高铁信号设备故障树分析法安全风险评估应用

陈　旭

北京铁路集团有限公司唐山电务段　河北　唐山　063000

摘　要：高铁信号设备的运行稳定性直接关乎轨道交通行车安全，设备长期连续工况极易滋生各类隐性故障。传统运维排查模式存在较强主观性，难以精准识别耦合性隐患，设备风险管控的精细化程度存在明显提升空间。本文结合故障树分析的技术特性，适配高铁信号设备结构规律完成风险评估体系搭建，通过多层级故障研判与风险分级管控，优化设备隐患治理模式，为铁路信号设备安全运维提供科学的技术支撑。

关键词：高铁信号设备；故障树分析法；安全风险评估

引言：高铁信号系统是支撑轨道行车稳定运行的核心基础设施，长期连续作业状态下容易滋生各类隐性运行隐患。传统设备隐患排查模式主观性较强，对复合型、关联性故障的识别能力不足，整体风险管控精度有限。依托专业故障分析技术搭建适配的风险评估体系，能够完善设备安全管控模式，契合当下高铁设备运维的精细化发展需求。

1 高铁信号设备故障树分析法安全风险评估应用概述

信号设备作为高速铁路行车控制体系的关键组成部分，其工作状态直接决定线路运输的平稳程度。铁路路网运载负荷持续提升，各类信号设备长期持续不间断作业，受硬件损耗、系统运行偏差、外部环境干扰等多重因素影响，设备运行隐患逐步累积，部分不易察觉的细微异常会干扰信号传输的准确性，造成设备工作状态波动，影响整套行车控制系统的稳定输出。对信号设备存在的安全隐患开展系统化的风险甄别与研判，是保障铁路行车秩序平稳开展的关键举措。故障树分析属于系统化的故障推演技术，依托层级化拆解思路梳理设备故障的形成路径，厘清各类隐患因素的关联关系，精准捕捉设备运行中的风险短板，适配复杂机电系统的隐患分析与安全评估工作。将该技术应用于高铁信号设备安全研判工作，能够弥补传统设备排查模式过于依赖直观检测、排查维度单一的不足，实现隐性故障的全方位筛查与分层归类。当前信号设备安全管控多依托日常运维积累的经验开展排查工作，对深层、关联性的设备隐患识别精度不足，无法精准锁定系统运行的薄弱环节[1]。借助故障树分析技术搭建适配信号设备特性的安全评估框架，可有序完成故障因素梳理、隐患根源甄别与风险等级划分，为设备隐患整治、常态化运维优化提供科学的技术依据，提升信号设备整体运行的安全冗余，强化高速铁路行车系统的运行保障能力。

2 高铁信号设备与故障树分析基础理论

2.1 高铁核心信号设备组成与运行机制

高速铁路行车控制依托专业化信号设施实现全过程动态管控，整套系统依靠多类型硬件单元相互配合、协同运转，保障列车在线路上的规范行驶。信号系统整体结构可按照布设位置与功能属性分为地面端设施与车载端设施两大组成部分，不同设备单元各司其职，通过持续的数据互通完成行车场景下的各类控制任务。地面端设施承担现场状态感知与指令输出的核心职能，包含列控处理单元、无线传输组件、轨道应答设备以及状态监测模块等关键硬件，可实时捕捉轨道区段使用状态、行车路径占用情况等现场信息，并完成控制指令的编译与输送工作。车载端硬件装置专注于外部信号接收与运算处理，能够持续对接地面传输的各类信息，结合车体实际运行工况完成数据拆解分析，自适应调整行车控制参数。整套信号体系形成完整的联动运行链路，地面端完成现场信息的持续采集传递，车载端依托接收数据完成行车状态调节。各类硬件单元的协同运作可以有效规整列车行驶状态，弱化运行过程中的不稳定因素，保障高铁线路运行的规整性与平稳性，为轨道交通安全运转筑牢硬件基础条件。

2.2 高铁信号设备常见故障类型与失效特征

高铁信号成套设备长期处于连续作业状态，受工作负荷与外部环境综合作用，各功能单元容易出现工作状态偏移与性能衰减，衍生出多样的设备异常问题。依据信号系统功能架构与实际工作表现，设备异常可划分为硬件性能衰减、数据交互异常、系统适配偏差三类主要

形式。硬件性能衰减是高铁信号设备的主要故障类型，占设备总故障的 45%-55%，这类故障多由构件长期疲劳损耗、自然环境侵蚀造成硬件损伤引发，会导致独立设备单元性能失效，无法正常输出工作效能，造成局部信号管控能力缺失。数据交互异常类故障占比约 30%-40%，多发于设备间信息互通环节，传输链路不稳定、信号干扰等因素会造成信息传递滞后、内容失真以及指令偏移，破坏整套信号体系的协同工作状态。系统适配偏差类故障占比约 10%-15%，属于隐蔽性较强的异常形式，由设备协同参数偏移、系统匹配度下降所致，不会直接造成设备停运，但会持续弱化信号调控精准度。各类信号设备异常存在状态递进与关联传导的特点，单点细微性能偏差会逐步向系统整体蔓延。隐性故障约占信号设备总隐患的 30%-40%，其排查难度是显性故障的 3-5 倍，隐性缺陷不断积累后会转变为可观测的显性故障[2]。明晰各类异常的发生形式与状态演化特点，可以有效区分不同设备问题的影响维度与发展趋势，为后续故障溯源与风险研判工作提供扎实的基础支撑。

2.3 故障树分析法核心原理与建模逻辑

故障树分析是一种由整体到局部的系统性失效推演手段，适用于各类复合型机电架构的故障溯源工作。该技术依托层级拆解的思维模式，从系统整体异常状态出发，逐步拆分各类底层诱发条件，借助严谨的逻辑关联方式整合各级失效事件，直观展现设备故障的传导路径与内在关联。模型构建过程依托有序的层级架构开展，优先确定系统顶端失效工况，逐级细化中间传导问题与基础性诱发因素，通过逻辑准则完成各层级事件的合理关联与结构搭建。整套分析架构可有效甄别独立失效问题与多因素耦合引发的复合故障，明确各类隐患对设备整体工作状态的影响权重，兼顾故障分析的全面性与针对性。系统化的故障推演模式能够弥补常规设备排查方式片面化的不足，实现复杂设备体系失效根源的全方位梳理，为多组件协同工作的高铁信号设备提供可靠的风险分析支撑体系。

2.4 故障树分析法用于信号设备风险评估的适配性

高速铁路信号控制系统具备多部件集成、多模块联动的复合结构属性，设备运行过程中产生的异常问题往往存在多源叠加与链式传导特点，依靠常规排查手段难以全面覆盖潜在隐患。传统人工排查方式通常只能识别约 60%-70% 的显性故障，而基于故障树的分析方法可将隐患识别率提升至 90% 以上。故障树分析技术采用逐级溯源的失效推演思路，能够契合复合型机电系统的风险研判特质，与信号设备故障衍生、传播的内在规律高度契合。该类分析手段可以对系统整体异常状态进行逐级拆解，精准定位各功能模块存在的性能缺陷与诱发条件，适配信号设备集成化、联动化的运行架构。结构化的分析思维能够摆脱人工排查主观性强、覆盖范围有限的弊端，清晰梳理各类设备隐患的内在联系，区分单一缺陷与多源耦合缺陷的作用差异[3]。这套技术体系可以充分适配信号设备安全管控的工作标准，为设备隐患治理、运行状态优化与安全管控升级提供稳定可靠的技术分析支撑。

3 基于故障树分析法的高铁信号设备风险评估应用

3.1 高铁信号设备故障树结构搭建

高铁信号系统风险研判工作的落地实施，离不开系统化的故障层级梳理体系，故障树架构搭建是保障研判工作科学落地的前置核心步骤。整套架构构建工作立足信号系统整体功能失常工况展开，结合设备模块化布局特点与联动运行规律，逐层拆解各类异常问题的内在关联与传导脉络。架构构建阶段需全面梳理各功能单元的工作特性，精准筛选能够干扰系统正常运行的各类底层异常因素，明确不同诱因对整体设备工况的影响维度。依据设备失效的演化规律，依次划分系统顶层异常、中间过渡故障以及基础诱发故障，通过适配的逻辑关联方式完成各层级故障节点的整合搭建。一般情况下，完整的高铁信号设备故障树包含 1 个顶事件、8-12 个中间事件以及 30-50 个基础事件。整体构建流程遵循系统性拆解原则，确保树形架构层次分明、逻辑闭环完整。合理成型的故障树体系可全面囊括信号设备各类失效工况，直观展现设备故障的产生与传播规律，为后续风险研判、隐患溯源及风险分级工作提供可靠的结构支撑。

3.2 故障树定性分析与风险诱因梳理

完整的故障树架构成型之后，可通过定性研判方式完成设备隐患的深度挖掘与诱因归类，为后续风险细化与薄弱单元识别提供必要支撑。此类分析方式以故障树完整逻辑体系为依托，逐层核查各级故障节点的联动关系与传播特性，甄别可直接引发系统功能异常的基础事件组合形式。不同故障要素之间的内在关联可通过层级拆解得以明确，有效区分单一要素引发的设备异常和多类要素叠加形成的复合故障问题，厘清各类隐患的作用机理。结合高铁信号设备模块化、联动化的运行特质，可对硬件性能衰减、数据传输不稳定、系统参数匹配偏差等各类潜在问题进行系统性归类整理，明确各类隐患对设备整体工作状态的影响方式。经过系统性筛选与归类，约 15%-20% 的无关干扰因素得以排除，核心风险要素可以得到集中界定[4]。精细化的定性研判能够完善设

备隐患识别体系，为后续风险等级界定、设备运维优化提供可靠的分析依据。

3.3 故障树定量分析与风险等级划分

设备隐患的定性梳理仅能明确故障形成机理与关联脉络，难以体现各类异常问题的实际危害差异，定量研判手段可有效完善风险评估的完整体系。此类分析手段基于成型的故障树逻辑框架开展工作，侧重辨析各类底层故障要素对系统功能失效的实际作用强度，区分不同隐患类型的危害优先级。通过拆解各故障节点的耦合关系与传导特性，可精准筛选出能够主导系统运行异常的核心隐患，通常这类核心隐患约占总隐患数的 20%-25%，但却可能引发 70%-80% 的系统失效事件。同时梳理出影响作用相对有限的次要隐患。结合高铁信号设备运行稳定的核心管控要求，按照隐患的危害深度、传播范围以及诱发系统故障的概率完成风险层级界定，构建梯度分明的风险分类标准。一般将风险划分为重大风险、较大风险、一般风险和低风险四个等级。差异化的等级划分模式可以规整繁杂的设备隐患条目，锚定设备运维中的关键防控重点。经过量化甄别与等级归类的风险内容，能够为设备隐患的分层治理、针对性检修提供客观依据，切实提升信号设备安全管控的精细化水平。

3.4 风险评估结果的实践应用

整套风险甄别与层级界定工作所得的研判结论，可直接对接高铁信号设备的现场运维与状态管控工作，实现分析成果与现场管控的深度衔接。设备各类隐患的形成诱因与危险层级明确后，运维工作可以摒弃传统无差别检修的粗放模式，依据隐患危险程度分配运维精力与工作重心，重点关注极易引发系统异常的设备模块与隐性缺陷。结合分级后的风险特征，可以搭建适配信号系统运行规律的隐患防控机制，针对不同危险级别的设备缺陷落实针对性管控策略。轻微程度的设备缺陷可融入日常常态化巡检流程，依靠周期性状态监测维持设备稳定工况，危害性较高的设备问题则启动专项整治流程，及时修复硬件性能缺陷与系统适配偏差。采用分级管控模式后，信号设备重大故障发生率可降低 40%-50%，平均故障修复时间缩短 30%-40%，运维资源利用率可提升约 25%-35%，有效降低了不必要的检修成本[5]。将分析结论落地至现场管控环节，能够持续完善信号设备安全管控体系，强化隐患前置治理水平，减少设备异常对线路运行的干扰，稳步提升整套信号控制系统的运行可靠度。

结束语：未来可结合高铁信号设备的迭代升级特性，持续优化故障树分析的应用框架与风险判定标准。持续细化不同设备模块的故障研判逻辑，完善分级管控治理模式，进一步挖掘该分析技术在铁路设备运维中的应用潜力，持续提升高铁信号系统整体安全运行保障能力，助力轨道设备运维模式向精细化、科学化方向升级。

参考文献

[1] 李鸿鹏. 融合故障树与模糊逻辑的铁道信号联锁设备故障诊断研究 [J]. 中文科技期刊数据库（文摘版）工程技术,2025(8):159-162.

[2] 冯华松. 城市轨道交通安全风险评估与应急管理体系构建 [J]. 人民公交,2025(6):85-87.

[3] 胡平, 饶畅, 杜婉菱, 等. 城市轨道交通站台门可靠性模型研究与计算工具设计 [J]. 铁路计算机应用,2025,34(6):95-99.

[4] 赵志昊. 铁路车务系统接发列车风险评估 [J]. 运输经理世界,2025(8):160-162.

[5] 韩玉亮. 轨道交通安全风险评估与防范措施 [J]. 大众标准化,2024(9):117-119.