

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211415

基于大数据的燃煤发电运行风险实时评估

李存斌, 董佳, 丁佳

(华北电力大学经济与管理学院, 北京 102206)

摘要: 燃煤发电机组运行过程中面临各种风险, 一旦发生故障将造成不小的经济损失和社会影响。为了保障机组的安全生产和稳定运行, 建立了燃煤发电运行风险实时评估模型, 从而及时制定故障检修计划。基于大数据关联规则分析了燃煤发电运行风险与影响因子的关联关系。在此基础上, 基于熵权法对影响因子赋权, 并结合灰色关联理论、证据理论和 Dempster 合成规则实现基本信度分配函数的确定和融合, 从而得到燃煤发电机组运行风险值和风险等级。最后, 以发电厂 A 的燃煤发电机组进行算例分析, 其风险评估结果与实际运行情况具有相关一致性, 证明了模型的现实意义。

关键词: 大数据; 燃煤发电; 风险评估; 证据理论; 灰色关联分析

Real-time assessment of operational risk of coal-fired power generation based on big data

LI Cunbin, DONG Jia, DING Jia

(School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Coal-fired power generation units are faced with various risks in their operation. A fault can cause considerable economic loss and social impact. In order to ensure the safe production and stable operation of the unit, a real-time assessment model of operational risk of a coal-fired power generation is established, so as to formulate the troubleshooting plan in time. Based on big data association rules, the association relationship between the operation risk of coal-fired power generation and impact factors is analyzed. The impact factors are weighted based on the entropy weight method, and the determination and fusion of the basic reliability distribution function are realized by combining the grey correlation theory, evidence theory and Dempster synthesis rules, so as to obtain the operation risk value and risk level of a coal-fired power generation unit. Finally, taking the coal-fired power generation unit of power plant A as an example, the risk assessment results are consistent with the actual operation. This proves the practical significance of the model.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 71840004).

Key words: big data; coal-fired power generation; risk assessment; evidence theory; grey relational analysis

0 引言

燃煤发电厂是当今社会电力发展的重要来源之一, 为了满足人们在生产和生活中对电能的需求, 燃煤发电厂大多都处于高负荷的生产强度, 机组设备极少停歇运行, 在这种情况下, 很容易出现机组装置和设备老化、磨损等故障, 导致安全问题的发生^[1-4]。随着大数据等先进技术的发展和设备维修观念的转变, 对发电设备监测和维修的实时性要求越来越高, 预防性维修远远优于事后维修, 而机组实

时动态的监测和评估是预防性维修的基础^[5-10]。因此, 对燃煤发电运行风险实时评估的研究是十分必要的。

燃煤发电过程中每一个步骤的风险对整个运行过程都有一定影响, 若不重视将造成严重的损失。目前, 国内外学者通过构建评价模型对燃煤发电风险评估展开了广泛而深入的研究, 包括建设、物流、经营、环保等方面的风险。文献[11]基于可拓层次分析法从技术、市场和管理等方面对燃煤发电建设风险进行评估。文献[12]运用风险管理理论对燃煤发电企业煤炭供应风险进行分析和评估。文献[13]构建了 SWOT 矩阵模型, 深入分析并评价燃煤发电厂所面临的经营风险, 并提出相应的风险防控策略。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(71840004)

文献[14]基于 ANP-Entropy-TODIM 方法对“一带一路”沿线国家燃煤发电厂投资风险进行评估。文献[15]采用系统动力学,对燃煤发电融资风险进行分析和评估,并提出规避风险的合理化建议。文献[16]通过建立多层次模糊综合评价模型对发电企业的燃煤风险评估进行深入的研究。文献[17]将灰色关联度分析法和模糊综合评价方法有机结合,应用到燃煤发电机组能效评价研究中。文献[18]使用 AERMOD 模型对燃煤发电厂排放物健康风险进行评估。

燃煤发电运行风险评估相关的文献多采用主成分分析法^[19]、信息熵^[20]、层次分析法^[21]及模糊评价方法等,对燃煤发电运行过程中的风险进行全面客观的评价,但少有研究实现对风险的动态、实时评估,使得评价存在一定滞后性,无法及时掌握燃煤发电机组的运行情况,一旦停机维修,将造成不小的经济损失。

随着先进信息技术的发展,大数据等技术在电力工业实时评估领域的应用逐渐引起学者们的关注。文献[22]通过大数据分析技术,基于高斯云模型实现对风电机组健康状态的实时评估。文献[23]采用大数据技术,基于多源信息融合,对电网暂态稳定风险进行实时评估。文献[24]结合层次分析法,利用大数据关联规则算法实时评估配电网安全风险。但基于专家经验的层次分析法具有一定的主观局限性,学者多选择挖掘历史故障数据去评估风险。文献[25]采用信息熵和灰色关联方法,结合大数据关联规则分析技术,挖掘特征因子与故障发生的关联关系,从而对架空输电线路雷害风险进行实时评估。文献[26]利用证据理论模型处理不完全信息问题的优势,融入大数据技术,对配电项目投资风险进行动态评估。可以发现大数据与熵权理论、灰色关联理论、证据理论等方法的结合,在状态实时评估、动态监测方面展现出独特优势,少有学者将此应用到燃煤发电运行风险实时评估的相关领域,因此,本文基于大数据技术,通过动态采集设备数据,结合关联规则分析和熵权理论实时挖掘数据流,基于证据理论和灰色关联理论提出了燃煤发电运行风险实时动态评估模型,及时对燃煤发电机组运行情况制定相应的安全措施,保障燃煤发电机组的稳定运行。

1 燃煤发电运行风险实时评估模型

燃煤发电运行风险实时评估模型如图 1 所示,包括物理层、信息层、融合层和目标层。由于燃煤发电系统体积规模较大,且系统十分复杂,为及时

掌握运行过程中各参数的变化情况,在系统中安装大量传感器,将设备运行的数据实时回传。当燃煤发电机组运行时,一部分设备能够自动实时回传数据,还有一部分设备则通过安装的传感器采集数据,并通过线路实时传输。动态与实时评估机制通过不断监测设备运行状态,结合机组历史运行数据和传感器回传的实时数据,实时整合数据资源并动态评估机组风险,动态更新机组风险状态,从而及时应对机组突发风险事故。

根据收集的机组运行实时数据流,分析燃煤发电机组相关的影响因子与机组运行风险的关联关系,得到的关联规则量化表会根据实时数据流的更新不断动态更新,更符合评估时刻区间内燃煤发电机组各个影响因子的属性状态,从而实现对燃煤发电机组实时、科学的风险评估。然后,基于熵权理论、灰色关联理论及证据理论等,对数据进行深度挖掘,计算得到每个时刻燃煤发电机组的风险评估值,并判断其风险等级,从而对其运行状况作出判断并采取相应处理措施,实时保障燃煤发电机组稳定运行。

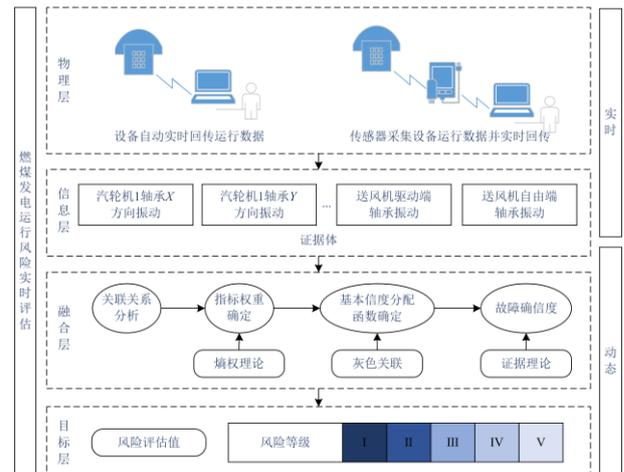


图 1 燃煤发电运行风险实时评估模型

Fig. 1 Real-time assessment model of operational risk of coal-fired power generation

1.1 燃煤发电运行风险与影响因子的关联规则量化

燃煤发电机组运行是一个复杂的过程,燃煤发电机组运行风险的关联因素较多。在大数据时代,从海量的机组运行数据中挖掘出有价值的信息是十分关键的工作,关联规则分析就是大数据的常用算法之一^[27]。本文采用关联规则量化不同影响因子与燃煤发电机组运行风险的关联关系。

若存在事务前项 M 与后项 N ,它们之间存在因果依存关系,即为关联规则^[28]。若通过 M 的值可以

推导出 N 的值, 则称 N 依赖于 M , 记为 $M \rightarrow N$ 。大多数学者通过支持度和置信度两个概念来量化关联规则^[29]。支持度表示事务项集 E 中包含关联规则 $M \rightarrow N$ 事务项出现的偶然程度, 计算公式为^[30]

$$S(M \rightarrow N) = \frac{\sigma(M \cup N)}{E} \quad (1)$$

式中, $\sigma(M \cup N)$ 表示同时包含 M 和 N 的事务数量。

置信度表示事务后项 N 对事务前项 M 的依赖程度, 计算公式为^[31]

$$C(M \rightarrow N) = \frac{\sigma(M \cup N)}{\sigma(M)} \quad (2)$$

式中, $\sigma(M)$ 表示包含 M 的事务数量。

本文选用置信度来量化各个影响因子与燃煤发电机组运行风险的关联关系, 置信度越高, 则燃煤发电机组在该影响因子的属性特征下运行风险越高, 发生故障的概率越大。 M 为关联规则的前项, 表示燃煤发电机组某一影响因子的属性特征; N 为关联规则的后项, 表示燃煤发电机组是否发生故障。

首先, 计算 $M_{j,k} \rightarrow N_1$ 的支持度, 记为 $S(M_{j,k} \rightarrow N_1)$, 表示第 j 个影响因子的第 k 个类别或区间的属性特征对此类或区间机组运行风险的支持度, 计算公式为

$$S(M_{j,k} \rightarrow N_1) = \frac{\sigma(M_{j,k} \cup N_1)}{|E|} \times 100\% \quad (3)$$

设研究对象为一个燃煤发电机组的若干时刻的运行情况, $g_{j,k}$ 为第 j 个影响因子的第 k 类别或区间的属性特征与燃煤发电机组运行风险的关联关系, 计算公式为

$$g_{j,k} = C(M_{j,k} \rightarrow N_1) = \frac{S(M_{j,k} \rightarrow N_1)}{S(M_{j,k})} = \frac{\sigma(M_{j,k} \cup N_1) / |E|}{\sigma(M_{j,k}) / |E|} \quad (4)$$

式中: $\sigma(M_{j,k})$ 为第 j 个影响因子的第 k 类别或区间的时刻数量; $\sigma(M_{j,k} \cup N_1)$ 为第 j 个影响因子的第 k 类别或区间发生故障的时刻数量; $C(M_{j,k} \rightarrow N_1)$ 为燃煤发电机组故障落在第 j 个影响因子的第 k 类别或区间的概率。例如, 在样本研究机组中, 一次风机 X 方向轴承振动区间在 $[2.1, 2.5]$ mm/s 的时刻数量为 1075 个, 在此振动区间内发生故障的时刻数量为 4 个, 研究样本共包括 3987 个时刻, 则支持度 $S(M_{\text{一次风机}X\text{方向轴承振动}[2.1,2.5]\text{mm/s}} \rightarrow N_{\text{机组故障=是}}) = 0.10\%$, 置信度 $C(M_{\text{一次风机}X\text{方向轴承振动}[2.1,2.5]\text{mm/s}} \rightarrow N_{\text{机组故障=是}}) =$

0.37%, 即有 $g_{j,k} = 0.37\%$, 记为存在事务项: “一次风机 X 方向轴承振动区间 $\in [2.1, 2.5]$ mm/s \rightarrow 机组发生故障 = 是 ($S = 0.10\%$, $C = 0.37\%$)”。

1.2 燃煤发电运行风险评估

1.2.1 影响因子权重确定

由于燃煤发电机组运行风险评估中, 每个影响因子造成的影响力不同, 因此采用熵权法根据各影响因子的重要程度合理确定权重。熵权法通过信息熵来有效量化无序性, 指标的信息熵越大, 其熵权越小^[32]。若第 i 个时刻燃煤发电机组处于第 j 个影响因子的第 k 个类别或区间, 其发生故障的概率表示为 $g_{j,k}^i$, 简记为 g_j^i , 则 m 个时刻燃煤发电机组 n 个影响因子的关联度矩阵 $\mathbf{G} = (g_j^i)_{m \times n}$, 将矩阵进行归一化处理, 得

$$\mathbf{V} = (v_j^i)_{m \times n} = \left(g_j^i / \sum_{i=1}^m g_j^i \right)_{m \times n} \quad (5)$$

计算影响因子的熵值矩阵 \mathbf{T} , 如式(6)所示。

$$\mathbf{T} = (t_j)_{1 \times n} = \left((-1 / \ln m) \cdot \sum_{i=1}^m (v_j^i \ln v_j^i) \right)_{1 \times n} \quad (6)$$

计算影响因子的权重矩阵 \mathbf{W} , 如式(7)所示。

$$\mathbf{W} = (w_j)_{1 \times n} = \left((1 - t_j) / (n - \sum_{j=1}^n t_j) \right)_{1 \times n} \quad (7)$$

根据上述计算, 得出加权关联度矩阵 \mathbf{X} 为

$$\mathbf{X} = (x_j^i)_{m \times n} = (w_j \cdot v_j^i)_{m \times n} \quad (8)$$

1.2.2 基本信度分配函数确定

证据理论是一种具有直接表达“不确定”和“不知道”能力的推理方法^[33]。对燃煤发电机组的 m 个时刻进行研究, 则识别框架集合为 $\Theta = \{E^1, E^2, \dots, E^m\}$, 基本信度分配函数 $f: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$, 满足 $f(\emptyset) = 0$ 和 $\sum_{A \subseteq \Theta} f(A) = 1$ 。 f_j 表示以第 j 个影响因子为证据体的基本信度分配函数, $f_j(E^i)$ 表示以第 j 个影响因子为证据体, E^i 时刻燃煤发电机组运行风险的基本信度, 其计算过程如下。

1) 计算 E^i 时刻第 j 个影响因子下燃煤发电机组的灰色关联系数 $r_{i,j}^i$, 计算公式为

$$r_{i,j}^+ = \frac{\min_i \min_j |x_j^i - X^+| + \rho \max_i \max_j |x_j^i - X^+|}{|x_j^i - X^+| + \rho \max_i \max_j |x_j^i - X^+|} \quad (9)$$

$$r_{i,j}^- = \frac{\min_i \min_j |x_j^i - X^-| + \rho \max_i \max_j |x_j^i - X^-|}{|x_j^i - X^-| + \rho \max_i \max_j |x_j^i - X^-|} \quad (10)$$

$$r_j^i = \frac{1}{\left(1 + \frac{r_{i,j}^+}{r_{i,j}^-}\right)^2} \quad (11)$$

式中： X^+ 为最优序列； X^- 为最劣序列； ρ 为综合灰色分辨系数； $r_{i,j}^+$ 为最优关联系数； $r_{i,j}^-$ 为最劣关联系数。

2) 计算第 j 个影响因子的 2 阶不确信度 u_j ，进而计算以第 j 个影响因子为证据体， E^i 时刻燃煤发电机组运行风险的基本信度值 $f_j(E^i)$ ，计算公式为

$$u_j = \frac{1}{m} \sqrt{\sum_{i=1}^m (r_j^i)^2} \quad (12)$$

$$f_j(E^i) = (1 - u_j) \cdot x_j^i \quad (13)$$

对于待评估的 m 个时刻、 n 个影响因子的燃煤发电机组，有基本信度矩阵如式(14)所示。

$$\mathbf{E}_{m \times n} = \begin{bmatrix} f_1(E^1) & L & f_j(E^1) & L & f_n(E^1) \\ f_1(E^2) & L & f_j(E^2) & L & f_n(E^2) \\ M & & M & & M \\ f_1(E^i) & L & f_j(E^i) & L & f_n(E^i) \\ M & & M & & M \\ f_1(E^m) & L & f_j(E^m) & L & f_n(E^m) \end{bmatrix} \quad (14)$$

3) 由于燃煤发电机组现实运行中具有不确定性，根据以上计算，以 E^θ 表示燃煤发电机组整体的不确定性，计算以第 j 个影响因子为证据体的基本信度值 $f_j(E^\theta)$ ，计算公式为

$$f_j(E^\theta) = 1 - \sum_{i=1}^m f_j(E^i) \quad (15)$$

1.2.3 基本信度分配函数融合

根据 Dempster 合成规则，以影响因子为证据体，以燃煤发电机组的各个时刻为识别体，即可计算在该证据体下各时刻燃煤发电机组运行风险的确信度^[34]。若以信任函数 $P(E^i)$ 表示确信 E^i 时刻燃煤发电机组运行风险的最小值，即为 E^i 时刻燃煤发电机组运行风险的确信度。在同一个识别框架下，将多个影响因子的基本信度分配函数融合成 $P(E^i)$ ，计算公式为

$$P(E^i) = (f_1 \oplus f_2 \oplus L \oplus f_n)(E^i) = \frac{\sum_{E_1 \mid E_2 \mid L \mid E_n = E^i} f_1(E_1) \cdot f_2(E_2) \cdot L \cdot f_n(E_n)}{\sum_{E_1 \mid E_2 \mid L \mid E_n \neq \emptyset} f_1(E_1) \cdot f_2(E_2) \cdot L \cdot f_n(E_n)} \quad (16)$$

$$P(E^1) + P(E^2) + L + P(E^m) + P(E^\theta) = 1 \quad (17)$$

式中， $\forall E_j \subseteq \Theta$ 表示以第 j 个影响因子为证据体， E_j

可以是识别框架集中的任意一个。若 $E_j = \{E^1, E^2, E^3\}$ ，则有 $f_j(E_j) = f_j(E^1) + f_j(E^2) + f_j(E^3)$ 。 $P(E^i)$ 即为燃煤发电机组的运行风险值，其值越大，发生故障的概率越大。 $P(E^\theta)$ 表示整体的确信度，即无倾向的所有研究时间内燃煤发电机组发生故障的概率。

1.2.4 风险评估等级划分

P 为燃煤发电机组评估时刻的运行风险值， P_v 为燃煤发电机组运行风险值的平均值，可以通过燃煤发电机组历史数据计算得出，计算公式为

$$P_v = \frac{\delta}{T^* \times y} \quad (18)$$

式中： δ 为燃煤发电机组发生故障的时刻数量； T^* 为累积时刻数量； y 为研究的燃煤发电机组总数。燃煤发电机组运行风险评估等级标准如表 1 所示。

表 1 燃煤发电机组风险评估等级标准

Table 1 Risk assessment level standard of coal-fired

power generation unit

风险等级	判定内容
I	$P \geq 1.5P_v$
II	$P_v \leq P < 1.5P_v$
III	$0.75P_v \leq P < P_v$
IV	$0.5P_v \leq P < 0.75P_v$
V	$P < 0.5P_v$

2 算例分析

2.1 风险评估影响因子选取

现代燃煤发电厂具有规模大、装机容量大、输电范围广等特点，因而对其整体安全性要求更高。燃煤发电机组是由锅炉、汽轮机和发电机三大主机及辅助设备共同组成，复杂的系统中包含大量不确定性因素影响着燃煤发电机组运行的安全性。燃煤发电机组风险实时评估能够及时发现机组运行过程中存在的安全问题，风险管控工作对燃煤发电厂稳定健康发展意义重大。

燃煤发电机组运行的过程中，设备的运行环境、维护与检修效果以及新技术的应用情况等方面存在很多隐患。具体来说，设备振动过大，会引起设备受力不均，短时间内，会导致设备的出力受限，长时间则会导致设备的疲劳损坏。燃煤发电厂中有大量的旋转设备，而这些旋转设备大多数都由各类电机驱动。在满负荷运行的情况下，汽轮机等核心设备由于振动故障引起的停机事故，造成了巨大的经济损失，达到约运行成本的 5%^[35]。此外，还对生产

人员的人身安全造成了严重的威胁。

通过查阅相关文献和调研发电厂实际运行情况发现, 汽轮机、一次风机、引风机和送风机等设备的轴承振动对燃煤发电机组运行风险有一定程度的综合影响, 但具体影响关系和程度有待挖掘, 通过理清这些影响因子与燃煤发电机组运行风险的关联关系, 从而对燃煤发电机组的运行风险进行实时评估, 为燃煤发电机组的正常运行提供保障。调研燃煤发电厂实际运行情况发现, 电压、温度等指标中的任何一个一旦超过正常范围, 机组必定出现问题,

因此没有将这些指标与其他指标综合考量去分析判断机组运行风险, 电压、温度等指标不纳入综合评估指标范围内。

综合上述分析, 选取燃煤发电机组风险评估影响因子, 包括汽轮机 1、2、3 轴承 X、Y 方向振动、一次风机 X、Y 方向轴承(主轴)振动、引风机 X、Y 方向轴承(主轴)振动和送风机驱动端、自由端轴承(主轴)振动, 共计 12 个影响因子, 如表 2 所示。数据来源于燃煤发电厂 A 在 2020 年 8 月至 2021 年 1 月机组的运行情况。

表 2 燃煤发电机组风险评估体系

Table 2 Risk assessment system of coal-fired power generation unit

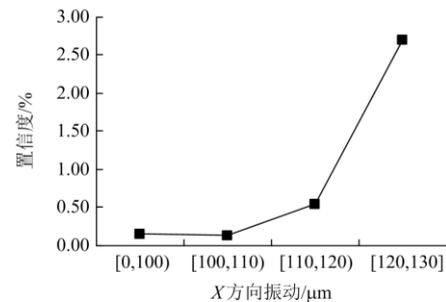
设备名称	指标名称	描述	单位
汽轮机(A ₁)	1 轴承 X 方向振动(B ₁)	燃煤发电机组中, 汽轮机结构复杂, 故障率高, 尤其是轴承异常振动, 如果发现不及时, 将造成汽轮机轴承损坏、转子弯曲, 甚至造成大轴断裂, 一旦发生故障将造成严重的安全事故。	μm
	1 轴承 Y 方向振动(B ₂)		
	2 轴承 X 方向振动(B ₃)		
	2 轴承 Y 方向振动(B ₄)		
	3 轴承 X 方向振动(B ₅)		
	3 轴承 Y 方向振动(B ₆)		
一次风机(A ₂)	X 方向轴承振动(B ₇)	轴承箱结构单薄、主轴直径小是造成轴承振动异常的常见原因, 许多燃煤发电厂曾因一次风机轴承振动值严重超标而被迫停运。通过对一次风机轴承零件的重新加工、及时更换, 可以大大提高机组运行的稳定性。	mm/s
	Y 方向轴承振动(B ₈)		
引风机(A ₃)	X 方向轴承振动(B ₉)	引风机的可靠性对燃煤发电机组的安全运行起着关键的作用。由于引风机输送的介质是烟气, 温度较高且易吸附, 极易造成轴承、叶片的磨损, 影响风机的稳定运行。因此, 及时的检查和维修引风机至关重要。	mm/s
	Y 方向轴承振动(B ₁₀)		
送风机(A ₄)	驱动端轴承振动(B ₁₁) 自由端轴承振动(B ₁₂)	送风机作为锅炉的关键设备之一, 其稳定运行对锅炉的影响十分重要。送风机轴承振动超标, 将严重威胁到锅炉的正常运行, 进而影响整个燃煤发电机组的正常运行。	mm/s

2.2 影响因子与燃煤发电机组风险的关联分析

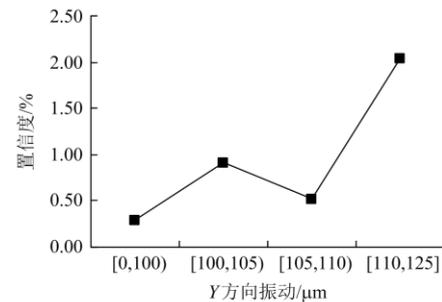
基于选取的汽轮机 1、2、3 轴承 X、Y 方向振动、一次风机 X、Y 方向轴承振动、引风机 X、Y 方向轴承振动和送风机驱动端、自由端轴承振动 12 个影响因子, 依据燃煤发电机组运行风险影响因子的特征数据, 根据式(4)分析每个影响因子与燃煤发电机组风险的关联关系。

1) 汽轮机轴承振动

燃煤发电机组的安全稳定运行与汽轮机主轴的运行情况密切相关, 汽轮机轴承振动与风险的关联关系分析结果如图 2 所示, 可以发现汽轮机 1、2、3 轴承 X、Y 方向振动最大的区间, 运行风险的置信度均为最高, 燃煤发电机组发生故障的概率最大。主要原因是汽轮机轴承振动过大, 极易造成汽轮机轴瓦、转子等的损坏甚至断裂, 导致汽轮机发电机组发生故障, 影响整个燃煤发电机组的正常运行。尤其是高参数大容量燃煤发电厂, 蒸汽对汽轮机叶片的冲击, 导致气流激振, 汽轮机主轴经常受到影响而振动异常, 进而引发机组运行事故。



(a) 汽轮机 1 轴承 X 方向振动



(b) 汽轮机 1 轴承 Y 方向振动

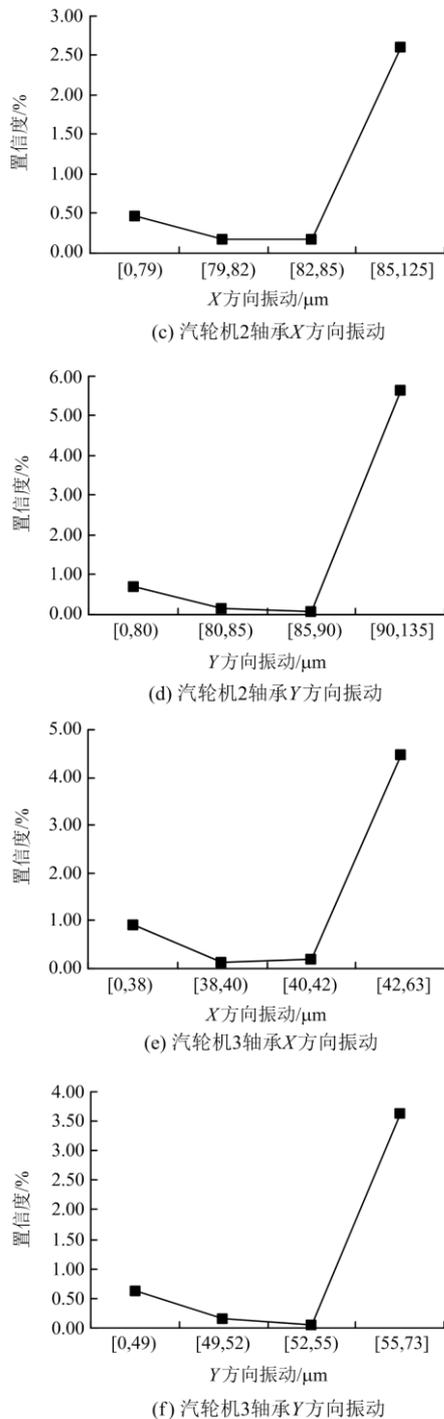


图2 汽轮机轴承振动与风险的关联关系
Fig. 2 Association relationship between bearing vibration of turbine and risk

2) 一次风机轴承振动

一次风机作为锅炉的重要辅机设备，其轴承振动是影响燃煤发电机组运行风险的关键因素之一，通过对一次风机 X、Y 方向轴承振动与燃煤发电机

组风险的关联关系进行分析，由图 3 可知，一次风机 X 方向轴承振动在[1.7, 2.1] mm/s 和[2.5, 4.9] mm/s 区间，发生故障的概率较高；一次风机 Y 方向轴承振动在[1.4, 1.6] mm/s 区间，运行风险的置信度较高。一次风机轴承振动大或严重超标，会造成风机轴承损坏、风机联轴器不同心以及风机转子质量不平衡，导致一次风机无法正常运行甚至整个机组被迫停运，严重影响燃煤发电机组的稳定运行。

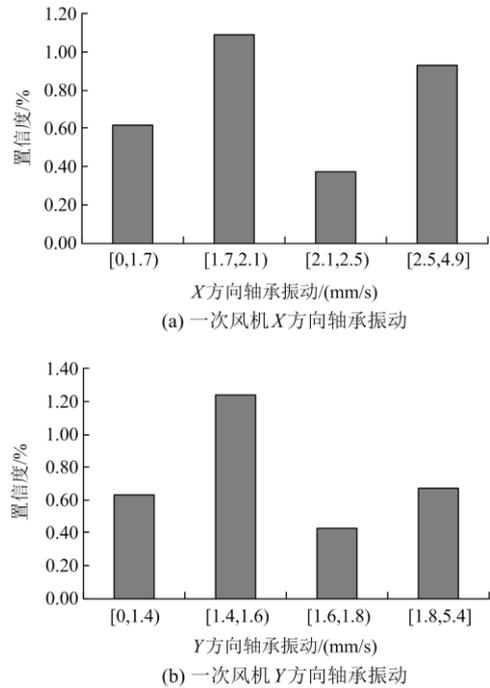


图3 一次风机轴承振动与风险的关联关系
Fig. 3 Association relationship between bearing vibration of primary air fan and risk

3) 引风机轴承振动

引风机运行的稳定性和安全性对燃煤发电机组的稳定运行起着十分关键的作用。引风机 X、Y 方向轴承振动与风险的关联关系分析结果如图 4 所示，引风机 X、Y 方向轴承振动最大区间运行风险的置信度均为最高，燃煤发电机组发生故障的概率最大。引风机轴承振动过大，将严重损害轴承机械性能，大大缩短其使用寿命，对叶片、机壳和风道等造成不同程度的损坏，甚至造成燃煤发电机组生产安全事故，应当予以重视并采取相应的预防和解决措施。

4) 送风机轴承振动

不同的送风机轴承振动大小对燃煤发电机组运行风险产生不同的影响，通过分析送风机驱动端、自由端轴承振动与燃煤发电机组风险的关联关系，

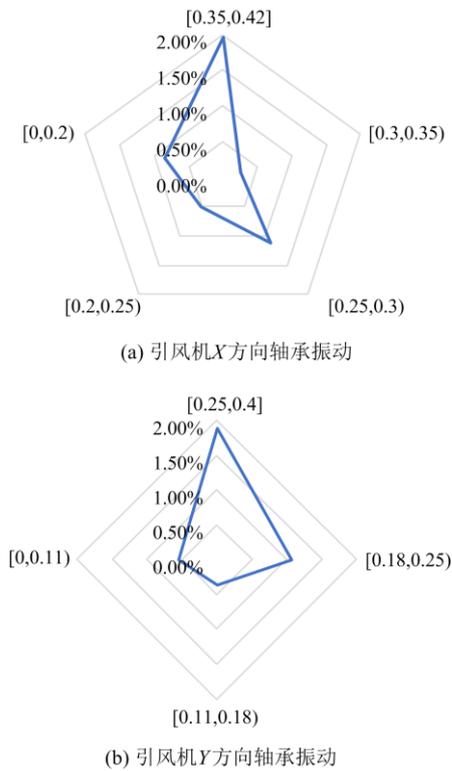


图 4 引风机轴承振动与风险的关联关系
Fig. 4 Association relationship between bearing vibration of induced draft fan and risk

由图 5 可知, 送风机驱动端轴承振动区间在[0.51, 0.55] mm/s 时, 燃煤发电机组运行风险的置信度最高; 送风机自由端轴承振动区间在[1, 1.02] mm/s 时, 燃煤发电机组发生故障的概率最大。送风机在机组出现运行偏离及异常甚至非计划停机时, 保障蒸汽的提供, 一旦其轴承振动超标, 严重影响送风机的稳定运行, 进而影响锅炉的稳定运行。

通过对汽轮机、一次风机、引风机和送风机轴承振动等 12 个影响因子与燃煤发电机组风险的关联关系分析, 形成关联规则量化表, 用于后续数据融合体系。在关联分析结果中虽然会存在与整体趋势不符的个别数据, 但不会影响后续建模和运算, 并且随着

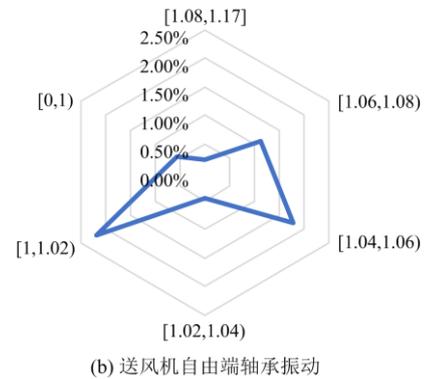
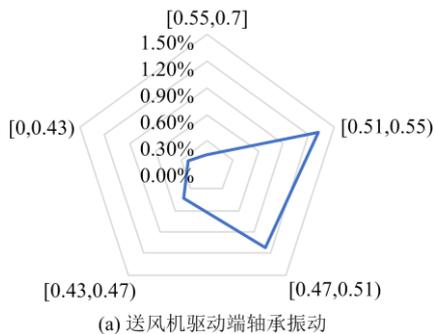


图 5 送风机轴承振动与风险的关联关系
Fig. 5 Association relationship between bearing vibration of forced draft fan and risk

数据量的增加, 关联分析结果也会随之得到修正。

2.3 燃煤发电机组风险评估

以发电厂 A 的燃煤发电机组为例, 根据 2.2 节中影响因子与运行风险的关联分析结果, 基于灰色关联分析法和证据理论对燃煤发电机组进行风险评估。研究对象为 2020 年 8 月至 2021 年 1 月燃煤发电机组 3987 个运行时刻, 运行数据如表 3 所示, 将每个时刻机组影响因子属性特征匹配关联规则量化表, 得到燃煤发电机组风险关联度矩阵 $G = (g_j^i)_{3987 \times 12}$, 通过信息熵理论计算得到加权关联度矩阵 $X = (x_j^i)_{3987 \times 12}$, 采用灰色关联方法计算得到燃煤发电机组风险基本概率分配信度值矩阵 $E_{3987 \times 12}$, 然后根据证据理论计算得到 3987 个风险确信度, 表示该燃煤发电机组这些时刻发生故障的风险状况, 风险评估值如表 4 所示。

根据风险评估等级标准, 燃煤发电机组 3987 个时刻的风险评估结果被分为 I、II、III、IV、V 共 5 个等级, 风险评估的具体结果如表 5 所示, 可以发现燃煤发电机组运行高风险时刻较少, 低风险时刻较多, 符合运维管理需求。

通过与实际运行情况对比, 发生故障的时刻风险评估值均处于风险等级 I 区间, 且位于风险评估值最大的 35 个时刻中。例如, T_{3461} 和 T_{3489} 对应的时刻分别为 2020 年 12 月 31 日 14 时 03 分和 2021 年 1 月 10 日 13 时 12 分, 实际运行中该时间段故障发生较频繁, 其相邻时间段的风险评估结果如图 6 所示, $P(E^{3461}) = 0.001232$, $P(E^{3489}) = 0.001166$, 风险评估值均排在 3987 个时刻风险值的前 0.5%, 在这两个时刻燃煤发电机组均处于高风险区间。

为了进一步证明该计算方法的有效性, 采用同

表 3 燃煤发电机组运行数据

Table 3 Operating data of coal-fired power generation unit

时刻	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇	B ₈	B ₉	B ₁₀	B ₁₁	B ₁₂
T ₁	111.06	103.29	81.3	85.32	38.96	53.14	2.67	1.94	0.22	0.11	0.6	1.08
T ₂	110.66	103.71	81.55	84.49	38.74	52.91	2.54	1.8	0.23	0.13	0.59	1.08
T ₃	110.6	103.27	81.51	85.17	38.95	53.16	2.48	1.77	0.28	0.1	0.58	1.08
T ₄	111.43	104.45	79.64	83.41	40.53	54.5	2.61	1.86	0.21	0.1	0.61	1.08
T ₅	111.84	105.07	79.49	83.06	41.04	54.75	2.56	1.82	0.29	0.11	0.62	1.08
T ₆	112.08	105.08	79.55	82.76	41.14	54.72	2.58	1.81	0.29	0.11	0.6	1.08
T ₇	112.31	105.25	79.17	82.15	41.07	54.76	2.62	1.84	0.29	0.2	0.64	1.12
T ₈	112.1	105.3	79.42	82.66	41.1	54.8	2.51	1.71	0.22	0.11	0.63	1.17
T ₉	112.02	105.14	80.04	83.2	40.9	54.66	2.51	1.69	0.28	0.12	0.59	1.08
T ₁₀	111.66	104.97	79.81	83.53	40.91	54.71	2.44	1.66	0.3	0.15	0.58	1.08
N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
T ₃₉₈₃	101.17	105.5	84.94	83.1	40.23	51.92	2.36	1.64	0.3	0.19	0.49	1.03
T ₃₉₈₄	99.94	105.2	85.32	84.71	39.9	51.39	2.11	1.48	0.3	0.11	0.49	1.07
T ₃₉₈₅	99.48	104.43	85.91	86.19	39.13	50.52	2.31	1.63	0.3	0.11	0.49	1.07
T ₃₉₈₆	99.6	104.14	86.48	87.31	39.75	51.51	2.4	1.67	0.3	0.17	0.52	1.08
T ₃₉₈₇	99.15	104.72	85.32	85.23	40.27	51.63	1.99	1.43	0.3	0.2	0.49	1.07

表 4 燃煤发电机组风险评估值

Table 4 Risk assessment value of coal-fired power generation unit

时刻	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
风险值	6.55×10 ⁻⁵	7.11×10 ⁻⁵	6.43×10 ⁻⁵	8.03×10 ⁻⁵	7.50×10 ⁻⁵	7.50×10 ⁻⁵
时刻	T ₇	T ₈	T ₉	T ₁₀	T ₁₁	T ₁₂
风险值	1.00×10 ⁻⁴	5.32×10 ⁻⁵	6.70×10 ⁻⁵	4.70×10 ⁻⁵	5.36×10 ⁻⁵	5.26×10 ⁻⁵
时刻	T ₁₃	T ₁₄	T ₁₅	T ₁₆	T ₁₇	T ₁₈
风险值	2.39×10 ⁻⁴	9.74×10 ⁻⁵	5.28×10 ⁻⁵	1.14×10 ⁻⁴	9.51×10 ⁻⁵	1.08×10 ⁻⁴
时刻	T ₁₉	T ₂₀	T ₂₁	T ₂₂	T ₂₃	T ₂₄
风险值	1.08×10 ⁻⁴	1.08×10 ⁻⁴	2.88×10 ⁻⁴	2.64×10 ⁻⁴	7.49×10 ⁻⁴	2.74×10 ⁻⁴
时刻	T ₂₅	T ₂₆	T ₂₇	T ₂₈	L	T ₃₉₇₅
风险值	2.16×10 ⁻⁴	2.21×10 ⁻⁴	6.46×10 ⁻⁵	7.84×10 ⁻⁵	L	6.56×10 ⁻⁴
时刻	T ₃₉₇₆	T ₃₉₇₇	T ₃₉₇₈	T ₃₉₇₉	T ₃₉₈₀	T ₃₉₈₁
风险值	1.13×10 ⁻⁴	1.12×10 ⁻⁴	1.20×10 ⁻⁴	5.95×10 ⁻⁴	2.68×10 ⁻⁴	2.62×10 ⁻⁴
时刻	T ₃₉₈₂	T ₃₉₈₃	T ₃₉₈₄	T ₃₉₈₅	T ₃₉₈₆	T ₃₉₈₇
风险值	2.12×10 ⁻⁴	6.53×10 ⁻⁵	2.14×10 ⁻⁴	1.94×10 ⁻⁴	1.75×10 ⁻⁴	2.66×10 ⁻⁴

表 5 燃煤发电机组风险评估结果

Table 5 Risk assessment results of coal-fired power generation unit

风险等级	数量	时刻
I	267	T ₃₄₆₁ 、T ₁₇₅₃ 、T ₁₇₅₂ 、T ₃₄₈₉ 、T ₃₄₆₀ 、T ₃₄₀₃ 、T ₃₃₉₉ 、T ₃₄₀₀ 、T ₃₄₀₂ 、T ₃₄₄₃ 、T ₁₆₄₇ 、T ₁₈₀₁ 、T ₁₇₅₉ 等
II	470	T ₅₅₀ 、T ₂₂₇₈ 、T ₅₄₂ 、T ₁₈₉₃ 、T ₁₅₂₅ 、T ₃₈₆₃ 、T ₂₅₃ 、T ₂₂₄₆ 、T ₂₂₅₀ 、T ₆₂₃ 、T ₃₆₂ 、T ₂₁₀₄ 、T ₆₂₆ 、T ₃₉₄₂ 等
III	431	T ₁₆₁₀ 、T ₅₁₇ 、T ₃₂₆₄ 、T ₁₀₁₇ 、T ₁₀₁₈ 、T ₅₁₁ 、T ₄₀₃ 、T ₃₃₁₈ 、T ₁₀₁₃ 、T ₃₀₇₁ 、T ₃₅₉₂ 、T ₂₃₇₁ 、T ₂₄₁₄ 等
IV	1267	T ₃₃₁₂ 、T ₃₃₁₃ 、T ₃₃₅₇ 、T ₃₃₆₀ 、T ₃₈₅₆ 、T ₃₇₁₆ 、T ₂₄₀₄ 、T ₃₇₇₂ 、T ₃₆₂₉ 、T ₂₇₃₆ 、T ₂₇₆₄ 、T ₃₈₅₇ 、T ₁₁₇₃ 等
V	1552	T ₂₃₅₆ 、T ₂₄₈₄ 、T ₂₄₆₉ 、T ₁₂₁₇ 、T ₂₈₄₅ 、T ₁₄₆₃ 、T ₁₀₅₆ 、T ₂₁₇₄ 、T ₂₉₁₉ 、T ₂₉₂₆ 、T ₃₁₄₉ 、T ₃₁₅₁ 、T ₃₅₉₅ 等

样的方法对 2021 年 2 月燃煤发电机组 600 个时刻的风险进行评估, 结果如图 7 所示。其中, “△”表示该时刻燃煤发电机组发生故障, “—”表示燃煤发电机组风险评估值。在 T¹⁵⁴、T¹⁵³、T⁴⁸、T²⁰²、T³¹⁹、T³⁴⁹ 时刻, 风险评估值排在 600 个时刻风险值的前 1%, 燃煤发电机组处于故障高风险区间, 在实际运行情况中, 这些时刻燃煤发电机组均发生了故障。综合上述分析可以发现, 燃煤发电机组在高风险等级的时刻发生故障的比例高, 在低风险等级的时刻发生故障的比例低, 并且逐渐递减, 该评估模型与机组实际运行情况具有一致性, 说明该评估方法具有一定的有效性。

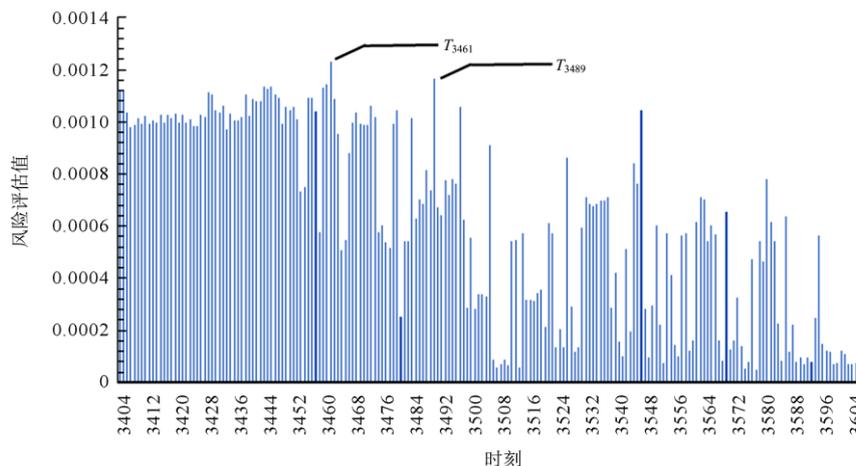
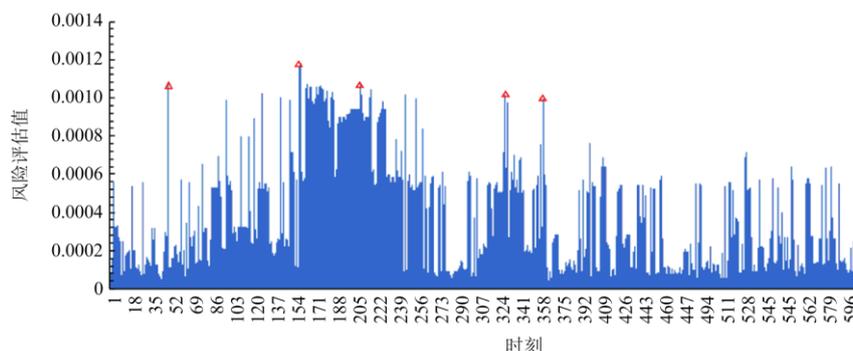
图 6 T_{3404} — T_{3604} 燃煤发电机组风险评估结果Fig. 6 Risk assessment results of coal-fired power generation unit in T_{3404} — T_{3604} 

图 7 2021 年 2 月燃煤发电机组 600 个时刻的风险评估结果

Fig. 7 Risk assessment results of coal-fired power generation unit at 600 moments in February 2021

3 结论

本文建立了基于大数据的燃煤发电运行风险实时评估模型, 通过燃煤发电运行风险与其影响因子的关联关系分析, 结合灰色关联理论、证据理论和 Dempster 合成规则的基本信度分配函数的确定和融合, 实现了燃煤发电运行风险的实时评估, 并通过算例分析, 证明了模型的现实意义。

在实际应用中, 通过对实时数据流的及时处理、挖掘, 结合设备状态评估技术, 对机组运行风险进行实时评估, 对机组设备发生故障的类型进行初步的判断和识别, 并对其目前的严重程度和未来的发展趋势进行及时预测, 从而在不影响发电设备可靠运行的前提下, 有针对性地制定相应的安全措施, 建立有效、全面的设备应急处理预案, 尽可能地降低检修成本, 提高设备的运行效率, 以便预防机组不安全事件的发生, 保障燃煤发电机组的安全、高

效、稳定、可靠运行。

参考文献

- [1] 李军徽, 冯喜超, 严干贵, 等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 163-170.
LI Junhui, FENG Xichao, YAN Gangui, et al. Survey on frequency regulation technology in high wind penetration power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 163-170.
- [2] WANG Yili, ZHU Caichao, LI Yao, et al. Maximizing the total power generation of faulty wind turbines via reduced power operation[J]. Energy for Sustainable Development, 2021, 65: 36-44.
- [3] LI Jiangman, SHEN Jianlin, WANG Xiaoli, et al. Layout and power generation estimation of 50 MW wind turbine in Dayingpo[J]. Energy Reports, 2021, 7: 979-989.
- [4] SUN Li, YOU Fengqi. Machine learning and data-driven

- techniques for the control of smart power generation systems: an uncertainty handling perspective[J]. *Engineering*, 2021, 7(9): 1239-1247.
- [5] 李欣悦, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 直流双极闭锁故障下送端系统暂态过电压计算方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(1): 1-8.
LI Xinyue, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Transient overvoltage calculation method of HVDC sending-end system under DC bipolar blocking[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(1): 1-8.
- [6] 张伟晨, 熊永新, 李程昊, 等. 基于改进 VDCOL 的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(13): 63-72.
ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated recovery of multi-infeed DC system based on improved VDCOL[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(13): 63-72.
- [7] 陈磊, 何慧雯, 王磊, 等. 基于限流器与断路器协调的混合直流输电系统故障隔离方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(19): 119-127.
CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Fault isolation method of a hybrid HVDC system based on the coordination of a fault current limiter and a DC circuit breaker[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(19): 119-127.
- [8] KARAMOV D N. Methodology for calculating the lifetime of storage batteries in autonomous energy systems with renewable power generation[J]. *Energy Reports*, 2020, 6: 15-24.
- [9] 孙立明, 杨博. 蓄电池/超导混合储能系统非线性鲁棒分数阶控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(22): 76-83.
SUN Liming, YANG Bo. Nonlinear robust fractional-order control of battery/SMES hybrid energy storage systems[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(22): 76-83.
- [10] DZOBO O, MALILA B, SITHOLE L. Proposed framework for blockchain technology in a decentralised energy network[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2021, 6(3): 396-406.
- [11] 尚敬英. 基于可拓层次分析法的火电建设工程项目风险评价研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
SHANG Jingying. Research on risk evaluation of thermal power construction project based on extension AHP method[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [12] 董鑫. 燃煤发电企业煤炭供应风险控制方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
DONG Xin. Research on risk control methods of coal supply for coal-generating power enterprises[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [13] 韩琨. A 燃煤发电厂经营风险分析及防控策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
HAN Kun. Research on risk analysis of A fossil power plant management and the prevention and control tactics[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [14] YUAN Jiahai, LI Xinying, XU Chuanbo, et al. Investment risk assessment of coal-fired power plants in countries along the Belt and Road initiative based on ANP-Entropy-TODIM method[J]. *Energy*, 2019, 176: 623-640.
- [15] 刘鹏飞. 火电建设项目融资动态风险研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
LIU Pengfei. Research on dynamic risk of thermal power construction project financing[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [16] 朱锋. 发电企业燃煤风险管理研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2006.
ZHU Feng. Studying of fuel risk management for power plants[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2006.
- [17] 胡斌. 600 MW 燃煤发电机组能效评价方法研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2014.
HU Bin. Research on energy efficiency evaluation method of 600 MW coal-fired generating unit[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2014.
- [18] MOKHTAR M M, HASSIM M H, TAIB R M. Health risk assessment of emissions from a coal-fired power plant using AERMOD modelling[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2014, 92(5): 476-485.
- [19] 商立群, 王守鹏. 改进主成分分析法在火电机组综合评价中的应用[J]. *电网技术*, 2014, 38(7): 1928-1933.
SHANG Liqun, WANG Shoupeng. Application of improved principal component analysis in comprehensive assessment on thermal power generation units[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(7): 1928-1933.
- [20] 齐敏芳, 付忠广, 景源, 等. 基于信息熵与主成分分析的火电机组综合评价方法[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(2): 58-64, 12.
QI Minfang, FU Zhongguang, JING Yuan, et al. A comprehensive evaluation method of power plant units based on information entropy and principal component analysis[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(2): 58-64, 12.
- [21] 李刚, 张建付, 文福拴, 等. 计及信息不确定性的风电机组健康状态实时评估方法[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(18): 111-117.
LI Gang, ZHANG Jianfu, WEN Fushuan, et al. Evaluation

- of real-time health condition for wind turbines considering information uncertainty[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(18): 111-117.
- [22] 李勇, 何蕾, 庞传军, 等. 基于层次分析法的火电厂运行情况量化评价方法[J]. *电网技术*, 2015, 39(2): 500-504.
LI Yong, HE Lei, PANG Chuanjun, et al. An analytical hierarchy process based quantitative method to evaluate operating condition of thermal power plant[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(2): 500-504.
- [23] 宋墩文. 基于多源信息融合的电网暂态稳定风险评估[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
SONG Dunwen. Power grid transient stability risk assessment based on multi-source information fusion[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016.
- [24] 白东平. 基于态势感知的主动配电网安全风险评估方法研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2021.
BAI Dongping. Research on safety risk assessment method of active distribution network based on situational awareness[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2021.
- [25] 白剑锋. 基于大数据分析的输电线路状态评估和故障预测研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
BAI Jianfeng. Research on condition assessment and fault prediction of overhead transmission lines based on big data analysis[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [26] 万文轩, 徐文渊, 裴剑, 等. 应用 D-S 证据理论评估增量配电项目投资风险的方法[J]. *微型电脑应用*, 2021, 37(9): 185-188, 196.
WAN Wenxuan, XU Wenyuan, PEI Jian, et al. Evaluation method of investment risk of incremental distribution project based on D-S evidence theory[J]. *Microcomputer Applications*, 2021, 37(9): 185-188, 196.
- [27] 杜平, 张小军, 许永新, 等. 基于改进云模型和 Eclat 算法的输电线路极端灾害风险评估[J]. *现代电力*, 2021, 38(5): 483-491.
DU Ping, ZHANG Xiaojun, XU Yongxin, et al. Extreme disaster risk assessment of transmission line based on improved cloud model and Eclat algorithm[J]. *Modern Electric Power*, 2021, 38(5): 483-491.
- [28] 刘豫航, 黄少伟, 梅生伟, 等. 基于序列模式挖掘的电力系统连锁故障模式分析方法[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(6): 34-40.
LIU Yuhang, HUANG Shaowei, MEI Shengwei, et al. Analysis on pattern of power system cascading failure based on sequential pattern mining[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(6): 34-40.
- [29] BERNAL B G, MARTÍNEZ-TRINIDAD J F, VALDOVINOS R R M, et al. A PSO-based algorithm for mining association rules using a guided exploration strategy[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2020, 138: 8-15.
- [30] 王有元, 周立玮, 梁玄鸿, 等. 基于关联规则分析的电力变压器故障马尔科夫预测模型[J]. *高电压技术*, 2018, 44(4): 1051-1058.
WANG Youyuan, ZHOU Liwei, LIANG Xuanhong, et al. Markov forecasting model of power transformer fault based on association rules analysis[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(4): 1051-1058.
- [31] 孙丰杰, 王承民, 谢宁. 面向智能电网大数据关联规则挖掘的频繁模式网络模型[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(5): 110-116.
SUN Fengjie, WANG Chengmin, XIE Ning. Frequent pattern network model for association rule mining of big data in smart grid[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(5): 110-116.
- [32] LI Zhao, LUO Zujiang, WANG Yan, et al. Suitability evaluation system for the shallow geothermal energy implementation in region by Entropy Weight Method and TOPSIS method[J]. *Renewable Energy*, 2022, 184: 564-576.
- [33] XIAO Fuyuan. A new divergence measure for belief functions in D-S evidence theory for multisensor data fusion[J]. *Information Sciences*, 2020, 514: 462-483.
- [34] 薛大为, 王永, 高康凯. 基于规范分解的证据合成悖论分析[J]. *北京邮电大学学报*, 2019, 42(1): 28-34.
XUE Dawei, WANG Yong, GAO Kangkai. Analysis of evidence combination paradox based on canonical decomposition[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2019, 42(1): 28-34.
- [35] 樊新永, 张磊. 火力发电厂一次风机电机的振动故障分析与处理[J]. *电气防爆*, 2020(4): 8-13.
FAN Xinyong, ZHANG Lei. Analysis and solution of fan motor vibration fault in thermal power plant[J]. *Electric Explosion Protection*, 2020(4): 8-13.

收稿日期: 2021-10-21; 修回日期: 2021-12-30

作者简介:

李存斌(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为信息管理、风险管理;

董佳(1997—), 女, 通信作者, 博士研究生, 主要研究方向为信息管理与决策支持; E-mail: 15611571133@163.com

丁佳(1981—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统风险管理。

(编辑 许威)