

# 基于改进组合赋权法和云模型的泵站运行状态评价方法

曾涛<sup>1</sup>, 秦钟建<sup>2</sup>, 刘良<sup>2</sup>, 张社荣<sup>1</sup>, 王泉华<sup>1</sup>, 王超<sup>1</sup>, 贾贺<sup>1</sup>

(1. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室; 2. 中水淮河规划设计研究有限公司)

**摘要:** 针对泵站运行状态评价方法缺乏、传统的赋权及评价方法不确定性强、结果失真等问题, 提出了一种基于改进组合赋权法和云模型的泵站运行状态评价方法。通过构建包含安全状态监测、技术性能和运行经济性3个准则的评价指标体系, 利用模糊AHP-DEMATEL确定主观权重, 基于泵站历史运行数据采用CRITIC法确定客观权重, 二者结合得到组合权重, 最终采用云模型进行评价。实例验证结果表明, 该方法能有效处理评价中的不确定性和模糊性, 可用于数字孪生泵站系统, 实现监测、评估和预警一体化管理。

**关键词:** 泵站运行状态评价; AHP-DEMATEL; CRITIC法; 组合赋权; 云模型; 数字孪生

**An evaluation method for pump station operation status based on improved combined weighting method and cloud model**//Zeng Tao<sup>1</sup>, Qin Zhongjian<sup>2</sup>, Liu Liang<sup>2</sup>, Zhang Sherong<sup>1</sup>, Wang Xiaohua<sup>1</sup>, Wang Chao<sup>1</sup>, Jia He<sup>1</sup> (1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University; 2. China Water Huaihe Planning and Design Research Co., Ltd.)

**Abstract:** To address the lack of effective methods for evaluating the operation status of pump stations, as well as the high uncertainty and result distortion associated with traditional weighting and evaluation approaches, an evaluation method for pump station operation status based on improved combined weighting method and cloud model is proposed. An evaluation indicator system is constructed, consisting of three criteria: safety status monitoring, technical performance, and operational economy. The subjective weights are determined using the fuzzy AHP-DEMATEL method, while the objective weights are obtained through the CRITIC method based on historical operation data of the pump station. The combined weights are then derived by integrating the subjective and objective weights, and the operation status of the pump station is finally evaluated through the cloud model. Application examples verify that the proposed method can effectively handle uncertainty and fuzziness in the evaluation process. It can be applied to digital twin pump station systems, enabling integrated management of monitoring, evaluation, and early warning.

**Key words:** pump station operation status evaluation; AHP-DEMATEL; CRITIC method; combined weighting; cloud model; digital twin

泵站作为水资源调度和管理的重要设施, 在城市供水、防洪排涝等领域扮演着重要角色。随着其运行时间的增加, 机组可能因故障或事故而停机, 导致供水中断, 并带来重大经济损失甚至人员伤亡。因此, 泵站运行状态评估是其运行管理和检修维护的重要内容。泵站运行系统复杂, 运行数据及影响安全可靠运行的因素众多。因此, 需建立科学、全面的运行状态评价方法, 以实现从传统的计划检修向状态检修的转变, 从而提高泵站管理水平。

目前常见的综合评价方法有层次分析法

(AHP)<sup>[1]</sup>、物元可拓法<sup>[2]</sup>、神经网络<sup>[3]</sup>、逼近理想解排序法(TOPSIS)<sup>[4]</sup>等。近年来, 部分学者将模糊综合评价法用于电力设备<sup>[5-7]</sup>、风电机组<sup>[8-9]</sup>、铁路<sup>[10]</sup>等领域, 验证了其在处理复杂系统不确定性方面的有效性。由于单一权重确定方法存在片面性, 因此将主观赋权法和客观赋权法相结合的组合赋权法得到了广泛应用。例如, 周兰庭等<sup>[11]</sup>针对土石坝运行安全评价问题, 将序关系分析法(G1)和改进熵权法组合获得了评价指标的主客观权重, 能更客观地反映土石坝的真实运行状态; 张晓峰等<sup>[12]</sup>以望虞河西

**基金项目:** 水利部重大科技项目(SKS-2022133); 天津大学自主创新基金项目(2023XJD-0065)

**作者简介:** 曾涛(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事智慧水利和水工结构研究。E-mail: 2496175976@qq.com

**通信作者:** 王泉华(1992—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事智慧水利和水工结构研究。E-mail: tjdamwxh@163.com

岸圩区为研究区,构建了水动力-水质模型和多目标评价指标体系,并采用 AHP-熵权法主客观相结合确定指标权重,优选单圩及联合调度方案;计蓉等<sup>[13]</sup>针对电力设备的状态数据质量评价提出了模糊 AHP-熵权法。传统模糊评价法中的指标隶属度通过设定隶属度函数直接得到,降低了其对系统模糊性和不确定性评估的准确性和适用性。而李德毅等<sup>[14]</sup>提出的云模型理论通过定性概念和定量数据之间的相互转换,能够适应复杂系统分析的模糊性。已有许多学者将云模型与组合赋权法结合以分别确定隶属度和权重的方法应用于各种复杂系统的健康状态评估中。例如:宋亮亮等<sup>[15]</sup>考虑韧性评价的模糊性和随机性,构建了基于 G1-决策试验与评价试验法 (DEMATEL) 和云模型的水利工程运行安全韧性评价模型,并验证了其合理性;高玉琴等<sup>[16]</sup>构建了城市洪涝灾害韧性评价指标体系,采用可拓 AHP 和熵权法结合博弈论进行组合赋权,对城市洪涝灾害韧性进行了评价并证明了其有效性。

针对泵站运行状态评价研究,吕淑然等<sup>[17]</sup>基于事故致因理论,综合运用 DEMATEL-网络分析法 (ANP)-灰色关联分析法 (GRA) 构建了泵站运行安全综合评价体系;王鑫等<sup>[18]</sup>利用 AHP 与云模型定量评价了泵站现代化管理水平;高盛等<sup>[19]</sup>采用序列二次规划法 (SQP) 对泵站建筑物安全进行了综合评价,与实际情况吻合程度较高。以上研究多集中于泵站运行或建筑物安全评价,构建的评价指标体系中定性指标居多,因此具有较强的主观性和模糊性,权重求解缺乏客观性和全面性,且较少涉及技术性指标,影响评估结果的准确性。

鉴于此,本文构建立式机组泵站运行状态评价指标体系,引入模糊 AHP-DEMATEL 确定主观权重,结合泵站历史运行数据使用 CRITIC 法确定客观权重,并采用拉格朗日乘子法得到主客观组合权重。针对泵站运行状态评价存在的不确定性和模糊性问题,采用云模型评价方法得到泵站运行状态等级,并将该方法集成到数字孪生泵站运行管控系统中,以期实现泵站运行状态监测、评估及预警的一体化管理。

## 1 评价指标体系构建

基于南水北调东线某立式机组泵站 2021—2023 年运行监测数据,并结合相关规范和文献<sup>[20]</sup>,构建包含机组安全状态监测、技术性能、运行经济性 3 个准则层的泵站运行状态评价指标体系。其中,安全状态监测指标包括机组电机、轴承等的温度及振摆参数等;技术性能指标包括扬程、电机

运行参数、流量等的稳定性以及机组启停频次等,稳定性采用离散系数量化表示;运行经济性指标包括单位能耗和成本等。

为简化评价过程并提高结果可靠性,首先剔除停机时段数据,并依据运行日志及  $3\sigma$  准则校核异常数据,对缺失数据按变量数据特征采用线性插值、前向填充或滑动平均等方法进行插值,对连续缺失超过 3 h 的数据予以剔除。预处理后对数据进行归一化,利用相关性分析以约简指标集。

采用 Spearman 相关性分析研究同一准则层各指标间的相关性。结果表明,部分温度监测及电机运行参数的相关系数较高(超过 0.85)。结合灰色关联度验证,其分析结果一致。在保留关键安全状态监测指标的前提下,对于强相关性指标取离散系数较高者为代表,并将多监测点同类变量合并为单一指标,避免指标冗余并保留信息特征。最终形成包含 32 个指标的评价指标体系,见图 1。

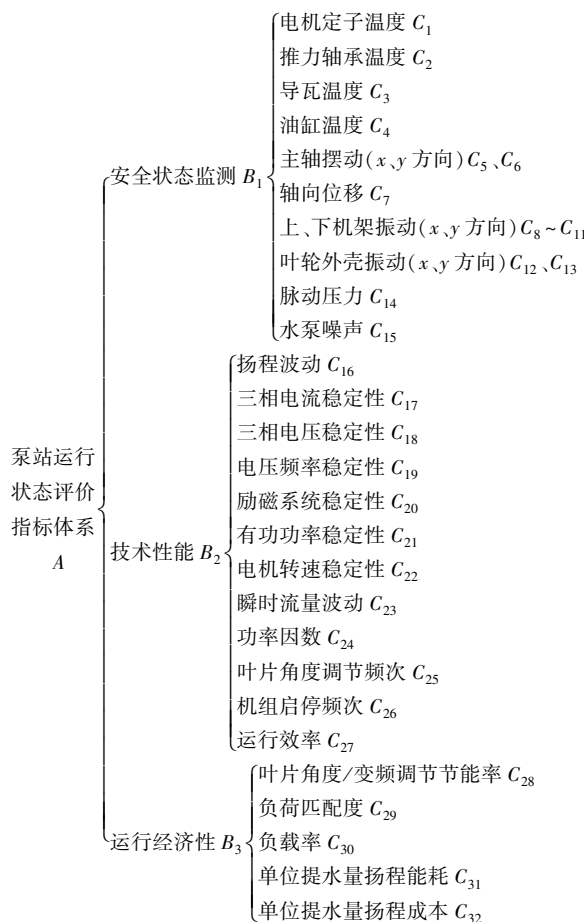


图 1 泵站运行状态评价指标体系

## 2 改进主客观组合赋权法

### 2.1 主观权重确定

#### 2.1.1 主观初始权重

泵站运行状态评价涉及多指标综合判断,传统 AHP 依赖专家经验,难以避免主观模糊性<sup>[21]</sup>。为

提高判断可靠性,本文采用改进模糊 AHP 法,将指标间重要程度表示为三角模糊数 $(l, m, u)$ ,其中 $l$ 为最小可能值, $m$ 为最可能值, $u$ 为最大可能值;并将传统 9 标度法<sup>[22]</sup>简化为 5 标度法,以降低决策复杂性。主要步骤为:①收集  $K$  个专家对同一准则项  $B_i(t=1,2,3)$  下  $n$  个指标  $C_i$  间的重要程度评分,建立模糊判断矩阵  $A$ ;②将  $A$  转换为模糊一致性矩阵  $\tilde{A}$ ;③对  $\tilde{A}$  归一化得到指标模糊权重向量  $\tilde{W}=(\tilde{w}_i)_n$ ,其中, $\tilde{w}_i$  为归一化后的模糊权重;④使用重心法去模糊化,得到主观初始权重  $\hat{w}_i$ ,与准则项权重  $\hat{w}_{B_i}$  相乘得到指标总体权重  $w'_i$ 。

### 2.1.2 主观综合权重

AHP 能确定指标的相对重要性,但未考虑实际问题中指标间可能存在的相互影响和交叉关系<sup>[23]</sup>。因此,引入模糊 DEMATEL 分析系统内部的因果关系,通过中心度和原因度确定指标间的相互影响关系<sup>[21]</sup>,优化权重分配。主要步骤如下:①将专家对指标间相互影响程度的评分转换为三角模糊数,构建直接影响矩阵  $M=(d_{ij})_{n \times n}$ ;②对  $M$  进行标准化处理,得到标准化直接影响矩阵  $\tilde{M}$ ;③计算综合影响矩阵  $\tilde{T}$ ,并将其去模糊化,得到  $T=(t_{ij})_{n \times n}$ ;④根据  $T$  计算各指标影响度  $D_i$ 、被影响度  $C_i$ 、中心度  $M_i$  和原因度  $R_i$ ;⑤将中心度  $M_i$  归一化后得到主观调整权重  $\hat{w}_i$ ,与准则项权重  $\hat{w}_{B_i}$  相乘得到总体调整权重  $w''_i$ ;⑥基于初始权重与调整权重,使用拉格朗日乘子法<sup>[24]</sup>得到主观综合权重  $w_{i,s}$ :

$$w_{i,s} = \sqrt{w'_i w''_i} / \sum_{i=1}^n \sqrt{w'_i w''_i} \quad (1)$$

### 2.2 主客观组合权重确定

为降低主观赋权的经验判断偏差,采用 CRITIC 法处理泵站大量历史运行数据,确定客观权重<sup>[25]</sup>。该方法由 Diakoulaki 等<sup>[26]</sup>提出,是一种基于数据客观属性(对比强度和冲突性<sup>[4]</sup>)的权重计算方法。主要步骤如下:①将预处理后的各指标数据序列进行正向化或逆向化处理,得到标准化数据矩阵  $Z=(z_{ij})_{n \times m}$ ;②计算各指标的标准差  $\sigma_i$  以表征其对比强度;③计算相关系数矩阵  $R=(r_{ij})_{n \times n}$  以衡量指标间冲突性,其中  $r_{ij}$  为指标  $i$  与指标  $j$  的相关系数;④结合  $\sigma_i$  与  $r_{ij}$  确定指标的信息量  $G_i = \sigma_i \sum_{j=1}^n (1 - |r_{ij}|)$ ;⑤将  $G_i$  归一化后得到各指标的客观权重  $w_{i,o}$ 。

结合指标主观权重  $w_{i,s}$  和客观权重  $w_{i,o}$ ,使用拉格朗日乘子法得到各指标主客观组合权重  $w_i$ 。

## 3 基于云模型的泵站运行状态评价方法

泵站运行状态评价涉及多指标、多尺度数据,具

有模糊性和不确定性特征。云模型是一种结合模糊数学和概率统计的数学模型,通过云发生器能够实现定性概念与定量数据间的相互转化<sup>[15]</sup>,将指标数据映射至评价等级,兼顾模糊性和随机性。正态云模型的核心思想是通过云滴 $(x, \mu)$ ( $x$  为云滴值, $\mu$  为隶属度)表达模糊概念的分布特性,每个云滴以云参数 $(E_x, E_n, H_e)$ 描述,其中  $E_x, E_n, H_e$  分别表示期望、熵、超熵。

### 3.1 评价等级正态标准云及隶属度

#### 3.1.1 评价等级正态标准云

将泵站运行状态划分为 5 个等级:优秀、良好、一般、较差、差,基于指标相对状态参数及黄金分割法确定各等级标准云的相对状态区间。等级评价标准云可采用完整云或半云<sup>[27]</sup>,对于优秀和差两个边界等级,采用半云形式以避免评价结果离散。

各评价等级标准云参数为<sup>[27]</sup>:

$$\begin{cases} E_x = (S_{\max} + S_{\min})/2 \\ E_n = (S_{\max} - S_{\min})/3 \\ H_e = 0.05 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $S_{\min}, S_{\max}$  分别为相对状态区间的下限、上限。

各评价等级的相对状态区间及云参数见表 1,将标准云参数输入正向云生成器,得到标准云模型,见图 2。依据评价指标云图与标准云的相对位置可初步判别所处的状态等级。

表 1 等级评价标准及其云参数

评价等级	相对状态区间	云参数
优秀	0.85~1.00	(1,0.1,0.05)
良好	0.60~<0.85	(0.725,0.083,0.05)
一般	0.40~<0.60	(0.5,0.067,0.05)
较差	0.15~<0.40	(0.275,0.083,0.05)
差	0~<0.15	(0,0.1,0.05)

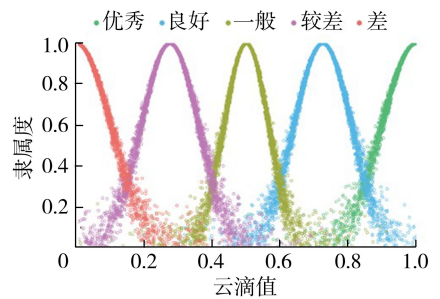


图 2 标准云模型

#### 3.1.2 隶属度

对于评价云位于两个评价等级中间或因数据离散导致雾化严重等情况,目视判断存在误差。因此,引入云隶属度  $\mu$  定量表征评价云对各等级的归属程度。由于云滴数量直接影响隶属度计算结果的稳定性与准确性,以评价云 $(0.81, 0.01, 0.004)$ 对良好等级 $(0.725, 0.083, 0.05)$ 的隶属度为例,分别取

500、1000、2000、5000、10000 云滴数得到相应的隶属度计算解,进行 30 次随机试验验证误差。以云滴数为无穷大时的结果为精确解,取 100 万次计算结果作为标准值  $E_\mu$ 。计算不同云滴数下的误差绝对值,结果如图 3 所示。

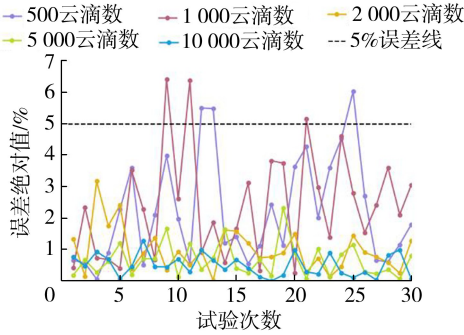


图 3 不同云滴数误差变化

由图 3 可知,随着云滴数的增加,计算误差及其波动逐渐减小。云滴数为 500 和 1000 时,多次出现误差超过 5% 且波动较大;云滴数为 2000 时,误差均控制在 5% 以内且波动明显减小;进一步增加云滴数,改进幅度不显著。综合考虑计算准确性和效率,选取 2000 云滴数计算隶属度。

### 3.2 综合评价云模型

#### 3.2.1 相对状态参数

考虑不同指标原始数据的量纲和趋势差异,将数据序列转化为相对状态参数  $S(x)$  以统一表征各指标优劣程度,其取值范围为  $[0, 1]$ ,其中 1 表示最佳状态,0 表示最差状态。根据指标属性分为越大越优型、越小越优型、适度型 3 类,计算公式分别为:

$$S(x) = \begin{cases} 1 & x > x_{\max} \\ (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) & x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ 0 & x < x_{\min} \end{cases} \quad (3)$$

$$S(x) = \begin{cases} 1 & x < x_{\min} \\ (x_{\max} - x) / (x_{\max} - x_{\min}) & x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ 0 & x > x_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

$$S(x) = \begin{cases} 0 & x < x_{\min} \\ (x - x_{\min}) / (\bar{x} - x_{\min}) & x_{\min} \leq x \leq \bar{x} \\ (x_{\max} - x) / (x_{\max} - \bar{x}) & \bar{x} < x \leq x_{\max} \\ 0 & x > x_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $x$  为指标实际数据;  $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$  分别为指标的上、下限值;  $\bar{x}$  为最优值。

#### 3.2.2 评价云参数与评价结果

将各指标的相对状态参数输入逆向云发生器得

到云参数,并利用正向云发生器生成指标云图,根据云参数计算其相对各评价等级的隶属度。假设某指标共有  $n$  个数据,其云参数按下式计算:

$$\begin{cases} E_{xi} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_j \\ E_{ni} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |S_j - E_{xi}| \\ H_{ei} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (S_j - E_{xi})^2 - E_{ni}^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $S_j$  为第  $j$  个数据的相对状态参数。

在指标层基础上引入权重  $w_i$  构建准则层云模型,结合隶属度可得到其对应评价等级。假设准则层  $B_i$  包含  $m$  个指标,其云参数按下式计算:

$$\begin{cases} E_{xB_i} = \sum_{i=1}^m w_i E_{xi} / \sum_{i=1}^m w_i \\ E_{nB_i} = \sqrt{\sum_{i=1}^m w_i E_{ni}^2} / \sum_{i=1}^m w_i \\ H_{eB_i} = \sqrt{\sum_{i=1}^m w_i H_{ei}^2} / \sum_{i=1}^m w_i \end{cases} \quad (7)$$

同理,根据准则层权重  $w_{B_i}$  计算得到目标层云参数 ( $E_{x_A}, E_{n_A}, H_{e_A}$ ),形成综合云模型,结合隶属度确定泵站运行状态评价等级。

## 4 实例验证

为验证本文提出的泵站运行状态评价方法(以下简称“本文方法”)的适用性和准确性,选取南水北调东线某大型立式轴流泵站为研究对象。该泵站于 2013 年投产,共安装 4 台机组,设计扬程为 3.57 m,设计单泵流量为 33.5 m<sup>3</sup>/s,总装机容量为 8960 kW。本文采用该泵站 2021—2023 年的运行数据(采样间隔为 5 min)开展研究。

### 4.1 评价指标权重确定

共邀请 30 名专家参与评分,包括 11 名高校科研人员和 19 名泵站(机组类型一致)运行管理人员。各准则层专家评分的 Kendall 协调系数均大于 0.7,且方差分析验证关键指标评分无显著差异( $p > 0.05$ ),表明专家意见具有较好的一致性。

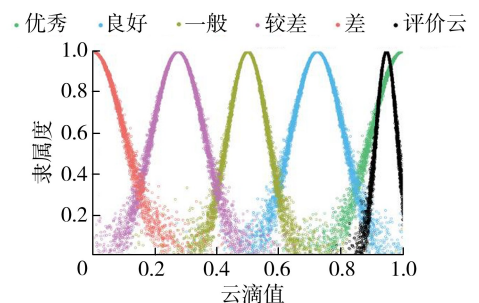
将专家评分转化为三角模糊权重,得到主观初始权重。在此基础上,采用模糊 DEMATEL 识别指标间相互影响程度,将中心度归一化得到主观调整权重,通过式(1)得到各指标主观综合权重如表 2 所示。由表 2 可知,在主观上主轴摆动( $C_5 \sim C_6$ )、扬程波动( $C_{16}$ ),尤其是运行效率( $C_{27}$ )、单位能耗( $C_{31}$ )和成本( $C_{32}$ )方面的重要程度较高,符合泵站运行关注重点。

表 2 各指标权重分布

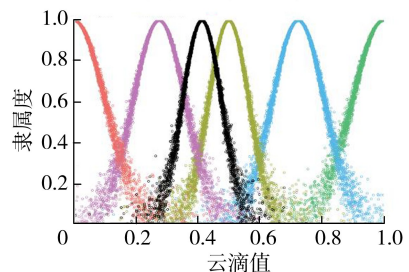
指标	主观初始权重	主观调整权重	主观综合权重	客观权重	主客观组合权重
$C_1$	0.0200	0.0170	0.0190	0.0335	0.0262
$C_2$	0.0090	0.0130	0.0110	0.0201	0.0153
$C_3$	0.0120	0.0140	0.0130	0.0315	0.0214
$C_4$	0.0110	0.0150	0.0130	0.0320	0.0214
$C_5$	0.0470	0.0290	0.0370	0.0341	0.0373
$C_6$	0.0480	0.0290	0.0380	0.0347	0.0377
$C_7$	0.0300	0.0450	0.0370	0.0387	0.0397
$C_8$	0.0280	0.0320	0.0300	0.0379	0.0353
$C_9$	0.0280	0.0310	0.0300	0.0349	0.0337
$C_{10}$	0.0260	0.0350	0.0300	0.0407	0.0367
$C_{11}$	0.0260	0.0350	0.0300	0.0398	0.0364
$C_{12}$	0.0280	0.0320	0.0300	0.0344	0.0337
$C_{13}$	0.0280	0.0320	0.0300	0.0340	0.0335
$C_{14}$	0.0340	0.0460	0.0400	0.0409	0.0424
$C_{15}$	0.0280	0.0250	0.0270	0.0359	0.0323
$C_{16}$	0.0480	0.0220	0.0330	0.0286	0.0319
$C_{17}$	0.0120	0.0200	0.0160	0.0312	0.0232
$C_{18}$	0.0180	0.0140	0.0160	0.0445	0.0278
$C_{19}$	0.0120	0.0190	0.0150	0.0135	0.0150
$C_{20}$	0.0200	0.0240	0.0220	0.0328	0.0283
$C_{21}$	0.0240	0.0300	0.0270	0.0414	0.0350
$C_{22}$	0.0230	0.0230	0.0230	0.0309	0.0281
$C_{23}$	0.0180	0.0200	0.0190	0.0166	0.0186
$C_{24}$	0.0370	0.0420	0.0400	0.0253	0.0331
$C_{25}$	0.0330	0.0440	0.0380	0.0326	0.0369
$C_{26}$	0.0250	0.0340	0.0300	0.0348	0.0335
$C_{27}$	0.0920	0.0870	0.0910	0.0224	0.0470
$C_{28}$	0.0300	0.0260	0.0280	0.0209	0.0254
$C_{29}$	0.0280	0.0240	0.0260	0.0304	0.0295
$C_{30}$	0.0210	0.0110	0.0160	0.0264	0.0212
$C_{31}$	0.0670	0.0560	0.0620	0.0260	0.0419
$C_{32}$	0.0880	0.0720	0.0810	0.0187	0.0407

表 3 部分评价指标对各评价等级的隶属度

指标	优秀	良好	一般	较差	差
$C_1$	0.5973	0.1322	0.0041	0.0002	0.0001
$C_2$	0.6611	0.0611	0.0016	0.0001	0.0000
$C_3$	0.6478	0.0863	0.0025	0.0001	0.0000
$C_4$	0.6581	0.0686	0.0018	0.0001	0.0000
$C_5$	0.6612	0.0617	0.0017	0.0001	0.0000
$C_6$	0.0018	0.0506	0.4511	0.3284	0.0190
$C_7$	0.6616	0.0617	0.0016	0.0001	0.0000
$C_8$	0.6593	0.0629	0.0016	0.0001	0.0000
$C_9$	0.6417	0.0907	0.0026	0.0001	0.0000
$C_{10}$	0.5256	0.1439	0.0488	0.0211	0.0056
$C_{11}$	0.6613	0.0616	0.0016	0.0001	0.0000
$C_{12}$	0.0770	0.5623	0.1911	0.0127	0.0002
$C_{13}$	0.6394	0.0914	0.0026	0.0001	0.0000
$C_{14}$	0.2884	0.4395	0.0246	0.0012	0.0005
$C_{15}$	0.1380	0.6068	0.0776	0.0040	0.0001



(a) 电机定子温度



(b) 主轴摆动(y方向)

图 4 部分指标评价云

基于本文预处理后的历史运行数据,利用 CRITIC 法得到客观权重,结合主观综合权重得到主客观组合权重分布,见表 2。由指标层权重进一步得到准则层权重为(0.4509,0.3824,0.1667)。

## 4.2 云模型评价结果

### 4.2.1 各指标评价云计算

以 2023 年某日机组存在启停工况的数据为例进行分析。计算各指标相对状态参数,经逆向和正向云发生器生成评价云图。由隶属度矩阵(表 3)及隶属度最大原则<sup>[21]</sup>可得其评价等级。

图 4 为部分指标的评价云,结合隶属度矩阵可知,电机定子温度为优秀等级,主轴摆动(y 方向)为一般等级。该结果与机组启动工况运行特征相符,温度参数均值较低;同时,受瞬态扰动影响,振摆参数不稳定、运行效率低、流量波动大,验证了指标云模型与实际状态的匹配性。

### 4.2.2 准则层与目标层评价结果

基于准则层云参数得到各准则的评价云图,见图 5。结合准则层隶属度矩阵(表 4)可知,安全状

态监测与技术性能为优秀等级,运行经济性为良好等级,这是由于机组启动工况增加了额外的能耗。由准则层参数得到目标层评价云,隶属度矩阵为(0.4539,0.1685,0.1005,0.0372,0.0039),属优秀等级,表明该日机组整体运行状态较好。

表 4 准则层隶属度矩阵

等级	安全状态监测	技术性能	运行经济性
优秀	0.4825	0.4910	0.1891
良好	0.1817	0.1363	0.2237
一般	0.0615	0.1221	0.2067
较差	0.0288	0.0135	0.1566
差	0.0020	0.0003	0.0252

### 4.2.3 异常工况验证

选取 4 个典型异常工况开展分析:①2020 年 4 月 23 日至 5 月 9 日调水初期,因上游来水漂浮水草巨大,拦污栅前后水头壅高,导致水泵运行工况波

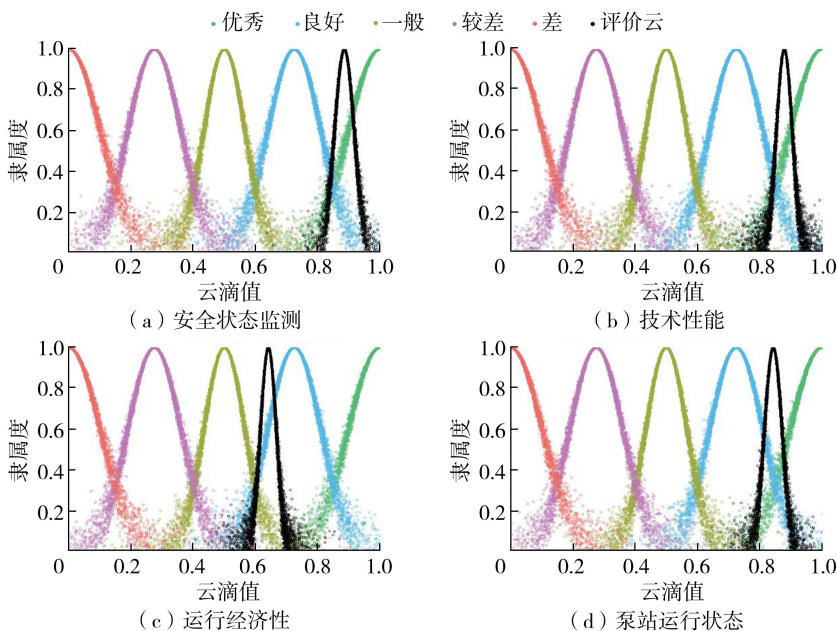


图5 准则层及目标层评价云

动较大,扬程变化大;②2020年11月3日,因机组传感器起初安装在填料压环附近,压环产生振动,影响测量精度,导致振摆数据分布分散且数值较大;③2021年12月初2号机组超声波流量计出现偏差,流量数据波动较大;④2021年5月2日机组大修前,设备长期运行导致轴瓦磨损,振摆数据分布分散且数值较大。评价结果如表5所示。

表5 不同异常工况下的评价结果

工况	主要指标	指标评价等级	准则层评价等级			目标层评价等级
			$B_1$	$B_2$	$B_3$	
①	$C_{16}$	较差				
	$C_{23}$	较差	优秀	良好	一般	良好
	$C_{27}$	一般				
	$C_{31}$	较差				
②	$C_5$	较差	良好	优秀	优秀	良好
	$C_6$	较差				
③	$C_{23}$	较差				
	$C_{29}$	一般	优秀	良好	良好	良好
	$C_{30}$	一般				
④	$C_5$	差				
	$C_6$	差	一般	良好	良好	一般
	$C_7$	较差				
	$C_8 \sim C_{11}$	较差				

由表5可知,工况①主要影响水力性能和经济性指标;工况②安全监测指标受影响明显,但由于是测量系统问题而非设备故障,评价等级仍为良好;工况③主要影响流量相关的技术性能和经济性指标,体现了测量质量对评价结果的影响;工况④多项安全监测指标出现恶化,评价等级降至一般,准确反映了设备健康状态的恶化趋势,为设备维护决策提供了有力支撑。验证结果表明本文方法能够有效识别不同类型的异常表现,准确反映泵站的不同运行状态。

#### 4.2.4 不同评价方法对比

将本文方法与模糊综合评价法<sup>[28]</sup>、Mamdani模糊推理法<sup>[29]</sup>、集对分析法<sup>[30]</sup>对启停机工况的隶属度评价结果进行对比,见表6。上述3种方法评价结果均为优秀等级,与本文方法结果一致,验证了本文方法的可靠性。本文方法的不确定性处理能力,比传统模糊综合评价法更适合复杂系统评价,云图呈现更直观,组合赋权较传统权重更客观合理,评价精度更高。

表6 同一工况下不同方法隶属度评价结果

评价方法	优秀	良好	一般	较差	差
模糊综合评价法	0.5156	0.2823	0.0634	0.0456	0.0067
Mamdani 模糊推理法	0.3987	0.2134	0.1456	0.0623	0.0089
集对分析法	0.4234	0.1756	0.1189	0.0434	0.0056
本文方法	0.4539	0.1685	0.1005	0.0372	0.0039

#### 4.3 本文方法在数字孪生泵站系统中的应用

本文方法已集成到南水北调数字孪生泵站群运行管控系统(B/S架构)的安全监测中心模块中。该模块主要包括泵站运行状态监测与评价两项功能,其以本文构建的评价指标体系为基础,采用树状结构实现指标可视化展示及配置管理,并能够基于监测数据运用云模型进行泵站运行状态的评价与云图等结果展示,最终在该模块实现异常状态识别与预警。该模块实现了泵站运行状态监测、评估、预警功能的一体化管理。

### 5 结语

本文提出了一种基于改进组合赋权法和云模型的泵站运行状态评价方法,以解决泵站运行状态评价过程中的不确定性和模糊性问题。针对立式机组

泵站构建了包含安全状态监测、技术性能、运行经济性 3 个准则的评价指标体系。利用模糊 AHP-DEMATEL 计算主观权重,通过 CRITIC 法计算客观权重,结合拉格朗日乘子法得到主客观组合权重,提高了权重分配的科学性和可靠性。通过云模型方法对泵站运行状态进行评价,克服了传统评价方法在处理不确定性和模糊性方面的不足,并能够直观展示各评价指标的状态分布。选取南水北调东线工程某立式轴流泵站不同工况下的运行数据对本文方法进行实例验证,并与其他方法进行对比,结果表明,本文方法能够有效评估泵站的运行状态,评价结果与实际运行情况一致。本文方法已集成到南水北调数字孪生泵站群运行管控系统中,可服务于泵站系统的状态监测、运行管控和调度方案评价,实现监测、评估与预警功能的自动化和一体化管理,为泵站日常运维提供了科学依据和决策支持。

## 参考文献:

[ 1 ] 唐清竹,徐宗学,王京晶,等.深圳河流域城市洪涝风险分析[J].水力发电学报,2023,42(6):13-22. (Tang Qingzhu, Xu Zongxue, Wang Jingjing, et al. Urban flood risk assessment for Shenzhen River basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(6): 13-22. (in Chinese))

[ 2 ] 熊伟,董增川,卢嘉琪,等.基于组合赋权模糊物元可拓模型的渭河流域甘肃段河流健康评价[J].水利水电科技进展,2023,43(4):9-14. (Xiong Wei, Dong Zengchuan, Lu Jiaqi, et al. River health evaluation in Gansu section of Weihe River Basin based on combined weighted fuzzy matter-element extension model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023,43(4):9-14. (in Chinese))

[ 3 ] 王力,张露露.基于 IHHO-BP 神经网络的模拟电路故障诊断[J].电子测量与仪器学报,2024,38(5):238-248. (Wang Li, Zhang Lulu. Fault diagnosis of analog circuit based on IHHO-BP neural network[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(5):238-248. (in Chinese))

[ 4 ] 朱洁,冯建刚,高玉琴,等.基于 BWM-CRITIC-TOPSIS 的幸福河湖综合评价模型[J].水利水电科技进展,2022,42(6):8-14. (Zhu Jie, Feng Jiangang, Gao Yuqin, et al. Comprehensive evaluation model for happy rivers and lakes based on BWM-CRITIC-TOPSIS [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(6):8-14. (in Chinese))

[ 5 ] 石宜金,谭贵生,赵波,等.基于模糊综合评估模型与信息融合的电力变压器状态评估方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(21):167-176. (Shi Yijin, Tan Guisheng, Zhao Bo, et al. Condition assessment method for power transformers based on fuzzy comprehensive

evaluation and information fusion [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 167-176. (in Chinese))

[ 6 ] 石少伟,王可,陈力,等.基于模糊综合评价和贝叶斯判别的电力变压器状态判别和预警[J].电力自动化设备,2016,36(9):60-66. (Shi Shaowei, Wang Ke, Chen Li, et al. Power transformer status evaluation and warning based on fuzzy comprehensive evaluation and Bayes discrimination[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016,36(9):60-66. (in Chinese))

[ 7 ] 门业堃,钱梦迪,于钊,等.基于博弈论组合赋权的电力设备供应商模糊综合评价[J].电力系统保护与控制,2020,48(21):179-186. (Men Yekun, Qian Mengdi, Yu Zhao, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of power equipment suppliers based on game theory and combination weighting [J]. Power System Protection and Control, 2020,48(21):179-186. (in Chinese))

[ 8 ] 李进友,李媛,冯冰,等.基于随机组合赋权模糊评价的风电机组健康状态评估[J].太阳能学报,2022,43(8):340-351. (Li Jinyou, Li Yuan, Feng Bing, et al. Wind turbine health state assessment based on stochastic combination weighting fuzzy evaluation [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022,43(8):340-351. (in Chinese))

[ 9 ] 黄必清,何焱,王婷艳.基于模糊综合评价的海上直驱风电机组运行状态评估[J].清华大学学报(自然科学版),2015,55(5):543-549. (Huang Biqing, He Yan, Wang Tingyan. Fuzzy synthetic evaluation of the operational status of offshore direct-drive wind turbines [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2015,55(5):543-549. (in Chinese))

[ 10 ] Eboli L, Fu Yanbing, Mazzulla G. Multilevel comprehensive evaluation of the railway service quality [J]. Procedia Engineering, 2016, 137:21-30.

[ 11 ] 周兰庭,郭枫,王浩.土石坝运行安全评价的改进组合赋权-云模型[J].水利水电科技进展,2024,44(6):86-92. (Zhou Lanting, Guo Feng, Wang Hao. Improved combination weighting-cloud model for operation safety evaluation of earth-rockfill dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024,44(6):86-92. (in Chinese))

[ 12 ] 张晓峰,石永杰,刘俊,等.基于 AHP-熵权法的望虞河西岸圩区活水调度方案多目标优选[J].水利水电科技进展,2024,44(3):80-87. (Zhang Xiaofeng, Shi Yongjie, Liu Jun, et al. Multi-objective optimization of flowing water dispatch schemes in western polder area of Wangyu River based on AHP-entropy weight method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(3):80-87. (in Chinese))

[ 13 ] 计蓉,侯慧娟,盛戈峰,等.基于组合赋权法和模糊综合评价的电力设备状态数据质量评估[J].高电压技术,2024,50(1):274-281. (Ji Rong, Hou Huijuan, Sheng Gehao, et al. Data quality assessment for power equipment

- condition based on combination weighing method and fuzzy synthetic evaluation[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1):274-281. (in Chinese))
- [14] 李德毅,刘常昱.论正态云模型的普适性[J].中国工程科学,2004,6(8):28-34. (Li Deyi, Liu Changyu. Study on the universality of the normal cloud model [J]. Engineering Science, 2004, 6(8):28-34. (in Chinese))
- [15] 宋亮亮,张劲松,杜建波,等.基于云模型的水利工程运行安全韧性评价[J].水资源保护,2023,39(2):208-214. (Song Liangliang, Zhang Jinsong, Du Jianbo, et al. Assessment of operation safety resilience of water conservancy projects based on cloud model [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2):208-214. (in Chinese))
- [16] 高玉琴,汪键,高见,等.基于组合赋权-云模型的城市洪涝灾害韧性评价方法[J].水利水电科技进展,2024,44(2):22-29. (Gao Yuqin, Wang Jian, Gao Jian, et al. Evaluation method of urban flood disaster resilience based on combined weighting-cloud model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(2):22-29. (in Chinese))
- [17] 吕淑然,田琦.基于DEMATEL-ANP-GRA的大型泵站运行安全综合评价[J].安全与环境学报,2022,22(4):1729-1735. (Lyu Shuran, Tian Qi. Comprehensive evaluation of operation safety of large pumping station based on DEMATEL-ANP-GRA [J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(4):1729-1735. (in Chinese))
- [18] 王鑫,徐钰德,赵志宏,等.基于云模型的泵站现代化管理综合评价[J].人民黄河,2022,44(7):156-160. (Wang Xin, Xu Yude, Zhao Zhihong, et al. Comprehensive evaluation of pumping station modernization management based on cloud model [J]. Yellow River, 2022, 44(7):156-160. (in Chinese))
- [19] 高盛,冯旭松,李同春,等.基于SQP法的泵站建筑物模糊安全综合评价及界面开发[J].水利水电技术,2018,49(1):75-81. (Gao Sheng, Feng Xusong, Li Tongchun, et al. SQP method-based fuzzy comprehensive safety assessment on pumping station structure and its interface development [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(1):75-81. (in Chinese))
- [20] 邢丹君.水泵机组状态评价与参数预测方法的研究与实现[D].扬州:扬州大学,2018.
- [21] 张彬桥,杨洋,刘雷,等.基于改进AHP及云模型的水轮机调节系统状态评价[J].人民长江,2024,55(5):219-225. (Zhang Binqiao, Yang Yang, Liu Lei, et al. Operation status evaluation of hydraulic turbine regulation system based on improved AHP and cloud model [J]. Yangtze River, 2024, 55(5):219-225. (in Chinese))
- [22] 徐飞飞,陈剑文,李俊莹,等.云模型在城市地下空间开发利用适宜性评价中的应用研究[J].安全与环境工程,2024,31(1):107-115. (Xu Feifei, Chen Jianwen, Li Junying, et al. Research on the application of cloud model in the suitability evaluation of the development and utilization of underground space [J]. Safety and Environmental Engineering, 2024, 31(1):107-115. (in Chinese))
- [23] 黄显峰,周引航,张启凡,等.基于云模型的水光互补清洁能源基地容量配置方案优选[J].水利水电科技进展,2024,44(1):44-51. (Huang Xianfeng, Zhou Yinhang, Zhang Qifan, et al. Capacity allocation scheme optimization based on cloud model for a hydro-photovoltaic complementary clean energy base [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(1):44-51. (in Chinese))
- [24] Luo Gang, Meng Yao, Peng Lyubin, et al. Indicator system and evaluation method for technology development maturity of P2X [J]. Energy Reports, 2023, 9(S7):1974-1982.
- [25] 孙开畅,薛文丽,李婷婷,等.水利工程施工的IT2FS-MARCOS风险评价[J].水力发电学报,2024,43(7):109-120. (Sun Kaichang, Xue Wenli, Li Tingting, et al. IT2FS-MARCOS method for risk assessment of water conservancy engineering construction [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024, 43(7):109-120. (in Chinese))
- [26] Diakoulaki D, Mavrotas G, Papayannakis L. Determining objective weights in multiple criteria problems: the critic method [J]. Computers & Operations Research, 1995, 22(7):763-770.
- [27] 曾盛富,梁浩全,王岩,等.基于改进的组合赋权和云模型的平流层飞艇健康状态评估[J].北京航空航天大学学报,2026,52(1):326-337. (Zeng Shengfu, Liang Haoquan, Wang Yan, et al. Health status assessment of stratospheric airship based on improved combination weighting and cloud model [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52(1):326-337. (in Chinese))
- [28] Wu Xueling, Hu Fang. Analysis of ecological carrying capacity using a fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Ecological Indicators, 2020, 113:106243.
- [29] 张琦,王月峰,李建春,等.深基坑紧邻地铁隧道安全评价方法[J].中国安全科学学报,2021,31(4):95-104. (Zhang Qi, Wang Yuefeng, Li Jianchun, et al. Evaluation method for safety of subway tunnels adjacent to deep foundation pits [J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(4):95-104. (in Chinese))
- [30] 刘俊杰,高峰,刘翠善,等.基于集对分析的清流河流域蓝绿水分类分析[J].水资源保护,2024,40(5):95-103. (Liu Junjie, Gao Feng, Liu Cuishan, et al. Classification analysis of blue and green water based on set pair analysis in the Qingliu River Basin [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(5):95-103. (in Chinese))

(收稿日期:2024-09-29 编辑:俞云利)