

基于联合距离评估法的共享电动汽车驾驶风险评估

李延来, 张殿峰, 申子凡

(辽宁大学 商学院, 辽宁 沈阳 110036)

摘要: 基于模糊信息和多属性决策, 提出一套共享电动汽车 (SEVs) 失效模式与影响分析 (FMEA) 方法, 包括采用互评法进行专家筛选与赋权, 构建风险评估标准, 采用共识理论对专家意见进行检验, 采用贴程度最优化法对风险因子进行客观赋权, 引入联合距离评估 (CODAS) 法对失效模式的风险水平进行排序等。结果表明, 高风险的失效模式主要分布在动力系统和行车系统。灵敏度分析和对比分析验证了结果稳健性和方法有效性。最后, 提出了可行性安全管理措施建议。

关键词: 共享电动汽车 (SEVs); 风险评估; 安全管理; 共识检验; 联合距离评估 (CODAS) 法

中图分类号: X820.4; F272.3

文献标志码: A

Driving Risk Assessment of Shared Electric Vehicles Based on CODAS Method

LI Yanlai, ZHANG Dianfeng, SHEN Zifan

(School of Business, Liaoning University, Shenyang 110036, China)

Abstract: Based on the fuzzy information and multi-attribute decision making, a failure mode and effect analysis (FMEA) method for shared electric vehicles (SEVs) was proposed, including determining experts candidate and their authority weights through mutual evaluation, constructing risk assessment criteria through qualitative analysis, testing expert opinions using consensus theory, objectively weighting risk factors using close degree optimization method, and ranking the risks of failure modes by introducing the combinative distance-based assessment (CODAS) method. The results show that high-risk failure modes are mainly distributed in power system and driving system. The robustness of the

results and the validity of the method were verified by sensitivity analysis and comparative analysis. Finally, feasible safety management measures were proposed.

Key words: shared electric vehicles (SEVs); risk assessment; safety management; consensus inspection; combinative distance-based assessment (CODAS) method

共享电动汽车 (SEVs) 属于共享经济范畴, 具有非排他性、所有权与分时使用权分离、客户按次付费等特性, 已在北京、青岛、宁波、杭州等大型城市推广^[1]。在高质量出行的需求下, 共享汽车模式的存在具有必然性和必要性, 目前共享电动汽车主要在城市内外环交通中被频繁使用, 可以很好地满足消费者各个时段、多种目的的出行需求^[2]。共享电动汽车具有可持续性, 可以缓解城市交通压力, 提升机动车利用率, 对环境的负面影响小, 对于实现碳中和具有重要的促进作用^[3], 因而共享电动汽车的发展具有长远意义。

周溢等^[4]认为, 电动汽车在环境方面具有亲和性, 在可持续性方面明显优于燃油汽车, 但是消费者对电动汽车存在一定的怀疑, 需要提升其社会层面的表现, 消除消费者的质疑。消费者对使用电动汽车的担忧有一定的道理。王博等^[5]认为, 电动汽车刚刚经历技术范式萌芽阶段, 发展比较迅速, 技术标准还有待完善, 总体而言在技术发展方面还不如燃油汽车成熟。电动汽车与燃油汽车的区别主要在动力系统方面。王震坡等^[6]研究表明, 动力电池存在电压失稳、局部高温、热失控等风险, 且风险随着里程的增加而增加, 并可能引起电池损坏、着火、爆炸等问题, 需要严格的安全管理和维护。另外, 由于共

收稿日期: 2022-02-17

基金项目: 国家自然科学基金 (71872153); 辽宁省“兴辽英才”计划之攀登学者项目 (XLYC2002059); 辽宁省教育厅面上项目 (LJKR0048)

第一作者: 李延来 (1971—), 男, 教授, 博士生导师, 管理学博士, 主要研究方向为系统工程、决策理论与方法、运作管理等。E-mail: lyl_2001@163.com

通信作者: 张殿峰 (1987—), 男, 博士生, 主要研究方向为运作管理、决策理论与方法、风险管理、消费者行为等。E-mail: zdf_1987@163.com



论文
拓展
介绍

享中存在不确定性、信息不对称性、车辆频繁使用、驾驶员可能操作不当,以及车辆维修不及时或不彻底等问题导致共享电动汽车使用存在较多的风险。余静财等^[7]研究表明,车辆障碍、使用障碍问题对消费者选择共享电动汽车有负面影响,应当抑制这些因素。赵敏等^[8]研究表明,感知风险对于消费者使用共享电动汽车具有负向影响,降低消费者的感知风险对于共享电动汽车的推广意义重大。综上,共享电动汽车作为新兴事物,在汽车技术、安全管理方面存在隐患,一旦出现危险将造成较大的财产损失甚至人员伤亡,对共享电动汽车的推广也会带来负面影响。基于此,将从驾驶安全角度对共享电动汽车进行系统的风险评估。

失效模式及影响分析(FMEA)方法由美国国家航天局于20世纪60年代首次提出^[9]。FMEA方法是一种有效的安全和可靠性分析工具,在机械安全^[10]、交通运输^[11]、产品质量^[12]等领域被广泛应用。FMEA方法通过失效模式的发生概率、严重程度、检测难度3个风险因子的乘积确定风险优先数(RPN),RPN值越大代表失效模式越严重^[13]。在应用中,FMEA方法存在一定的局限性,主要体现在风险因子难以精确确定、没有考虑风险因子的相对重要性、不同风险因子相乘得到相同的RPN值、波动性敏感等问题^[14-15]。

为避免出现RPN值失效的问题,众多学者基于多属性决策方法和模糊信息提出了改进的模糊FMEA方法^[16]。耿秀丽等^[17]在起重机故障模式研究中对FMEA方法进行了改进,引入了犹豫模糊集语义术语对风险因子进行模糊评估,通过多准则妥协排序(VIKOR)方法对风险模式进行风险排序。周文财等^[18]在研究轻型客车故障模式问题时基于三角模糊数将客观数据与专家评估相结合,通过模糊层次分析法(AHP)计算风险因子权重,采用模糊拓展全乘比例多目标优化(MULTIMOORA)计算失效模式的重要程度,并对其风险水平进行了排序。Bashan等^[19]为了研究船舶航行安全问题,使用单值中性集对安全因素进行了评估,通过单值中性集加权平均(SVNWAO)法计算了风险因子的权重,并采用逼近理想解(TOPSIS)法对安全问题进行了排序。Liu等^[20]在研究绿色物流风险问题时,通过概率语言对失效模式进行了评估,提出了一个基于风险态度的权重计算模型,并通过后悔理论与偏好序结构排序法(PROMETHEE)相结合的方式对运输风险进行了排序。

以往研究对FMEA方法的改进还存在一些不足。Wu等^[21]对FMEA方法的应用进行了系统的文献回顾,发现评估标准的建立和应用方面研究较少、风险评估的流程不完整等问题。基于此,在研究共享电动汽车失效模式的过程中,提出了较为完善的模糊FMEA方法,包括完善专家筛选及赋权流程,构建风险评估标准,对专家意见进行共识检验,对风险因子进行客观赋权,引入联合距离评估(CODAS)法对失效模式的风险水平进行排序。

1 问题描述

从共享电动汽车安全角度进行分析,挖掘出失效模式,并进行驾驶风险评估,以此帮助运营平台将有限的资源合理地分配到风险防控中。为了便于风险评估,现对计算过程中的主客体做出符号设定。

令 $E_t(t=1, 2, \dots, T)$ 表示参与风险评估的专家,其中 T 为参与评估的专家人数;令 $R_i(i=1, 2, \dots, m)$ 表示不同的风险因子,其中 m 为风险因子个数;令 $F_j(j=1, 2, \dots, n)$ 表示失效模式,其中 n 表示驾驶过程中存在的失效模式数量。专家 E_t 给出的评价矩阵可以定义为 $E_{tj}=(e_{tj})_{m \times n}$,其中 e_{tj} 为专家 E_t 针对失效模式 F_j 的风险因子 R_i 的评估值。考虑到不同专家的权威性差异,通过相互评价的方法对专家 E_t 赋予权重值 λ_t ,权重值满足 $\lambda_t \geq 0$ 且 $\sum_{t=1}^T \lambda_t = 1(t=1, 2, \dots, T)$ 。令 w_i 表示风险因子的权重,权重值满足条件 $w_i \geq 0$ 且 $\sum_{i=1}^m w_i = 1(i=1, 2, \dots, m)$ 。

2 风险评估方法

基于模糊FMEA的综合评估方法共包括4个步骤:通过权威值互评法确定专家人选和专家的评估权重;由专家组筛选失效模式,通过建立评估标准对失效模式的风险进行评估,并采用共识理论对评估值进行验证,最终获得符合共识条件的风险评估矩阵;整合专家评估矩阵,通过贴适度最优化法计算不同风险因子的客观权重;通过联合距离评估法计算联合距离,并根据距离大小对失效模式的风险水平进行排序。

2.1 语言短语集

语言变量符合人们的评价习惯,可以描述复杂

与不确定性的问题,并能够体现认知的模糊性^[22]。语言短语集是一组预先设定的包含多个语言变量的集合,这些语言变量具有层级化的特征,可以对具有不确定性的对象进行模糊评估^[23]。设 S 为语言短语集,即 $S = \{s_v | v = 0, 1, \dots, (V/2) - 1, V/2, (V/2) + 1, \dots, V\}$,其中 s_v 代表集合 S 中第 $v + 1$ 个语言变量, V 一般为偶数。 S 具有以下特征:有序性和极值性,当 $v > v'$ 时,有 $s_v > s_{v'}$,且当 $s_v > s_{v'}$ 时,有 $\max\{s_v, s_{v'}\} = s_v$ 和 $\min\{s_v, s_{v'}\} = s_{v'}$;可逆性,令 neg 表示逆算子,若 $v' = V - v$,则有 $\text{neg}(s_v) = s_{v'}$ 。本研究中,设 $V = 8$,即有 $S = \{s_0, s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7, s_8\} = \{\text{很低}(\text{very low, VL}), \text{较低}(\text{relatively low, RL}), \text{低}(\text{low, L}), \text{略低}(\text{slightly low, SL}), \text{中等}(\text{middle, M}), \text{略高}(\text{slightly high, SH}), \text{高}(\text{high, H}), \text{较高}(\text{relatively high, RH}), \text{很高}(\text{very high, VH})\}$ 。

为了便于计算,可以将语言变量转化为三角模糊数。设专家评估值 e_{ij} 为语言短语集中的某一语言变量 s_v ,则其转化公式为^[24]

$$s_v = e_{ij} = (e_{ij, \text{low}}, e_{ij, \text{mid}}, e_{ij, \text{high}}) = (\max\{(v - 1)/V, 0\}, v/V, \max\{(v + 1)/V, 1\}) \quad (1)$$

2.2 选择评价专家并确定其评估权重

风险评估需要专家具备相应的知识背景或从业经验。设有 T 名专家具备评价资质,将各位专家的信息分别交给候选人,由候选人对自己及其他人的权威值进行评估,其中候选人自己的权威值设置为中等(M)。设 $P_{kt}(t, k = 1, 2, \dots, T)$ 为第 k 位专家对第 t 位专家评估的权威值,则通过比较 $\frac{1}{T} \sum_{k=1}^T P_{kt}$ 与 M 的大小确定专家是否入选评估团队,若 $\frac{1}{T} \sum_{k=1}^T P_{kt} > M$ 则入选,反之则不入选。

通过计算专家权威值与参照值的欧氏距离关系确定权重。设权威值的距离为 $\lambda_{t, \text{dis}} = d\left(\frac{1}{T} \sum_{k=1}^T P_{kt}, M\right)$ ($k = 1, 2, \dots, T$),则专家的评估权重为

$$\lambda_t = \frac{d\left(\frac{1}{T} \sum_{k=1}^T P_{kt}, M\right)}{\sum_{t=1}^T d\left(\frac{1}{T} \sum_{k=1}^T P_{kt}, M\right)}, k, t = 1, 2, \dots, T \quad (2)$$

2.3 失效模式与风险水平评估

专家团队成立后,专家需要筛选失效模式,并对失效模式的风险水平进行评估,评估完成后可形成

初始决策矩阵。为了保证评估的一致性,专家的评估信息还需要进行共识检验,如果专家的评估意见符合共识水平就进行下一步计算,如果专家的评估意见没有达到共识水平就需要对不满足条件的内容进行再次评估,以达到共识水平^[25]。假设2位专家对同一失效模式下不同风险因子的评估值分别为 e_{ij} 与 e_{kij} ,那么2个专家评估的相似性矩阵可定义为

$$\alpha_{kij} = 1 - d_s(e_{ij} - e_{kij}) \quad (3)$$

式中: $d_s(e_{ij} - e_{kij})$ 为2个专家的评估值通过归一化运算后的欧式距离。设 ϕ 为算数平均算子,则专家评估值的聚合相似矩阵可定义为

$$\beta_{ij} = \phi(\alpha_{kij}) \quad (4)$$

令 δ_j 表示失效模式的共识水平,则有

$$\delta_j = \frac{\sum_{i=1}^m \alpha_{kij}}{n} \quad (5)$$

根据一致性检验原则,专家的评估需满足以下共识条件:

$$\min \delta_j > \epsilon \quad (6)$$

式中: ϵ 为共识参数, $\epsilon \in [0.5, 1]$ 。参照Li等^[26]的研究,取 $\epsilon = 0.85$ 。

在获得符合专家共识水平的评估矩阵后,依据不同专家的权重进行加权计算,可以得到整合的风险因子决策矩阵,如下所示:

$$E = \sum_{i=1}^T E_{ij} = \lambda_t (e_{ij})_{m \times n} \quad (7)$$

式中: e_{ij} 为通过转换后再计算得到的三角模糊数, $e_{ij} = (e_{ij, \text{low}}, e_{ij, \text{mid}}, e_{ij, \text{high}})$ 。

2.4 利用贴近度最优化法计算风险因子的客观权重

利用TOPSIS法构建最大化贴近度的优化模型,计算贴近度最优化权重。通过本方法,可以计算出区分度最大的权重^[27]。贴近度最优化法计算步骤如下:

步骤1 计算三角模糊数的分级平均积分 \bar{e}_{ij} ,对三角模糊数进行转化^[28-29],用于比较三角模糊数的大小。 \bar{e}_{ij} 的计算式如下所示:

$$\bar{e}_{ij} = \frac{e_{ij, \text{low}} + 4e_{ij, \text{mid}} + e_{ij, \text{high}}}{6} \quad (8)$$

步骤2 根据 \bar{e}_{ij} 的大小确定正负理想解 f_j^+ 与 f_j^- 的值,计算式如下所示:

$$\begin{cases} f_i^+ = \max(e_{ij, \text{low}}, e_{ij, \text{mid}}, e_{ij, \text{high}}) \\ f_i^- = \min(e_{ij, \text{low}}, e_{ij, \text{mid}}, e_{ij, \text{high}}) \end{cases} \quad (9)$$

\bar{e}_{ij} 最大的模糊数为正理想解,最小的为负理想解。

步骤3 根据欧式距离公式,分别计算失效模式各风险因子评估值与正负理想解的距离。

步骤4 计算每个评估值的贴近度 ρ_{ij} ,如下所示:

$$\rho_{ij} = \frac{d(e_{ij}, f_{ij}^-)}{d(e_{ij}, f_{ij}^+) + d(e_{ij}, f_{ij}^-)} \quad (10)$$

步骤5 设风险因子的非归一化权重向量 $\mathbf{w}^* = (w_1^*, w_2^*, \dots, w_m^*)^T$,则可确定 F_j 的贴近度 ρ_j ,计算式如下所示:

$$\rho_j = \sum_{i=1}^m w_i^* \rho_{ij}$$

步骤6 合理的权重向量应该使得贴近度最大化,基于此构建多目标优化模型 Model-1。设权重向量 \mathbf{w}^* 满足条件 $w_1^{*2} + w_2^{*2} + \dots + w_m^{*2} = Q$,其中 Q 为实数,且 $Q > 0$ 。由向量的性质可知, Q 可以是任何大于0的实数,且经过归一化处理后可以得到唯一的一组归一化向量 $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T$ 。目标优化模型 Model-1 表示为

$$\begin{aligned} & \max (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n) \\ \text{s.t. } & \begin{cases} \mathbf{w}^* = (w_1^*, w_2^*, \dots, w_m^*)^T \\ w_1^{*2} + w_2^{*2} + \dots + w_m^{*2} = Q, w_i^* \geq 0 \end{cases} \end{aligned}$$

因为各失效模式是同等重要的,所以可以采用线性加权和的方法将 Model-1 转化为线性规划模型 Model-2,求解此模型即可得各风险因子的归一化权重。线性规划模型 Model-2 表示为

$$\begin{aligned} & \max Z = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m w_i^* \rho_{ij} \\ \text{s.t. } & \begin{cases} \mathbf{w}^* = (w_1^*, w_2^*, \dots, w_m^*)^T \\ w_1^{*2} + w_2^{*2} + \dots + w_m^{*2} = Q, w_i^* \geq 0 \end{cases} \end{aligned}$$

步骤7 求解 Model-2。构建以下拉格朗日函数:

$$L = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m w_i^* \rho_{ij} + \phi(w_1^{*2} + w_2^{*2} + \dots + w_m^{*2} - Q)$$

通过对 w_i^* 和参数 ϕ 求偏导,得

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial w_i^*} = \sum_{j=1}^n \rho_{ij} + 2\phi w_i^* = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \phi} = w_1^{*2} + w_2^{*2} + \dots + w_m^{*2} - Q = 0 \end{cases}$$

$$D_{Ej} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \frac{1}{3} [(l_{ij,low} - g_{i,low})^2 + (l_{ij,mid} - g_{i,mid})^2 + (l_{ij,high} - g_{i,high})^2]} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} D_{Tj} = & \sum_{i=1}^m \frac{1}{3} (|l_{ij,low} - g_{i,low}| + |l_{ij,mid} - g_{i,mid}| + \\ & |l_{ij,high} - g_{i,high}|) \end{aligned} \quad (16)$$

步骤5 构造相关评估矩阵 $R = (h_{jk})_{n \times n}$,其中 $h_{jk} = (D_{Ej} - D_{Ek}) + (\phi(D_{Ej} - D_{Ek})(D_{Tj} - D_{Tk}))$ (17)

对方程组进行求解,得

$$w_i^* = \frac{\sqrt{Q} \sum_{j=1}^n \rho_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^n \rho_{ij} \right)^2}}$$

通过归一化公式 $w_i = w_i^* / \sum_{i=1}^m w_i^*$,约去未知数,求得

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n \rho_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \rho_{ij}} \quad (11)$$

2.5 运用联合距离评估法计算排序

联合距离评估法是 Ghorabae 等^[30]在 2016 年开发出的一种多属性决策排序方法,该方法在距离测算中除了计算二阶的欧氏距离(ED)外,还计算一阶的曼哈顿距离(TD),并通过阈值函数将 2 种距离联合起来,以更好地区分不同排序对象之间的差异。联合距离评估法具有很强的实用性,近年来在技术选择^[31]、选址^[32]等领域被广泛应用。

步骤1 归一化处理,将模糊数转化为标准化值。将标准化矩阵 $A = (a_{ij})_{m \times n}$ 转化为

$$\begin{aligned} A = & \left(\frac{e_{ij,low}}{\max(e_{ij,high})}, \frac{e_{ij,mid}}{\max(e_{ij,high})}, \frac{e_{ij,high}}{\max(e_{ij,high})} \right)_{m \times n} = \\ & (a_{ij,low}, a_{ij,mid}, a_{ij,high})_{m \times n} = (a_{ij})_{m \times n} \end{aligned} \quad (12)$$

步骤2 计算加权标准化决策矩阵。令 l_{ij} 表示加权决策矩阵,表达式如下所示:

$$l_{ij} = (l_{ij,low}, l_{ij,mid}, l_{ij,high}) = (w_i a_{ij,low}, w_i a_{ij,mid}, w_i a_{ij,high}) \quad (13)$$

步骤3 确定负理想解的值。令 $g = (g_i)_{1 \times m}$ 表示负理想解矩阵, g_i 表示第 i 个风险因子的负理想点,则

$$g_i = \min(l_{ij,low}, l_{ij,mid}, l_{ij,high}) \quad (14)$$

步骤4 根据负理想解计算欧氏距离 D_{Ej} 和曼哈顿距离 D_{Tj} ,计算式如下所示:

式中: ψ 为识别 2 个欧氏距离差异大小的阈值函数^[33]。 ψ 定义为

$$\psi(x) = \begin{cases} 1, & |x| \geq \tau \\ 0, & |x| < \tau \end{cases} \quad (18)$$

式中: x 在本方法中表示 2 个欧氏距离的差; τ 是决策

者可以设定的阈值参数, τ 为 $[0.01, 0.05]$ 。本研究的计算中, 设置阈值参数 $\tau = 0.02$ 。

步骤6 计算每个失效模式的评估分数, 计算式如下所示:

$$H_j = \sum_{k=1}^n h_{jk} \quad (19)$$

步骤7 根据失效模式的分数 H_j 进行排序, H_j 分数越高代表风险越大。

3 案例研究

3.1 组建专家团队并计算评估权重

根据专家的专业水平和从业经验, 本研究中共选择了4位专家候选人。在选择时将4位专家的资料交由各位候选人进行相互评估, 评估的信息如表1所示。评分越高代表候选人在该领域越专业。通过式(1)将语言变量转化为三角模糊数, 经过计算和分析, 4位专家都达到了专家入选标准。然后, 通过式(2)计算得到各位专家的评估权重向量 $\lambda = (0.3571, 0.2143, 0.2857, 0.1429)^T$ 。

表1 候选专家互评信息

Tab.1 Mutual evaluation information of candidate experts

		被评估者			
		E_1	E_2	E_3	E_4
评估者	E_1	M	RH	M	SL
	E_2	RH	M	H	SH
	E_3	H	SL	M	H
	E_4	M	SH	H	M

3.2 专家对共享电动汽车进行失效模式风险评估

结合电动汽车的车辆结构, 考虑共享车辆的功能完备性, 通过德尔菲法, 专家确定了共享电动汽车存在的24种失效模式。 F_1 : 制动失灵; F_2 : 喇叭故障; F_3 : 自检系统故障; F_4 : 转向系统故障; F_5 : 防抱死系统(ABS)故障; F_6 : 轮胎故障(胎压不足、爆胎、轮毂

损坏等); F_7 : 悬架故障; F_8 : 车体损伤; F_9 : 传动系统故障; F_{10} : 安全气囊故障; F_{11} : 仪表盘故障; F_{12} : 电池故障; F_{13} : 电池管理系统(BMS)故障; F_{14} : 电机控制单元(MCU)故障; F_{15} : 电机故障; F_{16} : 灯光系统损坏; F_{17} : 视线阻挡(玻璃起雾、后视镜遮挡、雨刷故障、缺少玻璃水等); F_{18} : 空调系统故障; F_{19} : 充电故障; F_{20} : 车机功能故障(死机, 定位或网络异常等); F_{21} : 雷达故障(倒车、辅助系统等); F_{22} : 门窗故障; F_{23} : 冷却系统故障; F_{24} : 内饰异常(松动、反光、异物等)。

对于故障模式发生率的评估, 参考了某品牌电动汽车的当量故障率^[34], 以及出租电动汽车在频繁使用中的故障分布频率^[35]等故障特征。同时, 考虑到共享电动汽车的品牌多样性和质量差异性^[36]以及运营环境的复杂性和不确定性, 失效模式的发生概率由专家从技术发展成熟度、质量稳定性和故障发生比率3个平行互补的角度进行分析和评估(见表2)。失效模式的严重程度通过失效模式可能造成的后果进行评估。失效模式可能造成的后果包含行程耽误、事故、人身伤害等, 由专家按照失效模式能够引起的后果的影响大小和分布情况, 通过专业分析进行评估(见表3)。失效模式的检测难度由专家通过是否可以由驾驶员直接观察、是否容易在选车时忽略、在多大比率上可以通过自检系统检测、是否需要拆解检测等进行综合评估。一般而言, 能够直接观察和清晰自检的故障的检测难度低, 反之则检测难度大(见表4)。

专家从发生概率、严重程度、检测难度3个风险因子对失效模式进行了评估。首先通过式(1)将语言变量转化为三角模糊数, 然后通过式(3)~(6)检验可知, 自检系统故障和安全气囊故障的共识系数分别为 $\delta_3 = 0.8030$ 和 $\delta_{10} = 0.8158$, 不符合共识条件。考虑到自检系统可能涉及到复杂的线路问题, 检测难度较大, 专家 E_1 将检测难度的评估值由 SL 改为 H, 评估达到共识水平; 考虑到安全气囊在事故中的重要保护作用, 专家 E_1 将严重程度由评估值 SL

表2 发生概率评估分级标准

Tab.2 Evaluation grading criteria of occurrence

评估级别	发生概率评级的对应标准
VL	技术成熟, 质量稳定, 在频繁使用或各类环境中不会增加故障率
RL	技术成熟, 质量相对稳定, 在频繁使用或特定环境中会增加故障率
L	技术相对成熟, 质量相对稳定, 在频繁使用中性能下降很慢, 特定条件下增加故障率
SL	技术相对成熟, 质量相对稳定, 在频繁使用中性能下降较慢, 故障率很低但缓慢升高
M	技术相对成熟, 质量相对稳定, 在频繁使用中性能下降较快, 故障率很低但逐步升高
SH	技术相对成熟, 质量基本稳定, 在频繁使用和特定环境中出现较低故障率
H	技术不成熟, 质量基本稳定, 在频繁使用和特定环境中故障率缓慢升高
RH	技术不成熟, 质量不稳定, 在频繁使用和特定环境中出现较高故障率
VH	技术不成熟, 质量不稳定, 在频繁使用和特定环境中频繁出现故障

表3 严重程度评估分级标准
Tab.3 Evaluation grading criteria of severity

评估级别	严重程度评级的对应标准
VL	不直接影响汽车的安全行驶,不易影响驾驶员操作
RL	不直接影响汽车的安全行驶,容易造成驾驶员操作失误
L	常见情况下不具有危害性,少数情况下影响到汽车的安全行驶
SL	常见情况下具有较低的危害性,少数情况下造成抛锚或增加事故风险及事故后果
M	轻微影响汽车的安全驾驶,需短暂停车处理,可以继续驾驶,但会增加事故风险
SH	直接影响汽车的安全驾驶,随时有抛锚、发生碰撞或被困在车内的可能
H	直接影响汽车的安全驾驶,一旦发生,需要驾驶员停车,否则带来较高的事故风险
RH	具有突发性等,显著升高驾驶风险或造成突然停车,驾驶员需要尽快离场
VH	汽车失去控制,或者发生冒烟、起火、爆炸,直接危害驾驶员及周边人员、车辆的安全

表4 检测难度评估分级标准
Tab.4 Evaluation grading criteria of detection

评估级别	检测难度评级的对应标准
VL	通过驾驶员观察可以轻易发现且不易被忽略的问题
RL	通过自检系统可以清晰识别或通过观察可以轻易发现,但是容易被忽略的问题
L	通过自检系统可以识别,但容易被忽视的电气问题,或短距离驾驶可以发现的问题
SL	通过自检系统可以识别出问题,但是可能出现延迟、误判、错报、漏报,或人为改动
M	通过常规观察和自检系统不能完全识别,但是存在异响、异味等信号特征
SH	通过常规观察和自检系统不能完全识别,通过简单检查检修可以识别
H	通过常规观察和自检系统不能完全识别,通过专业检查检修可以识别
RH	通过常规观察和自检系统不能识别,且检查检修相对复杂
VH	通过常规观察和自检系统不能识别,且检查检修非常复杂

改为 M,专家 E_3 将严重程度评估值由 L 改为 SH, 评
估达到共识水平。经过共识检验和调整,24 个失效
模式的共识水平都达到了要求。专家评估结果和共

识水平系数如表 5 所示。

3.3 计算风险因子权重

通过表 5 及专家权重,按照式(7)可以得出风险

表5 专家对共享电动汽车的风险评估

Tab.5 Risk assessment of shared electric vehicles by experts

失效模式	发生概率				严重程度				检测难度				共识水平系数
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_1	E_2	E_3	E_4	E_1	E_2	E_3	E_4	
F_1	M	SH	M	SL	RH	VH	VH	H	SH	H	H	H	0.895 2
F_2	RL	RL	L	RL	RL	L	L	L	RL	RL	L	RL	0.937 5
F_3	RL	VL	RL	L	M	L	SL	SH	H	RH	H	SH	0.851 6
F_4	VL	RL	VL	VL	H	SH	H	H	RL	RL	L	VL	0.924 9
F_5	RL	VL	RL	L	SH	SL	SL	M	SL	SH	H	SH	0.851 6
F_6	SL	M	M	SL	M	SH	H	M	VL	RL	L	RL	0.886 4
F_7	VL	RL	VL	RL	SL	SL	L	M	H	SH	SH	SH	0.914 8
F_8	SH	M	M	SH	L	VL	L	VL	VL	VL	RL	RL	0.901 4
F_9	RL	RL	L	L	SH	M	M	SL	M	SH	M	M	0.909 7
F_{10}	VL	RL	VL	VL	M	VH	SH	M	L	RL	SL	L	0.857 3
F_{11}	RL	RL	VL	VL	M	SH	M	SL	VL	L	M	RL	0.850 6
F_{12}	SH	M	H	SH	SL	H	H	H	SH	SH	H	H	0.868 1
F_{13}	SH	M	SH	M	SH	H	H	SH	RL	L	SL	SL	0.895 8
F_{14}	SL	SL	L	L	H	RH	RH	H	M	M	SL	SL	0.916 7
F_{15}	M	SL	SH	L	M	SH	H	SH	SL	L	SL	SL	0.868 1
F_{16}	M	SH	M	SH	SH	M	M	SH	RL	VL	VL	RL	0.921 8
F_{17}	L	RL	L	L	M	SH	SH	M	L	SL	SL	L	0.923 6
F_{18}	SL	L	SL	L	L	RL	VL	L	RL	RL	VL	RL	0.911 6
F_{19}	SL	L	L	L	SL	SH	M	SL	RL	RL	RL	RL	0.930 6
F_{20}	L	RL	L	RL	SL	L	M	M	VL	RL	VL	RL	0.900 9
F_{21}	L	SL	SL	L	SL	M	L	M	L	L	RL	L	0.902 8
F_{22}	L	RL	RL	L	L	L	L	RL	RL	L	RL	RL	0.930 6
F_{23}	RL	VL	RL	VL	SH	H	H	SH	SL	SL	SL	SL	0.949 5
F_{24}	RL	RL	L	RL	L	RL	RL	L	RL	L	VL	L	0.907 8

因子评价矩阵。基于整合的风险因子评价矩阵,通过贴适度最优化方法,即式(8)–(11),可以计算出风险因子的权重向量 $w=(0.3257, 0.3768, 0.2970)^T$ 。同时,依据该矩阵,通过式(8)可以获得不同风险因子下各失效模式的排序。发生概率的失效模式排序为

$$\begin{aligned} &F_{12} > F_{13} > F_8 > F_{16} > F_1 > F_{15} > F_6 > F_{18} > \\ &F_{14} > F_{21} > F_{19} > F_{17} > F_{20} > F_{22} > F_9 > F_2 > \\ &F_{24} > F_5 = F_3 > F_{23} > F_{11} > F_7 > F_4 = F_{10} \end{aligned}$$

从排序关系可知,电气结构故障率以及车体、轮胎等易损部位故障率较高,机械结构以及不会在共享中增加损耗的部件故障率较低。严重程度的失效模式排序为

$$\begin{aligned} &F_1 > F_{14} > F_4 > F_{23} = F_{13} > F_{10} > F_{12} = F_{15} > \\ &F_6 > F_{16} = F_{17} > F_9 > F_{11} > F_5 > F_{19} > F_3 > F_{20} > \\ &F_{21} > F_7 > F_{22} > F_2 > F_{24} > F_8 > F_{18} \end{aligned}$$

从排序关系可知,容易造成车辆失控、速度控制失效、显著增加事故风险等与实时控制、动力调整相关的失效模式排序在前,配套组件类的失效模式由于不直接影响驾驶安全而排序靠后。检测难度的失效模式排序为

$$\begin{aligned} &F_3 > F_1 > F_{12} > F_7 > F_5 > F_9 > F_{14} > F_{23} > \\ &F_{15} > F_{17} > F_{10} = F_{13} > F_{11} > F_{21} > F_2 > F_{22} > \\ &F_4 > F_{24} > F_{19} > F_6 > F_{18} > F_{16} > F_8 > F_{20} \end{aligned}$$

从排序关系可知,涉及到线路问题或者复杂机械问题的故障模式排序在前,能够被直观地观察到的失效模式以及可以被自检系统清晰识别的失效模式排序在后。

3.4 对失效模式进行排序

结合风险因子权重,通过式(12)–(13)得到加权决策矩阵。通过式(14)以进一步得到负理想解的值为

$$g=[(0.000\ 0, 0.011\ 5, 0.065\ 1), (0.024\ 0, 0.058\ 2, 0.106\ 2), (0.000\ 0, 0.015\ 0, 0.057\ 1)]$$

通过式(15)–(16)得到不同失效模式与负理想解之间的欧氏距离(D_E)与曼哈顿距离(D_T)的值分别为

$$\begin{aligned} D_E = [&0.403\ 6, 0.060\ 4, 0.255\ 1, 0.216\ 5, \\ &0.210\ 8, 0.234\ 5, 0.215\ 2, 0.216\ 8, 0.214\ 7, \\ &0.191\ 6, 0.143\ 8, 0.365\ 0, 0.308\ 1, 0.301\ 9, \\ &0.266\ 3, 0.259\ 3, 0.188\ 5, 0.118\ 6, 0.156\ 2, \\ &0.112\ 7, 0.147\ 8, 0.071\ 0, 0.226\ 7, 0.055\ 5] \end{aligned}$$

$$D_T = [0.688\ 3, 0.089\ 5, 0.361\ 1, 0.240\ 7, 0.318\ 6, 0.348\ 9, 0.280\ 7, 0.222\ 4, 0.343\ 7,$$

$$0.243\ 5, 0.198\ 3, 0.624\ 4, 0.487\ 6, 0.487\ 5, 0.444\ 2, 0.365\ 2, 0.304\ 4, 0.126\ 2, 0.234\ 3, 0.153\ 9, 0.241\ 1, 0.108\ 2, 0.318\ 5, 0.077\ 6]$$

通过式(17)–(19)得到失效模式的评分值为

$$\begin{aligned} H = [&13.955\ 7, -8.646\ 5, 2.627\ 4, -0.887\ 1, \\ &0.194\ 3, 1.413\ 5, -0.240\ 4, -1.190\ 4, 0.819\ 4, \\ &-1.670\ 2, -3.960\ 0, 11.497\ 6, 6.846\ 9, 6.695\ 7, \\ &4.641\ 8, 2.812\ 5, -0.481\ 4, -6.346\ 3, -2.907\ 1, \\ &-5.878\ 5, -2.965\ 1, -7.997\ 8, 0.677\ 7, \\ &-9.011\ 6] \end{aligned}$$

通过排序可知失效模式的排序为

$$\begin{aligned} &F_1 > F_{12} > F_{13} > F_{14} > F_{15} > F_{16} > F_3 > F_6 > \\ &F_9 > F_{23} > F_5 > F_7 > F_{17} > F_4 > F_8 > F_{10} > \\ &F_{19} > F_{21} > F_{11} > F_{20} > F_{18} > F_{22} > F_2 > F_{24} \end{aligned}$$

制动失灵、电池故障、BMS故障、MCU故障、电机故障、灯光系统损坏、自检系统故障、轮胎故障、传动系统故障、冷却系统故障、ABS故障、悬架故障、视线阻挡、转向系统故障为相对风险较高的失效模式。车体损伤、安全气囊故障、充电故障、雷达故障、仪表盘故障、车机功能故障、空调系统故障、门窗故障、喇叭故障、内饰异常为相对风险较低的失效模式。从分布来看,高风险的失效模式多属于动力系统的故障、行车系统的故障,而低风险的失效模式多属于配套系统的故障。为了验证结果的稳健性,将进行敏感性检验和对比分析。

3.5 阈值参数灵敏度分析

联合距离评估法是通过阈值参数 τ 综合运用2种距离的排序方法。为了分析阈值参数 τ 对排序结果的影响,在 τ 的取值范围 $[0.01, 0.05]$ 内分别取 $\tau = \{0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05\}$ 对结果进行灵敏度分析,分析结果如图1所示。

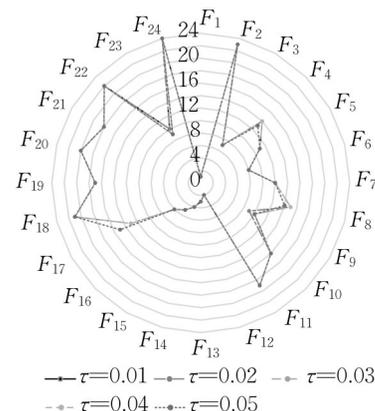


图1 联合距离评估法阈值参数 τ 灵敏度分析

Fig.1 Sensitive analysis of threshold parameter τ of CODAS method

由图 1 可知,在阈值参数取值范围内,前 10 位的失效模式没有发生变化,总体比较稳定,这说明本研究的结果具有很好的稳健性。通过细化分析发现,在阈值参数取值发生变化时,有 5 个失效模式的顺位关系发生了变化但变化不大,传动系统故障(F_9)与冷却系统故障(F_{23})在 $\tau \in [0.02, 0.03]$ 区间的排序发生了交替,视线阻挡(F_{17})与车体损伤(F_8)、转向系统故障(F_4)在 $\tau \in [0.04, 0.05]$ 区间的排序发生了交替。阈值参数对排序影响的大小主要取决于每种失效模式之间风险因子的差异,当失效模式之间差异显著时,调整阈值参数对排序的影响小;当失效模式之间的差异不显著时,调整阈值参数可能带来较大的排序变化。这种基于二阶和一阶距离的算法既可以较好地地区分失效模式之间的风险大小,也可以通过阈值参数调整反映失效模式之间的细微差别。

3.6 不同方法对比分析

为了验证联合距离评估法的有效性,使用其他学者已经在模糊 FMEA 方法中验证过的基于距离的多属性决策方法与联合距离评估法进行对比分析。为了保证对比的可参照性,对比分析中采用本研究上述的原始数据、归一化计算方法、风险因子权重、专家权重等信息。对比分析选用了 3 种不同的多属性决策方法,分别是熵权 TOPSIS 法^[37]、VIKOR 方法^[38]以及改进的 PROMETHEE 方法^[20]。4 种方法的有效性对比结果如表 6 所示。

由表 6 结果可知:联合距离评估法计算的排序结果与 PROMETHEE 方法、TOPSIS 法较为相近,位次差异最多为 3, Pearson 相关系数分别为 0.992 和 0.972,与 VIKOR 方法有一定的差异,位次差异最多为 7, Pearson 相关系数为 0.921。4 种方法的排序结果的趋势基本一致。这说明联合距离评估法是有效的,同时包括联合距离评估法在内的每个方法都有自己的特点。

与 TOPSIS 法相比,联合距离评估法采用了 2 种距离进行综合,且在与负理想解进行对比之后又对失效模式进行了两两比较,排序值的确定注重排序对象间的相互区别,在比较中避免了参照点出现极大值或极小值的影响。本研究对比的 PROMETHEE 方法也是采用两两比较的方式,不同之处在于 PROMETHEE 方法是在对比中先计算流入量和流出量并相减得到净流量后再进行对比。与 VIKOR 方法相比,联合距离评估法计算结果差异更明显。这是因为 VIKOR 方法除了以正负理想点为参照点外,排序依据是距离值与最大加权距离值折衷的结果。也是因为此,VIKOR 方法与 3 种方法的相关性都相对低,在 0.940 左右。综合而言,联合距离评估法作为一种多属性决策方法,与基于距离的方法之间具有较好的相关性,在排序方式上提供了新思路,具有在基于模糊 FMEA 方法的风险评估中应用的价值。

表 6 4 种方法的计算结果及其与联合距离评估法结果的相关系数

Tab.6 Calculation results of four methods and their correlation coefficients with the results of CODAS method

方法	失效模式排序	相关系数
TOPSIS	$F_1 > F_{12} > F_{14} > F_{13} > F_{15} > F_{23} > F_3 > F_9 > F_{16} > F_6 > F_5 > F_4 > F_{17} > F_{10} > F_7 > F_{19} > F_{11} > F_8 > F_{21} > F_{20} > F_{18} > F_{22} > F_2 > F_{24}$	0.972** (0.000)
VIKOR	$F_1 > F_{12} > F_{14} > F_{15} > F_{13} > F_{17} > F_9 > F_6 > F_{16} > F_3 > F_5 > F_{21} > F_{23} > F_{19} > F_7 > F_{10} > F_4 > F_{11} > F_{20} > F_8 > F_{22} > F_2 > F_{18} > F_{24}$	0.921** (0.000)
PROMETHEE	$F_1 > F_{12} > F_{14} > F_{13} > F_{15} > F_3 > F_{16} > F_9 > F_6 > F_{23} > F_5 > F_7 > F_{17} > F_4 > F_{10} > F_8 > F_{21} > F_{19} > F_{11} > F_{20} > F_{18} > F_{22} > F_2 > F_{24}$	0.992** (0.000)
CODAS	$F_1 > F_{12} > F_{13} > F_{14} > F_{15} > F_{16} > F_3 > F_6 > F_9 > F_{23} > F_5 > F_7 > F_{17} > F_4 > F_8 > F_{10} > F_{19} > F_{21} > F_{11} > F_{20} > F_{18} > F_{22} > F_2 > F_{24}$	1.000

注:**表示在 0.01 水平上显著。

4 讨论与启示

本研究使用模糊 FMEA 方法分析了共享电动汽车的风险因子,在此基础上获得了失效模式带来的驾驶风险水平的排序。结果显示,在共享电动汽车驾驶过程中,较高的风险水平集中分布在动力系统和行车系统之中,相对低风险的失效模式主要集

中在配套系统中。结合共享电动汽车的特性,这些失效模式的产生和风险水平与电动汽车的技术成熟度、共享过程中的不确定性、不同驾驶员的驾驶经验差异和操作规范化差异、主要功能频繁使用和损耗等因素都密切相关。

共享电动汽车的使用和管理是相分离的,运营平台有义务做好电动汽车的安全管理。对于运营平

台而言,资源是有限的,本研究能够帮助平台在安全防控方面有的放矢,合理且有效地分配资源。为了提升安全管理水平,运营平台需要在内部建立完善的管理机制和培训机制等,在服务消费者方面需要从共享管理和车辆管理2个方面改进。

共享管理的安全优化可以降低共享过程中的不确定性和减少因驾驶员操作不当带来的车辆安全隐患。共享管理可以采取的措施包括但不限于:定期进行全面检查并在客户端公示车辆状况、升级后台管理系统并实时监控和定位车辆、通过车联网和软件限制消费者选择问题车辆、开放用户协助上报车辆状况的窗口、完善软件安全管理功能、设置消费者用车前后对车辆进行检查的环节、通过人脸识别系统保证驾驶员与开锁人一致、配备防误操作系统或智能速度控制系统、限制驾驶员打开动力舱或者记录开启动力舱的人员、配备应急安全工具、提供一键呼救或客户端呼救以及道路救援服务等。

车辆是风险与服务的共同载体,车辆管理的安全优化可以通过提高运营车辆的质量、科学有序地检修车辆、针对频繁使用制定针对性的措施等来降低风险,防患于未然。车辆管理可以采取的措施包括但不限于:建设专业检修工厂、组建专业化的检修团队、制定严格的车辆检修流程和检修项目清单、加大对动力系统和行车系统的检修力度、在选择或定制车辆时增强对动力系统和行车系统的关注、安装监控和定位设备、逐步淘汰问题车辆尤其是动力系统存在问题的车辆、缩短对老旧车辆和高里程车辆的检修周期、建立易损耗配件清单、集中采购易损耗配件以降低成本等。

共享电动汽车运营平台通过提升安全管理水平,能够提供更加流畅的服务、更好的风险防控和更加可靠的驾驶安全保障。这可以在减少损失的同时帮助平台获得更好的消费者信任、更高的美誉度和更大的市场占有率,对于平台的市场渗透、新市场开发策略的实施将会有直接的促进作用。随着共享电动汽车市场占有率的提升和共享电动汽车数量的增加,消费者也将享受到更加便捷、安全和绿色的出行服务。

5 结论与展望

本研究从驾驶风险的角度对共享电动汽车的安全问题进行了研究,对驾驶过程中的失效模式进行

了系统的分析,研究结果显示,制动失灵、电池故障、BMS故障、MCU故障等来自动力系统和行车系统的故障具有较高的风险水平。针对故障产生的潜在原因,从共享管理和车辆管理方面提出了提升安全管理水平的措施建议。在研究方法方面,通过专家评选、赋权、共识检验等环节完善了专家评估流程,通过贴进度最优化赋权法、联合距离评估法对FMEA方法进行了改进,形成了一套风险分析算法。灵敏度分析和对比分析验证了结果的稳健性和方法的实用性。

在未来研究方面,可以从动态角度进行分析,结合时间和空间角度对共享电动汽车的驾驶风险进行拓展。在时间方面,可以研究不同行驶里程、不同车龄的电动汽车的风险特征和风险水平,以帮助运营平台更好地识别主要问题,更有针对性和时效性地保养车辆;在空间方面,可以研究电动汽车在不同气候条件、地理条件、治安条件下的风险类型和风险级别等,以帮助共享电动汽车制定更加具有区域针对性的安全管理建议。

作者贡献声明:

李延来:数据收集,核心思想提炼。

张殿峰:论文撰写,数据处理,论文修改。

申子凡:论文修改,数据检查,资料整理。

参考文献:

- [1] 李苏秀,刘颖琦,KOKKO A. 中国新能源汽车产业不同阶段商业模式创新特点及案例研究[J]. 经济问题探索, 2017(8):158.
LI Suxiu, LIU Yingqi, KOKKO A. Characteristics of business model innovation in different stages of China's new energy vehicle industry and case study [J]. Exploration of Economic Issues, 2017(8):158.
- [2] 陈小鸿,成嘉琪,叶建红,等. 共享汽车用户及出行时空特征分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(6):796.
CHEN Xiaohong, CHENG Jiaqi, YE Jianhong, et al. Analysis of carsharing users and demand spatio-temporal characteristics [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(6):796.
- [3] CHEN T D, KOCKELMAN K M. Carsharing's life-cycle impacts on energy use and greenhouse gas emissions [J]. Transportation Research, Part D: Transport and Environment, 2016, 47:276.
- [4] 周谧,甄文婷. 新能源汽车与传统汽车的生命周期可持续性评价[J]. 企业经济, 2018(1):129.
ZHOU Mi, ZHEN Wenting. Life cycle sustainability evaluation of new energy vehicles and traditional vehicles [J].

- Enterprise Economy, 2018(1):129.
- [5] 王博,刘则渊,刘盛博.我国新能源汽车产业技术标准演进路径研究[J].科研管理,2020,41(3):12.
WANG Bo, LIU Zeyuan, LIU Shengbo. Technical standards evolution path of China's new energy vehicle industry [J]. Science Research Management, 2020, 41(3):12.
- [6] 王震坡,袁昌贵,李晓宇.新能源汽车动力电池安全管理技术挑战与发展趋势分析[J].汽车工程,2020,42(12):1606.
WANG Zhenpo, YUAN Changgui, LI Xiaoyu. An analysis on challenge and development trend of safety management technologies for traction battery in new energy vehicles [J]. Automotive Engineering, 2020, 42(12):1606.
- [7] 余静财,李文权,王顺超,等.共享电动汽车选择行为分析[J].东南大学学报(自然科学版),2021,51(1):153.
YU Jingcai, LI Wenquan, WANG Shunchao, *et al.* Analysis of the selection behavior of shared electric vehicles [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021, 51(1):153.
- [8] 赵敏,王善勇.电动汽车共享的使用意向研究[J].大连理工大学学报(社会科学版),2018,39(3):32.
ZHAO Min, WANG Shanyong. Investigating the intention for electric vehicle sharing [J]. Journal of Dalian University of Technology (Social Science), 2018, 39(3):32.
- [9] SHARMA R K, KUMAR D, KUMAR P. Systematic failure mode effect analysis (FMEA) using fuzzy linguistic modeling [J]. International Journal of Quality & Reliability Management, 2005, 22(9):986.
- [10] 陈玉忠,董红磊,李晨风,等.基于改进的模糊FMECA法的汽车ABS缺陷风险评估[J].汽车安全与节能学报,2016,7(3):265.
CHEN Yuzhong, DONG Honglei, LI Chenfeng, *et al.* Risk assessment of vehicle ABS defects based on a modified fuzzy FMECA method [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2016, 7(3):265.
- [11] OTURAKCI M, DAGSUYU C. Integrated environmental risk assessment approach for transportation modes [J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2020, 26(2):384.
- [12] MARYANI E, PURBA H H, SUMADI S. Analysis of aluminium alloy wheels product quality improvement through DMAIC method in casting process: a case study of the wheel manufacturing industry in Indonesia [J]. Journal Européen des Systèmes Automatisés, 2021, 54(1):55.
- [13] STAMATIS D H. Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution [M]. Milwaukee: ASQ Quality Press, 2003.
- [14] WANG Y, CHIN K, POON G K K, *et al.* Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(2):1195.
- [15] SUO B, ZHAO L, YAN Y. A novel Dempster-Shafer theory-based approach with weighted average for failure mode and effects analysis under uncertainty [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2020, 65:104145.
- [16] LIU H, CHEN X, DUAN C, *et al.* Failure mode and effect analysis using multi-criteria decision making methods: a systematic literature review [J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 135:881.
- [17] 耿秀丽,张永政.基于犹豫模糊集的改进FMEA风险评估方法[J].计算机集成制造系统,2017,23(2):340.
GENG Xiuli, ZHANG Yongzheng. Improved FMEA approach for risk evaluation based on hesitant fuzzy set [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(2):340.
- [18] 周文财,魏朗,邱兆文,等.模糊环境下汽车故障模式风险水平综合评价方法[J].机械科学与技术,2021,40(12):1952.
ZHOU Wencai, WEI Lang, QIU Zhaowen, *et al.* Hybrid risk evaluation method for vehicle failure modes under fuzzy environment [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(12):1952.
- [19] BAŞHAN V, DEMIREL H, GUL M. An FMEA-based TOPSIS approach under single valued neutrosophic sets for maritime risk evaluation: the case of ship navigation safety [J]. Soft Computing, 2020, 24:18749.
- [20] LIU P, LI P. An improved failure mode and effect analysis method for multi-criteria group decision-making in green logistics risk assessment [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 215:1.
- [21] WU Z, LIU W, NIE W. Literature review and prospect of the development and application of FMEA in manufacturing industry [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112:1409.
- [22] ZADEH L A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning: I [J]. Information Sciences, 1975, 8(3):199
- [23] 樊治平,陈发动,张晓.基于累积前景理论的混合型多属性决策方法[J].系统工程学报,2012,27(3):295.
FAN Zhiping, CHEN Fadong, ZHANG Xiao. Method for hybrid multiple attribute decision making based on cumulative prospect theory [J]. Journal of Systems Engineering, 2012, 27(3):295.
- [24] YING C, LI Y, CHIN K, *et al.* A new product development concept selection approach based on cumulative prospect theory and hybrid-information MADM [J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 122:251.
- [25] WU Z B, XU J P. Possibility distribution-based approach for MAGDM with hesitant fuzzy linguistic information [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2016, 46(3):694.
- [26] LI Y L, WANG R, CHIN K S. New failure mode and effect analysis approach considering consensus under interval-valued intuitionistic fuzzy environment [J]. Soft Computing, 2019, 23(22):11611.
- [27] 朱江洪,李国芳,王睿,等.地铁列车非正常停车FMEA风险评估[J].中国安全科学学报,2017,27(2):145.
ZHU Jianghong, LI Guofang, WANG Rui, *et al.* FMEA

- based assessment of risk that metro train stops abnormally [J]. *China Safety Science Journal*, 2017, 27(2): 145.
- [28] 肖钰, 李华. 基于三角模糊数的判断矩阵的改进及其应用 [J]. *模糊系统与数学*, 2003, 17(2): 59.
- XIAO Yu, LI Hua. Improvement on judgement matrix based on triangle fuzzy number [J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2003, 17(2): 59.
- [29] LIAO M, LIANG G, CHEN C. Fuzzy grey relation method for multiple criteria decision-making problems [J]. *Quality & Quantity*, 2012, 47(6): 3065.
- [30] GHORABAEE M K, ZAVADSKAS E K, TURSKIS Z, *et al.* New combinative distance-based assessment (CODAS) method for multi-criteria decision making [J]. *Economic Computation & Economic Cybernetics Studies & Research*, 2016, 50(3): 25.
- [31] ALI T, NAHIAN A J, MA H. A hybrid multi-criteria decision-making approach to solve renewable energy technology selection problem for Rohingya refugees in Bangladesh [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 273: 122967.
- [32] SIMIC V, KARAGOZ S, DEVECI M, *et al.* Picture fuzzy extension of the CODAS method for multi-criteria vehicle shredding facility location [J]. *Expert Systems with Applications*, 2021, 175: 114644.
- [33] ECER F, PAMUCAR D, MARDANI A, *et al.* Assessment of renewable energy resources using new interval rough number extension of the level based weight assessment and combinative distance-based assessment [J]. *Renewable Energy*, 2021, 170: 1156.
- [34] 张坤, 魏东坡, 尹文荣, 等. 基于大数据的纯电动汽车系统故障规律研究 [J]. *济宁学院学报*, 2019, 40(5): 12.
- ZHANG Kun, WEI Dongpo, YIN Wenrong, *et al.* Research on fault law of pure electric vehicle system based on big data [J]. *Journal of Jining University*, 2019, 40(5): 12.
- [35] 郭家辉. 电动汽车故障报警记录分析: DC-DC 逆变器异常是最常见的故障类型 [J]. *汽车与配件*, 2020(13): 60.
- GUO Jiahui. Analysis of electric vehicle fault alarm records: DC-DC inverter abnormality is the most common fault type [J]. *Automobile and Accessories*, 2020(13): 60.
- [36] 杨小娟, 阳东波, 贾红, 等. 新能源汽车可靠性大数据分析技术研究 [J]. *公路交通科技*, 2017, 34(S2): 123.
- YANG Xiaojuan, YANG Dongbo, JIA Hong, *et al.* Study on reliability analysis technology for new energy vehicle based on big data [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2017, 34(S2): 123.
- [37] 王鸣涛, 叶春明. 基于熵权 TOPSIS 的区域工业绿色制造水平评价研究 [J]. *科技管理研究*, 2020(17): 53.
- WANG Mingtao, YE Chunming. Evaluation study of regional industrial green manufacturing level based on entropy weight and TOPSIS [J]. *Science and Technology Management Research*, 2020(17): 53.
- [38] PRAKASH C, BARUA M K. A combined MCDM approach for evaluation and selection of third-party reverse logistics partner for Indian electronics industry [J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2016, 7: 66.

(上接第 1239 页)

- experiment on shear resistance of prefabricated bridge columns with grouted sleeve connection [J]. *Journal of Institute of Disaster Prevention*, 2021, 23(1): 17.
- [11] 逯艳东, 李士友, 胡兴安, 等. 灌浆套筒连接预制拼装桥墩抗剪强度设计方法 [J]. *市政技术*, 2020, 38(5): 17.
- LU Yandong, LI Shiyu, HU Xingan, *et al.* Shear strength design method of prefabricated bridge piers connected with grouting sleeve joints [J]. *Municipal Engineering Technology*, 2020, 38(5): 17.
- [12] HAN Q, X LI, XU K, *et al.* Shear strength and cracking mechanism of precast bridge columns with grouted sleeve connections [J]. *Engineering Structures*, 2021, 230 (1): 111616.
- [13] 王志强, 张杨宾, 蒋仕持, 等. 套筒连接的预制拼装桥墩抗剪性能试验 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(6): 103.
- WANG Zhiqiang, ZHANG Yangbin, JIANG Shichi, *et al.* Experimental study of shear performance of precast segmental bridge piers with grouted splice sleeve [J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2018, 46(6): 103.
- [14] HOSE Y, SILVA P, SEIBLE F. Development of a performance evaluation database for concrete bridge components and systems under simulated seismic loads [J/OL]. *Earthquake Spectra*, 2000, 16(2). [2021-10-31]. <https://doi.org/10.1193/1.1586119>.
- [15] 李田田. 城市高架节段拼装桥墩构造及抗震性能研究 [D]. 上海: 同济大学, 2013.
- LI Tiantian. Research on structural details and seismic performance of urban viaduct precast segmental concrete columns [D]. Shanghai: Tongji University, 2013.