建立了涵盖故障类型、维修时间、运行里程、处理措施等多维度信息的结构化数据库。如表 1 所示，通过专业的数据分析工具，对所有故障记录进行预处理和分类整理，剔除信息不完整的样本后获得高质量故障案例集。研究采用时间序列分析方法，以标准检修周期为基准将故障数据进行分组，建立故障发生规律与运行里程的映射关系。同时运用统计学聚类方法对故障类型进行特征提取，重点关注 IGBT 器件失效、驱动系统故障等关键项目，通过数理统计手段揭示故障模式分布规律，为检修策略优化提供可靠的数据支撑。

表 1 变流器模块故障数据采集内容

数据类别	采集内容	数据形式
故障信息	故障类型、故障代码、故障现象	文本、代码
时间信息	故障发生时间、维修完成时间	时间戳
运行参数	运行里程、工作时长	数值型
处理信息	维修措施、更换部件、检测结果	文本
环境因素	工作温度、振动数据	数值型

（二）典型故障分布规律

通过对变流器模块故障数据的统计分析，揭示了故障分布的显著特征。如表 2 所示，在 171 起有效故障案例中，接触器故障占比最高达 36%，主要涉及交流接触器（Q101/Q201）和辅助电源断路器（K111/K211）。IGBT 功率器件失效与驱动系统故障分别占比 28%和 15%，构成变流器故障的主要类型。温度传感器故障占比 12%，其中电机温度传感器异常占据主导地位^[3]。从部件层面分析，频繁动作部件、信号采集单元和功率器件成为故障易发区域，这与其承受的机械应力、电气应力密切相关。值得注意的是，部分故障呈现出明显的关联性，如驱动系统故障往往伴随着 IGBT 器件的异常表现。

表 2 变流器模块典型故障分布

故障类型	故障数量	占比（%）	主要故障部件
接触器故障	62	36	Q101/Q201, K111/K211
IGBT 失效	48	28	功率单元
驱动系统故障	26	15	驱动板、控制电路
传感器故障	21	12	温度传感器
其他故障	14	9	辅助电路等

（三）时间序列特征研究

研究对变流器故障数据进行时间序列分析，发现故障发生具有明显的里程分布特征。将故障数据按 10 万公里间隔统计，故障频率在 120 万–200 万公里区间达到峰值，占总故障数的 75.6%。其中 140 万–160 万公里区间故障最为集中，占比达 24.4%。通过对故障时序特征深入分析发现，设备可靠性随运行里程增加呈现明显的劣化趋势，在 100 万–150 万公里期间，故障率随里程增加而逐渐升高；而在 150 万–190 万公里区间，故障率呈现逐步下降趋势。特别值得注意的是，C4 检修（150 万–180 万公里区间）后的 90 万–100 万公里区间故障率降至最低，表明定期检修对故障预防具有显著效果^[4]。这种分布规律揭示了设备可靠性随运行里程呈现出典型的“浴盆曲线”特征，为制定差异化检修策略提供了重要依据。

（四）故障关联性研究

通过数据挖掘技术对变流器故障记录进行深入分析，发现多种故障类型之间存在显著的关联特征。IGBT 器件失效与驱动系统故障表现出较强的耦合性，约 83%的 IGBT 失效案例伴随着驱动板异常信号。变流器模块振动与驱动板脉冲线断裂故障也呈现明显的相关性，实测数据显示驱动板垂向振动超出国标 GB/T 21563 要求约 2 倍，在 51Hz 和 74Hz 频段出现共振峰值。温度传感器故障往往导致系统保护策略触发，引发模块转矩受限甚至封锁。研究还发现网压波动与 IGBT 损坏之间存在因果关系，当网压降至 19kV 以下时，网侧变流器输入电流将超过 IGBT 额定值 2430A，长期波动可能导致器件失效。这些关联特征为故障诊断和预防性维护提供了重要参考。

三、模块失效机理研究

（一）IGBT 器件失效分析

IGBT 器件失效呈现出两种典型模式：单管变桥臂直通和模块桥臂直通。通过波形分析发现，当单个 IGBT 器件发生失效时，驱动电路检测到异常电流信号，在微秒级时间内切断栅极驱动，同时触发保护策略封锁其他功率单元。而模块桥臂直通故障则表现为上下桥臂同时导通，引起直流母线短路，系统检测到过流信号后快速封锁所有 IGBT 触发脉冲。实验数据显示，在网压低于 19kV 工况下，网侧变流器输入电流可达 3000A，远超 IGBT 额定电流 2430A，长期过流运行导致器件热应力积累。同时，变流器并联运行时的均流特性对 IGBT 寿命也产生显著影响，电流分配不均会加速器件劣化。这些失效特征为 IGBT 器件的选型优化和保护策略改进提供了重要依据。

（二）控制系统故障机制

变流器控制系统故障主要涉及驱动板、脉冲分配板及传动控制单元（DCU）三个层级。驱动板负责 IGBT 栅极信号控制，通过光纤接收脉冲分配板发出的控制指令，并将检测到的故障信息反馈至上层控制单元。研究表明，驱动板故障多由振动引起，测试数据显示其垂向振动在 51Hz 和 74Hz 频段出现共振，振幅超出设计标准值 2 倍。脉冲分配板承担死区时间控制和最小脉宽处理功能，其异常往往导致 IGBT 开通时序失调。DCU 作为最高层控制器，执行故障诊断和保护策略，当接收到下级设备报警信号后自动进行故障等级

判断,根据严重程度实施单模块隔离或整架封锁等保护措施。这种多层级控制架构虽提高了系统可靠性,但也增加了故障诊断的复杂度。

(三) 环境因素影响评估

外部环境因素对变流器模块可靠性产生显著影响。现场测试数据表明,机车运行时的路谱振动已超出设计标准要求,驱动板安装点测得的垂向振动达到国标 GB/T 21563 规定值的 2 倍以上。此类振动长期作用导致驱动板线束承受剪切应力,引发脉冲线疲劳断裂。同时,线路网压波动对 IGBT 器件寿命影响显著,特别在 13‰坡道区段,满功率工况下输入电流接近 1540A。当网压低于 19kV 时,电流峰值可达 2410A,接近 IGBT 额定值临界点。此外,变流器水冷系统的散热性能随环境温度变化而波动,高温天气下冷却效果下降,加剧了功率器件的热应力积累。这些环境因素的耦合作用成为影响设备可靠性的重要原因。

(四) 核心部件寿命研究

变流器核心部件的寿命特性研究对优化检修周期具有重要指导意义。通过对检修数据分析发现,IGBT 功率器件在运行 120 万-200 万公里区间进入寿命快速衰减期,故障率显著提升。而交流接触器(Q101/Q201)和辅助电源断路器(K111/K211)等频繁动作部件的寿命周期相对较短,在 110 万-160 万公里区间故障率达到峰值。温度传感器和驱动板等信号采集控制部件则表现出较为分散的失效分布,其中驱动板脉冲线在振动环境下的平均使用寿命约为 130 万公里。研究表明,谐振电容、接地检测电容等静态元件具有较长的使用寿命,首次故障普遍出现在 200 万公里以后,这为调整 C6 修程必换件清单提供了数据支持。

四、检修优化策略研究

(一) 数据挖掘分析方法

本研究建立了基于 Python 的变流器检修数据挖掘分析平台,实现故障特征的自动识别与分类。通过数据预处理技术对原始检修记录进行清洗,剔除异常值和缺失项,构建标准化的故障样本库。利用时间序列分析方法研究故障发生规律,采用聚类算法对故障类型进行特征提取和模式识别^[5]。针对关键部件的寿命特性,运用概率统计模型建立故障预测机制,结合机车运行工况数据,实现对部件剩余寿命的准确评估。系统还整合了设备状态监测数据,通过关联规则挖掘

算法揭示故障之间的内在联系,为检修决策提供数据支撑,实现检修资源的优化配置。

(二) 预防性维护优化

基于故障数据分析结果,研究提出了变流器模块的差异化预防性维护策略。针对 IGBT 功率器件在 120 万-200 万公里区间故障率高发的特点,建议在 C4 修时增加器件特性测试项目,对关键参数超标器件进行预防性更换。考虑到驱动板振动问题,优化了安装结构并改进了脉冲线连接工艺,采用热缩式端子替代传统压接方式,有效提升了线束抗振性能。针对网压波动引起地过流风险,在控制软件中增加了网压异常判断功能,当检测到连续波动超过设定阈值时,系统自动降低功率输出。同时,优化了故障自动复位和隔离功能,采用组合式诊断方法对故障进行分级处理,实现故障的精准定位和快速处置。

(三) 工艺改进措施

针对变流器检修过程中发现的技术问题,研究制定了系统性的工艺改进方案。在驱动板安装环节,采用新型减振结构降低振动传递,并对脉冲线连接方式进行优化,引入热缩式端子替代传统压接工艺,热缩管在吹缩过程中释放的胶状物质能有效包裹导线绝缘层,显著提升了线束抗振性能。对 IGBT 模块检修,强化了并联均流特性测试,完善了器件筛选标准,建立了关键参数数据库用于趋势分析。在 C6 修必换件管理方面,基于寿命特性研究结果,对谐振电容、接地检测电容等静态元件的更换周期进行了优化调整,延长至 360 万公里。这些工艺改进措施经实践验证,有效提升了检修质量和设备可靠性。

结束语:

综上所述,HXD1 型机车牵引变流器作为核心动力装置,其可靠性直接影响机车运行安全。通过对检修数据的系统分析,揭示了故障发生规律和失效机理,为优化检修策略提供了科学依据。研究表明,应加强对 IGBT 器件、驱动系统等关键部件的预防性维护,完善故障诊断和保护策略,优化检修工艺和质量控制体系。同时,建议调整部分静态元件的更换周期,实现检修资源的合理配置。这些优化措施的实施,将有效提升变流器模块的运行可靠性,降低维护成本,对提高机车运营效率具有重要的实践意义。

参考文献

- [1]丁杰.HXD1 型电力机车牵引变流器风机振动测试分析[J].机电工程技术, 2023, 52 (02): 59-62+144.
 - [2]龚菊芳.HXD1 型牵引变流器模块检修数据研究及运用[J].电器工业, 2022, (07): 35-38+47.
 - [3]丁杰,殷仁述,熊英,等.HXD1 型电力机车牵引变流器的线路振动测试及分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2022, 35 (02): 100-107.
 - [4]吴勇忠.浅析 HXD1 型电力机车牵引变流器突出故障与处理[J].科技展望, 2016, 26 (33): 28.
 - [5]欧健.HXD1 型电力机车牵引变流器故障诊断研究[D].中南大学, 2014.
- 作者简介: 杨胜芳(1982.9-)男, 贵州黄平人, 大学本科, 工程师, 研究方向: 铁路机车电工检修专业。