

中文引用格式:侯羽澳,王强,柳青,等. 基于偏离度-FCE的袋式除尘系统实时定量风险评价[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(10):30-38.

英文引用格式:HOU Yuao, WANG Qiang, LIU Qing, et al. Real-time quantitative risk evaluation of bag dedust system based on deviation degree-FCE[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(10): 30-38.

基于偏离度-FCE的袋式除尘系统实时定量风险评价*

侯羽澳¹, 王强^{**1}教授, 柳青²讲师, 林雅敏³高级工程师, 张少锋³高级工程师

(1 中国计量大学 能源环境与安全工程学院, 浙江 杭州 310018; 2 中国计量大学

质量与标准化学学院, 浙江 杭州 310018; 3 浙江图讯科技股份有限公司, 浙江 杭州 310023)

中图分类号: X964

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.10.1969

资助项目: 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(2022C03179)。

【摘要】 为保障袋式除尘系统运行安全, 预防粉尘燃爆事故发生, 提出一种基于偏离度-模糊综合评价(FCE)的袋式除尘系统实时定量风险评价模型。首先, 基于工业物联网传感器采集的除尘器进出风口压差、除尘箱温度和锁气卸灰故障信号等指标的监测数据, 引入偏离度实现监测指标的风险量化; 其次, 采用FCE法计算袋式除尘系统的风险状态, 结合层次分析法(AHP)和变权理论对评价指标赋权, 依据隶属函数和隶属度加权平均原则, 量化基于偏离度的袋式除尘系统风险, 获得系统风险评价结果; 最后, 运用某型号袋式除尘系统的监测数据验证模型。结果表明: 当袋式除尘系统评价指标的监测值越趋近于报警阈值, 且趋近于报警阈值的指标数量越多时, 所处风险等级越高, 评价结果与其实际运行情况具有相关一致性, 验证了模型的有效性。

【关键词】 偏离度; 模糊综合评价(FCE); 袋式除尘系统; 定量风险评价; 变权理论

Real-time quantitative risk evaluation of bag dedust system based on deviation degree-FCE

HOU Yuao¹, WANG Qiang¹, LIU Qing², LIN Yamin³, ZHANG Shaofeng³

(1 College of Energy Environment and Safety Engineering, China Jiliang University, Hangzhou

Zhejiang 310018, China; 2 College of Quality and Standardization, China Jiliang University,

Hangzhou Zhejiang 310018, China; 3 Zhejiang Topinfo Technology Co., Ltd.,

Hangzhou Zhejiang 310023, China)

Abstract: In order to ensure the safe operation of bag dedust system and prevent the occurrence of dust explosion accident, a real-time quantitative risk evaluation model of bag dedust system was proposed based on deviation degree-FCE. Firstly, based on the monitoring data of the pressure difference between inlet and outlet of the dust, box temperature and lock-in ash discharge fault signal collected by the industrial Internet of Things sensor, the deviation degree was introduced to characterize the risk status of the monitoring parameters of the bag dedust system. Then, FCE was used to calculate the risk status of the bag dedust system. The analytic hierarchy process(AHP) and variable weight theory were combined to assign

* 文章编号: 1003-3033(2024)10-0030-09; 收稿日期: 2024-04-21; 修稿日期: 2024-07-22

** 通信作者: 王强(1976—), 男, 湖北应城人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事安全检测技术研究。E-mail: qiangwang@cjlu.edu.cn。

weights to the evaluation indicators. Based on the membership function and weighted average principle of membership degree, the risk of the bag dedust system was quantified by deviation degree, and the risk evaluation result for the bag dedust system was obtained. Finally, the monitoring data of a certain type of bag dedust system was used to verify the effectiveness of the model. The findings demonstrate that when the monitoring value of the evaluation indicators of the bag dedust system gradually approaches the alarm threshold, and the number of indicators approaching the alarm threshold increases, the risk level is higher. The evaluation results are correlated with the actual operation situation, thus validating the efficacy of the model.

Keywords: deviation degree; fuzzy comprehensive evaluation (FCE); bag dedust system; quantitative risk evaluation; variable weight theory

0 引言

袋式除尘系统作为一种高效的除尘设备,在工业生产上得到广泛应用^[1-2]。然而,袋式除尘系统内部由于持续地、长期地或频繁地存在可燃性粉尘被归类于 20 区,且摩擦、碰撞等容易产生火花,故极易导致燃爆等事故发生^[3-4]。因此,评价袋式除尘系统的风险状况具有重要意义。

近年来,已有学者对袋式除尘系统风险评价展开了相关研究,ZALOSH 等^[5]研究了袋式除尘器的粉尘爆炸风险,并举例验证,发现除尘器的安全防护是防治粉尘爆炸事故的必要条件。李增杰等^[6]通过测量通风管道、除尘器等的运行指标,确定了通风除尘系统的风险,并采用模糊综合评价方法评价了通风除尘系统风险。宋英杰等^[7]构建了基于压力-状态-响应模型的布袋除尘装置稳定运行指标体系,运用层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 确定指标权重,量化分析了布袋式除尘系统的运行稳定性。YUAN Zhi 等^[8]以除尘系统为例,研究了一种最优安全策略,可在有限预算条件下有效降低粉尘爆炸风险。高娟等^[9]基于粉尘爆炸特性参数,结合故障模式及影响分析 (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA) 与道化学火灾爆炸指数法,提出一种半定量的干式除尘系统风险分析方法。SUN Siheng 等^[10]采用模糊综合评价 (Fuzzy Comprehensive Evaluation, FCE) 法构建某除尘系统粉尘爆炸风险评价模型,评价了粉尘爆炸风险。但上述袋式除尘系统风险评价研究未能实现实时风险评价,使得评价存在一定滞后性,无法及时掌握袋式除尘系统的实时风险状况。

随着物联网和大数据技术的发展和运用,其在实时风险评价方面展现出独特优势^[11-12]。卢颖等^[13]基于体育场馆的物联网监测数据,运用随机森

林算法筛选出最优的体育场馆动态火灾风险评估指标体系,以提高风险评估的科学性。邱泽阳^[14]等运用现场监测数据挖掘方法建立了指标偏离度计算模型,实现了油气输送动设备实时定量风险评估。可见,物联网监测数据在实时风险评价上的适用性,理论上也可将物联网监测数据应用于袋式除尘系统的风险评价中。并且近年来应急管理部加快推进工贸行业粉尘涉爆企业安全生产风险监测预警系统建设应用^[15],积累了大量的袋式除尘系统物联网监测数据。鉴于此,笔者拟建立基于偏离度-FCE 法的袋式除尘系统实时定量风险评价模型;基于工业物联网传感器采集袋式除尘系统实时监测数据,引入偏离度表征监测指标的风险状态,并将偏离度融入到监测指标变权重和隶属度计算中,实现袋式除尘系统的实时定量风险评价,以期为风险处置提供参考。

1 袋式除尘系统实时风险评价方法

1.1 确定袋式除尘系统监测指标偏离度

袋式除尘系统的每个监测指标具有不同的物理意义和变化范围。为消除不同指标数据类型和量纲的影响,使各监测指标变化情况与袋式除尘系统的风险状态联系起来,引入偏离度 R 。对于袋式除尘系统,由于每一种监测指标监测数据分布规律不同,且其变化趋势不是线性的,传统的偏离度计算方法不再适用。因此,文中结合实际情况,运用袋式除尘系统历史监测数据进行曲线拟合,建立各监测指标的偏离度计算模型。确定所划分的偏离度区间分界点对应的实际监测数据值,再以偏离度为纵坐标,相应的实测数据值为横坐标拟合最优曲线。计算步骤如下:

1) 偏离度等级划分。袋式除尘系统各监测指标的偏离度范围为 $[0, 1]$ 。当某种监测指标接近报警阈值时,偏离度趋近于 1;反之,则趋近于 0。偏离

度等级划分见表1。

表1 偏离度等级划分

Table 1 Classification of deviation degree

等级	区间
轻度	[0,0.25)
中度	[0.25,0.5)
高度	[0.5,0.75)
重度	[0.75,1]

2) 确定重度偏离区间分界点对应的实际监测值。根据收集到的现场监测数据可知:袋式除尘系统监测指标分为2大类:除尘器内部环境监测指标和防爆控制装置的运行情况监测指标。这2类监测指标中包含开关量、模拟量2种数据类型。开关量包括锁气卸灰故障信号、喷淋管路流量信号等监测指标;模拟量包含除尘箱温度、除尘器灰斗温度等越小越优型监测指标和过滤器清灰气源压力、进出口压差等中间型监测指标。对于开关量,当其处于正常状态时, R 为0;报警状态时 R 为1。对于模拟量,确定越小越优型监测指标的高报阈值和高高报阈值作为 R 为0.75和1时的对应值;确定中间型监测指标的低报阈值、低低报阈值、高报阈值和高高报阈值作为 R 为0.75和1时的对应值。模拟量的报警阈值与重度偏离度分界点的对应关系见表2。

表2 模拟量的报警阈值与重度偏离分界点的对应关系

Table 2 Correspondence between the alarm threshold of simulated quantity and severe deviation demarcation point

指标 (模拟量) 类型	越小越优型		中间型			
	高报 阈值	高高报 阈值	低低报 阈值	低报 阈值	高报 阈值	高高报 阈值
R	0.75	1	1	0.75	0.75	1

3) 确定轻度偏离、中度偏离和高度偏离区间分界点对应的实际监测值。袋式除尘系统的历史监测数据更符合其实际运行状态,故运用现场数据挖掘方法确定分界点的监测值。越小越优型指标筛选出低于高报阈值的正常数据,由小到大按5:3:2比例得到 R 为0、0.25、0.5对应的实际监测值;中间型指标筛选在高报阈值和低报阈值范围内的正常数据,由中间到高、低报阈值按5:3:2的比例得到 R 为0、0.25、0.5对应的实际监测值。为降低拟合曲线的误差,分别再以0.05为1个单位划分轻度偏离、中度偏离和高度偏离区间,并按照相应比例确定对应的实际监测值参与偏离度函数的拟合,偏离度

与对应比例的关系见下式:

当 $k=0$ 时,

$$R_k = 0, d_k = 0 \quad (1)$$

当 $0 < k \leq 14$ 时,

$$R_k = R_{k-1} + 0.05$$

$$d_k = \begin{cases} d_{k-1} + 10, & 0 < k \leq 5 \\ d_{k-1} + 6, & 5 < k \leq 10 \\ d_{k-1} + 4, & 10 < k \leq 14 \end{cases} \quad (2)$$

式中: R_k 为第 k 个点所取的偏离度值; d_k 为 R_k 所对应的比例。在此基础上,确定 d_k 对应的实际监测值。

4) 确定袋式除尘系统监测指标的偏离度拟合函数。根据由袋式除尘系统大量监测数据确定的各偏离度对应的实际监测值,拟合最贴近于各监测指标实际变化规律函数,见下式:

$$R(x) = \begin{cases} 1, & (x = 0) \\ 0, & (x = 1) \end{cases} \quad (3)$$

$$R(x) = \begin{cases} 0, & (x = 0) \\ 1, & (x = 1) \end{cases} \quad (4)$$

$$R(x) = a_q x^q + a_{q-1} x^{q-1} + \dots + a_2 x^2 + a_1 x + a_0 \quad (5)$$

式中: $R(x)$ 为偏离度拟合函数; x 为监测指标的监测值; $a_0 \sim a_q$ 为通过历史监测数据挖掘确定的待定系数; q 为多项式拟合函数的次数。将袋式除尘系统监测指标的实时监测数据代入相应的偏离度拟合函数,即可得到各监测指标相应时刻的偏离度。

1.2 袋式除尘系统实时定量风险评价模型

1.2.1 风险等级划分

根据《粉尘爆炸危险场所用除尘系统安全技术规范》^[16]和工作人员运维经验,将袋式除尘系统的风险状态分为低风险、一般风险、较大风险、重大风险4个等级。袋式除尘系统偏离度与风险等级之间的关系见表3。

表3 袋式除尘系统偏离度与风险等级之间的关系

Table 3 Relationship between deviation degree and risk level of bag dedust system

风险等级	低 V_1	一般 V_2	较大 V_3	重大 V_4
R	[0,0.25]	(0.25,0.5]	(0.5,0.75]	(0.75,1]

1.2.2 偏离度-FCE实时定量风险评价模型

基于偏离度-FCE袋式除尘系统实时定量风险评价模型建模步骤如下:

步骤1:确定评价指标因素集 U 。袋式除尘系

统的一级指标集和二级指标集:

$$\begin{cases} U = \{U_1, U_2, \dots, U_i, \dots, U_m\} \\ U_i = \{U_{i1}, U_{i2}, \dots, U_{ij}, \dots, U_{in}\} \end{cases} \quad (6)$$

式中: U 为袋式除尘系统; U_i 为第 i 个一级指标, $i = 1, 2, \dots, m$; m 为一级指标个数; U_{ij} 为一级指标 U_i 的第 j 个二级指标, $j = 1, 2, \dots, n$; n 为 U_i 中的二级指标个数。

步骤 2: 确定风险状态评语集 V 。袋式除尘系统的风险状态分为 4 个等级, 即 $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4\}$ 。

步骤 3: 计算指标偏离度 R_{ij} 。将二级指标监测数据带入相应的偏离度拟合曲线, 得到其监测数据对应的实时偏离度 R_{ij} 。

步骤 4: 构造模糊评价矩阵。在实际工程应用中, 最常用的隶属函数是三角隶属函数和梯形隶属函数^[17]。由于三角函数在处理状态等级边缘信息时不够精细, 而梯形隶属度函数在保存隶属度边界信息方面存在不足, 故采用两者相结合的方式描述评价指标偏离度 R_{ij} 与隶属度的对应关系, 见下式:

$$pv_1(R_{ij}) = \begin{cases} 1, & 0 \leq R_{ij} < 0.25 \\ 2 - 4R_{ij}, & 0.25 \leq R_{ij} < 0.5 \\ 0, & R_{ij} \geq 0.5 \end{cases} \quad (7)$$

$$pv_2(R_{ij}) = \begin{cases} 4R_{ij} - 1, & 0.25 \leq R_{ij} < 0.5 \\ 3 - 4R_{ij}, & 0.5 \leq R_{ij} < 0.75 \\ 0, & R_{ij} < 0.25 \text{ 或 } R_{ij} \geq 0.75 \end{cases} \quad (8)$$

$$pv_3(R_{ij}) = \begin{cases} 4R_{ij} - 2, & 0.25 \leq R_{ij} < 0.75 \\ 4 - 4R_{ij}, & 0.75 \leq R_{ij} < 1 \\ 0, & R_{ij} < 0.25 \text{ 或 } R_{ij} > 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$pv_4(R_{ij}) = \begin{cases} 0, & R_{ij} < 0.75 \\ 4R_{ij} - 3, & 0.75 \leq R_{ij} \leq 1 \\ 1, & R_{ij} > 1 \end{cases} \quad (10)$$

式中 $pv_l(R_{ij})$ 为评价指标的 R_{ij} 隶属于风险等级 V_l ($l = 1, 2, 3, 4$) 的概率。

评价指标偏离度 R_{ij} 与风险等级的隶属函数如图 1 所示。

根据模糊隶属函数确定评价指标 R_{ij} 与风险等级之间的模糊评价矩阵:

$$P_l = \begin{bmatrix} pv_1(R_{11}) & pv_2(R_{11}) & pv_3(R_{11}) & pv_4(R_{11}) \\ pv_1(R_{12}) & pv_2(R_{12}) & pv_3(R_{12}) & pv_4(R_{12}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ pv_1(R_{mn}) & pv_2(R_{mn}) & pv_3(R_{mn}) & pv_4(R_{mn}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

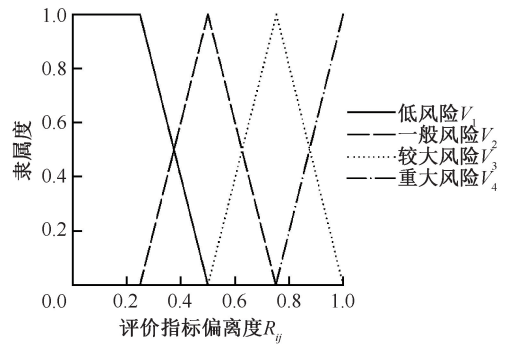


图 1 评价指标偏离度 R_{ij} 与风险等级的隶属函数

Fig. 1 Membership function of evaluation index deviation degree R_{ij} and risk level

步骤 5: 计算权重。使用 AHP 法确定袋式除尘系统各指标的常权重。在常权重下, 当某个监测指标的实测数据偏离度很大, 而该指标权重较小时, 会导致评价结果无法准确反映监测指标变化, 造成袋式除尘系统整体风险状态仍被误判为正常的假象, 而变权理论可以很好地解决该问题。因此, 结合变权理论^[18-19]确定袋式除尘系统监测指标的变权重。

袋式除尘系统监测指标变权重计算公式为:

$$\omega_{ij} = \frac{\omega'_{ij}(1 - R_{ij})^{\mu-1}}{\sum_{j=1}^n \omega'_{ij}(1 - R_{ij})^{\mu-1}} \quad (12)$$

式中: ω'_{ij} 为监测指标的常权重; μ 为变权系数, 取 0.2; R_{ij} 为第 i 个一级指标的第 j 个二级指标偏离度; 当 $R_{ij} = 1$ 时, 可将 R_{ij} 用趋近于 1 的数代替后再计算变权值。因此, 一级指标集常权重为 $\omega = [\omega_1 \omega_2 \dots \omega_m]$, 二级指标集变权重为 $\omega_i = [\omega_{i1} \omega_{i2} \dots \omega_{in}]$ 。

步骤 6: 综合评价。2 层模糊综合评判均选择加权平均型。一级指标模糊综合评价计算公式为:

$$B_i = \omega_i \cdot P_i \quad (13)$$

式中: B 为所有一级指标的隶属度集构成的袋式除尘系统整体的模糊综合评判矩阵, 袋式除尘系统的模糊综合评价计算公式为:

$$B' = \omega \cdot B = [b(V_1) \ b(V_2) \ b(V_3) \ b(V_4)] \quad (14)$$

求出向量 B' 后, 通常使用最大隶属度原则或加权平均原则来确定风险等级^[20]。最大隶属度原则忽略了其他指标的影响, 可能会导致评价结果不准确的情况。因此, 采用加权平均原则来确定袋式除尘系统的风险等级, 将得到的 B' 和它的风险评价集相对应的加权向量 H_l ($l = 1, 2, 3, 4$) 的加权评价价值作为袋式除尘系统实时定量风险评价的结果 R' , 即

$$R' = \frac{\sum_{l=1}^4 b(V_l) \cdot H_l}{\sum_{l=1}^4 b(V_l)} \quad (15)$$

2 定量风险评价实例分析

2.1 评价指标体系构建

通过调研分析某型号的袋式除尘系统(日产尘量 200 kg)的实际监测情况和文献资料,构建袋式除尘系统风险评价指标体系。该体系包括 1 个综合指标,2 个一级指标和 10 个二级指标,如图 2 所示。

确定各评价指标的报警阈值。开关量评价指标: U_{21} 和 U_{24} 的报警阈值为 0, U_{22} 、 U_{23} 和 U_{26} 报警阈值为 1,模拟量评价指标的报警阈值见表 4。

表 4 评价指标报警阈值

Table 4 Alarm threshold of evaluation indicator

监测指标	低低报阈值	低报阈值	高报阈值	高高报阈值
$U_{11}/^{\circ}\text{C}$	—	—	70	90
U_{12}/kPa	0.5	1.0	3.5	4.5
U_{13}/kPa	290	390	800	900
$U_{14}/^{\circ}\text{C}$	—	—	70	90
U_{25}/kPa	100	300	800	900

表 5 各评价指标偏离度拟合函数

Table 5 Fitting function of deviation degree of each evaluation index

评价指标	偏离度拟合函数
U_{21} 、 U_{24}	$R(x) = \begin{cases} 1, & (x = 0) \\ 0, & (x = 1) \end{cases}$
U_{22} 、 U_{23} 、 U_{26}	$R(x) = \begin{cases} 0, & (x = 0) \\ 1, & (x = 1) \end{cases}$
U_{11}	$R(x) = \begin{cases} 4.406 \times 10^{-5}x^2 + 0.00732x - 0.00458, & 0 \leq x < 90 \\ 1, & x \geq 90 \end{cases}$
U_{12}	$R(x) = \begin{cases} 0.0174^2 - 0.5240x + 1.2567, & 0.5 \leq x \leq 2.622 \\ -0.0506x^3 + 0.3114x^2 + 0.2726x - 1.924, & 2.622 < x \leq 4.5 \\ 1, & 0.5 < x \text{ 或 } x > 4.5 \end{cases}$
U_{13}	$R(x) = \begin{cases} -1.287\ln(x) + 8.343, & 290 \leq x \leq 640.6 \\ -5.062 \times 10^{-6}x^2 + 0.01183x - 5.527, & 640.6 < x \leq 900 \\ 1, & 290 < x \text{ 或 } 900 < x \end{cases}$
U_{14}	$R(x) = \begin{cases} 4.728 \times 10^{-5}x^2 + 0.00718x - 0.01142, & 0 \leq x < 90 \\ 1, & x \geq 90 \end{cases}$
U_{25}	$R(x) = \begin{cases} 5.198 \times 10^{-9}x^3 - 8.776 \times 10^{-6}x^2 + 0.00135x + 0.9496, & 100 \leq x \leq 517 \\ -1.802 \times 10^{-8}x^3 + 4.161 \times 10^{-5}x^2 - 0.02854x + 6.128, & 517 < x \leq 900 \\ 1, & x < 100 \text{ 或 } x > 900 \end{cases}$

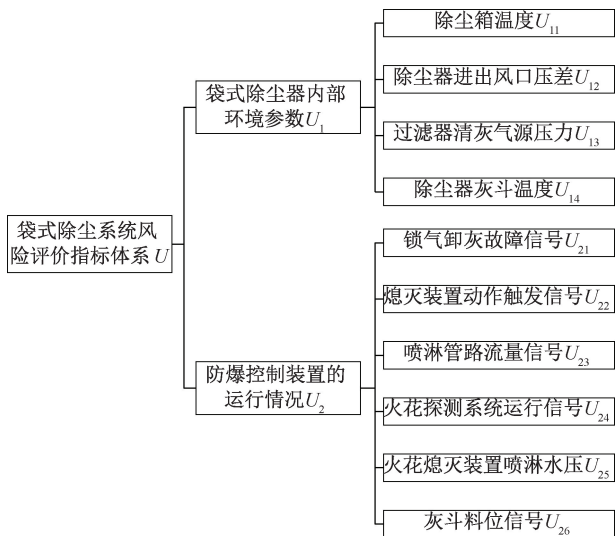


图 2 袋式除尘系统风险评价体系

Fig. 2 Risk evaluation system of bag dedust system

2.2 袋式除尘系统风险评价

根据袋式除尘系统各评价指标的报警阈值,以及收集的某型号的袋式除尘系统的 9 万多条历史监测数据确定的各偏离度对应的实际监测值,得到各评价指标的偏离度拟合函数,见表 5。

以袋式除尘系统 2023 年 8 月 29 日—9 月 5 日的 2 059 条监测数据为例,验证模型的有效性。监测数据见表 6。

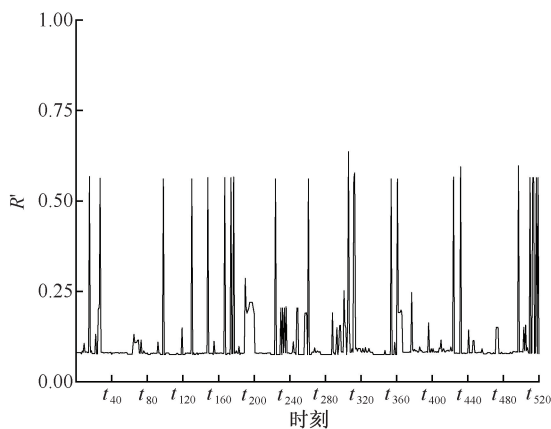
将表 6 中各评价指标的监测值代入相应的偏离度拟合函数,得到偏离度;运用 AHP 法和变权理论结合的方法得到一级指标的常权重和二级指标的变权重。令 $H_t = (H_1, H_2, H_3, H_4) = (0.074 9, 0.275 4, 0.565 1, 0.884 8)$, 依据式(9)一式(13)得到袋式除

尘系统偏离度 R' 折线图如图 3 所示。结合表 3, 将袋式除尘系统 2 059 个时刻的计算结果分为 4 个等级。其中,有 1 830 个时刻处于低风险等级,102 个时刻处于一般风险等级,121 个时刻处于较大风险等级,6 个时刻处于重大风险等级。由此可知:袋式除尘系统高风险时刻较少,低风险时刻较多,符合运维管理的需求。

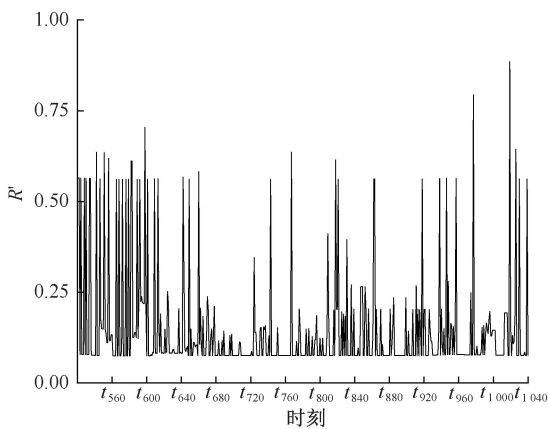
表 6 袋式除尘系统风险监测数据

Table 6 Risk monitoring data of bag dedust system

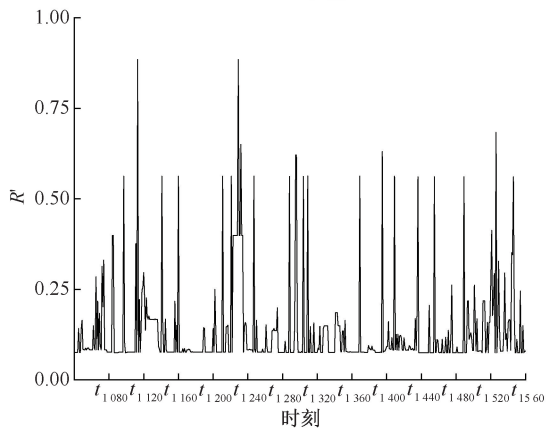
时刻	$U_{11}/^{\circ}\text{C}$	U_{12}/kPa	U_{13}/kPa	$U_{14}/^{\circ}\text{C}$	U_{21}	U_{22}	U_{23}	U_{24}	U_{25}/kPa	U_{26}
t_1	28.7	2.281	667.5	30.7	1	0	0	1	395.6	0
t_2	28.9	2.286	667.3	30.7	1	0	0	1	395.4	0
t_3	29.1	2.436	667.2	30.7	1	0	0	1	395.6	0
t_4	28.6	2.302	667.8	30.7	1	0	0	1	395.6	0
t_5	28.9	2.312	666.9	30.1	1	0	0	1	395.3	0
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
t_{2057}	23.3	2.426	646.4	30.1	1	0	0	1	523.4	0
t_{2058}	23.3	2.519	571.8	30.1	1	0	0	1	491.0	0
t_{2059}	22.8	2.308	605.2	30.1	1	0	0	1	518.0	0



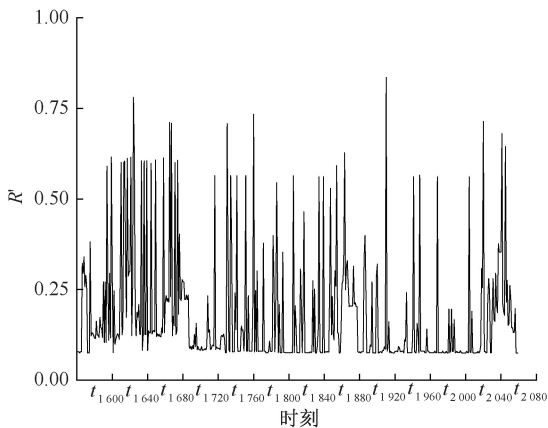
(a) 袋式除尘系统 t_1-t_{520} 的偏离度 R'



(b) 袋式除尘系统 $t_{521}-t_{1040}$ 的偏离度 R'



(c) 袋式除尘系统 $t_{1041}-t_{1560}$ 的偏离度 R'



(d) 袋式除尘系统 $t_{1561}-t_{2059}$ 的偏离度 R'

图 3 袋式除尘系统 2 059 个时刻的偏离度 R'

Fig. 3 Deviation degree R' of bag dedust system at 2 059 moments

选取 t_6 、 t_{624} 、 t_{1786} 和 t_{1910} 这 4 个典型时刻各评价指标的偏离度 R_{ij} 展开分析, t_6 、 t_{624} 、 t_{1786} 、 t_{1910} 时刻指标偏离度 R_{ij} 分布情况如图 4 所示。4 个时刻的袋式除尘系统偏离度为 $R'(t_6) = 0.0773$, $R'(t_{624}) = 0.2522$, $R'(t_{1786}) = 0.5449$, $R'(t_{1910}) = 0.8357$ 。

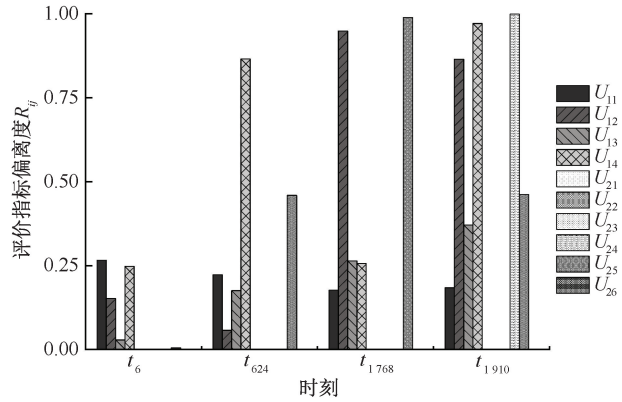


图 4 t_6 、 t_{624} 、 t_{1786} 、 t_{1910} 时刻评价指标偏离度 R_{ij} 分布情况

Fig. 4 Distribution of deviation degree R_{ij} of evaluation indicators at t_6 , t_{624} , t_{1786} , t_{1910}

由图 4 可知: t_6 时刻评价指标的偏离度 R_{ij} 均较低, 说明监测值均处于正常状态, 此时, 袋式除尘系统处于低风险等级; t_{624} 时刻有 1 个评价指标的偏离度 R_{ij} 较大, 说明该指标监测值趋近于报警阈值, 此时袋式除尘系统处于一般风险等级; t_{1786} 时刻有 2 个评价指标的偏离度 R_{ij} 较大, 说明这 2 个指标监测值均趋近于报警阈值, 此时袋式除尘系统处于较大风险等级; t_{1910} 时刻有 3 个评价指标的偏离度 R_{ij} 较大, 说明该这 3 个指标监测值均趋近于报警阈值, 此时袋式除尘系统处于重大风险等级。

为进一步验证该模型的有效性, 取 2023 年 9 月 11 日—13 日袋式除尘系统 773 个时刻的监测数据, 代入相应的偏离度拟合函数, 得到偏离度; 运用 AHP 法和变权理论结合的方法得到一级指标的常权重和二级指标的变权重; 依据式 (9) 一式 (13) 得到袋式除尘系统偏离度 R' 的柱状图如图 5 所示。在 t_{306} 和 t_{597} 时刻, 袋式除尘系统偏离度 R' 分别为 0.7802、0.8357, 处于重大风险等级。分析发现, 袋式除尘系统这些时刻有些评价指标的监测值几乎达到或已经超过了报警阈值。

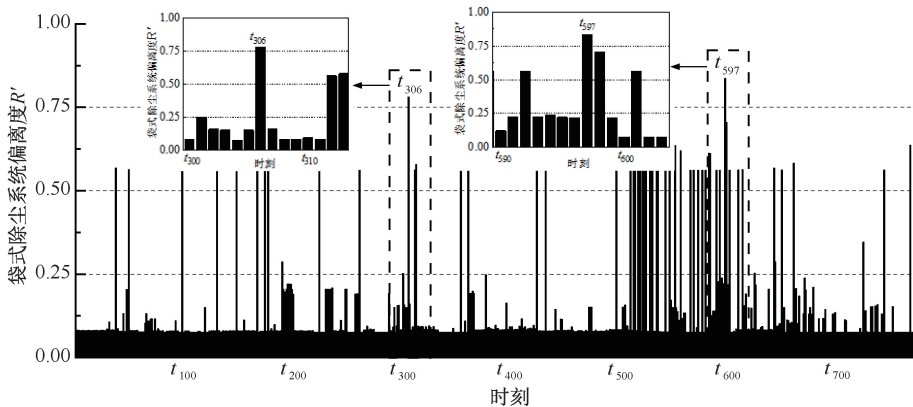


图 5 2023 年 9 月 11 日—13 日袋式除尘系统偏离度 R'

Fig. 5 Deviation degree R' of bag dedust system from September 11th to 13th, 2023

在 t_{306} 时刻, 袋式除尘系统的偏离度 R' 达到 0.7802, 导致这种情况的主要原因是除尘器灰斗温度和锁气卸灰装置的监测值趋近于报警阈值, 必须立即停机, 并采取以下处置措施: ①检查除尘器灰斗是否有粉尘堆积, 若有粉尘堆积, 应立即清理; 同时, 要仔细检查是否发生阴燃, 一旦发现火势, 应立即采取措施, 以防止火势蔓延。②检查锁气卸灰装置是否发生故障, 若有故障, 应及时检修, 以确保其正常运行。而在 t_{597} 时刻, 袋式除尘系统的偏离度 R' 高达 0.8357, 导致这种情况的主要原因是除尘器进风口压差、除尘器灰斗温度和火花探测系统运行信

号的监测值趋近于报警阈值, 需要立即停机, 并采取以下处置措施: ①检查滤袋是否出现堵袋或破损情况, 若有问题, 应及时更换或修复。②检查除尘器灰斗是否有粉尘堆积或阴燃现象, 若有粉尘堆积或阴燃现象, 应采取与 t_{306} 时刻相同的清理和灭火措施。③检查和修理火花探测系统, 确保其正常运行, 及时探测并响应火花信号。

综上所述可知: 当袋式除尘系统评价指标的监测值逐渐趋近于报警阈值, 且接近报警阈值的指标数量增多时, 该系统的偏离度 R' 越大, 所处风险等级越高。评价结果与袋式除尘系统实际运行情况具有相

关一致性,验证了模型的有效性。

3 结 论

1) 基于袋式除尘系统的监测指标,提出不同类型监测指标的偏离度计算方法,该方法可实现监测指标的风险量化。

2) 建立基于偏离度-FCE 的袋式除尘系统实时

定量风险评价模型,该模型采用 AHP 法与变权理论结合的方法确定评价指标权重,有助于解决状态失衡问题,提高评估结果的客观性和合理性。

3) 实例分析结果表明:当评价指标的监测值逐渐趋近于报警阈值,且接近报警阈值的指标数量增多时,所处风险等级越高。评价结果与袋式除尘系统实际运行情况具有相关一致性,验证了模型的有效性。

参 考 文 献

- [1] LI Xinyu, CHEN Haiyan, ZHANG Yansong, et al. Research on law and mechanism of dust explosion in bag type dust collector[J]. *Advanced Powder Technology*, 2022, 33(6): DOI: 10.1016/j.fincl.2021.103666.
- [2] 姚群, 宋七棣, 陈志炜. 2020 年袋式除尘行业发展评述和展望[J]. *中国环保产业*, 2021(3):19-22.
YAO Qun, SONG Qidi, CHEN Zhiwei. Review and prospect of the development of China's bag-hose precipitation industry in 2020[J]. *China Environmental Protection Industry*, 2021(3): 19-22.
- [3] 张延青, 郑德富, 张赛. 除尘器有限空间的粉尘燃爆风险与控制措施[J]. *中国环保产业*, 2022(3):57-61.
ZHANG Yanqing, ZHENG Defu, ZHANG Sai. Dust explosion risk of dust collector in limited space and the relevant control measures[J]. *China Environmental Protection Industry*, 2022(3): 57-61.
- [4] RANI S I, AZIZ B A, GIMBUN J. Analysis of dust distribution in silo during axial filling using computational fluid dynamics: assessment on dust explosion likelihood[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2015, 96: 14-21.
- [5] ZALOSH R. Dust collector explosions: a quantitative hazard evaluation method[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 36: 258-265.
- [6] 李增杰, 白建平. 基于模糊综合分析对某通风除尘系统的探究性评价[J]. *重庆科技学院学报:自然科学版*, 2013, 15(增 1):29-32.
LI Zengjie, BAI Jianping. The evaluation of ventilation and dust removal system based on fuzzy comprehensive analysis[J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2013, 15(S1): 29-32.
- [7] 宋英杰, 王刚, 唐武生. 基于 PSR-AHP 模型的布袋式除尘系统运行稳定性分析[J]. *白城师范学院学报*, 2019, 33(6):21-29,35.
SONG Yingjie, WANG Gang, TANG Wusheng. An analysis of operation stability bag-type dust removal system based on PSR-AHP model[J]. *Journal of Baicheng Normal University*, 2019, 33(6): 21-29, 35.
- [8] YUAN Zhi, KHAKZAD N, KHAN F, et al. Risk-based optimal safety measure allocation for dust explosions[J]. *Safety Science*, 2015, 74: 79-92.
- [9] 高娟, 苑艺笑, 薛少谦, 等. 基于复合模型的干式除尘系统粉尘爆炸风险分析[J]. *工业安全与环保*, 2021, 47(9):1-5.
GAO Juan, YUAN Yixiao, XUE Shaoqian, et al. Risk analysis of dust explosion in dry dedusting system based on compound model[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2021, 47(9): 1-5.
- [10] SUN Siheng, MAO Tingting, LYU Pengfei, et al. Dust Explosion risk assessment for dry dust collector based on AHP-fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Processes*, 2022, 10(12): DOI: 10.3390/pr10122616.
- [11] NASIKA C, DIEZ P, GERARD P, et al. Towards real time assessment of earthfill dams via model order reduction[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2022, 199: DOI: 10.1016/j.fincl.2021.103666.
- [12] XIE Shuyi, CHEN Yinuo, DONG Shaohua, et al. Risk assessment of an oil depot using the improved multi-sensor fusion

- approach based on the cloud model and the belief Jensen-Shannon divergence[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, 67: DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104214.
- [13] 卢颖, 赵志攀, 姜学鹏, 等. 大数据视域下体育场馆动态火灾风险指标研究[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(4): 155-162.
- LU Ying, ZHAO Zhipan, JIANG Xuepeng, et al. Dynamic fire risk indexes for stadiums from perspective of big data[J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32(4): 155-162.
- [14] 邱泽阳, 梁伟, 王雪, 等. 油气输送动设备实时定量风险评估模型[J]. *中国安全科学学报*, 2020, 30(2): 106-112.
- QIU Zeyang, LIANG Wei, WANG Xue, et al. Real-time quantitative risk assessment model of oil and gas transmission rotating equipment[J]. *China Safety Science Journal*, 2020, 30(2): 106-112.
- [15] 中华人民共和国应急管理部. 应急管理部办公厅关于加快推进工贸行业粉尘涉爆企业安全生产风险监测预警系统建设应用的通知[EB/OL]. (2023-04-20). https://www.mem.gov.cn/gk/zfxxgkpt/fdzdgknr/202304/t20230420_448558.shtml.
- [16] AQ 4273—2016, 粉尘爆炸危险场所用除尘系统安全技术规范[S].
AQ 4273-2016, Safety specifications for dedusting system used in dust explosion hazardous area[S].
- [17] ZHANG Jialiang, KANG Jichuan, SUN Liping, et al. Risk assessment of floating offshore wind turbines based on fuzzy fault tree analysis[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 239: DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109859.
- [18] LEE L, CHENG Yong, XIE Longjun, et al. An integrated method of set pair analysis and association rule for fault diagnosis of power transformers[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015, 22(4): 2368-2378.
- [19] 江新, 王婧雯, 王耀威, 等. 突变视角下地下深埋隧洞塌方风险耦合演化研究[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(5): 103-111.
- JIANG Xin, WANG Jingwen, WANG Yaowei, et al. Study on coupling evolution of collapse risk of deep underground tunnel from perspective of catastrophe[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(5): 103-111.
- [20] 谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2000: 156-163.



作者简介: 侯羽澳 (2000—), 女, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要研究方向为安全检测技术、大数据分析。E-mail: 577658234@qq.com。