

# 基于模糊综合评价的电动汽车充电安全风险评估

赵公豪<sup>1</sup>, 刘鸿鹏<sup>1</sup>, 袁 单<sup>1</sup>, 陈良亮<sup>2</sup>, 窦真兰<sup>3</sup>

(1. 东北电力大学 电气工程学院现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室, 吉林 吉林 132012;  
2. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 南京 211106; 3. 国网上海市电力公司, 上海 200433)

**摘要:** 为了定量评估电动汽车充电过程中的安全水平, 对电动汽车充电过程中诱发充电安全事故的因素进行了分析, 并采用模糊综合评价方法设计了电动汽车充电安全风险评估方案; 提出了一种综合赋权的方法来改进灰色关联度主观赋权存在的指标权重不确定的问题, 保证了评估结果的合理性与可靠性; 首先统计分析指标诱发充电事故的频率获得客观权重, 然后经过基于灰色关联度的专家经验判断得到主观权重, 最后通过标准离差求出主观权重与客观权重的分配系数; 该方法既保留了主观权重中专家的权威性, 又充分体现了数据本身所具有的客观特征; 其次, 将充电安全划分为 5 个等级并且设定合理的阈值, 构建梯形分布的隶属度函数; 经过对某充电站充电数据的分析, 验证了该风险评估方案的可行性和正确性。

**关键词:** 模糊综合评价; 充电安全; 指标评价体系; 灰色关联度

## Electric Vehicle Charging Safety Risk Assessment Method Based on Fuzzy Integrated Evaluation

ZHAO Gonghao<sup>1</sup>, LIU Hongpeng<sup>1</sup>, YUAN Dan<sup>1</sup>, CHEN Liangliang<sup>2</sup>, DOU Zhenlan<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

3. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** In order to quantitatively assess the safety level in the charging process of electric vehicles, this paper studies the factors that induce charging safety accidents in the charging process of electric vehicles, and designs a safety risk assessment scheme for electric vehicle charging by using a fuzzy comprehensive evaluation method. A comprehensive weighting method is proposed to improve the uncertainty of indicator weights in the subjective weighting of grey correlation degree, and ensure the reasonableness and reliability of the assessment results. Firstly, the frequency of charging accidents induced by indicators is statistically analyzed to obtain the objective weights. Then, subjective weights are obtained by the experience judgement of the experts based on the grey correlation. Finally, the allocation coefficients of subjective and objective weights are derived by the standard deviation. The method retains the subjective suggestions of the experts in the subjective weights, while fully reflecting the objective characteristics of the data itself. Then, the charging safety is divided into five levels and reasonable thresholds are set to construct a trapezoidal distribution on the affiliation function. After analyzing the charging data of a certain charging station, the feasibility and correctness of this risk assessment method is verified.

**Keywords:** fuzzy integrated evaluation; charging safety; indicator evaluation system; grey correlation

## 0 引言

随着科技与国民经济的进步, 汽车的数量急剧上升。然而, 由于汽车的普及, 消耗燃料的汽车排放的废物越来越多, 导致空气质量受到极大的影响。另外, 未来的能源供应也将变得极其紧张。为此, 汽车企业正朝着新能源汽车的方向不断前进。目前, 人们更倾向于使用更加环保的能源, 电动汽车变成汽车企业的新宠。特别值得一提的是, 将锂离子电池作为直接动力的电动汽车, 已经得到了消费者的普遍欢迎。

然而, 近年来关于电动汽车自燃的新闻屡见报端, 据不完全统计, 2022 年上半年发生了 47 起电动汽车着火事故, 其中充电中起火比例占 21.28%。可见电动汽车充电安全逐渐成为制约新能源汽车发展的关键因素, 对电动汽车充电安全进行评估的需求越来越迫切<sup>[1]</sup>。电动汽车充电故障安全预警已经成为当今电动汽车领域的一个热门话题, 而电动汽车充电安全评价模型则是解决这一问题的关键。通过收集实时数据, 将其输入预测模型, 再根据模型结果, 对电动汽车充电过程进行安全性评估, 从而确定其安全等级。因此, 必须建立一套完整的、科学有效的充电安全评价指标体系来对电

收稿日期: 2023-05-05; 修回日期: 2023-06-19。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(52094021N00S)。

作者简介: 赵公豪(1999-), 男, 硕士。

通讯作者: 刘鸿鹏(1978-), 男, 博士, 教授。

引用格式: 赵公豪, 刘鸿鹏, 袁 单, 等. 基于模糊综合评价的电动汽车充电安全风险评估[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(4): 300-307.

电动汽车充电状态进行风险评估。该指标体系不但可以精准地识别充电设备安全风险,而且能对充电设备可能产生的后果进行预测,以确保充电过程的安全性。

电动汽车充电安全综合评价是综合分析影响电动汽车充电安全的因素,通过模糊算法得出充电安全综合得分从而判断出所处的安全状态。文献[2]提出了一种基于卷积神经网络和双向长短记忆,充分挖掘电动汽车历史充电数据,对电动汽车充电状态监测与多级安全预警的方法。通过对CNN-BiLSTM输入历史数据训练模型,然后代入实时数据进行预测,引入了滑动窗口,对预测的残差进行处理与分析,可以有效地减少误报警的可能性。文献[3]建立了电动汽车充电桩健康状态评价指标体系,通过基于不确定层次分析法对充电桩健康状态进行综合评价并量化充电桩性能评价结果,经过实例分析验证了该指标体系的正确性。文献[4]利用随机森林对充电设备故障特征数据进行提取,进而构造数据集,然后利用深度置信网络设计了一种故障诊断的方法,与多种传统故障诊断方法进行比较,验证了该方法显著提高了故障诊断的正确率。文献[5]总结了常见的电动汽车充电安全事故及诱因,并提出了加强电动汽车安全的优化设计方法。另一方面,电池是电动汽车的重要器件,电动汽车发生着火或者爆炸的根本原因是电池的热失控,提高动力电池的安全预警能力,是有效避免充电安全事故发生的途径。对电动汽车的动力电池热失控机理和锂枝结晶的产生进行了总结分析,生成了电池的热失控故障机理模型<sup>[6-8]</sup>。文献[9]提出了一种电池在线评估与安全预警定位的方法,它利用了熵权与TOPSIS法对电池电热安全进行量化评估,由模组级和单体级实现两级预警与故障定位。文献[10]为了避免电动汽车充电过程热失控,找出电压、电流等反映发生动力电池锂枝结晶情况的特征量,然后对动力电池进行故障诊断与安全管理。综上所述,对充电设备或者动力电池单独的故障预警的研究已经比较成熟<sup>[11-13]</sup>,但是对于电动汽车充电过程安全风险一体化评估的研究还比较少。

灰色关联度分析法对样本数量要求不高,非常适用于电动汽车事故统计数据较少的情况。然而,该方法求取的主观权重具有不确定性,受主观因素影响大,所以可以通过改进灰色关联度方法来改善指标权重的合理性<sup>[14]</sup>。由于“安全”是一个模糊的概念,“安全”与“危险”之间并没有明确的界限,所以采用模糊综合评价来分析电动汽车充电安全问题<sup>[15]</sup>。文献[16]提出了基于改进模糊层次分析法对凝析气田的开发效果进行了评价,分别从灰色关联、层次分析和RSR值3个方面求取综合权重,然后通过两种隶属函数求取隶属度矩阵,最后通过模糊算法得出综合评价结果。文献[17]采用了模糊层次分析法对变电站建造过程的绿色低碳进行评价,利用层次分析法确定指标的权重,然后通过模糊综合评价的方法将各个指标得分综合到一起求出综合评分,来反映变电站的绿色施工情况。文献[18]采用了改进灰色关联度的方法对充电安全进行分析,

增加了指标间的区分度,但是并没有改变主观性强的问题,构建了电动汽车充电安全预警一体化模型,并且设计了充电安全预警平台,实现了对电动汽车充电安全的实时监测与安全预警。

因此,通过引入标准离差法把专家评估的主观权重与实际数据的客观权重拟合到一起求出综合权重,然后对电动汽车充电安全性进行模糊综合评价。通过实例分析,证实了该评价方法的可行性和实用性。

## 1 电动汽车充电安全特性

### 1.1 动力电池安全特性

在电池生产过程中,由于各个环节的技术难度不同,锂离子电池的最终表现往往会有所变化。例如,在电池的生产阶段,由于对原材料的细微调整,以及对电池的正反极的涂覆,可能会影响电池的最终表现。此外,由于电池的内部结构可能会有所变化,从而会影响电池的容量和内阻。在日常应用场景下,锂离子电池因为每个单元的温度、空气流动状态、自发放射特征等因素的变化,它们的额定功率、内部阻抗和电压的变化也将大大提高。当电池连接在一个地方,它们之间的变化会越来越明显,这会降低整个系统的运转效率,甚至可能导致危险的后果。所以,在确保系统的可靠运转的前提下,定期的系统故障检查是非常必要的。

异常电池在电池组中的表现大多也与电池容量、内阻等呈高度相关,因此电池异常可以通过其电压进行反映。常见的电池组异常主要有:电池绝缘破损、电池内短路以及电池漏液等。若电池绝缘破损,则在外特性上可能表现为充电电压较低;若电池存在内短路,其容量将大幅减少;对于电池漏液,流失大量电解液会降低其导电能力,同时大量的锂离子流失,会导致电池的容量迅速衰减、内阻增加,表现为电池电压偏高。

动力电池安全特性参数:

1) 温度指标:温度变化率和电池组内最高温度。在电池充电过程中,当温度变化率或电池组内最高温度大于某一值时,电池组部分过热或温度上升速度过快,意味着电池组内部电池连接可能出现松动,从而导致连接阻值增加,或某个单体电池的内阻发生变化。这可能进一步导致电池组存在热失控的潜在风险。

2) 电压指标:单体电压变化率,表明电压不一致性的电压极差,电池组内最大单体电压。

3) 内阻指标:(组内单体电池的内阻不一致性),当电池组中某个或几个电池的内阻明显大于组内其他电池时,这可能意味着该电池的连接松动导致连接内阻增加,或者该电池与其他电池相比衰减更严重,从而导致电池内阻的较大增长。针对此情形,应当发出潜在安全隐患的预警信息。

4) 单体电池内阻的变化值:是指在实际应用中,当前充电周期的内阻与上一次充电周期内阻之间的差异。电池寿命测试结果显示,在电池容量迅速下降期间,通常伴随电池内阻的急剧增长。因此,两个充电周期内的内阻变化

值也是表示电池潜在问题的关键信息。

5) 电池 SOH: 表示动力电池的健康状态, 可以用来衡量电池的寿命。用可用容量除以标准蓄电池的容量来要求, 它的健康状态会随着使用年限增加, 内部结构老化等影响逐渐降低。

## 1.2 充电设备安全特性

电动车充电技术的发展已经取得重大进展, 充电基础设施由电源、充电、监控、计费等部门组成。在充电过程中, 可以通过对非车载充电机和交流充电桩的充电安全性进行评估, 来确保电池充电的可靠性。

充电设备安全特性参数:

1) 直流电压输出误差: 电压输出可以根据不同的电压水平进行调整, 其输出误差也可以根据电压水平进行调整。为了确保电压的准确性, 请将电压输出设备配置为半载, 然后将电压传感器放置于电压输出端。通过对比检验, 确保充电机的输出电压符合设计要求, 其相对静态误差在  $\pm 0.5\%$  之内。

2) 充电稳压精度: 当电池处于稳压状态时, 将电池的电流调整到  $85\% \sim 115\%$  的额定电流, 并将负荷电流调整到  $10\% \sim 100\%$  的额定电流, 以此来确保电池的电压能够达到最大的效果。此外, 还要对电池的电流进行测量, 以确保电池的电压能够达到最大的效果。通过调节输入直流电压的参数, 并进行多次实验, 以确保在满足多级要求的情况下, 其稳压精度均低于  $\pm 0.2\%$ 。

3) 纹波系数: 通过纹波系数的校准, 将输入电压从设计时的最高和最低设置到指定的最大和最小设置, 并将负荷电流从  $10\% \sim 100\%$  的设置范围内进行校准, 最终可以获得充电机的交流分量的最大峰值。

4) 限压特性: 通过调节负载电阻, 可以有效地控制恒流充电设备的直流电压, 一旦电压高于设计的阈值, 就会被有效地抑制, 从而达到节约电力的目的。

5) 充电设备故障率: 可以用设备的停休时间占计划使用时间的百分比表示。表征着充电设备的可靠性与耐用性。

6) BMS 响应率: 表示电池管理系统与充电设施通信实时交互的成功率, 若交互失败则不能进行正常充电, 因此是电动汽车安全充电的前提。

7) 输出过压率: 表示输出电压超过额定电压的部分百分比, 输出过压率越大, 输出电压越大, 导致电池受热迅速增加从而引发发热失控。

8) 功率因数: 功率因数等于有功功率比视在功率。功率因数是决定电压稳定性、线路损耗、设备性能以及电费的关键因素。当输出功率超过  $1 \text{ kW}$  时, 功率因数必须达到  $50\% \sim 100\%$ , 且不能低于  $0.92$ 。

## 1.3 配电网安全特性

当配电网运行过程中, 存在着诸多不确定因素。这些不确定因素可以根据动态时间的快慢、参数变化情况 (如低电压、大幅度相角偏移等) 和调节方法 (如无功控制、切换开关控制等) 进行区分。针对以上配电网安全的分类

方法, 可以更加迅速、准确地进行相应的控制。

为了确保配电网的安全运行, 应该综合考虑多个因素, 包括但不限于: 安全供电水平、稳定的静态电压、薄弱的拓扑架构、短期的稳定性、监控设备的状况、风险控制等 5 个维度。

配电网安全特性参数:

1) 累计故障次数: 在接入充电设施的配电网区域内发生故障的总次数, 表征着配电网的安全水平, 可以表示配电网对电动汽车充电安全的影响。

2) 电压水平波动率: 可用配电网内额定电压与接入电动汽车时的实际电压的差值除以额定电压乘百分之百表示, 表征电动汽车充电时对配电网电压波动产生的影响。

3) 台变功率越限率: 电动汽车充电时需要的负载功率超过了配电网的额定功率, 然后求出超出的部分占额定功率的百分比。表征着配电网过负荷输出功率的能力, 越限率越大配电网越安全。

4) 短时负载率: 短时负载率是指在一个较短时间内, 某一电力系统的负载与其容量的比率。通常情况下, 短时负载率用于描述某电力系统在短时间内的负荷波动情况, 例如某一小时内的负荷峰值。

5) 配电变压器容载比: 配电变压器容载比是指变压器的额定容量与其实际负载的比率。通常情况下, 变压器的额定容量是指在标准工况下, 变压器能够稳定运行的最大容量, 而实际负载则是指变压器在运行过程中所承载的负荷。

## 2 电动汽车充电安全指标体系

评估电动汽车充电安全状态时, 首先构建电动汽车充电安全评价指标体系, 为了提高充电安全评估的可靠性, 需要选取合理的特征指标。在选取评价指标时, 要求评价者具备相关的理论知识基础, 并对评价对象有详细了解与认识。

### 2.1 指标体系构建原则

1) 科学性原则: 构建充电安全指标体系的时候, 所选取的指标必须具备明确的概念和相应的科学内涵。同时所选取的安全评价指标必须可以定量评估并且可以反映出电动汽车充电过程实际的安全状态。

2) 全面性原则: 电动汽车充电安全受到不同方面的因素影响, 在选取评价指标的时候应该从环境到配电网多个角度全面考虑。通过多角度建立的评价指标体系才可以真实反映出充电安全运行情况。

3) 可操作性原则: 所设计的充电安全预警模型可以付诸实践且可以保证评价结果的正确性。所选取的指标应该具有可量化性和真实性, 且既可以反映评价对象的内涵, 又可以保证评价结果的精度。

4) 独立性原则: 指标体系中的指标应该是相互独立的, 即不受其他指标的影响, 能够单独描述某个特定方面的情况, 而不会受到其他方面的影响。如果指标间存在依赖关系或重叠, 就可能会导致重复计算或计算偏差。

5) 稳定性原则: 在构建指标体系时, 应该选择稳定性较高的指标, 避免选择波动性较大的指标。稳定性是指在

不同时间和环境下的变化程度。稳定性较高的指标变化不会受到外界因素的影响而产生明显波动, 而稳定性较低的指标则可能会受到外界因素的影响而产生较大的波动。

6) 可比性原则: 选取的指标必须是充电过程中的共性, 不能是某一个充电过程所特有的属性, 这样评价对象才能具有可比性。

按照以上 6 个原则严格选取指标, 就可以建立正确的充电安全评价指标体系。

### 2.2 指标体系构建

图 1 为电动汽车充电安全指标体系构建流程图。首先, 对发生的电动汽车充电安全事故进行调研分析, 选出诱发充电安全事故的特征指标; 其次, 再从电动汽车安全充电的相关规范中选取关键指标; 最后, 使用所选出的指标构建评价指标体系可能具有不合理, 甚至错误等问题, 因此需要对所选的指标进行专家意见集中度计算, 求出专家意见集中度高的重要指标来构建评价指标体系。

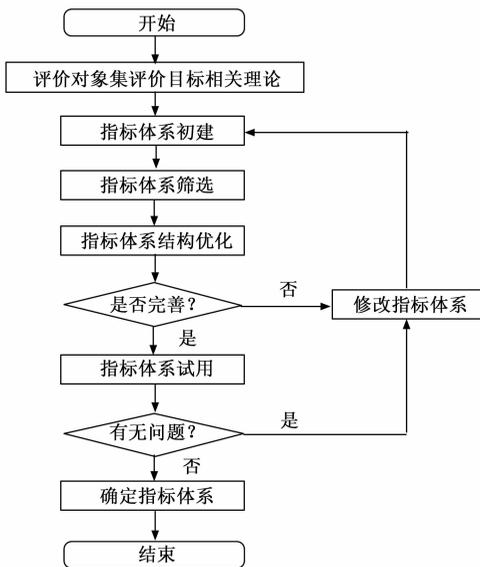


图 1 电动汽车充电安全指标体系构建流程图

本文主要从环境、动力电池、充电设备、配电网这 4 个角度来对电动汽车的充电安全进行综合评价, 如图 2 所示。

### 3 指标权重确定

电动汽车充电安全评价模型中各指标权重是受多种因素共同影响的复杂问题。为了保证评估的合理性, 采用主观权重与客观权重结合的方法确定指标的综合权重。

#### 3.1 基于灰色关联度主客观权重

灰色关联度分析法是由灰色理论发展而来。其中, 灰色关联分析的基本思想就是根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密。通过专家经验打分建立权重母序列, 选取专家经验打分的最大数值赋给参考序列。分析专家经验权重母序列与参考序列之间的差异来确定关联程度。当关联程度越大时, 指标序列与参考序列越接近, 表明该指标所具备的重要性越高, 应当赋予更大的权重。

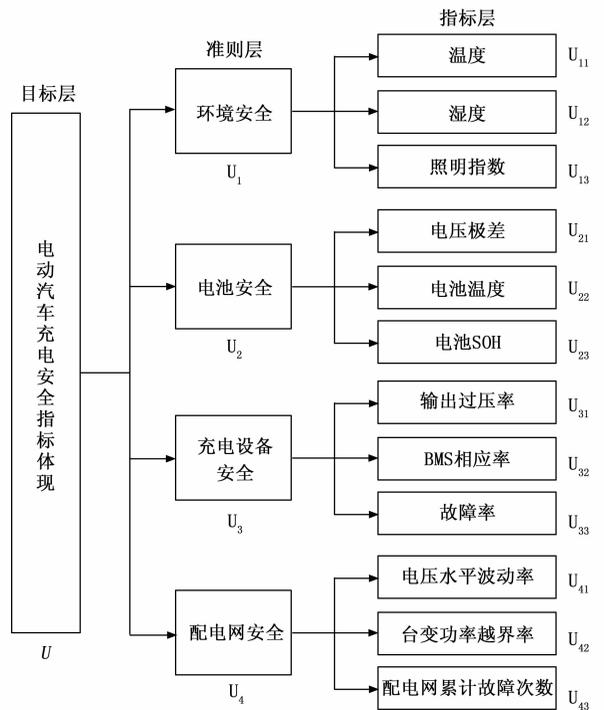


图 2 电动汽车充电安全指标体系

最后对各指标的关联度进行归一化处理, 得出各自的权重, 即:

1) 邀请  $m$  个专家对  $n$  个指标进行权重评估打分, 得出  $m \times n$  的权重母序列; 从权重母序列中选择出最大权重值, 并把该值赋到参考序列  $X_0$  中,  $X_0 = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(m))$ 。

$$X_1 = (x_1(1), x_1(2), \dots, x_1(m))$$

$$X_2 = (x_2(1), x_2(2), \dots, x_2(m))$$

⋮

$$X_n = (x_n(1), x_n(2), \dots, x_n(m)) \quad (1)$$

2) 计算各指标序列关联系数及关联度。把参考序列  $X_0$  与母序列相比较从而得出各个指标对应的关联系数为:

$$\gamma_{oi}(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (2)$$

式中,  $i=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, m; \rho$  表示分辨系数,  $\rho \in (0, 1)$ , 应用时一般选取 0.5。其关联度为:

$$\gamma_{oi} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \gamma_{oi}(k) \quad (3)$$

各序列的关联度大小代表着各个评价指标相对于参考序列的紧密程度, 其中关联度越大意味着专家评估权重集中度越高, 应该赋予的权重越大。把  $\gamma_{oi}$  关联度归一化后作为相应的权重, 即  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ , 其中:

$$\omega_i = \gamma_{oi} / \sum_{i=1}^n \gamma_{oi} \quad (4)$$

然而, 采用上述灰色关联度法求取指标权重存在两个

问题, 表现为:

1) 指标权重确立不具备客观性, 即使一组相同的母序列, 如果选取不同的参考序列  $X_0$  或者选择不同的分辨系数, 也会得出不同的权重结果。与此同时, 专家评估打分值又受主观因素影响太大。

2) 当分辨系数  $\rho = 0.5$  时, 通常有  $\gamma_i > 0.333$ , 从而导致指标间重要性难以区分。

### 3.2 基于实际数据的客观权重计算

权重分配的越合理充电安全风险评估的结果愈加准确。仅依靠专家经验很难保证权重分配的合理性, 为此引入了基于实际数据的客观权重来拟合出综合的权重结果。与此同时可以改善灰色关联度存在的指标权重间区分度不高和主观性太强的问题。

首先对 2014~2019 年电动汽车主要事故进行分析, 确定在充电过程中诱发事故的原因, 并且统计不同原因诱发事故的频率, 频率越高的赋予越大的权重, 即:

$$v_i = \frac{\sum_j \lambda_i}{N} \quad (5)$$

其中:  $N$  表示 2014 年~2019 年中充电过程中引发事故总次数,  $\sum_j \lambda_i$  表示第  $i$  种原因诱发事故总次数。

### 3.3 综合权重的计算

用标准离差法将主观权重和客观权重综合到一起得出综合权重。标准离差法是一种客观的权重分配方法, 其具体步骤如下:

计算主观和客观权重的标准差  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ , 将标准差更大的一项赋予更大的比重  $\mu$ , 且

$$\mu_i = \frac{\sigma_i}{\sum_{i=1}^2 \sigma_i} \quad (i = 1, 2) \quad (6)$$

其中:  $\mu_i$  为权重分配比例系数。

最后, 得到综合权重为:

$$W_i = \mu_1 \omega_i + \mu_2 v_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

## 4 隶属度函数确定和安全等级划分

### 4.1 隶属度函数确定

隶属度函数通常用来求取指标对不同评语等级的隶属程度, 其确定过程通常带有主观因素, 实质上是反映事物的渐变性。隶属函数需要具备以下特点: 1) 单峰值凸模糊集; 2) 隶属函数的因变量取值覆盖所有  $x$  轴取值; 3) 两个隶属函数重叠时, 不能同时出现最大隶属度。只要能够反映相同的模糊概念, 即使建立的隶属函数不同, 在实际应用中也是殊途同归。总的来说, 梯形分布的隶属函数适用范围广泛, 其简单易懂、可操作性强, 所以本文采用梯形分布的隶属函数, 其具体形式为:

1) 偏小型:

$$f(x) = \begin{cases} 1 & x < a \\ \frac{b-x}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 0 & x > b \end{cases} \quad (8)$$

2) 偏大型:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & x > b \end{cases} \quad (9)$$

3) 居中型:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x < c \\ 0 & x \geq d \end{cases} \quad (10)$$

所构建的充电安全的评价体系中的定量指标有“极大型”指标: 取值越大越好, “极小型”指标: 取值越小越好, 及“居中型”指标: 取值越趋近于某个区间越好。

### 4.2 安全等级划分

建立评语等级  $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$ ,  $v_1$  表示绝对安全,  $v_2$  表示安全,  $v_3$  表示一般安全,  $v_4$  表示危险,  $v_5$  表示非常危险。同时建立对应的评分集  $T = (t_1, t_2, \dots, t_5)^T$ ,  $t_1$  表示绝对安全,  $t_2$  表示安全,  $t_3$  表示一般安全,  $t_4$  表示危险,  $t_5$  表示非常危险, 其具体评分值如表 1 所示。

表 1 安全评分表

$T$	级别	得分
100/ $t_1$	绝对安全	90>
90/ $t_2$	安全	80~90
80/ $t_3$	一般安全	70~80
70/ $t_4$	危险	60~70
60/ $t_5$	非常危险	<60

调研电动汽车充电状况, 首先统计各个指标正常充电时的数据通过云模型生成相应的阈值区间, 合理划分等级; 然后分析充电故障时各个指标相关的特征数据, 生成危险等级下各个指标的阈值区间, 最后结合相关的国际标准以及行业规范标准, 整理出电动汽车充电不同指标的安全等级阈值, 最终构建安全等级划分表, 如表 2 所示。

表 2 电动汽车充电安全评价指标安全等级划分

代号	等级划分				
	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$
$U_{11}/^\circ\text{C}$	(5, 15)	(0, 5)	(-5, 0)	(-10, -5)	$\leq -10$
$U_{12}/\%$	$\leq 75$	(75, 80)	(80, 90)	(90, 95)	$\geq 95$
$U_{13}/\%$	$\geq 95$	(95, 90)	(90, 80)	(80, 70)	$\leq 70$
$U_{21}/\text{mV}$	$\leq 10$	(10, 50)	(50, 100)	(100, 500)	$\geq 500$
$U_{22}/^\circ\text{C}$	$\leq 60$	(60, 80)	(80, 100)	(100, 130)	$\geq 130$
$U_{23}/\%$	$\geq 99$	(99, 95)	(95, 90)	(90, 80)	$\leq 80$
$U_{31}/\%$	$\leq 1.5$	(1.5, 2.5)	(2.5, 5)	(5, 20)	$\geq 20$
$U_{32}/\%$	$\geq 99.8$	(99.8, 98)	(98, 97)	(97, 90)	$\leq 90$
$U_{33}/\%$	$\leq 3$	(3, 7)	(7, 10)	(10, 12)	$\geq 12$
$U_{41}/\%$	$\leq 0.3$	(0.3, 1)	(1, 2)	(2, 5)	$\geq 5$
$U_{42}/\%$	$\leq 1$	(1, 3)	(3, 5)	(5, 20)	$\geq 20$
$U_{43}/\text{次}$	$\leq 1$	(1, 2)	(2, 3)	(3, 5)	$\geq 5$

### 5 实验结果与分析

#### 5.1 实验步骤

按照所构建的充电安全评价体系, 对充电安全进行评价, 具体流程如图 3 示。

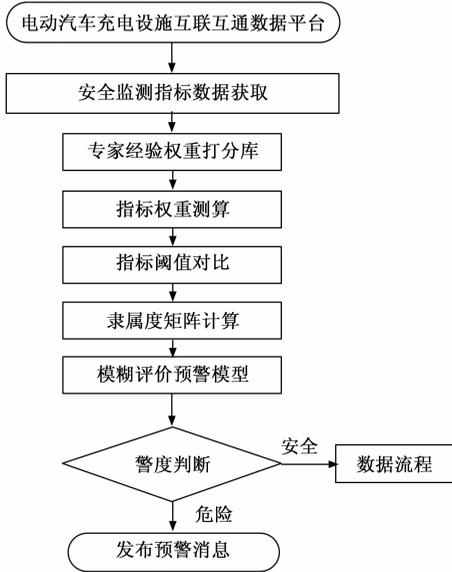


图 3 电动汽车充电安全评价流程图

首先通过灰色关联度确定不同评价指标的主客观权重。邀请 15 位来自电动汽车充电安全领域的专家以及业内人士, 对不同指标的权重进行评估打分; 以准则层的一级指标为例, 建立专家评估打分权重表 3。

表 3 专家经验判断权重

专家	指标			
	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	U <sub>3</sub>	U <sub>4</sub>
1	0.1	0.7	0.15	0.05
2	0.02	0.8	0.12	0.06
3	0.08	0.65	0.2	0.07
4	0.12	0.66	0.14	0.08
5	0.15	0.55	0.16	0.14
6	0.13	0.66	0.12	0.09
7	0.07	0.63	0.11	0.19
8	0.08	0.74	0.1	0.08
9	0.06	0.71	0.16	0.07
10	0.11	0.63	0.11	0.15
11	0.13	0.64	0.11	0.12
12	0.12	0.59	0.18	0.11
13	0.13	0.72	0.09	0.06
14	0.12	0.69	0.12	0.07
15	0.12	0.68	0.13	0.07

由上述的专家权重评估打分表, 建立相应的母序列矩阵, 然后找出权重的最大值作为参考值赋给参考序列 X<sub>0</sub>。

根据式 (1) ~ (4) 得出电动汽车充电安全的准则层模糊权重为 ω<sub>0</sub> = (0.195 0.412 0.2 0.193)。然后, 由

图 4 所示, 根据 2014~2019 年主要电动汽车事故统计<sup>[19-21]</sup> 确定电动汽车充电安全准则层环境安全 U<sub>1</sub>、电池安全 U<sub>2</sub>、充电设备安全 U<sub>3</sub> 和配电网安全 U<sub>4</sub> 权重。

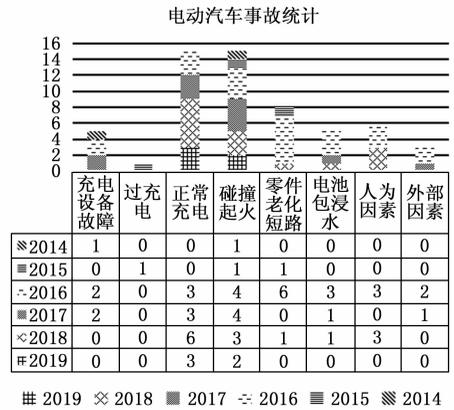


图 4 电动汽车充电事故统计图

统计不同原因诱发事故的频率, 频率越高赋予权重越大。准则层环境安全权重为 V<sub>1</sub> = 0, 电池安全的权重为 V<sub>2</sub> = 0.77, 充电设备安全的权重为 V<sub>3</sub> = 0.23, 配电网安全权重为 V<sub>4</sub> = 0。由式 (7) 得综合权重 W<sub>0</sub> = (0.045 0.688 0.223 0.044)。

同理可得环境安全 U<sub>1</sub> 的综合权重为: ω<sub>1</sub> = (0.719 0.241 0.04), 电池 U<sub>2</sub> 的综合权重: ω<sub>2</sub> = (0.264 0.614 0.122), 充电设备 U<sub>3</sub> 的综合权重: ω<sub>3</sub> = (0.117 0.658 0.225), 配电网 U<sub>4</sub> 的综合权重: ω<sub>4</sub> = (0.584 0.188 0.228)。

从“电动汽车充电安全平台”中获取南京市 2018 年度电动汽车的充电数据进行安全评价分析, 获取的充电数据如表 4 所示。

表 4 获取的 2018 年南京市充电数据

代号	指标	A	B	C	D	E
U <sub>11</sub> /°C		16	14	26	31	-15
U <sub>12</sub> /%		77	70	86	91	96
U <sub>13</sub> /%		100	97	86	75	60
U <sub>21</sub> /mV		18	4	80	200	500
U <sub>22</sub> /°C		80	40	90	120	130
U <sub>23</sub> /%		98.6	100	92	86	60
U <sub>31</sub> /%		2.4	1	3	10	25
U <sub>32</sub> /%		99.5	99.9	98	96	90
U <sub>33</sub> /%		3.5	2	8	11	13
U <sub>41</sub> /%		0.7	0.1	1.8	3	6
U <sub>42</sub> /%		1.8	1	8	15	20
U <sub>43</sub> /次		1	0	1.5	4	5

将 A 组充电数据代入式 (8) ~ (10), 结合安全等级阈值建立隶属度矩阵如下:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.9 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0.8 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.694 & 0.306 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0.1 & 0.9 & 0 & 0 \\ 0.609 & 0.391 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.875 & 0.125 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0.429 & 0.571 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

首先通过二级隶属度矩阵和二级指标权重得到一级模糊综合评判矩阵  $R$  为:

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 R_1 \\ w_2 R_2 \\ w_3 R_3 \\ w_4 R_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.028 & 0.588 & 0.384 & 0 & 0 \\ 0.085 & 0.249 & 0.666 & 0 & 0 \\ 0.401 & 0.466 & 0.133 & 0 & 0 \\ 0 & 0.591 & 0.409 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

然后得到充电安全评价的隶属度评判矩阵:

$$B = W_0 \times R = [0.120 \ 6 \quad 0.424 \ 6 \quad 0.454 \ 8 \quad 0 \ 0 \ 0]$$

最终得到评分值:

$$f = R \times T = \{86.44, 84.19, 92.68, 85.91\}$$

$$F = B \times T = 86.65$$

### 5.2 防范评估结果分析

图 5 为评价结果。环境安全评分为 86.44，电池安全评分为 84.19，充电设备安全 92.68，配电网安全评分为 85.91，综合得分为 86.65。环境安全处于安全级别，电池安全处于安全级别，充电设备安全处于绝对安全级别，配电网安全处于安全级别。此次充电过程处于安全级别。同理可得 B 组处于绝对安全级别；C 组处于一般安全级别；D 组处于危险级别；E 组处于非常危险级别。

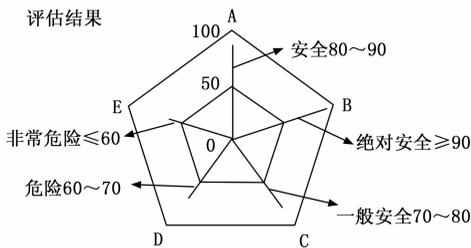


图 5 评价结果

A 组和 B 充电过程均处于安全等级以上，充电设备、配电网、动力电池的评估指标参数均处在阈值范围内，运行状态稳定，基本不会发生故障，所以无需检修。C 组充电过程的充电设备处于一般安全状态，充电设备的评估指标运行参数偏向阈值范围，运行状态较为稳定，故障发生率有所增加，应按检修周期定期巡检。D 组充电过程的充电设备和电池处于危险状态，评估指标参数极其接近阈值，运行状态不稳定，随时可能出现故障，应该加强监控优先

检修。E 组充电过程动力电池处于非常危险状态，评估指标参数超过了阈值，极易引发电池的热失控，从而导致充电事故的发生，应立刻停止充电进行检修。

### 6 结束语

从现有的相关标准以及充电安全事故中提炼出关键指标，经过专家评估打分选取集中度高的指标构建综合评价指标体系。通过基于灰色关联度的专家经验赋权与基于实际数据客观权重相结合的方法确定综合权重，避免了客观性缺失的弊端，提高了权重拟合的合理性，使得评估结果更加准确。分别从环境、电池、充电设备、配电网 4 个方面选取指标来评价电动汽车充电安全状态；通过分析正常充电时的数据和故障时的数据，生成各个指标的阈值区间，然后划分为 5 个安全等级，将充电过程的实时数据代入安全等级中去结合隶属函数便可以求出隶属度矩阵，最后通过模糊综合评价求出综合得分，实现安全预警。该评估方法可以实时监测电动汽车充电过程的数据，然后输出安全风险等级，有效降低充电安全事故发生的可能。

### 参考文献:

- [1] 高德欣, 郑晓雨, 王 义, 等. 电动汽车充电状态监测与多级安全预报警方法 [J]. 电工技术学报, 2022, 37 (9): 2252 - 2262.
- [2] 王大勇, 王廷虎, 王 鹏, 等. 基于注意力机制 BiLSTM 的设备智能故障诊断方法 [J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版), 2020, 53 (6): 601 - 608.
- [3] 于 畅. 电动汽车充电桩健康状态综合评估方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2020.
- [4] 林西浩. 基于深度学习的电动汽车充电设备故障诊断系统研究与设计 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2022.
- [5] 叶黎敏. 电动汽车安全性能措施浅析 [J]. 时代汽车, 2023, (4): 110 - 112.
- [6] VESA L A. Assessing the electrical risks in electric vehicle repair [C] // IEEE IAS Electrical Safety Workshop (ESW). Jacksonville, FL, United states: IEEE Computer Society, 2022: 1 - 7.
- [7] 陈素华, 白 莹. 锂离子动力电池热失控机理及热管理技术研究进展 [J]. 中国科学基金, 2023, 37 (2): 187 - 198.
- [8] 吴长青. 新能源汽车动力电池安全问题分析及解决策略 [J]. 时代汽车, 2023 (10): 100 - 102.
- [9] 于 璐, 张 辉, 田培根, 等. 一种梯次利用电池可重构储能系统多级在线安全评估及风险预警定位方法 [J]. 太阳能学报, 2022, 43 (5): 461 - 467.
- [10] 于秩祥. 电动汽车动力电池使用安全性研究 [J]. 北京汽车, 2023 (1): 18 - 21.
- [11] 李 辉, 温晶君. 电动汽车单体电池采集电路故障分析与对策 [J]. 客车技术与研究, 2023, 45 (1): 49 - 51.
- [12] 潘乐平. 电动汽车锂离子电池热失控安全防护系统的研究 [D]. 合肥: 安徽理工大学, 2022.
- [13] 张 晶, 时 玮, 张元星, 等. 电动汽车充电过程安全因素

- 及动态预警 [J]. 电源技术, 2019, 43 (5): 861-863, 868.
- [14] 陈宁, 陈嘉瑶, 钟志平. 基于电压注入法的电动汽车绝缘电阻在线检测 [J]. 电气传动, 2019, 49 (2): 66-73.
- [15] 唐荣华. 基于灰色关联分析综合法的信息系统安全管理评价 [J]. 电视技术, 2022, 46 (11): 41-46.
- [16] 夏静, 谢伟, 黄召庭, 等. 基于改进模糊层次分析法的凝析气田开发效果评价 [J]. 辽宁石油化工大学学报, 2022, 42 (6): 36-43.
- [17] 魏敏, 王法. 基于层次分析与模糊综合的变电站绿色施工评价方法研究 [J]. 能源研究与利用, 2023 (2): 53-56.
- [18] 宋伟. 电动汽车充电一体化安全预警防护体系研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2018.
- [19] 陈泽宇, 熊瑞, 孙逢春. 电动汽车电池安全事故分析与研究现状 [J]. 机械工程学报, 2019, 55 (24): 93-104, 116.
- [20] JIANG L R, ZHANG Y X, LI T Y, et al. Analysis on charging safety and optimization of electric vehicles [C] //IEEE 6th International Conference on Computer and Communications (ICCC). Chengdu, China: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020: 2382-2385.
- [21] 杨雪蛟. 电动汽车交流充电桩的充电安全分析研究 [J]. 环境技术, 2023, 41 (1): 77-82.
- ating secure boot for FPGAs [C] //2018 IEEE International Symposium on Hardware Oriented Security and Trust (HOST). IEEE, 2018: 221-226.
- [11] 康剑萍, 王沈敏, 杜竹青. PKI 技术在信息安全中的应用 [J]. 自动化仪表, 2020, 41 (4): 107-110.
- [12] HARRISON J, ASADIZANJANI N, TEHRANIPOOR M. On malicious implants in PCBs throughout the supply chain [J]. Integration, 2021, 79: 12-22.
- [13] 陈鑫辉, 倪力, 刘子坚, 等. 基于 ZnO 忆阻器的高鲁棒性毛刺型物理不可克隆函数设计 [J]. 电子与信息学报, 2023, 45 (9): 3331-3339.
- [14] 侯申, 李景龙, 刘海龙, 等. 轻量级可配置强物理不可克隆函数设计 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2021, 33 (10): 1627-1634.
- [15] 秦体红, 汪宗斌, 张宇, 等. 物联网 PKI 技术研究 [J]. 信息安全研究, 2022, 8 (12): 1156-1162.
- [16] 阎红灿, 窦桂梅, 陈子昂, 等. 基于动态信任值的实用拜占庭容错算法的优化 [J]. 华北理工大学学报 (自然科学版), 2023, 45 (1): 99-108.
- [17] 安美芳, 季宏志, 朱琳, 等. 面向软件在线升级过程的信任链机制 [J]. 计算机工程与设计, 2022, 43 (9): 2401-2407.
- [18] 章岸婧. 后真相时代数字档案信息信任链构建探究 [J]. 档案学研究, 2021 (3): 51-59.
- [19] 沈贝敏. 基于混合加密算法的医院信息系统秘钥存储管理 [J]. 微型电脑应用, 2022, 38 (3): 201-205.
- [20] 徐方晨, 刘陈. 一种 FPGA 芯片 JTAG 接口切换电路的设计 [J]. 中国新通信, 2021, 23 (8): 153-154.
- [21] 吕滔, 邓玉娇, 陈兰英, 等. 基于 JTAG 模式的安全级 DCS 模块软件下装 [J]. 仪器仪表用户, 2021, 28 (11): 38-42.
- [22] 何利文, 安聪, 国海轮. 针对 AES 加密算法的安全检测 [J]. 计算机技术与发展, 2022, 32 (5): 87-92.
- [23] 陈靖, 汪烈军, 钟劲松, 等. 改进型 AES 加密算法在无线传感器网络中的研究与实现 [J]. 现代电子技术, 2021, 44 (12): 44-48.
- [24] 何涛, 冯伟东, 王红卫, 等. 基于二维混沌映射的 AES 加密算法的研究与改进 [J]. 计算机与数字工程, 2021, 49 (10): 1993-1997.
- (上接第 292 页)
- 国标中的参数以及验签算法对于嵌入式设备来说执行流程复杂, 带来了效率的损失。因此接下来将进一步研究由用户与 KGC 共同决定签名私钥的隐式证书密码体制, 以及在 Secure Boot 应用中, 如何轻量化 SM9 认证协议。

#### 参考文献:

- [1] TAO Z, RASTOGI A, GUPTA N, et al. DICE\*: a formally verified implementation of DICE measured boot [C] //30th USENIX Security Symposium (USENIX Security 21), 2021: 1091-1107.
- [2] 潘红改, 程学军, 王建平. 融合加密与水印的移动终端代码篡改研究 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (1): 186-189.
- [3] HAJ Y J, WONG M M, PUDI V, et al. Lightweight secure-boot architecture for RISC-v system-on-chip [C] //20th International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED). IEEE, 2019: 216-223.
- [4] DHANUSKODI S N, LI X, HOLCOMB D. COUNTERFOIL: Verifying provenance of integrated circuits using intrinsic package fingerprints and inexpensive cameras [C] //29th USENIX Security Symposium, 2020: 1255-1272.
- [5] 于颖超, 甘水滔, 邱俊洋, 等. 二进制代码相似度分析及在嵌入式设备固件漏洞搜索中的应用 [J]. 软件学报, 2022, 33 (11): 4137-4172.
- [6] FRAZELLE J. Securing the boot process: the hardware root of trust [J]. Queue, 2019, 17 (6): 5-21.
- [7] JIANG H, CHANG R, REN L, et al. Implementing a ARM-based secure boot scheme for the isolated execution environment [C] //2017 13th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS). IEEE, 2017: 336-340.
- [8] KUMAR V B Y, GUPTA N, CHATTOPADHYAY A, et al. Post-quantum secure boot [C] //2020 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE). IEEE, 2020: 1582-1585.
- [9] EHRET A, DEL ROSARIO E, GETTINGS K, et al. A hardware root-of-trust design for low-power SoC edge devices [C] //2020 IEEE High Performance Extreme Computing Conference (HPEC). IEEE, 2020: 1-6.
- [10] POCKLASSERY G, CHE W, SAQIB F, et al. Self-authentic-