中北大学学报(自然科学版)
JOURNAL OF NORTH UNIVERSITY OF CHINA(NATURAL SCIENCE EDITION)
2026年 第47卷 第5期(总第229期)
Vol. 47 No. 5 2026(Sum No. 229)

文章编号：1673-3193(2026)05-0697-10 J. North Univ. China, Nat. Sci. Ed., 2026, 47(5): 697-706.

数据驱动的氢燃料电池失效风险排序

叶 宁，禹 超

(沈阳理工大学 自动化与电气工程学院，辽宁 沈阳 110170)

摘 要：针对车载质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell，PEMFC)传统失效模式与影响分析(Failure Mode and Effects Analysis，FMEA)依赖专家评分、异量纲指标难统一及排序易受权重和样本波动影响的问题，构建了M-CRITIC-MUNRA数据驱动风险排序方法。以N车型6类实车失效测试数据为研究对象，从功率、电压、温度及执行机构响应中提取功率变异系数、单体电压极差均值、冷却液出口温度99%分位值和空压机转速平均绝对跟踪误差等4类风险因子，建立了失效模式-运行变量-风险因子映射及决策矩阵。采用改进CRITIC(M-CRITIC)依据指标离散性和相关冲突确定客观权重，并以多重归一化评级分析(MUNRA)融合3类归一化结果；通过消融、权重扰动、留一秩反转及1 000次循环移动块Bootstrap评价排序稳定性，并以FM2低温冷启动实车测试展示了风险因子提取与排序的实际应用过程。结果表明：RF4和RF1权重分别为0.305 6和0.291 8，基线风险次序为FM1、FM2、FM4、FM5、FM3、FM6；扰动幅度为0.15时，Spearman均值为0.935 7，留一平均秩反转率为0.100，Bootstrap下FM1进入前二的概率为88.1%。该方法可实现异量纲运行指标的客观赋权与多尺度聚合，实际应用中可结合Top-2进入概率和排名区间形成优先检查组，为车载PEMFC维护优先级评价提供量化依据。

关键词：质子交换膜燃料电池；失效模式；M-CRITIC；MUNRA；风险排序

中图分类号：TM911.4；U469.72 **文献标识码：**A **doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2026.07.0012

引用格式：叶宁，禹超. 数据驱动的氢燃料电池失效风险排序[J]. 中北大学学报(自然科学版)，2026，47(5)：697-706.

Ye Ning，Yu Chao. Data-driven failure risk ranking of hydrogen fuel cell[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition)，2026，47(5)：697-706.

Data-Driven Failure Risk Ranking of Hydrogen Fuel Cell

Ye Ning，Yu Chao

(School of Automation and Electrical Engineering，Shenyang Ligong University，Shenyang 110170，China)

Abstract：To address the reliance of conventional failure mode and effects analysis (FMEA) on expert scoring，the difficulty in unifying heterogeneous indicators，and the sensitivity of risk rankings to weight and sample fluctuations in vehicular proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) systems，a data-driven M-CRITIC-MUNRA risk-ranking method was developed. Six on-vehicle failure-test datasets from a vehicle model denoted as Model N were used. Four risk factors were extracted：output-power coefficient of variation，mean single-cell voltage range，99th percentile of coolant outlet temperature，and mean absolute tracking error of air-compressor speed. A failure mode-operating variable-risk factor map-

收稿日期：2026-07-12

基金项目：辽宁省教育厅基本科研项目(LJ212510144035)

作者简介：叶 宁(1979—)，男，副教授，博士，主要从事液压机器人故障检测与自主控制、电力市场数据挖掘的研究。E-mail：yening_neu@sylu.edu.cn。

ping and decision matrix were established. M-CRITIC was used to determine objective weights from indicator dispersion and intercriteria conflict, while MUNRA integrated three normalization schemes. Ranking stability was evaluated through ablation analysis, weight perturbation, leave-one-out rank-reversal analysis, and 1,000-run circular moving block bootstrap resampling. An FM2 low-temperature cold-start on-vehicle test illustrated the practical risk-factor extraction and ranking procedure. The results show that RF4 and RF1 have weights of 0.305 6 and 0.291 8, respectively, and the baseline ranking is FM1, FM2, FM4, FM5, FM3, and FM6. At a perturbation amplitude of 0.15, the mean Spearman coefficient is 0.935 7, the average leave-one-out rank-reversal rate is 0.100, and FM1 enters the top two in 88.1% of bootstrap samples. The method enables objective weighting and multiscale aggregation of heterogeneous operating indicators. Top-2 inclusion probabilities and ranking intervals can be jointly used to form priority inspection groups for maintenance prioritization.

Key words: proton exchange membrane fuel cell; failure mode; M-CRITIC; MUNRA; failure risk ranking

0 引 言

氢燃料电池汽车具有排放低、补能快和续驶里程长等特点，其安全性与可靠性已成为整车风险分析的重要内容[1]。质子交换膜燃料电池(PEMFC)的运行状态受温度、压力、流量、电压和电流等变量共同影响，数据驱动方法可用于识别关键故障变量[2]，膜化学降解及水热状态变化也会影响电堆健康水平[3]。空气泄漏、低温启动受阻、阳极吹扫异常和执行偏差通常表现为功率波动、单体电压离散、温度异常或跟踪误差，因此有必要将运行响应转化为失效风险排序依据。

传统FMEA依赖严重度、发生度和探测度的专家评分，且默认指标等权，难以反映运行数据的客观差异。多属性决策已用于改进FMEA的不确定性处理[4]，包括TOPSIS风险评价[5]、氢能系统失效严重度分析[6]、PEMFC模糊风险排序[7]、FMEA与贝叶斯网络融合[8]及容错控制研究[9]。现有方法多侧重专家判断、故障机理或单一排序模型，对异量纲运行指标的客观赋权、归一化差异及排序稳定性缺少协同处理。

数据驱动FMEA能够将风险评价与系统运行响应建立联系[10-11]，但现有PEMFC风险分析仍多依赖专家严重度、发生度和探测度评分，或采用单一赋权、排序方法，尚缺少对异量纲运行指标客观赋权、多归一化聚合及排序波动进行统一处理的系统级方法。为此本文进行以下研究：1)从功率、电压、温度和执行机构响应中提取4类风险因子，构建失效模式-运行变量-风险因子映射，使改进FMEA由专家语言评价转向运行数据评价；2)以M-CRITIC识别风险因子的离散信息和相关冲突，以MUNRA融合线性、向量和非线性归一化结果，实现异量纲指标的客观赋权与多尺度聚合；3)通过赋权-排序组合消融、权重扰动、留一秩反转和循环移动块Bootstrap，从权重、备选模式及时序样本三个层面评价排序稳定性。

1 失效模式与风险因子构建

1.1 氢燃料电池系统评价对象

图1所示车载PEMFC由电堆、供氢、空气供给和冷却系统组成，输出受供气、热管理及电堆状态共同影响[12]。本文评估空气密封、空气压力调节、空压机、供氢、阳极吹扫和低温冷启动等6类失效。

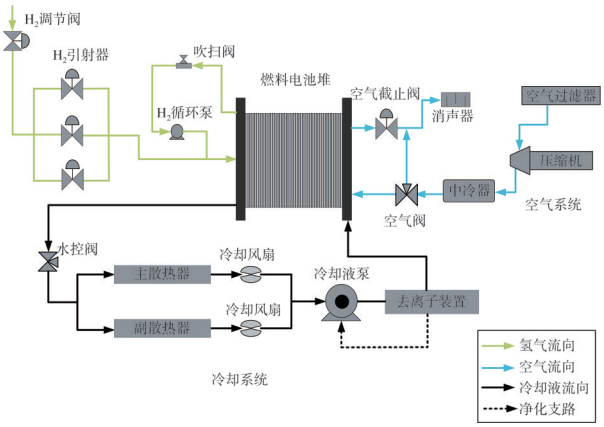


图1 燃料电池系统

Fig. 1 Fuel cell system

1.2 风险因子提取

按可观测性、故障敏感性和子系统覆盖性，从功率、电压、温度、转速及压力信号中选取RF1功率变异系数、RF2单体电压极差均值、RF3冷

却液出口温度99%分位值和RF4空压机转速平均绝对跟踪误差；有效区间为电流大于5 A。

$$\Omega=\{t\mid I_t>I_{\min}\},\ I_{\min}=5\ \mathrm{A},\ N=|\Omega|, \tag{1}$$

式中：I_t为电堆电流；$I_{\min}$为有效工作电流阈值；N为有效样本数量。

1）f_1为RF1功率变异系数，用于表征输出功率相对波动。

$$P_t=U_tI_t, \tag{2}$$

$$\bar{P}=\frac{1}{N}\sum_{t\in\Omega}P_t, \tag{3}$$

$$f_1=\frac{\sqrt{\left(\left(\frac{1}{(N-1)}\right)\sum_{t\in\Omega}(P_t-\bar{P})^2\right)}}{(\bar{P}+\varepsilon)}, \tag{4}$$

式中：U_t为电堆电压；P_t为输出功率；$\bar{P}$为有效工作区间内的平均功率；$\varepsilon=10^{-5}$为防止分母为零引入的极小常数。f_1越大，输出稳定性越差。

2）f_2为RF2单体电压极差均值，用于表征电堆一致性风险：

$$f_2=\frac{1}{N}\sum_{t\in\Omega}(V_{\max,t}-V_{\min,t}), \tag{5}$$

式中：$V_{\max,t}$和$V_{\min,t}$分别为最高、最低单体电压。f_2越大，电堆一致性越差。

3）f_3为RF3温度状态风险，采用冷却液出口温度99%分位值表征温度高值风险。

$$f_3=Q_{0.99}(\{T_{\mathrm{cool},t}\mid t\in\Omega\}), \tag{6}$$

式中：$T_{\mathrm{cool},t}$为冷却液出口温度；$Q_{0.99}$表示99%分位数。

4）f_4为RF4空压机转速跟踪误差，用于表征空气供给执行偏差。

$$f_4=\frac{1}{N}\sum_{t\in\Omega}|n_{\mathrm{set},t}-n_{\mathrm{fbk},t}|, \tag{7}$$

式中：$n_{\mathrm{set},t}$和$n_{\mathrm{fbk},t}$分别为空压机设定转速和反馈转速。f_4越大，空气供给控制偏差越明显。

由此，每个失效模式可表示为一个四维风险向量

$$\boldsymbol{X}_i=[f_{1,i},f_{2,i},f_{3,i},f_{4,i}]。 \tag{8}$$

所有失效模式组成原始风险决策矩阵

$$\boldsymbol{X}=[x_{ij}]_{m\times4}, \tag{9}$$

式中：$m=6$；x_{ij}为第i个失效模式在第j个风险因子下的取值；RF1～RF4均为成本型指标。本文将4项指标作为面向全部失效模式统一计算的全局风险因子，用于从功率、电压、温度和执行机构响应等不同维度表征系统运行状态。因而，每一种失效模式均形成完整的四维风险向量，各风险因子的取值不以其是否列入某一失效模式的主要关联项为筛选条件。上述指标用于风险排序中的可观测状态表征，不等同于故障机理参数或故障专属特征。

1.3　失效模式与风险变量映射

6类失效模式与风险因子的主要物理关联见表1。需要说明的是，表中所列风险因子用于指出某类失效最直接的运行响应，并不表示该失效模式只计算这些指标。由于PEMFC电堆、供氢、空气供给及热管理子系统之间存在耦合，一处失效还可能在其他运行变量中形成伴随响应。因此，RF1～RF4在本文中统一作为全局风险因子，对FM1～FM6均进行计算并共同参与后续赋权和排序。表1仅承担失效机理与主要响应之间的解释作用，不作为风险因子的筛选规则。

表1　氢燃料电池系统失效模式与风险因子的映射关系

Tab. 1　Mapping relationship between failure modes and risk factors of hydrogen fuel cell system

失效模式	关键部件	失效机理说明	主要风险表现	机理相关风险因子
FM1	空气管路、密封阀、阴极入口	空气泄漏或密封不足导致阴极供氧下降	反应气体供应不稳定，输出功率波动	RF1、RF2、RF4
FM2	冷却液回路、电堆暖机过程	低温下产水、结冰和升温迟滞影响启动稳定性	低温启动稳定性下降	RF1、RF2、RF3
FM3	罗茨压缩机、电机、转速反馈	空压机执行能力下降或反馈异常	实际转速偏离设定转速	RF4
FM4	氢循环泵、吹扫阀、阳极回路	吹扫不足导致水和氮气积累，吹扫过强导致氢气利用率下降	水管理异常，电压波动加剧	RF1、RF2
FM5	节流阀、引射器、供氢管路	氢气压力或流量不足导致局部贫氢	局部贫氢，电堆输出不稳定	RF1、RF2
FM6	伺服阀组、背压阀、阴极压力调节回路	空气压力调节迟滞导致阴极压力无法匹配功率需求	空气压力调节迟缓	RF4

注：RF1～RF4均作为全局风险因子参与评价，表中所列机理相关风险因子仅用于说明失效机理与主要运行响应之间的对应关系，不表示原始实车测试中的具体故障注入操作。

1.4 评估流程

如图2所示，本文首先对故障测试数据进行数值化、缺失值处理和有效工作区间筛选，再提取RF1～RF4并构建失效模式决策矩阵。随后，以M-CRITIC计算风险因子权重，将权重输入MUNRA得到综合风险评分和排序。最后，通过组合消融、权重扰动、留一秩反转及循环移动块Bootstrap评价排序稳定性，并据此提出改进建议。

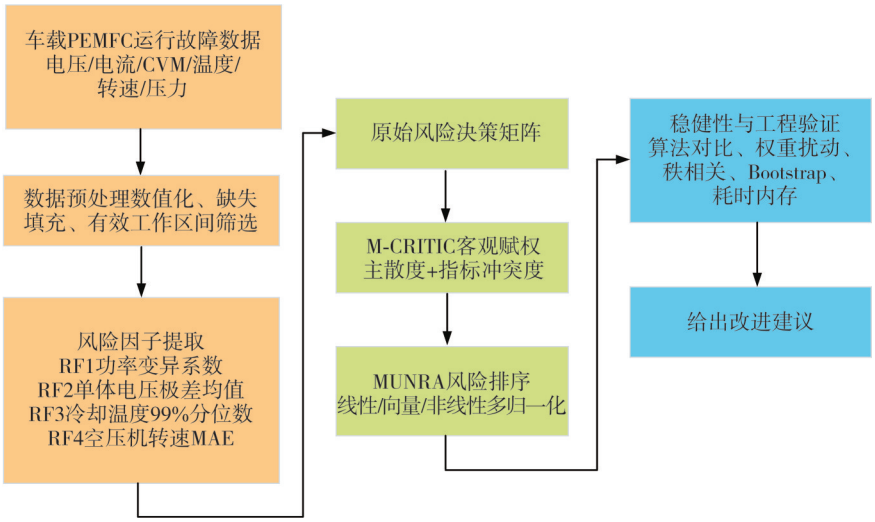


图2 基于M-CRITIC-MUNRA的车载PEMFC失效风险排序流程

Fig. 2 Workflow of vehicular PEMFC failure risk ranking based on M-CRITIC-MUNRA

2 M-CRITIC-MUNRA组合风险评估模型

2.1 M-CRITIC的客观赋权

针对RF1～RF4量纲不同、指标间可能存在相关性的特点，本文采用M-CRITIC确定风险因子客观权重，并以MUNRA完成失效模式排序。传统CRITIC依据指标离散程度及指标间冲突关系确定客观权重[13]，其中指标冲突性通常采用Pearson相关系数描述。考虑车载PEMFC不同运行风险因子之间可能存在非线性关联，本文参考文献[14]，以距离相关系数替代Pearson相关系数构造指标冲突度，使权重计算同时考虑指标离散信息及更一般的相关关系。所得权重随后输入MUNRA进行综合风险评价。

$$\boldsymbol{X}=[x_{ij}]_{m\times n}, \tag{10}$$

式中：m为失效模式数量；n为风险因子数量；x_{ij}为第i个失效模式在第j个风险因子下的取值。

将原始矩阵按列转化为比例矩阵。

$$\boldsymbol{r}_{ij}=\frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}x_{ij}}, \tag{11}$$

式中的比例变换用于消除不同风险因子数值尺度对后续权重计算的直接影响。

在比例矩阵基础上，进一步利用各指标的上下边界进行距离归一化。对第j个风险因子，归一化结果为

$$z_{ij}=\frac{r_j^{\max}-r_{ij}}{r_j^{\max}-r_j^{\min}}, \tag{12}$$

式中：$r_j^{\max}$和$r_j^{\min}$分别为第j个风险因子比例值的最大值和最小值。

为进一步计算第j个和第k个风险因子间的距离相关系数，首先构造样本两两距离$a_{pq}=|z_{pj}-z_{qj}|$、$b_{pq}=|z_{pk}-z_{qk}|$，经双中心化后分别得到矩阵$\boldsymbol{A}_{pq}$和$\boldsymbol{B}_{pq}$。距离相关系数表示为

$$d_{jk}=\frac{\left[m^{-2}\sum_{p=1}^{m}\sum_{q=1}^{m}\boldsymbol{A}_{pq}\boldsymbol{B}_{pq}\right]^{\frac{1}{2}}}{\left[\left(m^{-2}\sum_{p=1}^{m}\sum_{q=1}^{m}\boldsymbol{A}_{pq}^{2}\right)\left(m^{-2}\sum_{p=1}^{m}\sum_{q=1}^{m}\boldsymbol{B}_{pq}^{2}\right)\right]^{\frac{1}{4}}}。 \tag{13}$$

Pearson相关系数主要刻画线性相关性，Spearman相关系数基于秩次衡量单调关联，距离相关系数则可刻画更一般的统计依赖关系[14]。因此，本文采用d_{jk}衡量风险因子之间的信息重叠程度。

第j个风险因子的综合信息量为

$$C_j=\sigma_j\sum_{k=1}^{n}(1-d_{jk}),\tag{14}$$

式中：σ_j为第j个风险因子的标准差；d_{jk}为第j个与第k个风险因子的距离相关系数。C_j越大，说明该指标在当前失效模式集合中提供的区分信息越多。最终权重为

$$w_j=\frac{C_j}{\sum_{k=1}^{n}C_k}。\tag{15}$$

式(15)所得权重反映各风险因子的区分信息量，用于后续MUNRA聚合，不等同于单个故障的严重程度。

2.2　MUNRA风险排序

MUNRA融合线性、向量和非线性归一化结果[15]，以降低单一尺度对排序的影响。RF1～RF4均为成本型指标，计算前转换为风险效益型指标

$$N_{(ij)}^{(1)}=\frac{x_{(ij)}}{\left(\max\limits_i x_{(ij)}\right)},\tag{16}$$

$$N_{(ij)}^{(2)}=1-\frac{\left(\max\limits_i x_{(ij)}-x_{(ij)}\right)}{\sqrt{\left(\sum\limits_{i=1}^{m}\left(\max\limits_i x_{(ij)}-x_{(ij)}\right)^2\right)}},\tag{17}$$

$$N_{(ij)}^{(3)}=\left(\frac{x_{(ij)}}{\left(\max\limits_i x_{(ij)}\right)}\right)^3,\tag{18}$$

式中：$N_{(ij)}^{(1)}$、$N_{(ij)}^{(2)}$和$N_{(ij)}^{(3)}$分别为线性、向量和非线性归一化结果。随后计算3类加权综合值

$$S_i^{(q)}=\sum_{j=1}^{n}w_j N_{ij}^{q},\ q=1,2,3。\tag{19}$$

最终综合风险值为

$$R_i=\frac{(S_i^{(1)}S_i^{(2)}S_i^{(3)})}{(S_i^{(1)}+S_i^{(2)}+S_i^{(3)})}。\tag{20}$$

为便于比较不同失效模式风险水平，将R_i映射为百分制评分

$$Z_i=50+45\tanh\left(\frac{(R_i-\mu)}{(\sigma+\varepsilon)}\right),\tag{21}$$

式中：μ和σ分别为R_i均值和标准差；10^{-9}。Z_i越大，综合风险越高。

参照MUNRA原始方法中成本型准则采用三次非线性归一化的设置[15]，本文取非线性归一化指数p=3，以增强不同风险水平之间的区分。评分参数μ、由当前样本自适应确定。输入6×4风险矩阵及M-CRITIC权重，输出各失效模式的综合风险评分。

3　风险评估实例

3.1　实车失效测试与决策矩阵构建

本文采用N车型PEMFC实车整车测试数据开展风险评价。6类数据分别来源于对应失效工况的实车测试，每类失效模式形成一个独立数据文件，并记录测试期间的整车CAN运行信号、非数值仿真或独立PEMFC部件台架数据。其中，FM1、FM3～FM6均为车辆行驶且燃料电池系统有功率输出工况，FM2为－9 ℃低温冷启动怠速测试。现有资料未进一步记录车辆行驶测试的具体场地，以及阀门开度、控制指令修改量等详细故障设置参数，因此本文仅依据可核实的失效类型、运行工况及实测CAN信号开展评价。CAN信号解析后得到电堆电压、电流、单体极值电压、冷却液出口温度及空压机转速等物理量。以FM2为例，表2列出与RF1～RF4计算相关的部分连续实测记录。数据处理时按时间顺序整理记录，对异步信号进行前向保持，并以电堆电流大于5 A作为有效工作区间，随后计算RF1～RF4并构建表3所示决策矩阵。为进一步说明实测运行响应与风险排序结果之间的联系，后文选取FM2低温冷启动测试进行典型案例分析。

表2　FM2低温冷启动实测数据示例

Tab. 2　Measured data sample from the FM2 low-temperature cold-start

t/s	电堆电压 U/V	电堆电流 I/A	输出功率/kW	单体电压极差/V	冷却液出口温度/℃
28.302	307	118.5	36.380	0.21	－5
28.402	317	101.4	32.144	0.18	－5
28.502	337	68.4	23.051	0.10	－5
28.602	344	59.6	20.502	0.08	－5
28.702	347	58.1	20.161	0.07	－5
28.802	348	57.2	19.906	0.06	－5

表3 各失效模式全局风险因子决策矩阵

Tab. 3 Decision matrix of global risk factors for each failure mode

失效模式	RF1	RF2/V	RF3/℃	RF4/(r•min^{-1})
FM4	0.512 8	0.049 0	55.0	981.030 4
FM2	0.573 4	0.104 3	20.0	83.782 0
FM5	0.507 4	0.026 6	53.0	1 324.516 4
FM1	0.491 0	0.019 9	47.0	2 648.148 9
FM6	0.433 9	0.036 3	50.0	587.991 7
FM3	0.212 0	0.058 3	73.0	450.461 6

表3中：FM1的RF4最高；FM2的RF1和RF2较高。FM3的RF3为73 ℃，主要受初温、负荷及试验区间影响，属于伴生响应，不改变表1映射。由于RF1～RF4对所有失效模式统一计算，表中每一类失效均保留4项指标，其中既包括表1所列的主要直接关联响应，也包括系统耦合形成的伴随响应。

3.2 M-CRITIC权重计算结果

由表4可知，RF4和RF1的权重分别为0.305 6和0.291 8，高于RF2和RF3。该结果说明，在当前6类失效模式中，空压机转速跟踪偏差和功率相对波动具有较强的样本区分信息；RF2和RF3仍参与综合评价，但其离散性与冲突信息相对较弱。M-CRITIC得到的权重来自决策矩阵本身，避免了对4类风险因子直接等权处理。

表4 权重系数

Tab. 4 Weight coefficient

风险因子	RF1	RF2	RF3	RF4
最终权重	0.291 8	0.218 6	0.184 1	0.305 6

3.3 风险排序及工程解释

如图3所示，M-CRITIC-MUNRA得到的排序为FM1、FM2、FM4、FM5、FM3、FM6。FM1的RF4最高，其综合风险位居首位；FM2的RF1和RF2均为6类失效模式中的最高值，说明低温启动过程中功率波动和单体电压一致性响应较为突出，因此综合排序位居第二；FM4和FM5对应阳极吹扫及供氢异常，综合风险居中；FM3和FM6在本次测试中的多指标综合响应相对较弱。基线排序下，FM1和FM2具有较高检查优先级，其中FM1重点关注空气密封及供气状态，FM2重点关注预热及水热管理，FM4和FM5重点检查吹扫阀、引射器和氢循环部件，FM3和FM6关注空压机反馈及空气压力调节。

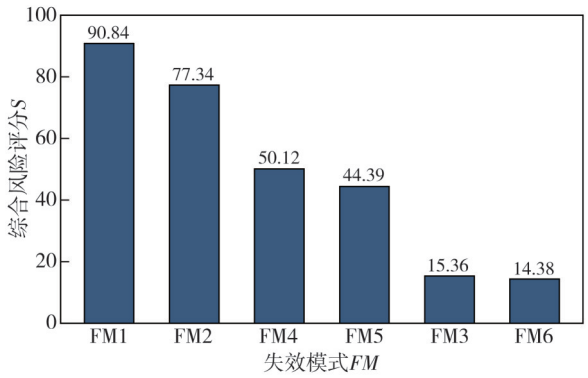


图3 排序结果

Fig. 3 Ranking results

3.4 实车典型失效案例分析

为进一步展示所提方法在实际失效工况中的应用过程，选取FM2低温冷启动实车测试进行案例分析。该测试经统一预处理后得到55 260条有效记录，环境温度为−8.5 ℃，车辆速度为0 km/h。图4给出了输出功率、单体电压极差和冷却液出口温度的实测响应。

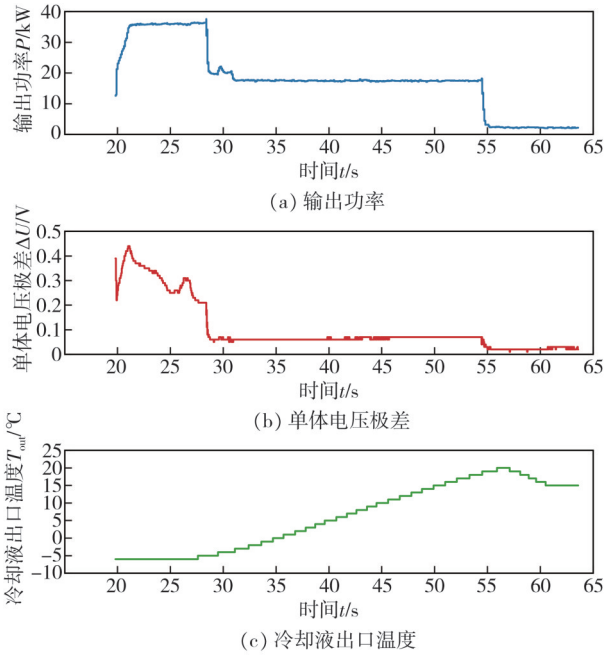


图4 FM2低温冷启动失效测试的实车运行响应

Fig. 4 Measured vehicle responses during the FM2 low-temperature cold-start failure test

由图4可见，低温启动过程中输出功率呈明显阶段性变化，单体电压极差在测试前段处于较高水平，随后逐步降低，同时冷却液出口温度随暖机过程持续上升。按本文风险因子定义复算，FM2的RF1、RF2、RF3和RF4分别为0.573 4，0.104 3，20.0和83.782 0，与表3结果一致。其

中，RF1和RF2均为6类失效模式中的最高值，表明该工况下功率波动和单体电压一致性变化较为突出。RF3虽与低温启动热状态存在机理关联，但本文采用冷却液出口温度99%分位值表征温度高值风险，因此本次低温启动测试中的取值较低。经M-CRITIC-MUNRA综合评价，FM2在基线风险排序中位列第二。该案例展示了从实车CAN信号中提取风险因子，形成决策矩阵并获得维护优先级的计算过程。

4　方法有效性与稳健性验证

为检验M-CRITIC赋权与MUNRA排序的组合效果，设置消融与基准对比，并通过权重扰动、留一秩反转和循环移动块Bootstrap，分别分析权重变化、备选模式变化及时序样本波动对排序结果的影响[16-17]。

4.1　消融与基准对比

设置Equal-MUNRA、CRITIC-MUNRA、M-CRITIC-TOPSIS和M-CRITIC-MUNRA四组方法，分别检验等权、传统CRITIC和TOPSIS替代相应模块后的影响。基线排序见表5，稳健性结果见图5。可以看出：Equal-MUNRA与完整方法排序一致；CRITIC-MUNRA交换了FM1和FM2的位置；M-CRITIC-TOPSIS将FM2由第二位降至第四位。这些结果表明，赋权方式会影响首要风险判定，聚合方式会改变局部次序，M-CRITIC与MUNRA分别承担客观赋权和多尺度聚合功能。

表5　4种赋权-排序组合的基线排序

Tab. 5　Baseline rankings of four weighting-ranking combinations

算法	排序
Equal-MUNRA	FM1、FM2、FM4、FM5、FM3、FM6
CRITIC-MUNRA	FM2、FM1、FM4、FM5、FM3、FM6
M-CRITIC-TOPSIS	FM1、FM5、FM4、FM2、FM3、FM6
M-CRITIC-MUNRA	FM1、FM2、FM4、FM5、FM3、FM6

4.2　权重扰动与秩反转

对各风险因子权重逐项施加$\pm\delta$扰动，并重新归一化。每个扰动幅度对应4个风险因子的8种扰动场景。图5(a)和图5(b)中节点表示各场景秩相关系数的均值，竖向误差棒表示最小值至最大值的变化范围。因此，部分误差棒向下延伸较长，表示个别权重扰动场景下排序相关性明显低于平均水平。随着δ的增大，Spearman和Kendall的相关系数整体下降，说明较大的权重变化会增加局部排序变化的可能性。当δ分别为0.05，0.10和0.15时，M-CRITIC-MUNRA的Spearman的均值分别为0.978 6，0.964 3和0.935 7，Kendall均值分别为0.950 0，0.916 7和0.866 7。

如图5(c)所示，M-CRITIC-MUNRA的留一平均秩反转率为0.100，最大值为0.133。其值低于Equal-MUNRA和CRITIC-MUNRA，但高于M-CRITIC-TOPSIS，说明该组合对备选失效模式变化具有较好的排序保持能力，但失效模式集合变化时仍可能出现局部逆序。

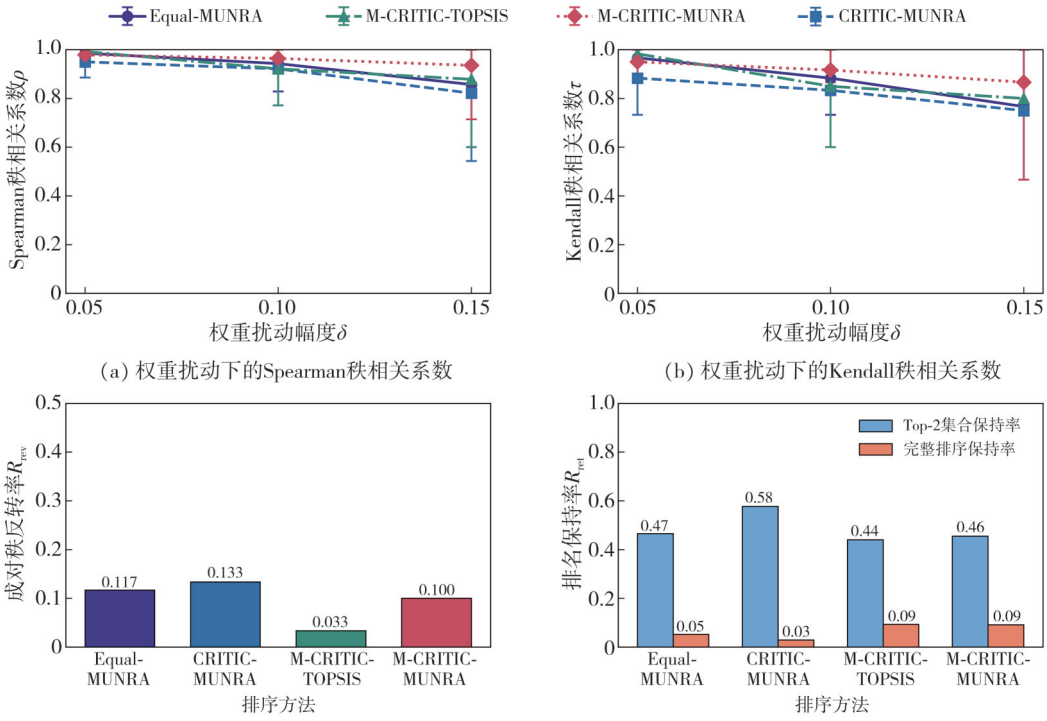
4.3　循环移动块Bootstrap的稳定性分析

多变量循环移动块Bootstrap(Circular Moving Block Bootstrap，CMBB)能够保持时间序列的局部相关性及多变量同步关系[18-19]。块长取同一失效模式4类序列中首个绝对自相关系数小于0.1的最大滞后；无满足值时取样本量立方根，并限制在20～0.1N之间。FM1～FM6的块长分别为2 357，924，40，2 253，1 803和487。每次同步重采样后重新计算风险因子、权重、评分及排名，共重复1 000次，随机种子为20260710。本文将重采样排序前两位的失效模式集合与基线排序前两位集合完全一致的次数占总重采样次数的比例定义为Top-2集合保持率，该指标不考虑前两位失效模式的内部次序；完整排序保持率表示6类失效模式次序与基线排序完全一致的重采样比例。

如图5(d)所示，M-CRITIC-MUNRA的Top-2集合保持率和完整排序保持率分别为0.455和0.091。其Top-2集合保持率低于CRITIC-MUNRA的0.577，但完整排序保持率高于Equal-MUNRA和CRITIC-MUNRA的0.052和0.029。M-CRITIC-MUNRA的Top-2集合保持率为0.455，说明FM1和FM2作为固定前两位组合仍受样本波动影响。但是，F1进入前二的概率为88.1%，其优先性相对稳定。实际应用中不将基线排序视为固定维护次序，而结合Top-2进入概率、平均排名及排名区间形成优先检查组；对排名区间重叠或前二集合不稳定的模式并列排查，并随新增运行数据滚动更新风险排序。

如图6所示，循环移动块Bootstrap下各失效模式的排名呈现不同程度的波动。FM1在1 000次重采样中居首的频率为67.9%，进入前二的概率为88.1%；FM2主要集中于第二位和第三位，而FM4和FM5的排名分布较宽。结果说明，FM1在当前测

试数据下具有较明确的检查优先性，但其他失效模式的相对次序仍受时序样本变化影响。因此，风险排序可作为维护优先级的初步依据，并结合排名分布确定检查顺序。



(a)、(b)中节点表示8种权重扰动场景的平均相关系数，误差棒表示相应场景的最小值-最大值范围

图5 4种赋权-排序方法的稳健性比较

Fig. 5 Robustness comparison of four weighting-ranking methods

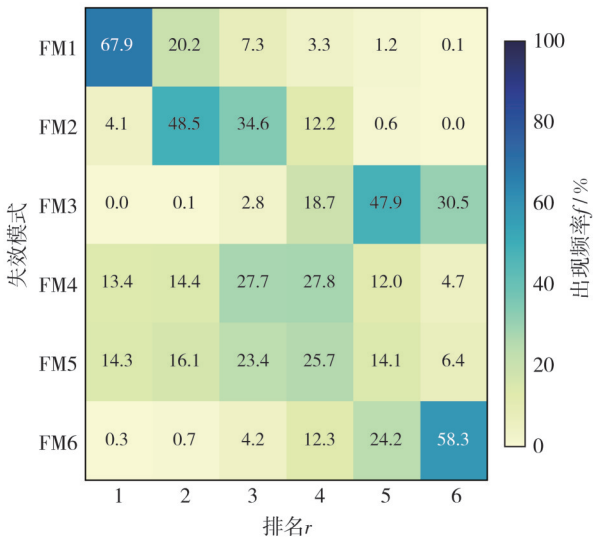


图6 M-CRITIC-MUNRA的Bootstrap排名频率

Fig. 6 Bootstrap ranking frequencies of M-CRITIC-MUNRA

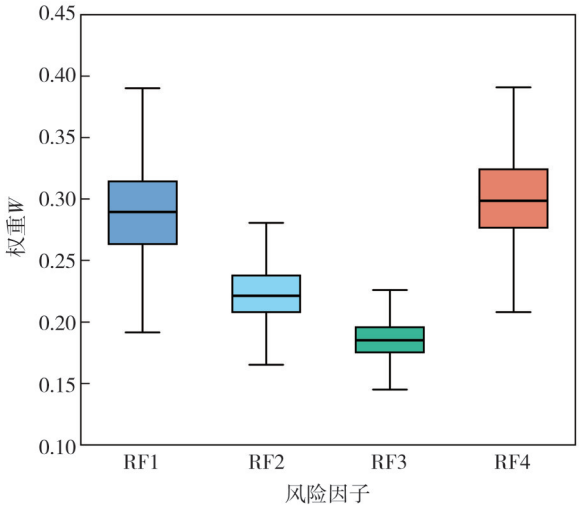


图7 M-CRITIC风险因子权重的Bootstrap分布

Fig. 7 Bootstrap distributions of M-CRITIC risk-factor weights

图7中，RF4和RF1的平均权重分别为0.300 8和0.288 5，95%区间分别为[0.232 0，0.375 1]和[0.210 8，0.364 6]；RF2和RF3的平均权重分别为0.223 9和0.186 8。RF4与RF1区间重叠，说明其相对重要性会随时序样本变化。

总体而言，消融结果验证了M-CRITIC与MUNRA分别在客观赋权和多尺度聚合中的作用，扰动与重采样结果则给出了排序结果的稳定范围。CMBB反映各失效测试内部的时序波动，不能替代跨车辆、故障批次及维修记录的外部验证[20]。

上述稳健性分析主要反映各失效测试内部的

时序波动，FM2实车案例则用于展示运行响应到风险排序的实际计算过程。由于现有数据尚缺少与失效测试严格匹配的正常工况样本及明确的故障起止标签，本文不对正常-故障分类的准确率、误报率或检测延迟进行评价。

5　结　论

本文基于6类车载PEMFC实车失效测试数据，从功率、电压、温度及执行机构响应中提取4类风险因子，建立失效模式—运行变量—风险因子映射，并采用M-CRITIC与MUNRA完成客观赋权和综合排序。FM2低温冷启动案例进一步展示了由实车运行信号提取风险因子并形成风险排序的实际应用过程，其中RF1和RF2均为6类模式中的最高值，FM2基线风险排序位列第2。

RF4和RF1的权重分别为0.305 6和0.291 8，6类失效模式的基线排序为FM1、FM2、FM4、FM5、FM3、FM6。组合消融表明，权重计算方式会影响首要风险判定，排序方法会改变局部次序。权重扰动幅度为0.15时，Spearman均值为0.935 7；留一平均秩反转率为0.100；循环移动块Bootstrap下FM1进入前二的概率为88.1%。

综合结果表明，M-CRITIC与MUNRA的组合能够实现异量纲运行指标的客观赋权和综合排序，为车载PEMFC维护优先级评价提供量化依据。实际应用中应结合Top-2进入概率及排名区间形成优先检查组，并随新增运行数据更新风险排序。受现有数据条件限制，当前研究仅基于单一车型实车失效测试数据，因此，方法的跨车辆和跨批次适用性仍需进一步验证。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献：

[1] Song K, Jia R L, Huang P Y, et al. Functional safety-oriented hazard analysis and risk assessment for vehicular fuel cell systems [J]. Heliyon, 2025, 11(1): e41410.

[2] Çelikdemir M Y, Çelikdemir S, Özdemir M T. Data driven hybrid feature selection and GPR based modeling for identifying critical fault variables in PEMFCs [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2026, 206: 153446.

[3] Chen S Y, Hao M S, Hu Y B, et al. Insight into the evolution of membrane chemical degradation in proton exchange membrane fuel cells: from theoretical analysis to model developing [J]. Journal of Power Sources, 2024, 599: 234238.

[4] Aleksić A, Tadić D, Komatina N, et al. Failure mode and effects analysis integrated with multi-attribute decision-making methods under uncertainty: a systematic literature review[J]. Mathematics, 2025, 13(13): 2216.

[5] Huang A, Yang Y L. FMEA risk assessment method: integration of multi-perspective weights and interval cloud model with TOPSIS approach[J]. Expert Systems with Applications, 2025, 289: 128377.

[6] Gill A, Pielecha I, Szwajca F. A new method of failure mode and severity effects analysis for hydrogen-fueled combustion systems[J]. Energies, 2024, 17(19): 4802.

[7] Brik K, Yahmadi R. Critical failure mode analysis of proton exchange membrane fuel cell using fuzzy risk priority calculation and Pareto ranking [J]. Journal of Applied Engineering Science, 2026, 24(2): 346-357.

[8] Rastayesh S, Bahrebar S, Blaabjerg F, et al. A system engineering approach using FMEA and Bayesian network for risk analysis: a case study[J]. Sustainability, 2019, 12(1): 77.

[9] Aubry J, Steiner N Y, Morando S, et al. Fault tolerant control of a proton exchange membrane fuel cell based on a modified failure mode and effect analysis [C]//2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2020: 1-5.

[10] Komarski D, Vassilev V, Nikolov S, et al. Data-driven process FMEA for flexible manufacturing systems: framework and industrial case study [J]. Applied Sciences, 2026, 16(8): 3760.

[11] Lei L, Li W B, Zhang S W, et al. Research progress on data-driven industrial fault diagnosis methods [J]. Sensors, 2025, 25(9): 2952.

[12] Fu P, Lan Z J, Chen Y S, et al. A review on modeling methods and key parameters control of proton exchange membrane fuel cell based on numerical comparison [J]. Energy Conversion and Management, 2025, 324: 119309.

[13] Diakoulaki D, Mavrotas G, Papayannakis L. Determining objective weights in multiple criteria problems: the critic method [J]. Computers & Operations Research, 1995, 22(7): 763-770.

[14] Sharkasi N, Rezakhah S. A modified CRITIC with a reference point based on fuzzy logic and hamming distance

[J]. Knowledge-Based Systems, 2022, 255: 109768.
[15] Ulutaş A, Ecer F, Turskis Z. Multiple normalization rating analysis (MUNRA) and its application to digital supplier selection in the textile industry[J]. Technological and Economic Development of Economy, 2025, 31(6): 2074-2104.
[16] Paradowski B, Wątróbski J, Sałabun W. Novel coefficients for improved robustness in multi-criteria decision analysis[J]. Artificial Intelligence Review, 2025, 58(10): 298.
[17] Więckowski J, Sałabun W. A new sensitivity analysis method for decision-making with multiple parameters modification[J]. Information Sciences, 2024, 678: 120902.
[18] Efron B. Bootstrap methods: another look at the jackknife[J]. The Annals of Statistics, 1979, 7(1): 1-26.
[19] Politis D N, Romano J P. A circular block-resampling procedure for stationary data[M]//LePage R, Billard L. Exploring the Limits of Bootstrap. New York: Wiley, 1992: 263-270.
[20] Hong J C, Yang J S, Weng Z P, et al. Review on proton exchange membrane fuel cells: safety analysis and fault diagnosis[J]. Journal of Power Sources, 2024, 617: 235118.