

基于行为倾向的变电站人身风险量化方法

蒋毅¹, 段芳铮², 潘志敏¹, 王梓糠², 李泽文², 尹骏刚³, 王勋⁴

(1. 国网湖南省电力有限公司, 湖南长沙 410004; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410114;
3. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410082; 4. 湖南湖大华龙电气与信息技术有限公司, 湖南长沙 410285)

摘要: 尽管当前电力系统智能化程度不断提高, 但仍需电力系统作业人员直接参与运维检修工作。因此, 研究有效量化人身风险对保障作业人员安全具有重要的现实意义。在深入探讨已有电力系统作业人员人身风险量化模型基础上, 考虑当前风险危害值确定方法不足和人为选择倾向现象对人身风险量化的影响, 提出基于行为倾向的变电站人身风险量化方法。该方法对风险危害值做进一步细分, 并采用 Bootstrap 方法对风险危害值的平均数进行处理, 模拟统计的不确定性; 对风险评估中易出现人为选择倾向的问题, 利用前景理论在风险值前乘以一个行为倾向系数 ω , 来反映管理者在面对事件风险值不同时的应对心理。结果表明, 该文方法能更有效地量化人身风险, 可为管理人员制定更符合实际的风险应对策略和资源分配方案提供参考, 进一步保障现场检修人员的作业安全。

关键词: 前景理论; 人身风险量化; 统计不确定性; Bootstrap 方法

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.04.005 中图分类号: TM08 文章编号: 1673-9140(2021)04-0037-07

A method of quantifying substation personal risks based on behavioural tendencies

JIANG Yi¹, DUAN Fangzheng², PAN Zhimin¹, WANG Zikang²,
LI Zewen², YIN Jungang³, WANG Xun⁴

(1. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410004, China; 2. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 4. Hunan HDHL Electric & Information Technology Co., Ltd., Changsha 410285, China)

Abstract: Although the intelligence level of the power system is constantly improving, the operation, maintenance and repair work still require the direct participation of electricity workers, so it is of great significance to study the effective quantification of personal risks to ensure the safety of workers. Based on profoundly discussing the quantification model of personal risks of the workers in power systems, this paper proposes a quantification method of personal risks in a substation based on behavioral tendency, considering the influence of the insufficient method of determining the risk hazard value and the phenomenon of artificial selection tendency on the quantification of personal risks. The hazard value was further subdivided, and the mean of hazard value was processed by the Bootstrap method to simulate statistical uncertainty. For the problem of artificial selection tendency in risk assessment, the prospect theory is used to multiply the value of risk by a coefficient of behavioral tendency ω , so as to reflect the response psychology of managers when facing events with different risk values. The results show that this method is more effective in quantifying personal risks, which can provide references for managers to carry out practical risk response strategies and resource allocation schemes, and further guarantee the safety of operation workers.

Key words: prospect theory; personal risks; statistical uncertainty; Bootstrap method

收稿日期: 2020-06-24; 修回日期: 2020-09-17

基金项目: 国家自然科学基金(51877012); 国网湖南省电力有限公司科技项目(5216A318000T)

通信作者: 尹骏刚(1978-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事电力物联网技术研究与应用; E-mail: yinjungang126@126.com

变电站设备巡检维修是保障电力系统安全运行、维持高可靠性的基础。随着科技的不断发展,变电站呈现出智能化、无人化的发展趋势^[1-3]。但是就目前的人工智能发展水平,人工作业在变电站以及电力行业都是不可替代的^[4]。在现场作业时,人作为一个随机系统,其行为带有较大的随机性与不确定性^[5],工作人员的人身安全一直是电力系统安全生产的重中之重。据有关部门统计,在2017—2019年之间,中国电力人身伤亡事故一共发生130起,死亡145人,如图1所示。其中,2019年中人的不安全行为造成25起事故、24人死亡;设备的不安全状态造成7起事故、13人死亡;环境因素造成6起事故、6人死亡。人的不安全行为造成事故多发,占到事故总起数66%,死亡人数占到总死亡人数的56%^[6]。

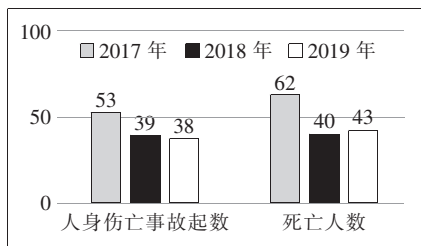


图1 2017—2019年电力人身伤亡事故起数及死亡人数

Figure 1 The number of casualties and deaths in the power industry from 2017 to 2019

在强调安全生产重要性的同时发现了安全决策和管控上的不足,需要提供一些新的技术手段帮助作业管理和风险评估^[7]。传统安全评估和决策逐渐向着更加智能和实用发展。

目前,大部分变电站风险量化模型只考虑了单方面的风险要素对变电站作业安全的影响。如:文献[8]提出了基于信息融合的预装式变电站健康状态评估方法,该方法首先采用多层模糊综合评价法、BP神经网络和灰色关联法分别对变电站中电力设备进行状态评估,然后,利用DS合成法将评估结果进行融合,得出设备的综合评估结果,最后,使用单层模糊综合评判法得出了预装式变电站整站的综合运行状态;文献[9]为了分析隐性故障对继电保护装置的影响,综合考虑保护发生隐性故障概率和其后果的严重程度,提出了针对保护装置的隐性故障风险评估方法,将概率与严重度相乘得到保护隐性故

障风险指标;文献[10]分析了电力行业的人身风险量化原理并建立“5M”安全理论,但其风险危害值取值粗糙,且风险值计算没有考虑抉择者的选择偏好缺乏真实性;文献[11]建立事故危害值与各影响因素间的多元线性回归模型,对供电作业事故危害值进行预测;文献[12]依据心理学领域的REASON模型,建立了变电运行人因事故分析的拟REASON模型,为人因事件分析提供了指导性方法,此模型有利于寻找引发人因事件的根本原因,但是未对各要素进行具体的量化分析。

鉴于上述研究的局限和不足,该文利用Bootstrap方法进行数据分析,利用前景理论描述决策者的选择偏好,建立一种考虑多方面因素的基于行为倾向的变电站人身风险量化方法,并通过算例验证其有效性,为变电站维修运检员工提供作业安全保障。

1 传统人身风险量化模型

1.1 人身风险量化模型

为了更好地阐述和比较,在提出基于行为倾向的变电站人身风险量化模型之前,先介绍一种基于期望效用理论的人身风险量化模型。期望效用理论(expected utility theory, EUT)^[13-14]认为风险事故的风险值为

$$R = P \cdot I \quad (1)$$

式中 P 为事故概率; I 为事故影响。

电力行业中为了更为直观地表示风险值,式(1)中的 P 将被一个因素分值 S 取代,并且满足 $S > 1$, 计算公式为

$$R = \prod_{i=1}^n S_i \cdot I \quad (2)$$

由于电力作业的复杂性和多风险因素的存在,故 S 为单一因素风险 S_i 之积。而风险事故影响则是某一作业项目事故记录中出现最多的事故危害值。因此,计算和评估风险值的关键就在于因素分值 S 的取值以及风险等级的划分。

1.2 关键因子分值和风险等级划分

根据人身事故的死亡人数以及受伤人数和程

度,文献[10]中将事故危害值分为 7 个等级,如表 1 所示。同样,在文献[10]中将风险因素分为 5 大类,共 25 个因素,其因素分值 S_i 如表 2 所示。

由式(2)得出风险值后需要对风险进行评估,因此,需要一个风险评估参照标准,也就是风险等级的划分。而基准因素分值为

$$S_b = \prod_{i=1}^{25} S_{bi} \quad (3)$$

$$S_{bi} = \sum_{j=1}^n (S_{ij} \cdot P_{ij}), i \in (1, 2, \dots, 25) \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n P_{ij} = 1 \quad (5)$$

其中, S_{bi} 是第 i 个元素的基准因素分值,其值为风险因素项分值 S_{ij} 与此项发生概率 P_{ij} 之积的再累加(P_{ij} 由当地历史事故数据得出)。

最后,通过基准因素分值 S_b 和事故危害值 I

可得到基准风险值:

$$R_b = S_b \cdot I \quad (6)$$

再用不同事故危害值的和与之相乘即可得到不同等级的风险值划分;在每次计算一个作业项目风险值后与风险基准值相比较即得出此项目的风险等级。

表 1 人身事故危害值

Table 1 The hazard value of personal accident

事故	对应的事故/事件等级	危害严重程度	分值
	>30 人死亡或>100 人重伤	特大人身死亡	500
	10~30 人死亡或 50~100 人重伤	重大人身死亡	300
造成人员死亡、重伤或轻伤(包括急性工业中毒)	3~10 人死亡或 10~50 人重伤	较大人身死亡	100
	<3 人死亡或<10 人重伤	一般人身死亡	50
		重伤	25
	1~5 人以上受伤	轻伤	15
		轻微伤	10

表 2 因素危险分值

Table 2 Risk score of factor

因素名称	因素项(分值/(1~5 分))
技能	技师以上(1),高级工(1.1),中级工(1.3),初级工(1.5)
人员年龄(岁)	<25(1.2),25~45(1),45~55(1.2),>55(1.5)
从业时间(年)	>8(1),5~8(1.1),2~5(1.3),1~2(1.7),<1(2)
作业熟悉	1 次/周(1),1 次/月(1.2),1 次/季度(1.5),1 次/年(2)
违规操作	无(1),>1 次/半年(2),>1 次/月(4)
健康	良好(1),病后恢复中(2),带病中(3)
精神状态	良好(1),一般(1.5),较差(3),很差(4)
工作情绪	乐意接受(1),接受(1.5),有抵触情绪(3)
设备类型	其他设备(1),10 kV 母线(1.2)主变、电容器组、GIS、PT 或 CT(1.3),阻波器(1.5)
感应电	无感应电(1),<110 kV(1.1),220 kV(1.3),500 kV(1.5)
倒供电	无(1),有(4)
工器具配置	科学(1),满足(1.2),不满足(5)
防护用品配置	科学(1),满足(1.2),不满足(5)
作业类型	地面作业、全部停电作业(1),地电位作业(2),高空作业、部分停电作业、等电位作业(3)
作业性质	计划工作(1),抢修工作(2)
人员配置	满足需求(1),少于需求(4)
作业时长	<2 h(1),2~4 h(1.2),4~8 h(1.5),>8 h(3)
作业时间	白天作业(1),晚上作业(2)
作业监护	专职监护(1),工作负责人监护(1.2),无监护人(4)
指导依据	作业表单(1),临时作业表单(1.2),无作业表单(1.5)
分组作业	1 组作业(1),2 组作业(1.2),3 组作业(1.5),4 组及以上(2)
交叉作业	无(1),有(2)
天气	正常(1),高温或大雾(1.5)~(2),火灾(2)~(3),雷雨大风(2)~(5)
区域	平原(1),丘陵(1.2),山区(1.5),人迹罕见(2)
空间	充足(1),受限空间(1.2),有限空间(1.5)

2 基于行为倾向的变电站人身风险量化模型

基于 EUT 的人身风险量化模型中存在 2 个显而易见的弊端。

1) 在考虑风险结果影响即获取风险危害值时, 通过对历史事故分析选取出出现次数最多的风险值。然而单个作业任务的电网事故记录的数据难以保证完整性, 故不能简单地由这些不完整数据得出最可能的风险危害值。

2) 在计算风险值时, 面对高风险低概率和低风险高概率事件, 由原有模型得到的风险值可能会相等或相近。然而实际问题中面对这 2 种情况需要不同的应对策略。

因此, 该文针对这 2 个弊端提出基于行为倾向的人身风险量化模型。

2.1 Bootstrap 方法

Bootstrap 即自举法, 是一种非参数统计方法, 最早由 Efron 提出^[15], 是一种应用于数据稀缺或者分布函数不确定情况下的统计方法。此方法通过对现存数据进行有放回的重重复随机抽样获得不确定信息, 不仅能很好地适用于大样本数据, 而且在小样本中更有其独特的优势^[16-18]。因其收敛速度快、适用范围广等优势, Bootstrap 被广泛应用于各种小样本数据分析中。

例如, 设有一组原始数据 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 其均值为 \bar{x} , 标准差为 δ_x , 对 X 进行 N 次 Bootstrap 抽样后可得:

$$X^i = (x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_n}), i = 1, 2, \dots, N,$$

$$x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_n} \in (1, 2, \dots, n) \text{ randomly} \quad (7)$$

$$\bar{X} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N) \quad (8)$$

$$\Delta = (\delta_X^1, \delta_X^2, \dots, \delta_X^N) \quad (9)$$

随后源数据不再由单个的 \bar{x} 和 δ_x 所表征, 而是由 \bar{X} 和 Δ 这 2 个数集来表征, 为认识数据 X 的特性提供了一种新的途径。

2.2 前景理论

Tversky 等人^[19] 提出了前景理论 (prospect theory, PT), 认为不确定条件下的选择行为是介于

有根据的展望和冒险碰运气之间的一种行为, 人们展望风险做出选择, 会背离偏好一致性和效用最大化^[20-22]。前景理论对管理人员在面临风险做理性决策时的行为偏好进行了很好的模拟, 指出面对收益时决策者将低估风险, 面对亏损时决策者会高估风险, 从而帮助决策者面对风险时做出更符合实际的应对方案。

前景理论中核心部分就是用 π 和 ν 描述前景总价值 V , 即

$$V = \sum_{i=1}^n \pi(p_i) \nu(x_i) \quad (10)$$

式中 ν 为第 i 个部分相对于参考值的距离, 在原始定义中表示盈利或亏损^[9]; $\pi(p_i)$ 为概率加权函数, 由第 i 个部分发生的概率 p_i 所决定, 表征的是概率为 p 的部分对总体价值的影响, 其特性如图 2 所示, 数学表达式为

$$\pi(p) + \pi(1-p) \leq 1 \quad (11)$$

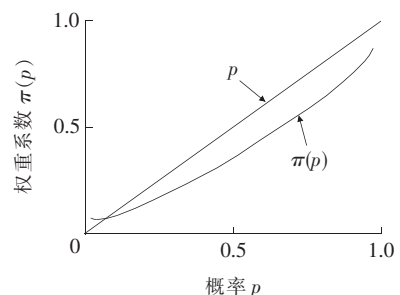


图 2 一个假定权重函数

Figure 2 A hypothetical weighting function

PT 作为行为金融学的四大研究成果之一, 其对风险和机会的衡量得到了广泛的认可。但目前来说 PT 主要应用于现实生活场景中, 只有少部分学者研究其在风险决策以及风险量化中的应用。

2.3 人身风险量化数学模型建设

在表 1 中, 重、轻和轻微伤事件的危害值相差较小, 较为精准。但特、重和较大人身死亡事故之间危害值相差太大, 不够精细。因此, 在模型建立前需对事故的危害值进行细分。细分规则如表 3 所示。

表 3 危害值评分方法

Table 3 Hazard value assessment method

人员受伤程度	人数	分值
轻微伤事件	n_1	2
轻伤	n_2	4
重伤	n_3	8
死亡	n_4	25

根据表 3,危害值计算公式为

$$I = n_1 \times 2 + n_2 \times 4 + n_3 \times 7 + n_4 \times 25 \quad (12)$$

如:某地区 8 年来 220 kV 变电站单台主变由运行转检修作业项目共发生 15 起人身伤亡事故。根据式(12)计算得到危害值集:

$$I = \begin{bmatrix} 25, 30, 50, 24, 100, 27, 8, \\ 37, 40, 32, 28, 28, 25, 60, 6 \end{bmatrix}$$

利用 Bootstrap 对此组数据进行 10^4 次重抽样,分别求得每次抽样结果的平均值,绘制分布图,如图 3 所示。

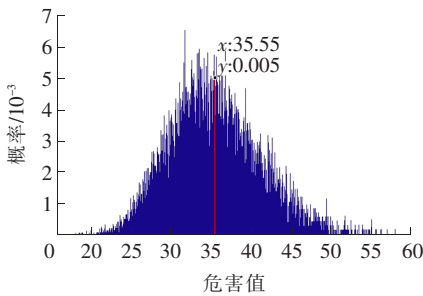


图 3 危害值平均数分布

Figure 3 The distribution of the mean of the hazard value

计算所有抽样平均值的期望值 $E(I) = 35.55$,即可认为此项作业风险平均危害值 $I = 35.55$ 。然后利用式(3)计算基准因素分值,得到某地区的 $S_b = 48.95 \approx 50$ 。最终可得风险等级划分,如图 4 所示。

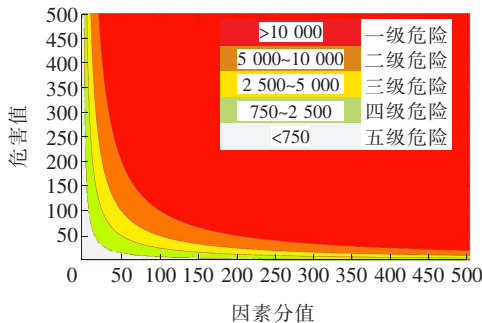


图 4 风险等级划分

Figure 4 Classification of risk level

在文 1.2 计算基准因素分值时,发现大量风险分值较低的因素发生的概率较高,而风险分值较高的因素发生概率较低。为了更好地均衡这种情况,根据前景理论,把每一个风险因素根据基准因素分值分为低风险 ($S_{bi} > S_{ij}$) 和高风险 ($S_{bi} < S_{ij}$) 两部分,各部分的概率分别为 p_L 和 p_H ,对每一个风险因素设置 2 个权重系数 ω_L 和 ω_H :

$$\omega_{iL} = 1 + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \times 2^{y_{ij}}) \frac{p_i^2}{p_L}$$

$$\omega_{iH} = 1 - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \times 2^{y_{ij}}) \frac{p_i^2}{p_H} \quad (13)$$

式中 p_i 为因素项目发生的概率,由事故数据得出; p_i^2/p_L 、 p_i^2/p_H 均为权重函数,与前景理论中 $\pi(p_i)$ 相对应; x 为前景价值, y 为限制函数,分别为

$$x_{ij} = \frac{S_{bi} - S_{ij}}{S_{bi}} \quad (14)$$

$$y_{ij} = \frac{|S_{bi} - S_{ij}| + (S_{bi} - S_{ij})}{2(S_{bi} - S_{ij})} \quad (15)$$

因素分值小于基准值时 $y = 1$;因素基准分值大于基准值时 $y = -1$ 。根据每一次工作的各风险因素的取值,取得该因素的 ω_L 或 ω_H ,从而得到每次工作的权重系数:

$$\omega = \frac{(\sum \omega_{iL} + \sum \omega_{iH})}{N} \quad (16)$$

式中 N 为总风险因素个数。

最后,基于行为倾向的变电站人身风险量化计算公式为

$$R = \omega S \cdot I \quad (17)$$

3 算例分析

该文利用某地区一次 220 kV 变电站 3 号主变由运行转检修作业项目为例计算其风险值。

1) 获取要素分值。220 kV 变电站 3 号主变由运行转检修作业项目的各风险值如表 4 所示。

2) 计算危害值以及权重系数。通过某地区 8 年的事故统计数据可以得到各因素基准分值以及因素项目发生概率。通过式(13)~(15)可得该例中各风险因素的 ω_L 和 ω_H ,如表 5 所示。

因素分值与基准因素分值进行比较,利用式(16)可得 $\omega = 1.136$ 。因此,由式(17)可得 $R = 1.136 \times 20.62 \times 35.55 = 832.73, R > 750$,可知此次 220 kV 变电站 3 号主变由运行转检修作业项目风险属于安全的四级危险,而且利用式(2)得到 $R = 35.55 \times 20.62 = 733.04, R < 750$,属于五级危险。可见在面对低风险高概率事件时,其风险值明显的增加了,说明即使是风险较低但发生的概率很大也应引起足够的重视。但当面对高风险低概率时,利

用传统方法计算的风险值会略大于该文方法计算的风险值,从而保留了工作任务仍有继续的可能性。这是前景理论对决策者选择偏好的较为真实的模拟。

表 4 220 kV 变电站 3 号主变由运行转检修
作业项目因素分值

Table 4 The factor score of No. 3 main transformer from operation to maintenance in 220 kV substation

因素名称	因素项(分值/分)	因素名称	因素项(分值/分)
技能	初级工(1.5)	作业类型	地面作业(1)
人员年龄(岁)	<25(1.2)	作业性质	计划工作(1)
从业时间(年)	1.5(1.7)	人员配置	满足需求(1)
作业熟悉	1次/月(1.2)	作业时长	2~4 h(1.2)
违规操作	无(1)	作业时间	白天作业(1)
健康	良好(1)	作业监护	工作负责人监护(1.2)
精神状态	良好(1)	指导依据	作业表单(1)
工作情绪	接受(1.5)	分组作业	1组作业(1)
设备类型	220 kV 母线(1)	交叉作业	无(1)
感应电	220 kV(1.3)	天气	温度 32 ℃(2)
倒供电	无(1)	区域	平原(1)
工器具配置	科学(1)	空间	充足(1)
防护用品配置	科学(1)		

表 5 各因素的 ω_L 和 ω_H

Table 5 ω_L and ω_H of each factor

因素名称	ω_L	ω_H	因素名称	ω_L	ω_H
技能	1.027	0.984	作业类型	1.388	0.919
人员年龄(岁)	1.083	0.988	作业性质	1.267	0.867
从业时间(年)	1.030	0.994	人员配置	1.311	0.844
作业熟悉	1.078	0.975	作业时长	1.090	0.975
违规操作	1.300	0.963	作业时间	1.300	0.850
健康	1.290	0.963	作业监护	1.211	0.987
精神状态	1.451	0.980	指导依据	1.083	0.988
工作情绪	1.167	0.979	分组作业	1.133	0.994
设备类型	1.103	0.993	交叉作业	1.164	0.918
感应电	1.012	0.949	天气	1.134	0.973
倒供电	1.176	0.912	区域	1.087	0.993
工器具配置	1.090	0.994	空间	1.080	0.991
防护用品配置	1.090	0.994			

4 结语

该文对事故危害值进行了细化,面对稀缺的事故小样本数据,利用 Bootstrap 方法对历史数据进

行分析,得到某项工作最有可能产生的后果,使结果更加科学合理。随着电力系统的运行数据库不断更新,Bootstrap 计算结果将更加准确。在处理因素项目风险分值时,在对低风险高概率和高风险低概率事件做决策时,利用前景理论进行决策偏好模拟得到更贴近生产实际的结果。最后,该文方法综合考虑了各方面的风险因素,并可根据不同作业类型进行灵活定制,这样能更加实际地帮助管理者做出正确合理的决策,及时预警并提醒作业人员,从而减少电力系统人身伤亡事故。

参考文献:

- [1] 郭国栋,龚雁峰,吴迪,等.引入 HoloLens 进行信息融合与数据挖掘的新型巡检方式及体验[J].中国电力,2021,54(7):208-216.
GUO Guodong, HONG Yanfeng, WU Di, et al. New inspection method and experience by introducing HoloLens into information fusion and data mining[J]. Electric Power, 2021, 54(7):208-216.
- [2] 郭杨,陈昊.激光导航智能机器人巡检系统在特高压变电站的应用[J].电力工程技术,2017,36(4):125-130.
GUO Yang, CHEN Hao. Intelligent robot in section system based on laser navigation in UHV substation [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(4):125-130.
- [3] 彭向阳,金亮,王锐,等.变电站机器人智能巡检技术及应用效果[J].高压电器,2019,55(4):223-232.
PENG Xiangyang, JIN Liang, WANG Rui, et al. Substation robot intelligent inspection technology and its application[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4):223-232.
- [4] 陈碧云,李欣桐,李滨,等.考虑人因风险的电力调度值班操作任务分配方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(21):156-162.
CHEN Biyun, LI Xintong, LI Bin, et al. Assignment method of power dispatching tasks considering human risk[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21):156-162.
- [5] 唐俊熙,何迪.基于模糊综合评估的电网人因可靠性分析[J].电力科学与技术学报,2017,32(3):63-68.
TANG Junxi, HE Di. Analysis of human reliability in power grid based on fuzzy synthetic evaluation[J].

- Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(3): 63-68.
- [6] 国家能源局. 2019 年 12 月事故通报及年度事故分析报告[EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2020-02/25/c_138816441.htm, 2020-02-25.
- [7] 张珂斐, 郭江, 陈红坤. 基于全维度的电力变压器智能决策支持系统研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(13): 33-38+85.
ZHANG Kefei, GUO Jiang, CHEN Hongkun. Research on decision support system of transformer based on full dimension method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(13): 33-38+85.
- [8] 曲朝阳, 杨琴. 基于贝叶斯网络的智能变电站风险关联模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(2): 95-99.
QU Zhaoyang, YANG Qin. Risk associated model of smart substations based on Bayesian network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2): 95-99.
- [9] 卢扬, 李永丽. 考虑隐性故障的单一保护装置风险评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(4): 84-90.
LU Yang, LI Yongli. Risk assessment on single-protection equipment considering hidden failures[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(4): 84-90.
- [10] 杨悦群. 电力作业人身风险量化评估模型[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [11] 魏秀宁, 柳亦钢, 黄玉龙, 等. 供电作业人身事故危害多元线性回归预测[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(7): 178-184.
WEI Xiuning, LIU Yigang, HUANG Yulong, et al. Prediction on human casualty hazard in power-supplying operation based on multiple linear regression[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(7): 178-184.
- [12] 梁广, 张勇军, 黎浩, 等. 变电运行人因事故分析的拟 REASON 模型[J]. 继电器, 2008, 36(3): 23-26.
LIANG Guang, ZHANG Yongjun, LI Hao, et al. Quasi-reason model for human errors analysis in substation operation[J]. Relay, 2008, 36(3): 23-26.
- [13] 孙多勇. 突发性社会公共危机事件下个体与群体行为决策研究[D]. 长沙. 国防科学技术大学, 2005.
- [14] 何红渠, 肖瑛. 基于期望理论的纳税遵从行为研究[J]. 财经研究, 2005(3): 100-108.
HE Hongqu, XIAO Ying. The study of tax compliance based on prospect theory[J]. Journal of Finance and Economics, 2005(3): 100-108.
- [15] Efron Bradley. Bootstrap methods: Another look at the jackknife[J]. The Annals of Statistics, 1979, 7(1): 1-26.
- [16] 谢益辉, 朱钰. Bootstrap 方法的历史发展和前沿研究[J]. 统计与信息论坛, 2008, 23(2): 90-96.
XIE Yihui, ZHU Yu. Bootstrap methods: Developments and frontiers[J]. Statistics & Information Forum, 2008, 23(2): 90-96.
- [17] 唐小松, 李典庆, 曹子君, 等. 有限数据条件下边坡可靠度分析的 Bootstrap 方法[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 893-911.
TANG Xiaosong, LI Dianqing, CAO Zijun, et al. A Bootstrap method for analyzing slope reliability based on limited shear-strength parameter data[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(3): 893-911.
- [18] Efron B, Tibshirani R J. An introduction to the Bootstrap[M]. New York: Chapman & Hall, 1993: 86-103.
- [19] Kahneman D, Tversky A. Prospect theory: An analysis of decision under risk[J]. Economica, 1979, 47(2): 263-291.
- [20] Wu G, Gonzalez R. Curvature of the probability weighting function[J]. Management Science, 1996, 42(12): 1676-1690.
- [21] Al-Nowaihi A, Bradley I, Dhami S. A note in the utility function prospect theory[J]. Economics Letters, 2008, 99(2): 337-339.
- [22] 何大安. 理性选择向非理性选择转化的行为分析[J]. 经济研究, 2005(8): 73-83.
HE Daan. A behavioral analysis of the transformation from rational choiceto irrational choice[J]. Economic Research Journal, 2005(8): 73-83.