

# 基于模糊 FMECA 的新能源 混合动力汽车整车控制器 HCU 失效风险研究

吴琪,丁志刚

(福建理工大学 机械与汽车工程学院,福建 福州 350118)

**摘要:** 混合动力汽车整车控制器 (hybrid control unit, HCU) 是保障汽车安全、可靠运行的重要零件之一,因此在 HCU 产品设计阶段对其进行失效风险分析尤为重要。基于模糊数学理论建立的针对 HCU 产品的模糊 FMECA 决策方法,通过引入模糊数学理论,对传统 FMECA (failure modes, effects and criticality analysis, 故障模式影响及危害性分析) 方法中的专家定性评价结果进行量化处理,形成模糊评价矩阵,并结合加权模型计算各失效模式的综合危害等级,可以有效地将定性评估结果转换成定量评估结果。避免了传统定性分析方法中因主观因素造成的决策失误,能够为 HCU 的开发、设计和决策提供科学可靠的风险评估手段。

**关键词:** HCU;故障;FMECA;模糊数学;失效风险

**中图分类号:** U463.6

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2097-3853(2026)01-0095-08

## Hybrid HCU failure risk study based on fuzzy FMECA

WU Qi, DING Zhigang

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** The hybrid control unit (HCU) is one of the key components ensuring the safe and reliable operation of hybrid electric vehicles. During the design stage of HCU products, it is essential to conduct failure risk analysis. By introducing fuzzy mathematics theory, the fuzzy FMECA decision-making method for HCU products, which is established on the basis of the fuzzy mathematics theory, can quantify the expert qualitative evaluation results in the traditional FMECA, so as to form a fuzzy evaluation matrix. Combined with a weighting model, the comprehensive risk level of each failure mode can be calculated, effectively transforming qualitative assessment results into quantitative ones. It makes up for the decision-making errors caused by subjective factors in the traditional qualitative analysis method and can provide a scientific and reliable risk assessment methods for the development, design, and decision-making of HCU.

**Keywords:** HCU; failure; FMECA; fuzzy mathematics; failure risk

《2023年汽车工业经济运行报告》指出,2023年中国新能源汽车销售量949.5万辆,其中插电式混合动力汽车销售量280.4万辆,比上年增长84.7%<sup>[1]</sup>。HCU作为负责混合动力汽车双动力源控制、能量管理、动力切换和制动能量回收等功能的核心部件,其是否安全可靠与混合动力汽车能否稳定运行和充分发挥性能息息相关,因

此,采用系统性方法对HCU进行深入的故障分析和全面的风险评估显得尤为重要<sup>[2]</sup>。

FMECA作为一种系统性的分析方法,可以用于识别、评估和控制系统或产品的潜在故障模式及其对系统功能的影响,该方法可以帮助设计和制造团队识别和修复潜在的故障模式,提高系统的可靠性和安全性<sup>[3]</sup>。该技术由美国军方首次

收稿日期:2024-09-20

第一作者简介:吴琪(1988—),女,福建三明人,硕士研究生,研究方向:新能源动力控制和机器视觉。

通信作者:丁志刚(1966—),男,辽宁沈阳人,正高级实验师,研究方向:新能源汽车动力匹配和智能检测装备。

提出,早期主要应用于航空航天领域,后因其易用性推广至民用,现广泛应用于各行业<sup>[4]</sup>。传统 FMECA 方法在评估故障模式的严重性、发生概率和可检测性时,依赖于定性分析,难以量化,评估结果易受主观因素的影响,导致准确性不足<sup>[5]</sup>。为克服传统 FMECA 方法中的缺陷,引入模糊数学分析方法,其核心思想是将各个评价指标的值转化为模糊集合,并通过模糊集合的运算和推理得到综合评价结果<sup>[6]</sup>,基于模糊数学的模糊 FMECA 方法可以对专家主观评价进行量化处理,并综合考虑不同故障模式的模糊性、风险等级等因素,合理分配风险因素权重,提高评估结果的科学性和实践指导性<sup>[7]</sup>。

本文基于模糊 FMECA 方法,构建了面向 HCU 失效模式的风险评价体系。该体系首先识别 HCU 典型失效模式作为评估对象。随后建立风险因素集,反映失效对系统可靠性的影响。在此基础上,通过专家打分法构建模糊评价矩阵,并结合权重分配进行模糊综合运算,计算各失效模式的综合危害等级值,实现风险等级排序<sup>[8]</sup>。评价结果可以为 HCU 相关的开发、设计和决策提供参考。

## 1 基于模糊数学的模糊 FMECA 评价方法构建

### 1.1 HCU 系统

HCU 典型结构如图 1 所示,由多个功能模块协同实现对混合动力系统的控制与管理。微控制器作为控制核心,负责执行预设程序指令,调度各模块运行;信号输入/输出模块(I/O)实现与外部传感器和执行器之间的数据交互,确保信号的有效传输;电源模块用于供电路径的选择与稳定,具备电压调节和过压保护功能;存储模块承担程序代码、运行数据和标定参数的存储任务;时钟模块提供时序基准,保证系统按预定频率稳定运行;信号调理模块对输入信号进行滤波、放大与校正,提升信号质量;CAN(controller area network,控制器局域网总线)通讯模块基于控制器局域网络协议,有效降低电磁干扰影响,保证各模块间控制指令、运行参数和状态信息能够实时交互;此外,印刷电路板(printed circuit board, PCB)作为物理载体,实现元器件的集成与互联,保障电路结构的紧凑性与稳定性。

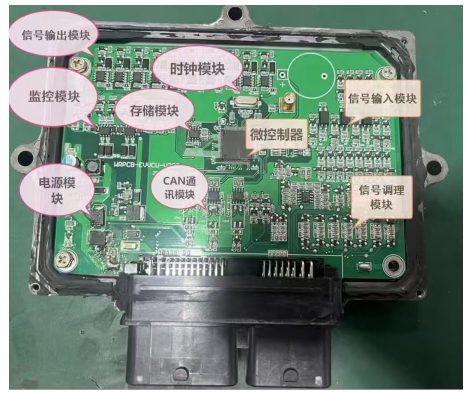


图 1 HCU 典型结构

Fig.1 Typical structure of HCU

### 1.2 典型 HCU 失效模式及危害(Hazards)分析

根据过往工程实践经验与资料统计,典型 HCU 失效模式及其 Hazards 分析,如表 1 所示。

表 1 典型 HCU 失效模式及 Hazards 分析

Tab.1 Typical HCU failure modes and Hazards analysis

序号	失效模式	失效原因	最差失效影响
1	供电失效	电源管理模块损坏	系统失效
2	通信故障	外部电磁干扰	保护模式
3	MCU 过热	软件 Bug 导致超频	保护模式
4	软件不匹配	缺少数据校验	偶发系统失效
5	焊点松动	振动导致焊点松脱	系统失效
6	模数转换器频率超出监控阈值	极端工况下模数转换器频率过低	系统重置
7	输出线路烧蚀	反向电压过高	系统失效

### 1.3 确定风险因素集

风险系数法(risk priority number, RPN)是一种常用的风险分析和评估方法,可用于确定风险的严重程度和优先级。

RPN 法对风险的严重度、发生频率以及监测可能性进行评估<sup>[9]</sup>,形成对应的量化评价表,每个潜在风险依据其严重程度、发生频率以及监测可能性获得相应的评分,将获得的评分相乘,可得出该风险的总分,即 RPN 值。RPN 值越高,表明该风险的优先级越高。根据 RPN 值的大小,可确定每个风险的优先处理次序,最大程度地降低风险对系统的潜在影响。

基于 HCU 的典型失效模式,综合考虑故障对系统的影响程度及危害程度、故障失效检测概率及危害程度、故障自恢复概率及危害程度和失效频率及危害程度等因素定义了 4 种风险因素,即:严重性、失效检测概率、自恢复性和失效频率。

根据失效模式的各项评价指标,建立失效模式  $a$  的风险因素集:

$$U^a = \{u_1^a, u_2^a, \dots, u_i^a\} \quad (1)$$

式中,  $U^a$  为失效模式  $a$  的风险因素集;  $u_i^a$  为失效模式  $a$  的第  $i$  个风险因素。

#### 1.4 建立评价水平集

将各风险因素的评价结果分为若干个评分级,即:

$$V^a = \{v_1^a, v_2^a, \dots, v_g^a\} \quad (2)$$

式中,  $V^a$  为失效模式  $a$  的评价水平集;  $v_g^a$  为失效模式  $a$  的第  $g$  个评价分级结果。

分别定义与 4 个风险因素对应的严重性等级、失效检测概率等级、自恢复性等级和失效频率等级及评分标准<sup>[10]</sup>,如表 2-表 5 所示。

表 2 严重性等级  $u_1^a$  定义

Tab.2 Definition of severity levels

严重性等级说明	影响评分
$v_1$ , 失效导致系统性能下降,但不损害系统或人员	2
$v_2$ , 失效导致系统性能下降,且可能损害系统但不会危害人员	4
$v_3$ , 失效导致系统丢失,但不会损害系统或人员	6
$v_4$ , 失效导致系统丢失,且可能损害系统或人员	8

表 3 失效检测概率等级  $u_2^a$  定义

Tab.3 Definition of failure detection levels

失效检测概率等级说明	影响评分
$v_1$ , 失效可检测,不会对系统产生损害	2
$v_2$ , 失效可检测,会对系统产生损害	4
$v_3$ , 失效难以检测,不会对系统产生损害	6
$v_4$ , 无法检测,会对系统产生不可逆损害	8

表 4 自恢复性等级  $u_3^a$  定义

Tab.4 Definition of self-recovery levels

自恢复性等级说明	影响评分
$v_1$ , 失效可自恢复,不会对系统产生损害	2
$v_2$ , 失效可自恢复,会对系统产生损害	4
$v_3$ , 失效不可自恢复,不会对系统产生损害	6
$v_4$ , 失效不可自恢复,会对系统产生不可逆损害	8

表 5 失效频率等级  $u_4^a$  定义

Tab.5 Definition of failure frequencies

失效频率等级说明	影响评分
$v_1$ , 极少(平均故障时间 < 1000 h)	2
$v_2$ , 较少(平均故障时间 < 100 h)	4
$v_3$ , 偶发(平均故障时间 < 12 h)	6
$v_4$ , 频繁(平均故障时间 < 2 h)	8

#### 1.5 建立风险因素权重集

模糊 FMECA 评价方法用权重评价不同因素对整个系统的重要性和贡献度,通过建立权重集,将不同风险因素的重要性量化为模糊权重,可以提高分析的客观性和可操作性。

$$H^a = \{h_1^a, h_2^a, \dots, h_m^a\} \quad (3)$$

式中,  $H^a$  为失效模式  $a$  的风险因素权重集,  $h_m^a$  为失效模式  $a$  的第  $m$  指标的权重,且权重集满足归一性要求,即:  $\sum_{i=1}^m h_i^a = 1$ 。

#### 1.6 建立模糊因素水平评价矩阵

为了建立 HCU 典型失效模式(本研究中为 7)的评价矩阵,组建了一个由  $p$  人(本研究中为 8)组成的专家评审组,专家评审组所有成员对每个风险因素评出一个且仅一个评价等级  $g$ (本研究中为 4),确定评价集。设第  $a$  个失效模式  $u^a$  的评价集为  $W^a$ ,依次进行各影响因素评价。若  $p$  位成员中评定  $u^a$  隶属于  $v_g$  的有  $p_g^a$  人,则  $u^a$  的评价集  $W^a$  为:

$$W^a = \left\{ \frac{p_1^a}{p}, \frac{p_2^a}{p}, \dots, \frac{p_n^a}{p} \right\} = \{r_1^a, r_2^a, \dots, r_n^a\} \quad (4)$$

式中,  $W^a$  为第  $a$  个失效模式  $u^a$  的评价集;  $r_n^a$  为第  $a$  个失效模式在第  $g$  个分级评价。且评价满足归一性要求,即:  $\sum_{g=1}^n \frac{p_g^a}{p} = 1$ 。

将第  $a$  个失效模式的失效因素评价集写成失

效模式  $a$  模糊因素水平评价矩阵, 矩阵为:

$$\mathbf{R}^a = \{W_1^a, W_2^a, \dots, W_x^a\}^T = \begin{bmatrix} r_{11}^a & r_{12}^a & \dots & r_{1n}^a \\ r_{21}^a & r_{22}^a & \dots & r_{2n}^a \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{x1}^a & r_{x2}^a & \dots & r_{xn}^a \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{R}^a$  为失效模式  $a$  的模糊因素水平评价矩阵;  $W_x^a$  为公式 (4) 给出的单因素评价集;  $r_{xn}^a$  为失效模式  $a$  的第  $i$  个风险因素对应的  $v_g$  的评价。

### 1.7 一级模糊综合评估

将第  $a$  个失效模式的权重系数  $H^a$  与失效模式  $a$  的模糊因素水平评价矩阵  $\mathbf{R}^a$  相乘即可得到失效模式  $a$  的一级综合模糊评价向量  $Q^a$ :

$$Q^a = H^a \cdot \mathbf{R}^a = [h_1^a, h_2^a, \dots, h_m^a] \begin{bmatrix} r_{11}^a & r_{12}^a & \dots & r_{1n}^a \\ r_{21}^a & r_{22}^a & \dots & r_{2n}^a \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{x1}^a & r_{x2}^a & \dots & r_{xn}^a \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 1.8 综合危害等级

将第  $a$  个失效模式的一级综合模糊评价向量  $Q^a$  与失效模式水平评价集  $V^T$  相乘即可得到失效模式  $a$  的综合危害等级  $C^a$ :

$$C^a = Q^a \cdot V^T \quad (7)$$

## 2 基于先验数据的专家风险评估

在 HCU 开发过程中产品成熟度较低, 较难实现准确评价, 常借助过往已开发完成的项目进行比较评价, 本项目基于验证数据分别进行各失效模式评价。

### 2.1 各失效模式实验验证

#### 2.1.1 供电失效

采用故障注入法<sup>[11]</sup>分别模拟 HCU 电源管理芯片损坏、HCU 电源输出短路、输出开路、输出缺项四种常见的供电失效型式, 测试 HCU 工作情况, 如表 6 所示。

表 6 供电失效 HCU 运行状况

Tab.6 HCU operation status with power supply failure

故障	是否工作	是否自恢复
芯片损坏	无法正常工作	否
输出短路	无法正常工作	否

表 6(续)

故障	是否工作	是否自恢复
输出开路	无法正常工作	否
输出缺项	功能受限	是

#### 2.1.2 通讯故障

造成通讯故障的主要方式为传导骚扰与辐射骚扰, 分别采用电源线传导抗扰度测试与开阔场辐射骚扰测试模拟并测试 HCU 在强电磁干扰环境下的运行情况, 如表 7 所示。

表 7 电磁环境异常 HCU 运行状况

Tab.7 HCU operation status in abnormal electromagnetic

environment		
骚扰型式	是否工作	是否自恢复
传导骚扰	功能受限	否
辐射骚扰	正常工作	—

#### 2.1.3 MCU 过热

HCU 的设计工作温度为  $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 使用外部热源加热 MCU 至指定温度, 模拟 MCU 超频工作时的异常高温, 采集 HCU 运行状况, 如表 8 所示。

表 8 异常高温时 HCU 运行状况

Tab.8 HCU operation conditions at abnormally high

temperatures		
温度/ $^{\circ}\text{C}$	是否工作	是否自恢复
90	正常工作	—
100	功能受限	是
110	功能受限	是

#### 2.1.4 软件不匹配

由于 HCU 采用模块化设计, 不同车型及企业的整车平台在制造或调试过程中存在刷写与硬件配置不匹配软件的风险, 可能导致系统功能异常或运行故障。为验证此类缺陷对 HCU 运行状态的影响, 通过模拟错误刷写操作, 测试 HCU 在软件与硬件不兼容情况下的工作表现, 如表 9 所示。

表 9 输入错误软件时 HCU 运行状况

Tab.9 HCU operation status with incorrectly entered software

错误软件	是否工作	是否自恢复
1	否	—
2	否	—
3	否	—
4	功能受限	—

## 2.1.5 焊点松动

选取若干个 HCU 零件安装至振动台架,使用强化振动台架模拟恶劣的振动工况,加快 HCU 老化,测试方法参照《环境试验 第 2-6 部分:试验-试验 Fc: 振动(正弦)》(IEC 60068-2-6:2007)<sup>[12]</sup>,试验条件见表 10,强化台架振动测试结果,如表 11 所示。为进一步确认通过强化振动测试后的 HCU 元器件焊点情况,随机抽取两个样

件进行切片 CT 检测,结果如图 2 所示。

表 10 强化振动试验条件

Tab.10 Enhanced vibration test conditions

环境 温度/℃	振动 加速度/G	振动 频率/Hz	时长/h	是否 通电
85	3.3~3.9	10~1 000	16	是

表 11 强化振动时 HCU 运行状况

Tab.11 HCU operation status during enhanced vibration

样品编号	测试时间/h	是否工作	是否自恢复
1	16	是	—
2	16	是	—
3	16	是	—
4	16	是	—
5	16	是	—

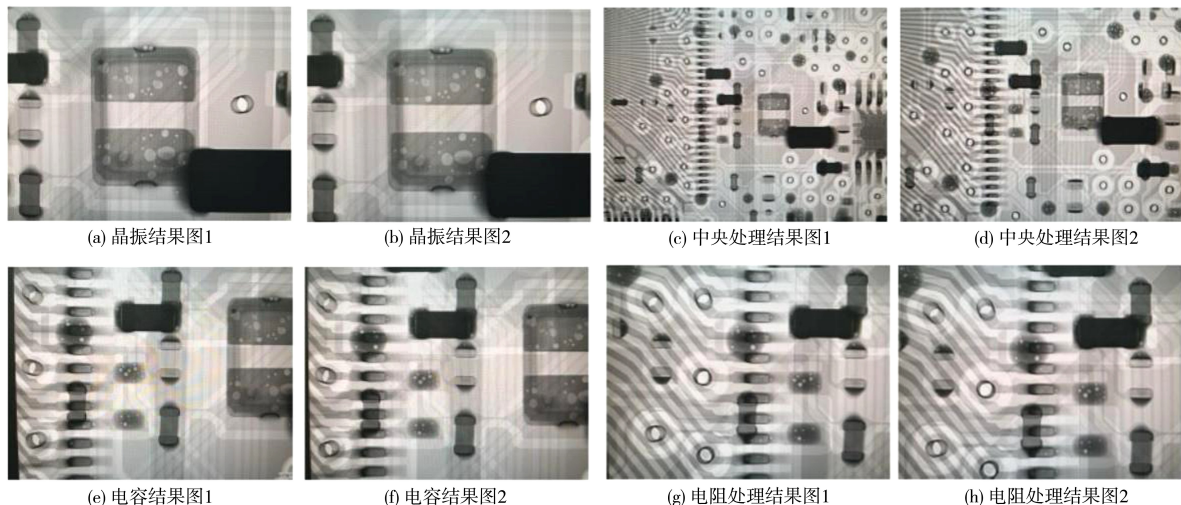


图 2 HCU 切片 CT 影像

Fig.2 CT image of HCU section

根据图 2 的 CT 影像分析,HCU 经过强化振动后,其晶振、中央处理器、电容、电阻的焊点无松动、松脱现象。

## 2.1.6 模数转换器频率超出监控阈值

软件监控频率为 14.545 MHz,通过改变采样时钟软件频率调整模数转换器的频率,使之低于或高于软件监控频率,对应的 HCU 运行状况如表 12 所示。

表 12 不同采样频率下 HCU 运行状况

Tab.12 HCU operation status at different sampling frequencies

频率/MHz	是否工作	是否自恢复
13.09	否	否
13.82	是	—
15.27	是	—
16.00	否	否

### 2.1.7 输出线路烧蚀

鉴于反向电压过高时可能引发电气击穿或设备损坏,带电测试存在较高安全风险,因此采用断电条件下的耐压测试模拟输出线路烧蚀的失效模式。测试前,测量典型火花塞的关键参数及其对应的反向电压值,为后续设定耐压等级提供依据,如表 13 所示。

表 13 典型火花塞反向电压

Tab.13 Typical spark plug reverse voltage

火花塞材质	热值	火花塞间隙/mm	反向电压/V
镍合金	320	1.05	700~900
铱金	320	0.9	300~600
双铂金	360	0.8	250~400

选取两款已完成开发阶段的 HCU 样机,开展静态耐压测试以评估其在反向电压工况下的失效风险。测试中采用高压直流电作为反向电压的替代信号源。虽然直流电与真实反向电压在波形上存在一定差异,但其测试工况更为严苛,能够更有效地揭示 HCU 在极端电压应力下的抗击穿能力。测试电压设定为 400、600、900 和 1 300 V 四档,每项电压等级下进行 20 次试验,共累计 80 次试验,测试结果详见表 14。

表 14 耐压测试结果

Tab.14 Voltage-withstanding test results

平台	直流电压/V	测试次数/次	单次时长/s	是否工作	是否自恢复
1	400	20	30	是	是
1	600			是	是
1	900			否	是
1	1 300			否	否
2	400			是	是
2	600			是	是
2	900			是	是
2	1 300			是	是

由表 14 可知,HCU 样机平台 2 的抗击穿能力优于平台 1,更具优势。因此,耐压测试可以有效评估 HCU 在极端电压条件下的抗击穿能力,为

HCU 的设计改进和可靠性评估提供有价值的数值支持。

## 2.2 权重评估

结合过往工程经验以及专家评审结果,对失效模式的严重性、失效检测概率、自恢复性和失效频率四个核心因素进行加权处理,形成权重集  $H$ 。组建由 8 名具备新能源汽车电控系统设计、试验验证及故障诊断经验的专家构成的评审小组,采用德尔菲法<sup>[13]</sup>对各风险因素的重要性进行独立评分。评分标准按照“对系统整体风险贡献度”的大小,划分为 1~5 级,将收集到的评分数据进行归一化处理,形成初步权重向量。结合典型 HCU 故障案例与 FMECA 分析的权重分布趋势,对初步结果进行修正和一致性验证,以提升权重分配的客观性。最终确定权重集合  $H$  如表 15 所示。

表 15 失效权重集

Tab.15 Set of failure weights

风险因素	严重性	失效检测概率	自恢复性	失效频率
权重	0.28	0.31	0.16	0.25

## 2.3 综合模糊评价

专家基于历史测试数据,对表 1 中 7 种典型 HCU 失效模式进行 RPN 评估。以表 1 中典型失效模式 1 供电失效模式为例,专家组评估结果如下:

严重性等级评价水平集为:

$$W_1^1 = \{0, 0.250, 0.375, 0.375\} \quad (8)$$

失效检测概率等级评价水平集为:

$$W_2^1 = \{0, 0.125, 0.500, 0.375\} \quad (9)$$

自恢复性等级评价水平集为:

$$W_3^1 = \{0, 0, 0.250, 0.750\} \quad (10)$$

失效频率等级评价水平集为:

$$W_4^1 = \{0.500, 0.375, 0.125, 0\} \quad (11)$$

综上可得,典型失效模式 1 的模糊评价矩阵如下:

$$R^1 = \{W_1^1, W_2^1, W_3^1, W_4^1\}^T = \begin{bmatrix} 0 & 0.250 & 0.375 & 0.375 \\ 0 & 0.125 & 0.500 & 0.375 \\ 0 & 0 & 0.250 & 0.750 \\ 0.500 & 0.375 & 0.125 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

同理可得典型失效模式的评价矩阵为:

$$R^2 = \begin{bmatrix} 0.125 & 0.250 & 0.500 & 0.125 \\ 0.375 & 0.375 & 0.250 & 0 \\ 0.250 & 0.250 & 0.375 & 0.125 \\ 0.250 & 0.500 & 0.250 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$R^3 = \begin{bmatrix} 0.250 & 0.5 & 0.250 & 0 \\ 0.625 & 0.375 & 0 & 0 \\ 0.375 & 0.375 & 0.250 & 0 \\ 0.375 & 0.375 & 0.250 & 0.125 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$R^4 = \begin{bmatrix} 0.250 & 0.375 & 0.250 & 0.125 \\ 0.750 & 0.250 & 0 & 0 \\ 0 & 0.750 & 0 & 0.25 \\ 0.625 & 0.375 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$R^5 = \begin{bmatrix} 0.250 & 0.375 & 0.125 & 0.250 \\ 0.125 & 0.375 & 0.375 & 0.125 \\ 0 & 0.625 & 0.250 & 0.125 \\ 0.750 & 0.250 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$R^6 = \begin{bmatrix} 0.375 & 0.250 & 0.250 & 0.125 \\ 0.125 & 0.250 & 0.500 & 0.125 \\ 0.250 & 0.375 & 0.375 & 0 \\ 0.5 & 0.375 & 0.125 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$R^7 = \begin{bmatrix} 0 & 0.125 & 0.500 & 0.375 \\ 0 & 0.125 & 0.625 & 0.250 \\ 0 & 0.125 & 0.500 & 0.375 \\ 0.375 & 0.500 & 0.125 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

## 2.4 一级模糊综合评估

根据公式(6),以表 1 中典型失效模式 1 供电失效模式为例,计算失效模式 1 的模糊评价向量如下:

$$Q^1 = H^1 \cdot R^1 = [0.280 \quad 0.310 \quad 0.160 \quad 0.250]$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.250 & 0.375 & 0.375 \\ 0 & 0.125 & 0.500 & 0.375 \\ 0 & 0 & 0.250 & 0.750 \\ 0.5 & 0.375 & 0.125 & 0 \end{bmatrix} =$$

$$[0.125 \quad 0.202 \quad 0.331 \quad 0.341]$$

(19)

同理,其他典型失效模式的模糊评价向量为:

$$Q^2 = [0.253 \quad 0.351 \quad 0.340 \quad 0.055]$$

$$Q^3 = [0.417 \quad 0.410 \quad 0.172 \quad 0.031]$$

$$Q^4 = [0.458 \quad 0.396 \quad 0.070 \quad 0.075]$$

$$Q^5 = [0.296 \quad 0.383 \quad 0.191 \quad 0.128]$$

$$Q^6 = [0.308 \quad 0.301 \quad 0.316 \quad 0.073]$$

$$Q^7 = [0.093 \quad 0.218 \quad 0.445 \quad 0.242]$$

## 2.5 综合危害等级计算与排序

根据公式(7),以表 1 中典型失效模式 1 供电失效模式为例,计算综合危害等级:

$$C^1 = Q^1 \cdot V^T = [0.125 \quad 0.202 \quad 0.331 \quad 0.341]$$

$$[2 \quad 4 \quad 6 \quad 8]^T = 5.777 \quad (20)$$

同理可得,其他典型失效模式的综合危害等级为:

$$C^2 = 4.392 \quad C^3 = 3.760 \quad C^4 = 3.522$$

$$C^5 = 4.305 \quad C^6 = 4.310 \quad C^7 = 5.672$$

综合危害等级  $C$  值越大表示该失效模式的风险越高。根据模型计算结果,确定 HCU 系统的 7 种典型失效模式的危害程度排序,即:输出线路烧蚀>供电失效>通信故障>模数转换器频率超出监控阈值>焊点松动>MCU 过热>软件不匹配。在 HCU 的研发早期阶段,应该重点关注危害程度高的失效模式,并进行针对性地改进与验证。

## 3 结论

针对 HCU 典型失效问题提出的基于模糊数学的模糊 FMECA 评估方法,通过建立包含严重性、失效检测概率、自恢复性与失效频率在内的四维评价指标体系,并采用专家评估赋权的方法合理分配权重,改进了传统 FMECA 在风险等级判定中的主观性问题。评估结果显示,输出线路烧蚀、供电失效和通信故障为 HCU 最具风险的失效模式,应在设计与验证阶段重点防控。该评估方法具有良好的工程适应性和推广价值,可为新能源汽车控制系统的可靠性设计和故障预警策略提供有效支撑。后续可结合实车运行数据与失效行为演化模型,进一步提高风险评估的动态性与精度。

## 参考文献:

- [1] 中国汽车工业协会. 2023 年汽车工业经济运行报告[R/OL]. (2024-07-05)[2024-9-20]. <https://finance.sina.com.cn/wm/2024-07-05/doc-inccesa6337176.shtml>.
- [2] HÄRING I. Introduction to system analysis methods[M]//Technical Safety, Reliability and Resilience. Singapore: Springer Singapore, 2021: 57-69.

- [3] ZHANG M, LIU S F, HOU X R, et al. Reliability modeling and analysis of a diesel engine design phase based on 4F integration technology[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(13): 6513.
- [4] FAKHRAVAR H. Application of failure modes and effects analysis in the engineering design process[D]. Norfolk, VA, USA: Old Dominion University, 2020.
- [5] SINGH J, SINGH S, SINGH A. Distribution transformer failure modes, effects and criticality analysis (FMECA)[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 99: 180–191.
- [6] 杨波, 刘振, 卫新洁, 等. 一种针对嵌入式系统的安全性分析方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2023, 49(8): 1930–1939.
- [7] 欧阳中辉, 胡道畅, 陈青华, 等. 基于模糊集理论和 TOPSIS 的 FMEA 分析方法[J]. *兵器装备工程学报*, 2020, 41(11): 117–123.
- [8] DONG Q, ZHANG G H, ZHAO Y Q, et al. Reliability analysis of FMECA threshing and cleaning system based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. *INMATEH Agricultural Engineering*, 2023: 173–184.
- [9] Facility energy system resilience and reliability: UFC 3–520–02[S]. Washington, DC: Department of Defense, 2023–07–27 (Change 1, 2025–01–29).
- [10] 李果, 刘俊博, 周惠敏, 等. 航空发动机限寿命件高效失效概率算法研究综述[J]. *航空动力学报*, 2022, 37(11): 2398–2407.
- [11] 魏朗, 周文财, 田顺, 等. 强化试验技术在车辆可靠性试验中的应用[J]. *机械设计*, 2020, 37(1): 1–9.
- [12] International Electrotechnical Commission. Environmental testing—Part 2–6: Tests—Test Fc: Vibration (sinusoidal); IEC 60068–2–6: 2007[S]. International Electrotechnical Commission, 2007.
- [13] DUBROV G M, YERSHOV Y M, LEVIN Y I, et al. Expert estimates in scientific and technical forecasting[M]. Kyiv: Naukova Dumka, 1994.
- [14] 唐少波, 王田宇, 温业堃, 等. 基于 FMECA 的产品可靠性分析方法[J]. *电子产品可靠性与环境试验*, 2022, 40(5): 61–63.

(责任编辑: 马晓磊)

(上接第 94 页)

- [9] SOURANDER T, PIETOLA M, MINAV T, et al. Sensorless position estimation of simulated direct driven hydraulic actuators[C] // *Proceedings of the 15th Scandinavian International Conference on Fluid Power*. Linköping, Sweden: Linköping University Electronic Press, 2017(144): 148–159.
- [10] 张树忠, 张兰, 刘喜涛, 等. 伺服电动机驱动泵控缸的位移软测量方法[J]. *液压与气动*, 2021, 45(7): 116–120.
- [11] ZHANG S Z, CHEN T Y, MINAV T, et al. Position soft-sensing of direct-driven hydraulic system based on back propagation neural network[J]. *Actuators*, 2021, 10(12): 322.
- [12] 李泽林, 刘成颖. 基于 Adaboost 算法的环抛机盘面钝化程度分类[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2021, 61(9): 986–993.
- [13] 顾玉磊, 马晖, 王愚勤, 等. 基于 BP-Adaboost 与 TOPSIS 的航空装备供应商评价[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2024, 54(1): 63–73.
- [14] 陈世平, 谢俊, 罗小, 等. 基于 BP-Adaboost 算法的数控机床材料切削能耗预测研究[J]. *制造技术与机床*, 2020(12): 20–24.
- [15] SÅ, RENSEN J K, HANSEN M R, EBBESEN M K. Numerical and experimental study of a novel concept for hydraulically controlled negative loads[J]. *Modeling, Identification and Control: a Norwegian Research Bulletin*, 2016, 37(4): 195–211.
- [16] 国钰, 张树忠, 王亚兵, 等. 中型挖掘机泵控系统 with 阀控系统的能效对比[J]. *液压与气动*, 2024, 48(7): 129–134.
- [17] 国家质量监督检验检疫总局 中国国家标准化管理委员会. 土方机械 液压挖掘机和挖掘装载机的反铲斗和抓铲斗容量标定: GB/T 21941—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

(责任编辑: 方素华)