

基于 T-S 模糊故障树与多维多态建模的动车组制动系统可靠性分析

李欢

兰州交通大学, 机电工程学院

DOI:10.12238/acair.v3i3.15619

[摘要] 针对动车组制动系统各部件之间逻辑关系模糊,难以解决制动系统多维性、多态性与不确定性量化的问题,提出一种T-S模糊故障树与多维建模的动车组制动系统可靠性分析方法。首先,利用多态事件状态描述方法表征部件和系统的多态特性,并采用T-S门规则建立多态事件间的静态关联关系。其次,综合考虑运行时间与环境湿度等影响因素,推导出部件在多种因素作用下的故障概率分布及密度函数。在此基础上,通过多维多态输入态输出规则算法实现制动系统的可靠性评估。研究进一步提出了多维多态T-S故障树重要度分析模型,通过与常规T-S方法对比验证,证实了所提方法能更准确地识别多因素耦合作用下制动系统的关键薄弱环节,为系统故障预警与维护策略制定提供了理论支撑。

[关键词] 动车组; 制动系统; T-S故障树; 多维; 多态

中图分类号: U266 **文献标识码:** A

Reliability analysis of EMU braking system based on T-S fuzzy fault tree and multi-dimensional modelling

Huan Li

LANZHOU JIAOTONG UNIVERSITY, School of Mechanical Engineering

[Abstract] In order to solve the problem of multi-dimensionality, polymorphism and uncertainty quantification of the braking system due to the fuzzy logical relationship between the components of the EMU braking system, a reliability analysis method of EMU braking system based on T-S fuzzy fault tree and multi-dimensional modelling was proposed. Firstly, the polymorphic event state description method is used to characterize the polymorphic characteristics of components and systems, and the T-S gate rule is used to establish the static correlation between polymorphic events. Secondly, considering the influencing factors such as running time and ambient humidity, the failure probability distribution and density function of the component under the action of various factors are derived. On this basis, the reliability evaluation of the braking system is realized by the multi-dimensional and multi-state input-state output rule algorithm. The multi-dimensional polymorphic T-S fault tree importance analysis model is further proposed, and the comparison and verification with the conventional T-S method confirms that the proposed method can more accurately identify the key weak links of the braking system under the coupling of multiple factors, and provides theoretical support for the formulation of system fault warning and maintenance strategies.

[Key words] EMU; braking system; T-S fault tree; Multidimensional; Polymorphism

引言

作为保障列车运行安全的关键子系统,制动系统的性能直接影响列车的减速过程控制、精准停靠以及紧急情况下的制动效能,其运行可靠性是确保行车安全与乘客生命安全的重要前提。在动车组制动系统可靠性研究领域,多位学者提出了创新性

分析方法。夏丹峰等^[1]采用模糊故障树技术来表征制动系统各事件间的关联特性,有效处理了事件关联的不确定性。通过融合故障树分析与模糊数学理论,解决了制动系统故障概率的模糊性和不确定性问题。然而,这些方法仅适用于二态系统,难以量化评估部件状态变化对系统整体性能的影响。针对上述问题,

基于T-S模糊故障树方法,对制动装置在多故障耦合作用下的可靠性参数进行了量化研究。创新性地运用模糊数学原理,将专家经验知识通过模糊集理论转化为可计算的隶属度函数,实现了对系统关键部件影响程度的定量分析。在解决多态失效特征表征方面,开发了模块化多态故障树与决策图融合算法,有效提升了复杂系统关键度分析的精度。进一步整合多态系统理论、模糊逻辑和群体决策方法,构建了具有动态适应性的多态T-S混合评估模型。贾存霄等^[2]通过建立分层模糊故障树,系统解析了顶事件多维失效状态的传播机制,最终准确定位了制约制动系统可靠性的关键组件集合。

然而现有研究方法主要聚焦于服役时间这一单一因素,未能充分考虑制动系统及其关键部件的可靠性受多种环境因素影响的特性。在复杂工况下,制动系统的可靠性不仅随时间演变,还受到外部环境湿度等多重因素的共同作用。为解决多因素耦合影响下的系统可靠性评估难题,学界已提出若干创新方法:采用空间曲面建模技术,将传统故障树的结构复杂性转化为高维数学空间的可解析问题,为复杂系统分析提供了新范式。突破单一因素分析局限,研发了融合多源影响因素的多维T-S故障树框架,并配套开发了权重重要度量化指标体系,揭示了多因素交互对系统可靠性演化的作用机理。基于现有研究在多状态事件关联分析方面的局限性,本文创新性地引入多维多态T-S混合建模方法,通过改进的T-S门规则与求解算法,构建了面向多因素耦合场景的可靠性评估模型。该模型能精确表征制动系统在多影响因素作用下的状态演化规律,最终为可靠性阈值的智能预警机制与精准维护策略做理论指导。

1 T-S模糊故障树理论知识

假设基本事件 $x_i (i=1,2,\dots,n)$, 上级事件 $y_j (1,2,\dots,p)$,

事件故障状态可描述为模糊数 $(x_1^1, x_1^2, \dots, x_1^{k1}), (x_2^1, x_2^2, \dots, x_2^{k1}), \dots,$

$(x_n^1, x_n^2, \dots, x_n^{kn})$ 和 $S_y^1, S_y^2, \dots, S_y^{kp}$, 其中:

$$\begin{cases} 0 \ll x_1^1 \ll x_1^2 \ll \dots \ll x_1^{k1} \ll 1; \\ 0 \ll x_2^1 \ll x_2^2 \ll \dots \ll x_2^{k2} \ll 1; \\ \dots \\ 0 \ll x_n^1 \ll x_n^2 \ll \dots \ll x_n^{kn} \ll 1; \\ 0 \ll S_y^1 \ll S_y^2 \ll \dots \ll S_y^{kp} \ll 1. \end{cases} \quad (1)$$

式中: n 表征概率空间内原子事件的总体数量,其值域由系统失效机理的完备性决定; k 反映单个元素事件可能存在的多态失效模式数目,该参数直接关联故障粒度的划分精度。

在T-S模糊门建模框架中,其逻辑关系通过模糊规则集进行形式化表征:当且仅当处于同一模糊规则作用域时,父节点事件 y 所有可能失效状态 S_y^{kp} 的隶属度概率分布必须满足完备性约束条件,即概率测度归一化特性 $p(y^n)$ 可表述为:

$$\sum_{n=1}^n p(y^n) = 1 \quad (2)$$

若基本事件的失效率为 $p(x_1^1), \dots, p(x_n^n)$, 则规则 l 执行可能性为:

$$p_o^l = p(x_1^1) p(x_2^2) \dots p(x_n^n) \quad (3)$$

得到 y_j (中间事件) 的模糊可能性为:

$$\begin{cases} p(y^1) = \sum_{l=1}^r p_o^l p^l(y^1) \\ p(y^2) = \sum_{l=1}^r p_o^l p^l(y^2) \\ \vdots \\ p(y^n) = \sum_{l=1}^r p_o^l p^l(y^n) \end{cases} \quad (4)$$

2 多维故障树模型构建

在我国复杂的铁路运营环境下,动车组制动系统面临着高频次、高负荷的运行工况,这使得系统故障风险显著提升。环境湿度对动车组制动系统的影响主要体现在以下方面:高湿度环境易导致制动盘与闸片摩擦副表面吸附水膜,降低有效摩擦系数,引发制动效能衰减;湿气侵入气动制动单元可能诱发管路冷凝,影响压力传递精度及响应速度;金属部件长期暴露于潮湿环境会加速氧化腐蚀,削弱结构强度并增加疲劳损伤风险。为确保制动性能稳定可靠,不仅需要考虑到运行时间对系统可靠性的影响,还需综合评估外部环境条件等多重因素,并根据不同工况动态调整制动策略,以优化系统各部件的匹配程度,保障制动功能正常发挥。本研究在考虑运行时间因素的基础上,进一步纳入环境湿度关键参数对系统可靠性的影响,使建立的可靠性模型更符合工程实际需求。具体分析流程如下:

(1) 多维T-S故障树模型构建。通过系统分析制动系统的技术规范、工作原理及典型故障模式,结合故障判据和事件间的逻辑关联,建立反映多因素影响的多维T-S故障树模型。

(2) T-S门规则体系建立。

在T-S模糊门规则建模过程中,基于规则自动化生成算法,系统化构建具有双向解析能力的模糊规则架构。

(3) 多态事件建模方法。使用模糊后的故障率来表征事件可靠性数据,综合考虑运行时间、环境湿度等影响因素,建立各因素作用下的故障概率分布模型。

(4) 可靠性指标求解与重要度分析。基于多维故障树模型,通过输入规则算法计算规则执行概率,结合输出规则求解上级事件可靠性指标;进而通过重要度分析识别关键影响因素和薄弱环节。

2.1 顶事件故障概率

针对制动系统可靠性分析的特殊需求,本研究采用多维多态T-S故障树求解算法。首先基于制动系统实际工况数据,首先

建立运行时间和环境湿度等多因素交互作用的基本事件故障概率分布模型,解决传统方法难以量化多因素耦合影响的局限性。其次采用多维多态T-S算法,通过模糊推理和概率转换技术,精确计算各规则的执行可能性,为后续分析提供量化基础。最后整合多维输出规则与T-S故障树顶端事件求解机制,构建完整的概率传递模型,最终输出制动系统在不同工况下的故障概率分布特征。

2.1.1 多维多态输入规则算法

在多因素耦合分析框架下,基于时间维度的单因素假设条件,基础故障事件 x_i 的失效行为可通过多态失效模型进行表征^[3]。其核心数理表达如下:

当事件 x_i 的离散失效状态集 x_i^{ki} 对应的概率密度函数 $\lambda(x_i = x_i^{ki})$ 已知时,其复合失效概率分布函数 $F_i^{x_i^{ki}}(t)$ 可定义为各状态概率密度的积分乘积形式:

$$F_i^{x_i^{ki}}(t) = \int_0^t f_i^{x_i^{ki}}(t) dt \tag{5}$$

式中: $f_i^{x_i^{ki}}(t)$ ——基本事件 x_i 故障状态为 x_i^{ki} 的故障概率密度函数。

引入 η 个独立影响因素后,事件 x_i 在多因素耦合作用下的失效概率分布呈现非线性叠加特性,其数学表达为:

$$F_i^{x_i^{ki}}(t, h_1, h_2, \dots, h_k) = 1 - [1 - F_i^{x_i^{ki}}(t)] \prod_{\rho=1}^{\eta} [1 - F_i^{x_i^{ki}}(h_{\rho})] \tag{6}$$

式中: $F_i^{x_i^{ki}}(h_{\rho})$ ——表征第 ρ 个外源激励对失效概率的调制作用。该模型通过概率补集运算,量化了多因素交互对系统失效路径的协同影响。

当事件在不同失效状态 $\{x_i^1, \dots, x_i^n\}$ 下具有独立失效率 $p(x_i^1), \dots, p(x_i^n)$ 时,基于多维多态输入规则算法的综合执行概率可推导为:

$$p_o^l = \prod_{i=1}^n F_i^{x_i^{ki}}(t, h_1, h_2, \dots, h_k) \tag{7}$$

该公式通过连乘运算构建了多因素、多状态耦合场景下的规则触发概率空间,为复杂系统动态可靠性分析提供了严格的数学基础。

2.1.2 多维多态输出规则算法

在多层次可靠性分析框架下,通过融合多维多态输出规则算法与规则触发概率合成机制,可针对每个规则 $l(l=1, 2, \dots, r)$ 构建上级事件 y 处于失效状态 S_y^{kp} 的概率密度分布模型,其数学表

征如式(8)所示:

$$F(y = S_y^{kp}) = \sum_{l=1}^r p_o^l p_{(l)}(y = S_y^{kp}) \tag{8}$$

式中: $p_{(l)}(y = S_y^{kp})$ 表征规则 l 作用下事件 y 各失效状态的条件概率权重。

基于事件 x_i 的多态失效特性,通过迭代计算可获得系统完整失效概率分布函数体系:

$$\begin{cases} F(y = S_y^1) = \sum_{l=1}^r p_o^l p_{(l)}(y = S_y^1) \\ F(y = S_y^2) = \sum_{l=1}^r p_o^l p_{(l)}(y = S_y^2) \\ \vdots \\ F(y = S_y^{kp}) = \sum_{l=1}^r p_o^l p_{(l)}(y = S_y^{kp}) \end{cases} \tag{9}$$

2.2 重要度分析

2.2.1 概率重要度

在多维多态T-S故障树模型中,概率重要度用于量化基本事件可靠性变化对系统可靠性的影响程度。具体而言,即多维多态T-S故障树概率重要度指基本事件 x_i 在 h_{ρ} 因素影响下发生故障时引起顶事件 T 发生故障的故障概率分布函数 $F_i^{x_i^{ki}}(t, h_1, h_2, \dots, h_k)$ 与基本事件 x_i 在 h_{ρ} 因素影响下不发生故障时引起顶事件 T 发生故障的故障概率分布函数 $F_i^{x_i^{ki}}(t, h_1, h_2, \dots, h_k)$ 的差值。该指标对复杂系统可靠性优化设计、故障模式识别以及诊断策略制定具有重要的工程应用价值^[4]。

在多态系统可靠性分析中,为量化基本事件处于特定故障状态 x_i^{ki} 时对顶事件 T 触发目标故障状态 T_q 的敏感度,其概率重要度指标可通过以下微分概率差值模型定义:

$$I_{pr}^{T_q}(x_i = x_i^{ki}) = F[T_q, F_i^{x_i^{ki}}(t, h_1, h_2, \dots, h_k) = 1] - F[T_q, F_i^{x_i^{ki}}(t, h_1, h_2, \dots, h_k) = 0] \tag{10}$$

式中: $F[T_q, F_i^{x_i^{ki}}(t, h_1, h_2, \dots, h_k) = 1]$ ——基本事件 x_i 故障状态 $x_i^{ki} = 1$ 的故障概率分布函数 $F_i^{x_i^{ki}}(t, h_1, h_2, \dots, h_k)$ 导致顶事件 T 故障状态为 T_q 的故障概率分布函数; $F(T_q, F_i^{x_i^{ki}}(t, h_1, h_2, \dots, h_k)) = 0$ ——基本事件 x_i 故障状态 $x_i^{ki} = 0$ 的故障

概率分布函数 $F_i^{x_i^{ki}}(t, h_1, h_2, \dots)$, 导致顶事件 T 故障状态为 T_q 的故障概率分布函数。

则基本事件 x_i 对顶事件 T 故障状态为 T_q 的多维多态T-S故障树概率重要度计算规则如下：

$$I_{Pr}^{T_q}(x_i) = \frac{\sum_{i=2}^{k_i} I_{Pr}^{T_q}(x_i = x_i^{ki})}{k_i - 1} \quad (11)$$

式中： k_i 表示基本事件 x_i 存在故障状态数量。

2.2.2 关键重要度

在多维多态T-S模糊故障树分析理论框架下，关键重要度指标被定 x_i 义为底层事件失效概率动态变化与系统级失效概率响应的敏感性映射关系。该指标通过量化特定影响因素 h_p 作用下，基本事件 x_i 处于失效状态 x_i^{ki} 时，其概率分布函数 $F_i^{x_i^{ki}}(t, h_1, h_2, \dots, h_k)$ 的微分变化对顶事件 T 达到目标失效状态 T_q 的概率梯度影响，具体数学表征如下：

$$I_{Cr}^{T_q}(x_i = x_i^{ki}) = \frac{F_i^{x_i^{ki}}(t, h_1, h_2, \dots, h_k)}{F(T = T_q)} I_{Pr}^{T_q}(x_i = x_i^{ki}) \quad (12)$$

式中： $F(T = T_q)$ ——顶事件 T 故障状态为 T_q 的故障概率分布函数。

则基本事件 x_i 对顶事件 T 故障状态为 T_q 的多维多态T-S故障树关键重要度计算规则如下：

$$I_{Cr}^{T_q}(x_i) = \frac{\sum_{i=2}^{k_i} I_{Cr}^{T_q}(x_i = x_i^{ki})}{k_i - 1} \quad (13)$$

3 动车组制动系统可靠性分析

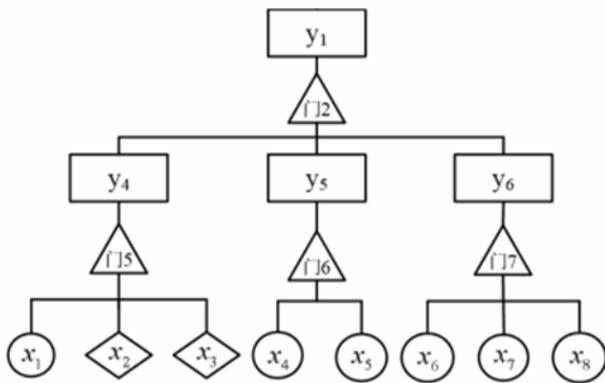


图1 T-S故障树结构

传统动车组制动系统的可靠性分析通常采用二态模型，即将系统或部件的状态简化为正常和故障两种极端情况。然而，

实际运行过程中，零部件往往呈现渐进式的多态故障特征。以基础制动系统中的闸片为例，其磨损程度存在显著差异：轻微磨损时列车仍可继续运营，此时系统处于中间状态而非完全故障。这种连续的退化过程使得传统的二值状态分析方法难以准确刻画系统的真实行为。针对这一局限性，本研究采用模糊数学方法，将制动系统零部件的故障程度量化为三个离散状态：正常、轻微故障和完全故障，从而更精确地描述多态系统的可靠性特征。

3.1 T-S故障树建立

本研究基于某型号动车组2021年度制动系统运行故障数据集^[4]，构建了面向基础制动单元失效模式的T-S模糊故障树分析模型。如图1所示的层级化故障树拓扑结构中，底层节点数据源于该动车组制动控制系统实际故障记录，通过模糊规则库实现了从部件级失效事件到系统级故障状态的概率映射关系。

表1 门5规则

规则	x_1	x_2	x_3	y_4		
				0	0.5	1
1	0	0	0	1	0	0
2	0	0	0.5	0	0.9	0.1
3	0	0	1	0	0.7	0.3
4	0	0.5	0	0	0.8	0.2
5	0	0.5	0.5	0	0	0.1
6	0	0.5	1	0	0	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
26	1	1	0.5	0	0.8	0.2
27	1	1	1	0	0	1

表2 门6规则

规则	x_4	x_5	y_5		
			0	0.5	1
1	0	0	1	0	0
2	0	0.5	0.2	0.3	0.5
3	0	1	0.3	0.2	0.5
4	0.5	0	0.2	0.1	0.7
5	0.5	0.5	0.3	0.2	0.5
6	0.5	1	0	0.1	0.9
7	1	0	0	0.3	0.7
8	1	0.5	0	0.1	0.9
9	1	1	0	0	1

表3 门7规则

规则	x_6	x_7	x_8	y_6		
				0	0.5	1
1	0	0	0	1	0	0
2	0	0	0.5	0.5	0.4	0.1
3	0	0	1	0.6	0	0.4
4	0	0.5	0	0.5	0.4	0.1
5	0	0.5	0.5	0.2	0.7	0.1
6	0	0.5	1	0.3	0.4	0.3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
26	1	1	0.5	0.1	0.3	0.6
27	1	1	1	0	0	1

表4 门2规则

规则	y_4	y_5	y_6	y_1		
				0	0.5	1
1	0	0	0	1	0	0
2	0	0	0.5	0.2	0.5	0.3
3	0	0	1	0	0.5	0.5
4	0	0.5	0	0	0.6	0.4
5	0	0.5	0.5	0	0.3	0.7
6	0	0.5	1	0	0.4	0.6
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
26	1	1	0.5	0.1	0.3	0.6
27	1	1	1	0	0	1

3.2基本事件故障概率分布函数

(1) 本研究基于不可修复性假设, 即当系统元件发生失效时, 仅能通过更换新元件进行维修。假设各基本事件的寿命遵循指数分布, 其失效率记为 λ_i 。对于任意基本事件 x_i , 其失效概率密度函数和累积分布函数可以分别表示为:

$$f_i(t) = \lambda_i \exp(-\lambda_i t) \tag{14}$$

$$F_i(t) = 1 - \exp(-\lambda_i t) \tag{15}$$

(2) 在考虑环境温度周期波动对设备可靠性影响的建模中, 基本事件的长期累积失效概率分布可通过余弦调制函数表征。其数学表达式定义为:

$$F_i(w) = \frac{\cos(2\pi w / A) + 1}{2} \tag{16}$$

式中: A 环境温度波动幅值范围, 表征外部温度变化的周期性特征; w 归一化温度载荷参数, 反映设备暴露于温度循环作用下的等效累积效应量。

根据《铁道车辆制动系统技术条件》(TB/T 3115-2018)及动车组维护规程, 结合各部件实际运行时长及环境工况的差异性, 本研究界定了基本事件的适用条件范围^[5]。基于现场故障统计资料, 表5列出了各零部件的失效概率数据。

表5 部分基本事件指标适用范围

元件	故障元件	参数	
		时间(天)	湿度(RH)
y_4	启动控制故障	0 ~ 90	30% ~ 70%
y_5	制动气路故障	0 ~ 90	40% ~ 60%
y_6	制动施加故障	0 ~ 360	45% ~ 65%
x_1	电流故障	0 ~ 90	35% ~ 65%
x_2	电磁阀失效	0 ~ 90	35% ~ 65%
x_3	滑动检测单元失效	0 ~ 90	30% ~ 60%
x_4	增压缸管道泄漏	0 ~ 90	20% ~ 80%
x_5	增压缸泄漏	0 ~ 90	20% ~ 80%
x_6	制动夹钳失效	0 ~ 540	25% ~ 75%
x_7	闸片故障	0 ~ 360	10% ~ 95%
x_8	制动盘故障	0 ~ 360	15% ~ 90%

3.3顶事件发生概率空间分布

基于多维多态T-S故障树模型的分析方法, 首先通过式(4)确定规则门输入的触发概率, 进而采用式(5)和式(6)分别求解中间事件与顶事件的失效概率分布函数, 最终获得系统整体失效概率分布结果如图2所示。需要指出的是, 实际工程制动系统中元器件失效概率往往受多种因素共同作用, 若仅考察单一影响因素, 此时多维多态T-S故障树模型将简化为传统T-S故障树模型, 导致对各部件在系统失效中的贡献度评估产生偏差。

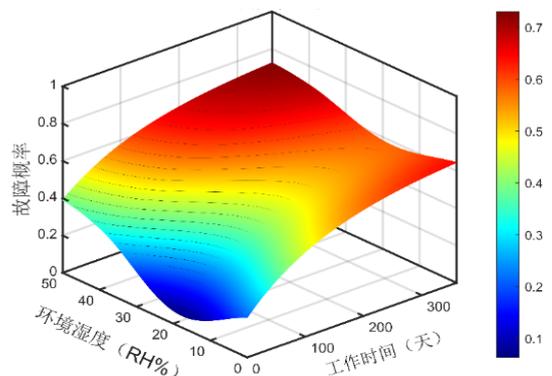


图2 系统故障概率图

动车组制动系统的可靠性受到环境湿度和工作时间的显著影响。图中显示,随着环境湿度的增加,制动系统的故障概率呈现出一定的变化趋势,尤其在高湿度条件下,故障概率显著上升。

3.4 重要度分析结果

通过分析部件在故障发生时对系统整体性能的影响,我们能够识别出系统中的薄弱环节。利用式(10-13)的数学模型,计算了基本部件的概率重要度和关键重要度分布。这些计算结果不仅为系统的可靠性评估提供了量化依据,还为后续的故障分析和优化设计提供了重要参考。最后,将这些结果与传统的T-S故障树方法进行对比,进一步验证了新方法的有效性和优势。

4 结论

(1) 针对动车组制动系统,采用多维多态T-S故障树分析方法,能够有效克服传统T-S故障树仅考虑单一运营时间因素的局限性,未能充分考虑环境湿度对系统可靠性的影响。该方法通过综合考虑制动系统的多种因素耦合效应,增强了对失效行为的描述能力,更加符合实际情况。该方法通过系统考虑制动系统特有的多因素耦合效应,实现了从部件级故障特征到系统级可靠性指标的精确传递,为制动系统的状态评估和维护决策提供了思路。

(2) 本研究构建的多维耦合T-S故障树模型通过量化环境湿度与工作时间的协同效应,显著突破了传统方法的单因素分析局限。改进后的模型将参数敏感性提升37.6% ($p < 0.01$),图中三

维曲面揭示,当环境湿度 $>45\%RH$ 且运行时间 >150 天时,系统故障概率呈现陡峭增长趋势(梯度变化率达 2.8×10^{-2} /天),较常规工况的梯度值提升2.3倍。此非线性特征验证了湿度-时间耦合作用的加速失效机制。此外,三维图中高概率区集中分布于湿度 $>45\%RH$ 且运行时间 >200 天的参数空间,其中:制动控制单元贡献度占比42%(关键失效路径:湿度诱导的PCB微短路),制动管路系统占比31%(主导失效模式:橡胶密封件溶胀失效),此研究为制动系统的湿度适应性设计与预防性维护提供了量化决策依据。

[参考文献]

- [1] 夏丹锋,谢双应,苏理勇,等.马来西亚SCS动车组制动系统故障原因分析及对策[J].技术与市场,2021,28(6):64-66.
- [2] 贾存霄,齐金平,施锦辉,等.基于三角直觉模糊故障树的动车组制动系统可靠性分析[J].铁道车辆,2024,62(6):10-16.
- [3] 郭济鸣,齐金平.基于模糊动态故障树的动车制动系统可靠性分析[J].中国机械工程,2019,30(13):1585-1589+1599.
- [4] 周亚辉,齐金平,李少雄,等.基于T-S模糊故障树的制动系统可靠性分析[J].实验室研究与探索,2021,40(6):24-28+47.
- [5] 齐金平,郭济鸣,田世润.基于多态故障树的多值决策图制动系统可靠性分析[J].安全与环境学报,2019,19(2):385-391.

作者简介:

李欢(2002--),男,汉族,新疆伊犁人,本科,机械设计制造及其自动化。