

基于 $N-K$ 模型的电动车火灾事故 风险因素耦合分析

张庆¹, 伍爱友^{1,2*}, 曾雯¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;
2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 为减少电动车火灾事故的发生, 提高电动车安全管理水平, 收集和整理了 2018 年—2022 年发生的 206 起电动车火灾事故报告, 分析引发电动车火灾的主要风险因素, 并探讨各因素的耦合作用对电动车火灾事故的影响。基于 $N-K$ 模型构建电动车火灾事故多风险因素耦合模型, 并进行耦合交互信息值的计算, 得到不同风险因素耦合发生的概率。研究表明: 参与耦合的风险因素数量增加, 耦合值也相应增加, 各因素之间的相互影响愈加密切。物-环境-管理是三因素耦合中造成电动车火灾事故风险最大的耦合因素; 人-物是双因素耦合中造成电动车火灾风险最大的耦合因素, 减少风险因素耦合能降低事故发生的概率。研究成果可为电动车火灾事故的防控提供理论参考和决策支持。

关键词: 电动车火灾; 风险分析; $N-K$ 模型; 耦合值

中图分类号: X928.7

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2025)01-0024-05

Coupling Analysis of Risk Factors for Electric Vehicle Fire Accidents Based on $N-K$ Model

ZHANG Qing¹, WU Aiyu^{1,2}, ZENG Wen¹

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Coal Mining Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to reduce the occurrence of electric vehicle fire accidents and improve the level of electric vehicle safety management, 206 reports of electric vehicle fire accidents that occurred from 2018 to 2022 are collected and organized. The main risk factors that caused electric vehicle fires are analyzed, and the coupling effect of various factors on electric vehicle fire accidents is explored. Based on the $N-K$ model, a multi risk factor coupling model for electric vehicle fire accidents is constructed, and the coupling interaction information values are calculated to obtain the probability of different risk factor coupling occurring. Researches have shown that as the number of risk factors involved in coupling increases, the coupling value also increases accordingly, and the mutual influence between various factors becomes increasingly close. Material environment management is the coupling factor that causes the highest risk of electric vehicle fire accidents among the three factors. Human object is the coupling factor that causes the highest risk of electric vehicle fire in the dual factor coupling. Reducing the coupling of risk factors can lower the probability of accidents occurrence. The research results can provide theoretical reference and decision support for the prevention and control of electric vehicle fire accidents.

Keywords: electric vehicle fire; risk analysis; $N-K$ model; coupling value

近年来,电动车的数量不断增加,电动车火灾事件也频繁发生.充电过程中的安全隐患成为引发火灾的主要原因.电动车及其电池等产品不合格,以及随意改装电动车等行为都大大增加了电动车火灾的风险.

在国内,许多学者针对电动车火灾事故已经开展了大量的研究工作,试图从不同的角度和层面探究电动车火灾事故的根源及其解决方案.朱晓东^[1]、林新美等^[2]分别从电动车生产质量、管理现状、电动车现有问题等多个角度分析电动车发生火灾的原因,提出多种应对措施;任国友等^[3]通过“2-4 模型”分析电动车火灾事故的多层次原因,建立了电动车火灾事故致因指标评价体系,并运用变异系数法对致因权重进行研究;阮立等^[4]针对电动车充电器的过温问题及充电过程中常见的故障,分析充电器过温报警保护系统设计的关键技术,并提出了改进过温保护系统的具体思路和技术措施;毛仕汉等^[5]通过定量分析电动车火灾的风险性,从电动车设计、生产、存放、充电等多个方面进行针对性探讨,提出减少火灾发生的技术措施;宋炜等^[6]运用 5Why 分析法分析电动车火灾发生原因和造成人员伤亡的原因,并针对事故原因提出规范日常使用、排查火灾隐患等改进建议;胡玉娟等^[7]建立电动车引发火灾事故树,通过计算事故树的最小割集、最小径集与基本事件的结构重要度分析电动车引发火灾的原因,并提出电动车火灾的安全防范措施.

上述研究都是针对电动车发生火灾的单个因素进行分析,未考虑多个因素的耦合作用对电动车火灾事故的影响.而 $N-K$ 模型作为一种有效的多因素耦合分析工具,能够系统地分析多个因素的交互作用对火灾风险的影响.该模型最初由 KAUFFMAN^[8]提出并用于解决基因组问题,同时该模型在地铁施工与运维^[9]、交通运输安全^[10]、区域火灾风险分析^[11]等领域也得到了广泛应用,表明 $N-K$ 模型的多因素耦合分析方法能够有效揭示各风险因素之间的交互效应.基于上述分析,本文构建基于 $N-K$ 模型的电动车火灾风险事故耦合模型,根据各风险因素之间的相互耦合关系,对其耦合效应进行综合评估,据此确定事件发生的概率,并针对评估结果提出相应的整改措施,为预防和控制电动车火灾事故提供决策支持.

1 风险因素耦合机理分析

1.1 事故风险因素识别

根据国家消防救援局官网和应急管理部公开发布的电动车火灾事故统计数据以及相关文献^[12-13],整理了我国 2018 年—2022 年发生的 206 起典型的电动车火灾事故.在数据筛选过程中,选取造成人员伤亡或财产损失较为严重的电动车火灾事故,排除由于其他因素(如建筑火灾、交通事故等)引发的火灾和因数据缺失或事故记录不明确的案例.针对事故发生的原因进行整合分析,采用德尔菲法分别从人、物、环境、管理这 4 个维度对火灾事故原因进行分类,事故案例具体风险因素如表 1 所示.人的因素是指与电动车用户、操作人员和其他相关人员的行为和素质相关的风险因素,这些因素的风险通常源于人的不当操作、不良习惯或疏忽等.物的因素涉及电动车相关设备的质量和性能等方面,主要是电池、充电器及电路系统等关键部件的故障或缺陷.环境因素涵盖电动车使用和存放环境中可能存在的外部条件,这些条件可能会增加火灾风险.管理因素涉及电动车安全管理相关的政策、制度和操作规程等.

表 1 电动车火灾事故风险因素

一级风险因素	具体风险因素
人的因素	过度充电;私自组装;未定期维修保养;违规充电;安全意识薄弱;安全技能欠佳等
物的因素	充电器故障;电瓶老化;零部件老化;电路故障;电池保护系统失效等
环境因素	高温暴晒;潮湿环境;道路原因;易燃物等
管理因素	电动车扎堆;安全培训不足;安全宣传不到位;未对电动车进行定期检查;产品质量监管不力等

1.2 影响因素耦合机理

风险耦合是指系统内部因素之间相互影响、相互促进,可能导致系统稳定性失衡,致使系统风险值发生变化^[14].电动车火灾事故通常不是由单一风险因素引起,而是由多种风险因素相互作用、相互促进导致.

电动车火灾风险耦合是指电动车在使用过程中,一系列不安全行为和不利的环境条件等因素相互作用形成耦合风险,打破原有的平衡系统,导致火灾事故的发生.电动车火灾风险因素的耦合形式可分为单因素、双因素及多因素风险耦合^[15].

单因素风险耦合是指同一级别的风险因素内部因子之间的相互作用,包括人的因素风险耦合、物的因素风险耦合、环境因素风险耦合和管理因素风险耦合这 4 种情况.单因素风险耦合是比较普遍的耦合形式.

双因素风险耦合是指电动车火灾事故风险因素中任意不同级的 2 个风险因素之间的相互作用,包括人-物、人-环境、人-管理、物-环境、物-管理、环境-管理共 6 种情况.

多因素风险耦合是指电动车火灾事故风险因素中任意 3 个及以上不同级风险因素之间的相互作用,包括人-物-环境、人-物-管理、人-环境-管理、物-环境-管理、人-物-环境-管理共 5 种情况.电动车火灾事故风险耦合演化过程如图 1 所示.

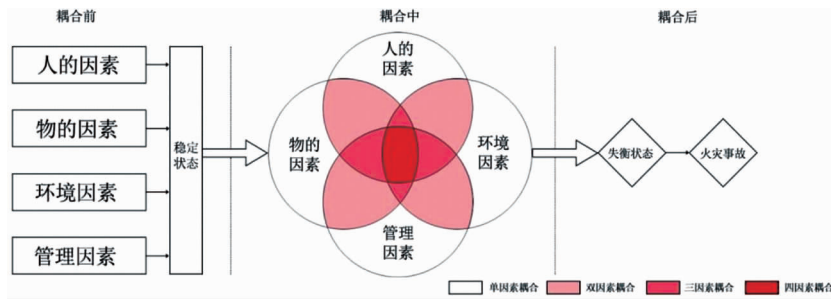


图 1 电动车火灾事故风险耦合演化过程

2 电动车火灾事故风险因素耦合模型

在系统风险评估中, $N-K$ 模型是一种常用的模型,该模型着重考虑系统内部各个元素之间的相互作用.在这个模型中, N 为系统中的元素个数, K 为系统元素间相互耦合关系的数量,其取值为 $[0, N-1]$.当 K 等于 0 时,表示系统内的风险因素未超过风险阈值,不会直接引发事故;当 K 大于 1 时,意味着风险因素已经达到危险的程度,可能会直接导致事故的发生.为了研究系统中各种风险因素之间的关系,运用信息理论中的交互信息来量化它们之间的耦合作用^[16].交互信息的计算公式为

$$T(a, b, c, d) = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \left[P_{hijm} \log_2 \left(\frac{P_{hijm}}{P_{h...} P_{...i} P_{...j} P_{...m}} \right) \right], \quad (1)$$

($h=1, 2, \dots, H; i=1, 2, \dots, I; j=1, 2, \dots, J; m=1, 2, \dots, M$).

式中: T 为风险因素耦合值; a, b, c, d 分别为人、物、环境、管理 4 种耦合因素; P_{hijm} 为人在第 h 个状态、物在第 i 个状态、环境在第 j 个状态、管理在第 m 个状态下风险因素发生耦合的概率; $P_{h...}, P_{...i}, P_{...j}, P_{...m}$ 分别为人员在 h 状态、物在 i 状态、环境在 j 状态、管理在 m 状态的概率; H, I, J, M 分别为人、物、环境、管理风险因素的状态数目.

电动车火灾事故中 4 种风险因素相互耦合,各因素的耦合多次叠加可以看作是耦合概率的增长,计算得到的 T 值越大表示风险耦合概率越大,事故越容易发生,即造成电动车火灾发生的概率越大.

根据风险因素耦合形式分析,将双因素风险耦合的 6 种耦合形式人-物、人-环境、人-管理、物-环境、物-管理、环境-管理对应的风险耦合值分别记为 $T_{2-1}(a, b), T_{2-2}(a, c), T_{2-3}(a, d), T_{2-4}(b, c), T_{2-5}(b, d), T_{2-6}(c, d)$.以 $T_{2-1}(a, b)$ 为例,其计算公式如式(2)所示,其他双因素风险耦合值计算公式类比式(2).

$$T_{2-1}(a, b) = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I \left[P_{hi..} \log_2 \left(\frac{P_{hi..}}{P_{h...} P_{...i}} \right) \right]. \quad (2)$$

将多因素风险耦合的 5 种耦合形式人-物-环境、人-物-管理、人-环境-管理、物-环境-管理、人-物-环境-管理对应的风险耦合值分别记为 $T_{3-1}(a, b, c), T_{3-2}(a, b, d), T_{3-3}(a, c, d), T_{3-4}(b, c, d), T_{3-5}(a, b, c, d)$.

d).以 $T_{3-1}(a,b,c)$ 为例,其计算公式如式(3)所示,其他三因素风险耦合值计算公式类比式(3);四因素风险耦合值计算公式同式(1).

$$T_{3-1}(a,b,c) = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left[P_{hij} \cdot \log_2 \left(\frac{P_{hij}}{P_{h...} P_{...i} P_{...j}} \right) \right]. \tag{3}$$

3 实例分析

3.1 $N-K$ 模型耦合概率计算

本文以收集的 206 起电动车火灾事故案例数据为研究对象,计算不同风险因素耦合导致的电动车火灾事故发生的次数和概率,如表 2 所示.用“0”表示某因素未造成电动车火灾事故,“1”表示某因素造成了电动车火灾事故.例如“1000”表示单因素耦合中只有人的因素内部因子相互作用造成电动车火灾事故,其余因素未造成事故;“0101”表示双因素耦合中只有物的因素和管理因素发生耦合造成了电动车火灾事故,人的因素和环境因素未造成电动车火灾事故.

表 2 电动车火灾事故风险因素耦合的次数和概率(2018 年—2022 年)

耦合形式	变量	数据结果					
单因素耦合	发生次数	$n_{0000}=0$	$n_{1000}=35$	$n_{0100}=29$	$n_{0010}=2$	$n_{0001}=0$	
	概率	$P_{0000}=0$	$P_{1000}=0.169\ 9$	$P_{0100}=0.140\ 8$	$P_{0010}=0.009\ 5$	$P_{0001}=0$	
双因素耦合	发生次数	$n_{1100}=53$	$n_{1010}=5$	$n_{1001}=7$	$n_{0110}=22$	$n_{0101}=7$	$n_{0011}=0$
	概率	$P_{1100}=0.257\ 3$	$P_{1010}=0.024\ 3$	$P_{1001}=0.034\ 0$	$P_{0110}=0.106\ 8$	$P_{0101}=0.034\ 0$	$P_{0011}=0$
多因素耦合	发生次数	$n_{1110}=25$	$n_{1011}=3$	$n_{1101}=5$	$n_{0111}=8$	$n_{1111}=5$	
	概率	$P_{1110}=0.121\ 4$	$P_{1011}=0.014\ 6$	$P_{1101}=0.024\ 3$	$P_{0111}=0.038\ 8$	$P_{1111}=0.024\ 3$	

3.2 风险耦合值计算

为方便计算不同风险因素耦合形式的风险耦合值 T ,首先需要计算各风险耦合发生的概率.以风险因素中人的因素未与其他因素耦合造成电动车火灾事故为例,其计算公式为

$$P_{0...} = P_{0000} + P_{0100} + P_{0010} + P_{0001} + P_{0110} + P_{0101} + P_{0011} + P_{0111}. \tag{4}$$

计算得到 $P_{0...}=0.329\ 9$.同理可以计算其他不同因素耦合作用下火灾事故发生的概率,如表 3 所示.

表 3 不同耦合形式的耦合概率

耦合形式	耦合概率			
单因素耦合	$P_{0...}=0.329\ 9$	$P_{1...}=0.670\ 1$	$P_{-0-}=0.252\ 3$	$P_{-1-}=0.747\ 7$
	$P_{-0-}=0.660\ 3$	$P_{-1-}=0.339\ 7$	$P_{-0-}=0.830\ 0$	$P_{-1-}=0.170\ 0$
双因素耦合	$P_{00-}=0.009\ 5$	$P_{0-0}=0.257\ 1$	$P_{0-0}=0.203\ 7$	$P_{00-}=0.203\ 9$
	$P_{01-}=0.320\ 4$	$P_{0-1}=0.072\ 8$	$P_{0-1}=0.048\ 6$	$P_{01-}=0.048\ 4$
	$P_{10-}=0.242\ 8$	$P_{1-0}=0.572\ 9$	$P_{1-0}=0.626\ 3$	$P_{10-}=0.456\ 4$
	$P_{11-}=0.427\ 3$	$P_{1-1}=0.097\ 2$	$P_{1-1}=0.121\ 4$	$P_{11-}=0.291\ 3$
	$P_{0-0}=0.174\ 8$	$P_{1-0}=0.485\ 5$	$P_{-00}=0.568\ 0$	$P_{-10}=0.262\ 0$
	$P_{0-1}=0.155\ 1$	$P_{1-1}=0.184\ 6$	$P_{-01}=0.092\ 3$	$P_{-11}=0.077\ 7$
	$P_{000}=0.000\ 0$	$P_{011}=0.145\ 6$	$P_{110}=0.281\ 6$	$P_{010}=0.174\ 8$
多因素耦合	$P_{100}=0.203\ 9$	$P_{111}=0.145\ 7$	$P_{101}=0.038\ 9$	$P_{001}=0.009\ 5$
	$P_{01-0}=0.247\ 6$	$P_{00-0}=0.009\ 5$	$P_{01-1}=0.072\ 8$	$P_{11-0}=0.378\ 7$
	$P_{00-1}=0.000\ 0$	$P_{10-0}=0.194\ 2$	$P_{11-1}=0.048\ 6$	$P_{10-1}=0.048\ 6$
	$P_{-110}=0.228\ 2$	$P_{-010}=0.033\ 8$	$P_{-000}=0.169\ 9$	$P_{-011}=0.014\ 6$
	$P_{-101}=0.058\ 3$	$P_{-001}=0.034\ 0$	$P_{-100}=0.398\ 1$	$P_{-111}=0.063\ 1$

根据式(1)~式(3)分别计算不同风险因素耦合形式下的风险耦合值,如图 2 所示.

根据各风险因素耦合结果分析得出:2 个风险因素参与的耦合作用中,人-物的耦合作用相较于其他双因素耦合所造成的风险更大,这主要是因为人在使用电动车过程中,人与物(电动车及其部件)直接接

触或人对物的不当操作,更容易发生耦合,从而导致事故风险更大.多个风险因素相互作用时,最大的风险发生在 4 个因素同时参与的耦合作用下,其次是 3 个因素参与的耦合作用所带来的风险.在 3 因素耦合中,物-环境-管理的耦合作用所产生的风险较高,而人-物-环境的耦合作用次之,这是由于“物”是电动车火灾的直接载体,涉及“物”的耦合风险普遍较高,在物-环境-管理和人-物-环境的耦合形式中,环境因素的影响会进一步放大火灾风险.人-物-管理耦合中人的不安全行为虽是主要诱因,但通过对人员培训和加强管理可以有效减少事故发生的可能性,降低事故概率.人-环境-管理耦合中由于火灾的直接载体“物”未参与耦合,间接风险因素耦合时火灾发生的概率相对较低.

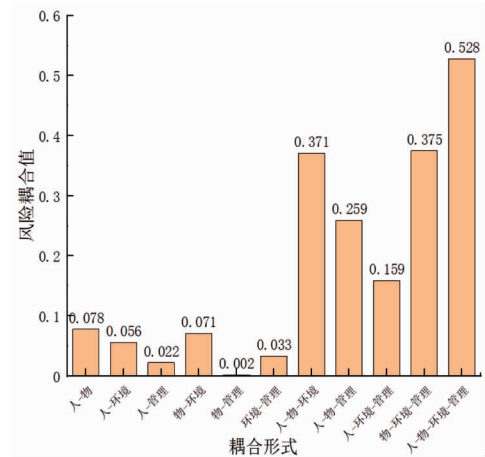


图 2 风险耦合值计算结果

4 结论

1) 电动车火灾事故通常不是由单一因素所引发的,而是多个因素之间耦合作用的结果,多个风险因素的相互耦合与叠加效应导致火灾风险增加.

2) 风险耦合值与参加风险耦合的因素个数相关,个数越多,其耦合值与发生概率越大.多个风险因素同时作用时,它们的耦合作用会产生大于单一因素影响的复合效应,增加事故发生的概率.

3) 人、物、环境、管理因素之间的耦合在很多情况下会显著增加火灾风险.后续研究将进一步探索是否存在其他因素的耦合对电动车火灾事故的影响.

参考文献:

- [1] 朱晓东.居民楼电动车火灾成因及管理措施[J].黑龙江科学,2020,11(6):154-155.
- [2] 林新美,陈凯,吴保朝.浅谈如何做好电动车火灾的防控[J].内蒙古科技与经济,2018(16):106.
- [3] 任国友,王永柱,吴敬.基于“2-4 模型”的电动车火灾事故致因研究[J].工业安全与环保,2023,49(5):34-38.
- [4] 阮立,叶帅宏,朱苡琼,等.电动车充电器过温报警保护系统设计的关键技术和思路分析[J].小型内燃机与车辆技术,2019,48(3):75-78.
- [5] 毛仕汉,庄孝凡.电动车火灾现状分析及解决措施探讨[J].中国设备工程,2022(21):103-105.
- [6] 宋炜,傅贵.电动车火灾事故原因及预防措施分析[J].安全,2022,43(3):39-45.
- [7] 胡玉娟,钱伟.基于 FTA 法的电动车火灾事故的分析[J].防灾科技学院学报,2011,13(1):23-26.
- [8] KAUFFMAN S A. Origins of order in evolution: self-organization and selection[M]//Understanding Origins. Dordrecht: Springer Netherlands, 1992: 153-181.
- [9] 王海英,楚林,许建.融合 N-K 模型的复杂网络架桥机施工安全风险因素分析[J].中国安全科学学报,2023,33(9):10-17.
- [10] 潘丹,李永周,罗帆.基于 N-K 模型的飞机运行安全风险耦合研究[J].安全与环境学报,2022,22(2):606-614.
- [11] 胡南燕,李雪雪,李玉飞,等.基于 ISM 与 N-K 模型的高校火灾多因素耦合风险分析与解耦管控[J].实验室研究与探索,2023,42(10):284-291.
- [12] 晏风,刘静,刘祉伊,等.基于典型案例分析电动车火灾事故原因及预防对策[C]//第二届建筑消防大会论文集.滨州,2024:76-79.
- [13] 梁雪.典型电动自行车火灾事故案例分析[J].劳动保护,2022(7):78-80.
- [14] 许铎.基于风险耦合的石油罐区火灾爆炸事故风险分析及仿真研究[D].大庆:东北石油大学,2020.
- [15] 赵俊茹,许铎,田峻东,等.基于 N-K 模型的石油罐区火灾爆炸事故风险因素耦合研究[J].压力容器,2019,36(10):49-55.
- [16] 邵志国,张靖轩,王伟.基于 N-K 模型和 SNA 的新能源汽车燃爆风险因素耦合分析[J].安全与环境学报,2023,23(2):363-371.