

中文引用格式:刘新,伍俊楠,潘殿琦,等. 基于改进 FMEA 的污水厂设备故障风险评估模型[J]. 中国安全科学学报,2024,34(8): 101-107.

英文引用格式:LIU Xin, WU Junnan, PAN Dianqi, et al. Equipment failure risk assessment model of wastewater treatment plant based on improved FMEA[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(8): 101-107.

基于改进 FMEA 的污水厂设备故障风险评估模型*

刘新¹副教授,伍俊楠¹,潘殿琦²教授,张以晨¹教授,张继权^{1,3}教授,柯楷¹

(1 长春工程学院 吉林应急管理学院,吉林 长春 130012; 2 长春工程学院 研究生学院,
吉林 长春 130012; 3 东北师范大学 环境学院,吉林 长春 130024)

中图分类号:X913.4

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.08.1513

资助项目:吉林省科技厅项目(20210203043SF)。

【摘要】 为保障污水处理厂正常运行,预防厂内设备发生故障,提出一种改进的故障模式与影响分析(FMEA)的风险评估模型。首先采用 FMEA 法识别污水厂设备故障模式,并结合毕达哥拉斯模糊集(PFS)刻画不确定评估信息;其次利用逐步权重评估比率分析法(SWARA)和最大偏差法计算主客观权重,通过博弈论组合权重计算3个风险因子的综合权重;然后采用多目标优化比率分析法(MOORA)对设备故障模式进行风险排序。最后以长春市Z污水厂设备故障风险评估为例,并将所提模型与传统 FMEA、毕达哥拉斯模糊(PF)-优劣解距离法(TOPSIS)和 PF-妥协折衷排序法(PF-VIKOR)等方法对比,验证该模型的有效性。结果表明:污水厂设备故障模式前3位是除砂机抽取的砂浆所含有有机物过多、膜片脱落或破裂和大块异物进入水泵。

【关键词】 污水厂; 故障模式与影响分析(FMEA); 设备故障; 风险评估; 毕达哥拉斯模糊集(PFS)

Equipment failure risk assessment model of wastewater treatment plant based on improved FMEA

LIU Xin¹, WU Junnan¹, PAN Dianqi², ZHANG Yichen¹, ZHANG Jiquan^{1,3}, KE Kai¹

(1 College of Jilin Emergency Management, Changchun Institute of Technology, Changchun Jilin 130012, China; 2 Graduate School, Changchun Institute of Technology, Changchun Jilin 130012, China; 3 School of Environment, Northeast Normal University, Changchun Jilin 130024, China)

Abstract: In order to ensure the normal operation of wastewater treatment plants and prevent equipment failures, an improved FMEA risk assessment model was proposed. Firstly, the FMEA method was used to identify the failure modes of wastewater treatment plant equipment, and it was combined with PFS to portray the uncertainty assessment information. Secondly, the subjective and objective weights were calculated using the stepwise weight assessment ratio analysis (SWARA) method and the maximum deviation method, and the comprehensive weights of the three risk factors were calculated through the game theory combination weights. Thirdly, the multi-objective optimization on basis of ratio analysis (MOORA) method was used for the equipment failure mode risk ranking. Finally, taking Changchun City Z

wastewater treatment plant equipment failure risk assessment as an example, the model proposed in this paper was compared with traditional FMEA, Pythagorean fuzzy technique for order preference by similarity to ideal solution (PF-TOPSIS), and Pythagorean fuzzy VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (PF-VIKOR), and the feasibility and effectiveness of the model were verified. The results show that the top 3 failure modes of wastewater plant equipment are that the grit extracted by the grit remover contains excessive organic matter, the diaphragm is dislodged or broken, and large foreign objects enter the pump.

Keywords: wastewater treatment plant; failure mode and effect analysis (FMEA); equipment failure; risk assessment; Pythagorean fuzzy set (PFS)

0 引言

污水处理厂(简称污水厂)是现代城市的重要基建,由于污水厂系统复杂,设备较多,一旦出现故障,将引起出水水质不达标,从而影响周边水资源可持续发展。因此,科学准确地评估污水厂设备故障风险,对设备故障风险排序,找到对系统影响最大的故障模式,并及时采取措施,对保障污水厂正常运行、促进水资源可持续发展具有重要的现实意义。

故障模式与影响分析(Failure Mode and Effect Analysis, FMEA)法是被广泛用于定义、识别和消除系统、设计过程中已知或潜在的失效、错误等,以防止意外失效的方法^[1]。目前,基于FMEA方法的污水厂设备故障风险评估,取得了一系列研究成果,例如:NIE Ru等^[2]引入多粒度语言表达FMEA团队成员的评估语言,评估了污水厂超临界水氧化系统的故障风险,并使用最优-最差法和最大偏差法求主客观权重。ALIZADEH等^[3]在研究污水厂预处理单元的设备故障风险中,基于模糊逻辑法模糊化风险因子和风险优先数(Risk Priority Number, RPN)。SHI Hua等^[4]提出了一种整合犹豫语言偏好关系和熵权法的新FMEA方法,对污水厂设备故障进行风险评估。KUMARI等^[5]将三角模糊层次分析法融入到优劣解距离法(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS)中,对污水厂常见设备故障进行风险评估。BONAB等^[6]在毕达哥拉斯模糊(Pythagorean Fuzzy, PF)背景下,将逐步权重评估比率分析(Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis, SWARA)方法融入到复比例评估法,成功建立了污水厂设备故障风险评估模型。ZHU Jianghong等^[7]基于最大偏差法—偏好顺序结构评估法混合FMEA方法,评估了超临界水氧化系统的故障风险。

综上,相关研究还存在一些不足,一是专家还未

很好地解决故障模式评估信息的定量化和不确定性问题;二是权重计算不合理;且以上研究多采用单一赋权法,这样影响评估结果的准确性和客观性。基于此,笔者拟提出一种改进的FMEA污水厂设备故障风险评估模型,并引入毕达哥拉斯模糊集(Pythagorean Fuzzy Set, PFS)表征评估信息,运用组合权重-多目标优化比率分析法(Multi-Objective Optimization on Basis of Ratio Analysis, MOORA)对设备故障模式进行排序,以确定需要优先处理的污水厂设备高风险的故障模式,降低污水厂的系统风险。

1 基于PFS和FMEA的风险评估

1.1 问题描述

判断并评估污水厂设备故障风险,以便及时对风险较大的故障模式制定对策措施,组建一个 t 位专家的FMEA团队 $TM_k(k=1,2,\dots,t)$,每个专家 TM_k 有相应的权重 λ_k ,且满足 $\sum_{k=1}^t \lambda_k = 1$ 。FMEA团队负责对 q 个风险因子 $RF_j(j=1,2,\dots,q)$ 条件下的 m 个设备故障模式 $FM_i(i=1,2,\dots,m)$ 进行风险评估。

1.2 PFS理论

YAGE^[8]提出的PFS在决策信息的模糊性和犹豫性等方面具有较好的优势,更符合实际中的不确定性^[9]。

定义1。设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为一个非空集合, $\mu_p: X \rightarrow [0, 1]$ 和 $\nu_p: X \rightarrow [0, 1]$ 为 X 到 $[0, 1]$ 区间的映射,则 X 上的一个PFS(P)定义如下:

$$P = \{ \langle x, \mu_p(x), \nu_p(x) \rangle \mid x \in X \} \quad (1)$$

式中 $\mu_p(x) \in [0, 1]$ 和 $\nu_p(x) \in [0, 1]$ 表示元素 x 属于 P 的隶属度和非隶属度,且满足条件:

$$0 \leq (\mu_p(x))^2 + (\nu_p(x))^2 \leq 1, \forall x \in X$$

定义2。元素 x 属于 P 的犹豫度定义如下:

$$\pi_p(x) = \sqrt{1 - (\mu_p(x))^2 - (\nu_p(x))^2} \quad (2)$$

那么, $p = (\mu_p(x), \nu_p(x))$ 被称为毕达哥拉斯模糊数 (Pythagorean Fuzzy Number, PFN), 记作 $p = (\mu_p, \nu_p)$ 。

常用的 PFN 运算规则可以参照文献[10-11]。

定义 3^[10-11]。设一个 PFN $p = (\mu_p, \nu_p)$, 则 p 的得分函数定义为:

$$M(p) = \mu_p^2 - \nu_p^2, M(p) \in [-1, 1] \quad (3)$$

定义 4^[11]。已知 2 个 PFN $p_1 = (\mu_1, \nu_1)$ 和 $p_2 = (\mu_2, \nu_2)$, 则定义 p_1 和 p_2 之间的毕达哥拉斯模糊距离 (Pythagorean Fuzzy Distance, PFD) 为:

$$d_{\text{PFD}}(p_1, p_2) = \frac{1}{2} (|\mu_1^2 - \mu_2^2| + |\nu_1^2 - \nu_2^2| + |\pi_1^2 - \pi_2^2|) \quad (4)$$

定义 5^[12]。令 $p_i = (\mu_i, \nu_i) (i = 1, 2, \dots, n)$ 为 PFN 集合, 那么 PFN 加权平均算子 (Pythagorean Fuzzy Weighted Averaging, PFWA), 可定义为:

$$\text{PFWA}(p_1, p_2, \dots, p_n) = \left(\sqrt{1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i^2)^{\eta_i}}, \prod_{i=1}^n (\mu_i)^{\eta_i} \right) \quad (5)$$

式中 $\eta = (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_i)$ 为 p_i 对应的权重向量, 且满足条件 $\eta_i \in [0, 1]$ 和 $\sum_{i=1}^n \eta_i = 1$ 。

1.3 改进 FMEA 的风险评估模型

步骤 1: 获取故障模式风险评估信息。专家 TM_k 用表 1 中的语言变量来评估故障模式, 将语言变量转化 PFN, 形成决策矩阵。把所有专家评估信息汇总到一个矩阵, 形成聚合评估矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} \{\mu_{11}, \nu_{11}, \pi_{11}\} & \cdots & \{\mu_{1j}, \nu_{1j}, \pi_{1j}\} \\ \vdots & & \vdots \\ \{\mu_{i1}, \nu_{i1}, \pi_{i1}\} & \cdots & \{\mu_{ij}, \nu_{ij}, \pi_{ij}\} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 $\{\mu_{ij}, \nu_{ij}, \pi_{ij}\}$ 为在风险因子 j 下第 i 个故障模式的 PFN。

表 1 语言变量及 PFN

Table 1 Linguistic variables and PFN

故障模式语言变量	风险因子权重语言变量	PFN
极其低 (EL)	极其不重要 (EUI)	(0.10, 0.99)
非常低 (VL)	非常不重要 (VUI)	(0.10, 0.97)
低 (L)	不重要 (UI)	(0.25, 0.92)
稍微低 (ML)	稍微不重要 (MUI)	(0.40, 0.87)
一般 (F)	一般 (F)	(0.50, 0.80)
稍微高 (MH)	稍微重要 (MI)	(0.60, 0.71)
高 (H)	重要 (I)	(0.70, 0.60)
非常高 (VH)	非常重要 (VI)	(0.80, 0.44)
极其高 (EH)	极其重要 (EI)	(1.00, 0.00)

步骤 2: 本文采用 SWARA 方法^[13] 计算主观

权重。

1) 成员根据重要程度对风险因子进行优先排序, 将最重要的风险因子放在第一位, 并得到 1 分, 其余的风险因子通过式 (3) 计算得分值降序排序。

2) 确定风险因子的相应重要性 (IM_j) 和计算系数 (b_j)。

$$b_j = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ \text{IM}_j + 1 & j > 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中 b_j 表示每个风险因子相对于上一个邻近风险因子的重要性。

3) 计算每个风险因子的初始权重 (c_j)。

$$c_j = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ \frac{b_{j-1}}{b_j} & j > 1 \end{cases} \quad (8)$$

4) 计算最终的主观权重。

$$\omega_j^s = \frac{c_j}{\sum_{j=1}^n c_j} \quad (9)$$

步骤 3: 本文采取最大偏差法计算客观权重。假设风险因子的权重向量为 $\omega^o = (\omega_1^o, \omega_2^o, \dots, \omega_q^o)$ 。如果风险因子的权重完全未知时, 构建一个线性规划模型推导最优权重向量如下:

$$\begin{cases} \max V_j(\omega') = \sum_{j=1}^q \sum_{i=1}^m V_{ij}(\omega') = \\ \sum_{j=1}^q \sum_{i=1}^m \sum_{g=1}^m d_{\text{PFD}}(r_{ij}, r_{hj}) \cdot \omega'_j \\ \text{s. t.} \quad \sum_{j=1}^q \omega'_j = 1, \quad \omega'_j \geq 0, \\ j = 1, 2, \dots, q \end{cases} \quad (10)$$

式中: $V_j(\omega')$ 为所有风险因子条件下故障模式 FM_i 对其他风险因子的偏差; $V_{ij}(\omega')$ 为对于所有风险因子条件下故障模式 FM_i 对其他风险因子的偏差; $d_{\text{PFD}}(r_{ij}, r_{hj})$ 为 2 个 PFN 的距离, 可用式 (4) 计算出来; r_{ij} 为在风险因子 j 条件下故障模式 i 的评估信息; r_{hj} 为在风险因子 j 条件下故障模式 h 的评估信息。

通过求解式 (10), 可用下式归一化处理最优权重向量:

$$\omega_j^o = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{g=1}^m d_{\text{PFD}}(r_{ij}, r_{hj})}{\sum_{j=1}^q \sum_{i=1}^m \sum_{g=1}^m d_{\text{PFD}}(r_{ij}, r_{hj})} \quad (11)$$

式中 ω_j^o 为风险因子 j 的客观权重。

步骤4:使用博弈论组合赋权法计算综合权重。将不同权重方法有机结合,获得相对均衡的最优组合权重^[14]。综合权重 ω_j 具体的计算步骤可见文献[15]。

步骤5:故障模式排序。在PF环境下,本文使用MOORA方法进行故障模式排序,步骤如下:

1) 构建加权矩阵 R' 。

$$R' = R \cdot \omega =$$

$$\begin{bmatrix} \{\mu'_{11}, \nu'_{11}, \pi'_{11}\} & \cdots & \{\mu'_{1j}, \nu'_{1j}, \pi'_{1j}\} \\ \vdots & & \vdots \\ \{\mu'_{i1}, \nu'_{i1}, \pi'_{i1}\} & \cdots & \{\mu'_{ij}, \nu'_{ij}, \pi'_{ij}\} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中 $\{\mu'_{ij}, \nu'_{ij}, \pi'_{ij}\}$ 为在风险因子 j 下第 i 个故障模式的加权 PFN。

2) 计算收益型指标总和 BN_i 与成本型指标总和 C_i 。

收益型指标表示数值越高越好,而成本型指标表示数值越低越好, BN_i 与 C_i 见下式:

$$\begin{cases} BN_i = \sum_{j=1}^g (\mu'_{mj}, \nu'_{mj}, \pi'_{mj}) \\ C_i = \sum_{j=g+1}^m (\mu'_{mj}, \nu'_{mj}, \pi'_{mj}) \end{cases} \quad (13)$$

3) 对 BN_i 和 C_i 去模糊化。

$$\begin{cases} M_{BN_i} = (\mu_{BN_i})^2 - (\nu_{BN_i})^2 \\ M_{C_i} = (\mu_{C_i})^2 - (\nu_{C_i})^2 \end{cases} \quad (14)$$

式中: M_{BN_i} 为收益型指标总和的得分函数; M_{C_i} 为成本型指标总和的得分函数。

4) 计算故障模式总体评分函数 My_i 。

$$My_i = M_{BN_i} - M_{C_i} \quad (15)$$

5) 故障模式 FM_i 排序。根据 My_i 的大小进行降序排序, My_i 越大,风险排序越高;反之,则风险排序越低。

2 设备故障风险评估案例分析

长春市 Z 污水厂位于吉林省长春市南部,占地面积 21.2 hm²。该污水厂处理规模达到 25 万

m³/d,采用一次沉淀、二次沉淀,改良“厌氧-缺氧-好氧”生物脱氮除磷(A₂O)+滤布滤池等主要工艺,主要设备有细格栅、粗格栅、水泵、除砂机、鼓风机、周边刮泥机、紫外线灯等等。为了验证本文所提改进 FMEA 模型的可行性和有效性,将其应用在该污水厂设备风险评估,以得到故障模式的风险排序,降低污水厂运行风险。

2.1 风险评估过程

由 5 位专家组成 FMEA 团队,对污水厂设备进行风险因子严重性 S 、频率 O 和可检测性 D 以及风险因子条件下的设备故障模式评估。团队成员由一位生产副厂长、一位安全管理部门部长、一位生产部门部长以及 2 位运行班班长组成,根据他们教育背景工作经验等,按照文献[16]计算得出他们的权重为 0.232,0.214,0.196,0.179,0.179。团队一共识别出 30 个设备故障模式,由于篇幅的限制,本文列出风险较高的 9 个设备故障模式,见表 2。

步骤 1:故障模式风险评估信息的获取。

专家团队以语言变量给出对风险因子 RF_j 条件下的 FM_i 评价信息,见表 3。根据表 1,将各专家评估信息转化为 PFN 形成决策矩阵,通过式(5)将所有专家的评估信息汇总到聚合评价矩阵 R 。

表 2 设备故障模式

Table 2 Equipment failure modes

序号	故障模式	可能导致的后果
FM ₁	粗格栅杂物缠绕	过滤功能不佳
FM ₂	限位开关故障或结冰	机器设备停机不工作
FM ₃	大块异物进入水泵	损坏水泵
FM ₄	集水井泥沙或淤泥增多	进水泵堵塞
FM ₅	除砂机抽取的砂浆所 含有机物过多	除砂率降低
FM ₆	破碎机损坏	污泥无法及时排除
FM ₇	膜片脱落或破裂	曝气不足
FM ₈	周边传动刮泥机与 积雪接触打滑	无法排泥
FM ₉	悬浮固体沉积在 紫外线管表面	消毒不彻底

表 3 设备故障模式专家语言变量评估结果

Table 3 Linguistic evaluation information of equipment failure modes

序号	S					O					D				
	TM ₁	TM ₂	TM ₃	TM ₄	TM ₅	TM ₁	TM ₂	TM ₃	TM ₄	TM ₅	TM ₁	TM ₂	TM ₃	TM ₄	TM ₅
FM ₁	VH	H	VH	VH	H	VH	MH	H	VH	H	ML	MH	F	ML	ML
FM ₂	MH	MH	F	MH	F	VH	MH	L	VH	MH	ML	F	VH	L	F
FM ₃	VH	VH	F	VH	H	MH	F	ML	MH	F	VH	H	VH	F	H

续表 3

序号	S					O					D				
	TM ₁	TM ₂	TM ₃	TM ₄	TM ₅	TM ₁	TM ₂	TM ₃	TM ₄	TM ₅	TM ₁	TM ₂	TM ₃	TM ₄	TM ₅
FM ₄	MH	MH	H	MH	MH	F	VH	MH	F	MH	H	VH	L	MH	MH
FM ₅	VH	VH	H	H	H	VH	VH	VH	VH	VH	F	VH	VH	VH	H
FM ₆	MH	MH	H	MH	MH	L	MH	MH	F	F	VH	VH	MH	VH	H
FM ₇	H	H	VH	H	H	L	VH	MH	H	MH	VH	VH	VH	VH	VH
FM ₈	VH	H	H	VH	H	ML	VH	L	ML	ML	L	L	VH	H	F
FM ₉	VH	H	H	H	H	ML	VH	L	ML	ML	L	VL	F	ML	L

步骤 2: 计算主客观权重。FMEA 团队成员采用语言变量的形式评估 3 个风险因子, 结果见表 4。根据表 1, 将表 4 中的语言变量转换为 PFN, 并根据团队成员的权重, 通过式 (5) 形成 PFWA 矩阵; 然后通过式 (7) 一式 (9) 计算主客观权重, 结果见表 5。

步骤 3: 通过式 (10) 计算风险因子的客观权重, 结果见表 5。

步骤 4: 综合前 2 个步骤计算主观和客观权重, 通过博弈论组合赋权法计算 3 个风险因子的综合权重, 结果见表 5。

步骤 5: 设备故障模式排序。通过根据式 (12) 一式 (15) 计算出每个故障模式的 M_{yi} 得分, 确定设备故障模式风险顺序为: $FM_5 > FM_7 > FM_3 > FM_6 > FM_4 > FM_1 > FM_8 > FM_2 > FM_9$ 。风险排序最高的 FM_5 , 其次是 FM_7 与 FM_3 。管理者应充分利用有限资源, 针对风险比较大的故障模式制定对应的控制措施。

表 4 风险因子专家语言变量评估结果

Table 4 Linguistic evaluation information of risk factors

风险因子	TM ₁	TM ₂	TM ₃	TM ₄	TM ₅
S	VI	VI	MI	VI	VI
O	I	VI	M	MI	I
D	MI	M	I	M	MI

表 5 风险因子的权重

Table 5 Weight of risk factors

风险因子	客观权重	主观权重	综合权重
S	0.226	0.378	0.270
O	0.323	0.330	0.325
D	0.451	0.292	0.405

2.2 灵敏度和比较分析

考虑风险因子权重对排序结果的影响, 本文采用增量占比变化方法^[17]进行灵敏度分析, 结果如图 1 所示。在所有灵敏度变化方案中, 有 4 个故障模式排名发生了改变, 占有故障模式的 44.4%, 说明风险因子的权重对故障模式排序结果有重要影响。因此, 应根据成员意见和实际情况, 合理确定风

险因子权重。

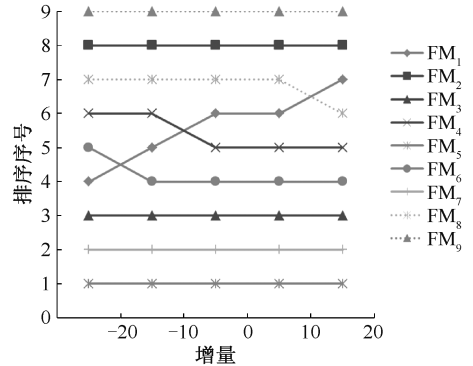


图 1 风险因子权重灵敏度分析

Fig. 1 Sensitivity analysis of risk factors weights

为了说明改进 FMEA 模型的差异性和优越性, 将该模型与其他方法 (包括传统 FMEA, PF-TOPSIS^[10] 和 PF-VIKOR^[18]) 进行对比, 见表 6。从表 6 可以看出, 4 种方法给出风险最高设备故障模式是 FM_5 。在风险最低的设备故障模式中, 除了 PF-VIKOR 法为 FM_2 , 其他方法均为 FM_9 。除了 FM_5 和 FM_7 之外, 这 4 种方法中每种设备故障模式的排序顺序并不完全一致, 造成这些差异的主要原因包括以下 2 个方面:

1) 本文使用 PFS 克服传统 FMEA 无法反映评估信息不确定性和模糊性的缺点。

2) PF-TOPSIS 和 PF-VIKOR 方法中的风险因子权重主要由评估者主观分配, 而本文模型使用博弈论组合赋权法计算综合权重, 使风险因子的权重更加客观合理。

将这 3 种方法与传统 FMEA 方法进行相关性^[19]分析, 结果如图 2 所示。PF-VIKOR 方法相关系数为 0.900, 说明与传统 FMEA 方法结果具有较高的相关性。其次, PF-TOPSIS 方法相关系数为 0.917, 比 PF-VIKOR 稍微高些。而本文提出模型的相关系数最高, 说明提出模型获得的结果跟传统 FMEA 最相似。因此, 所提出模型更能客观地评估污水厂设备故障风险。

表 6 本文模型与传统 FMEA 方法、PF-TOPSIS 和 PF-VIKOR 的结果比较

Table 6 Comparison of results of proposed model with traditional FMEA methods, PF-TOPSIS and PF-VIKOR

故障模式序号	经典 FMEA		PF-TOPSIS		PF-VIKOR		本文模型	
	RPN	排序	贴近度 CC_i	排序	综合值 CQ_i	排序	My_i	排序
FM ₁	248	4	0.592	3	0.128	3	0.102	6
FM ₂	157.2	8	0.347	8	0.390	9	-0.020	8
FM ₃	261.8	3	0.579	4	0.222	4	0.304	3
FM ₄	223.2	6	0.442	6	0.288	6	0.117	5
FM ₅	435.2	1	0.913	1	-0.085	1	0.672	1
FM ₆	226.8	5	0.435	7	0.338	7	0.189	4
FM ₇	345.6	2	0.757	2	0.082	2	0.505	2
FM ₈	159.2	7	0.460	5	0.257	5	0.084	7
FM ₉	101.8	9	0.226	9	0.352	8	-0.417	9

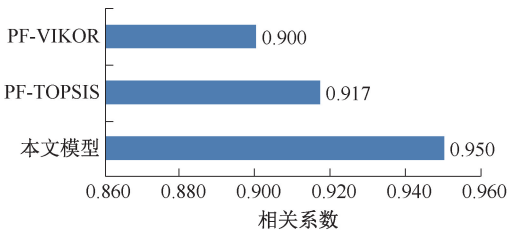


图 2 3 种方法的相关性分析结果

Fig. 2 Correlation analysis results of three methods

3 结论

1) 将 PFS 语言变量作为专家对污水厂各风险因子和故障模式的评估信息,减少了人为的主观性,

并以数值的形式清晰地反映了设备故障模式风险水平,为污水厂设备风险管理提供有效方法。

2) 借助 SWARA、最大偏差法和博弈论组合赋权法计算设备故障风险因子主客观权重和综合权重,使权重计算更加均衡。利用 MOORA 法对故障模式的风险程度进行排序,提高了评估结果的准确性。

3) 结合案例验证本文提出改进 FMEA 模型是可靠和有效的。随着污水厂设备逐渐升级,设备故障模式日益复杂,故障模式之间可能存在关联性,今后需考虑这种关联性。

参考文献

[1] 吴耀男,林雷,任新温,等. 一种基于逻辑结构数的改进型 FMEA 方法[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(10): 97-104.
WU Yaonan, LIN Lei, REN Xinwen, et al. An improved FMEA method based on logical structure number[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(10): 97-104.

[2] NIE Ru, TIAN Zhangpeng, WANG Xiaokang, et al. Risk evaluation by FMEA of supercritical water gasification system using multi-granular linguistic distribution assessment[J]. Knowledge-Based Systems, 2018, 162: 185-201.

[3] ALIZADEH S S, SOLIMANZADEH Y, MOUSAVI S, et al. Risk assessment of physical unit operations of wastewater treatment plant using fuzzy FMEA method: a case study in the northwest of Iran[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2022, 194(9): DOI:10.1007/s10661-022-10248-9.

[4] SHI Hua, LIU Zheng, LIU Huchen. A new linguistic preference relation-based approach for failure mode and effect analysis with dynamic consensus reaching process [J]. Information Sciences, 2022, 610: 977-993.

[5] KUMARI S, AHMAD K, KHAN Z A, et al. Failure mode and effects analysis of common effluent treatment plants of humid sub-tropical regions using fuzzy based MCDM methods[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 145: DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.107010.

[6] BONAB S R, OSGOOEI E. Environment risk assessment of wastewater treatment using FMEA method based on Pythagorean fuzzy multiple-criteria decision-making[J]. Environment, Development and Sustainability, 2022: DOI: 10.1007/s10668-022-02555-5.

[7] ZHU Jianghong, SHUAI Bin, LI Guofang, et al. Failure mode and effect analysis using regret theory and PROMETHEE

- under linguistic neutrosophic context [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, 64: DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104048.
- [8] YAGER R R. Pythagorean membership grades in multicriteria decision making[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2013, 22(4): 958–965.
- [9] ILBAHAR E, KARAŞAN A, CEBİ S, et al. A novel approach to risk assessment for occupational health and safety using Pythagorean fuzzy AHP & fuzzy inference system [J]. *Safety Science*, 2018, 103: 124–136.
- [10] ZHANG Xiaolu, XU Zeshui. Extension of TOPSIS to multiple criteria decision making with Pythagorean fuzzy sets[J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2014, 29(12): 1 061–1 078.
- [11] PENG Xindong, YANG Yong. Some results for Pythagorean fuzzy sets [J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2015, 30(11): 1 133–1 160.
- [12] ZHANG Xiaolu. A novel approach based on similarity measure for Pythagorean fuzzy multiple criteria group decision making[J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2016, 31(6): 593–611.
- [13] KERŠULIENĖ V, TURSKIS Z. Integrated fuzzy multiple criteria decision making model for architect selection[J]. *Technological and Economic Development of Economy*, 2011, 17(4): 645–666.
- [14] 周英豪,王文杰,卢西洲,等. 岩爆灾害博弈论组合赋权预测模型及应用[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(7): 105–112.
- ZHOU Yinghao, WANG Wenjie, LU Xizhou, et al. Combination weighting prediction model and application of rock burst disaster based on game theory[J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32(7): 105–112.
- [15] 辛酉阳,杨德磊,方前程. 改进 GRA-TOPSIS 模型在装配式建筑施工风险评估中的应用[J]. *安全与环境学报*, 2023, 23(7): 2 212–2 222.
- XIN Youyang, YANG Delei, FANG Qiancheng. Application of improved GRA TOPSIS model in risk assessment of prefabricated building construction[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2023, 23(7): 2 212–2 222.
- [16] 闫帅平. 基于 WSR-FPP 和云模型的地铁车站火灾安全评价[J]. *消防科学与技术*, 2021, 40(2): 279–283.
- YAN Shuaiping. Fire safety evaluation of subway station based on WSR-FPP and cloud model[J]. *Fire Science and Technology*, 2021, 40(2): 279–283.
- [17] KOKSALMIS E, KABAK Ö. Deriving decision makers' weights in group decision making: an overview of objective methods[J]. *Information Fusion*, 2019, 49: 146–160.
- [18] GUL M, AK M F, GUNERI A F. Pythagorean fuzzy VIKOR based approach for safety risk assessment in mine industry[J]. *Journal of Safety Research*, 2019, 69: 135–153.
- [19] ATTRI S D, SINGH S, DHAR A, et al. Multi-attribute sustainability assessment of wastewater treatment technologies using combined fuzzy multi-criteria decision-making techniques[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 357: DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131849.



作者简介: 刘新 (1976—),女,辽宁阜新人,博士,副教授,主要从事污水处理厂水质安全方面的研究。E-mail: sh_lx@ccit.edu.cn。