DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20251353

基于改进 FAHP-CRITIC 法的农业水权分配研究

陈 雷[1],何 军[1,2],潘少斌[3,4],张 锐[3,4],赵树君[1],魏 冲[1]

(1. 三峡大学水利与环境学院,湖北 宜昌 443002;2. 三峡库区生态环境教育部工程研究中心,湖北 宜昌 443002;
3. 湖北省水利水电科学研究院,湖北 武汉 430070;4. 湖北省节约用水研究中心,湖北 武汉 430070)

摘要:针对农业水权分配过程中专家偏好表征缺失与群体认知差异消解的问题,选取资源适配性、用水高效性、发展可持续性和制度有效性准则建立农业水权多层次分配指标体系,结合群决策理论和聚类分析改进模糊层次分析法(FAHP),引入信息熵改进的 CRITIC 法,构造改进 FAHP-CRITIC 耦合模型,以天门市重点中型灌区为对象开展实证应用,并与三种常见水权分配方法进行对比。结果表明,改进 FAHP-CRITIC 耦合模型的农业水权分配结果相较现状水权变幅在-13.21%~19.31%之间,满足灌区取水许可刚性约束,符合灌区用水规律,具有更强的科学性和实用性,可为南方湿润区同类型灌区农业水权动态调整提供参考。

关键词:农业水权分配;群决策;聚类分析;改进 FAHP-CRITIC

中图分类号:[TV93];TV213.4 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-7709(2025)12-0219-05

1 引言

在我国农业用水总量刚性约束日益增强、水资源供需矛盾突出的背景下,深化农业用水权改革、合理分配农业水权,推动农业用水向节约集约、公平高效的方向转变尤为重要。灌区农业用水主要包括灌溉、水产养殖等方面,其中灌溉用水作为农业用水主体,是农业水权分配的重点保障对象。早期农业水权分配多采用基于人口、面积等单指标分配方式,难以适应农业高质量发展背景下对水资源配置精准化的要求。随着多准则决策理论的发展,层次分析法[1]、主成分分析法[2]和熵权法等被应用于水权分配领域。然而,单一主观赋权易受决策者偏好的影响,分配结果认可度受限,客观赋权则完全依赖数据特征,存在指标权重与重要性不匹配的局限。对此,李聪等[3]基于多准则决策理论,构建主客观综合赋权模型进行农业水权分配,分配结果符合灌区需水现状,为灌区农业水权动态调整夯实了理论基础。主客观综合赋权为合理分配水权提供了可行路径,但仍存在主观赋权忽略专家决策意见模糊性和差异性的不足。因此,本文引入专家偏好聚类分析,识别群体认知差异,构造改进 FAHP-CRITIC 耦合模型,并在天门市重点中型灌区农业水权分配中进行实证应用,以期提升农业水权分配过程的科学性与结果的可靠性,为后续类似地区深化农业水权改革提供方法借鉴。

2 研究方法

立足天门市中型灌区农业用水权改革现状,建立农业水权多层次分配指标体系,采用 Spearman 秩相关系数最大距离聚类改进 FAHP,确定准则层权重,引入信息熵改进的 CRITIC 法对指标层赋权,构造改进 FAHP-CRITIC 耦合模型进行天门市重点中型灌区农业水权分配。

2.1 改进 FAHP-CRITIC 耦合模型

2.1.1 构建农业水权分配指标体系

农业水权主要受用水需求、利用效率、水资源条件及制度调控等因素影响。从资源适配性、用水高效性、发展可持续性和制度有效性四个方面构建多层次农业水权分配指标体系,选取了 12 项具有代表性和可操作性的指标(图 1)。设计灌溉面积反映用水基础,单位养殖用水量与亩均灌溉用水量用于衡量用水强度;灌溉水有效利用系数、节水工 程与计量设施覆盖率体现节水管理水平;水资源开发利用率、尾水达标排放率及水质达标率反映水资源利用与环境协调状况;制度类指标则反映制度调控能力和执行力度。其中单位养殖

收稿日期:2025-08-03,**修回日期**:2025-09-01

基金项目:国家自然科学基金项目(42401030);湖北省水利重点科研项目(HBSLKY202411)

作者简介:陈雷(1999-),男,硕士研究生,研究方向为农业水资源高效利用,E-mail:610665721@qq.com

通讯作者:何军(1981-),男,博士、副教授,研究方向为节水灌溉理论与技术,E-mail:hejun50@163.com

中国知网 https://www.cnki.net

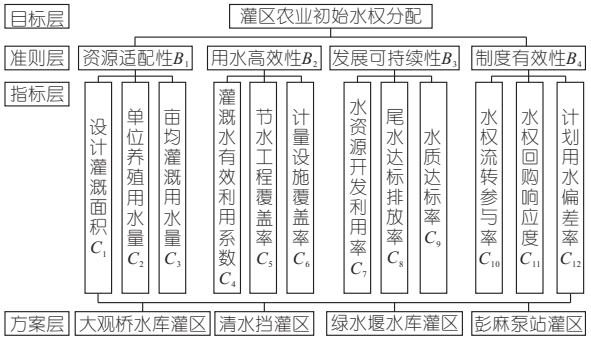

图 1 农业水权分配指标体系

Fig. 1 Agricultural water rights allocation indicator system

用水量、亩均灌溉用水量和计划用水偏差率为负向型指标(即指标值越小越优),其余为正向型指标(即指标值越大越优)。

2.1.2 准则层因素权重确定

(1)构造模糊判断矩阵。邀请水资源优化管理等领域专业知识与实践经验丰富的专家组,依据表 1 对准则层因素相对重要性评分[4],得到模糊判断矩阵 $\boldsymbol{F}(f_{ij})_{n\times n}$。

表 1 九标度评分表

Tab. 1 Nine-point scale method

标度值 r_{ij}	定义	说明
0.5	同等重要	两指标同等重要
0.6	稍微重要	前者比后者稍微重要
0.7	明显重要	前者比后者明显重要
0.8	重要得多	前者比后者重要得多
0.9	极端重要	前者比后者极端重要
0.1~0.4	反比较	若前者与后者相比较得到判断 r_{ij},则二者反比较得到的判断为 $r_{ji}=1-r_{ij}$

(2)确定准则初始权重。将模糊判断矩阵 $\boldsymbol{F}$ 处理得到模糊一致性矩阵 $\boldsymbol{K}(k_{ij})_{n\times n}$ 后,行和归一化处理得到权重向量 $\boldsymbol{W}=(w_1,w_2,\cdots,w_n)^{\mathrm{T}}$,其中 $w_i=(k_i+n/2-1)/[n(n-1)]$。处理公式为:

$$k_i=\sum_{j=1}^{n}f_{ij};k_{ij}=\frac{k_i-k_j}{2(n-1)}+0.5 \tag{1}$$

(3)一致性检验。根据权重向量 $\boldsymbol{W}$ 求得各模糊判断矩阵 $\boldsymbol{F}$ 的特征矩阵 $\boldsymbol{W}^*(w_{ij}^*)_{n\times n}$ 及相容性指标 $\boldsymbol{I}(\boldsymbol{F},\boldsymbol{W}^*)$,并进行一致性检验[5]。计算公式为:

$$\boldsymbol{I}(\boldsymbol{F},\boldsymbol{W}^*)=\frac{1}{n^2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{i=1}^{n}|f_{ij}+w_{ij}^*-1| \tag{2}$$

其中 $w_{ij}^*=w_i/(w_i+w_j)\quad i,j=1,2,\cdots,n$

当 $\boldsymbol{I}(\boldsymbol{F},\boldsymbol{W}^*)\leqslant\alpha$ 时,通过一致性检验;反之,一致性检验不通过,对应专家重新打分。α 为相容性指标临界值,α 越小表示模糊判断矩阵的一致性要求越高,通常取 0.1。

2.1.3 专家权重确定

结合 Spearman 秩相关系数与聚类分析法,识别专家群体的偏好差异,增强专家组对农业水权分配指标决策的客观性。将 m 位专家的权重向量 $\boldsymbol{W}=(w_1,w_2,\cdots,w_n)^{\mathrm{T}}$ 组成专家权重矩阵 $\boldsymbol{W}'(w_{ij})_{m\times n}$,并进行秩次排序,计算 Spearman 秩相关系数,通过 $d_{ij}=1-\rho_{ij}$ 得到距离矩阵 $\boldsymbol{D}(d_{ij})_{n\times n}$,运用最大距离对专家进行聚类,其中:

$$\rho_{ij}=1-\frac{6}{n(n^2-1)}\sum_{k=1}^{n}(R_{ik}-R_{jk})^2 \tag{3}$$

式中,R_{ik} 为第 i 位专家在第 k 个指标上的秩。

鉴于专家判断矩阵存在差异,以类间权重和类内权重计算专家权重。类间权重考虑专家数量及专家一致性权重差异值,专家数量越多的类别,差异值越小,越能反映专家群体共识,应赋予更大权重;类内权重仅需比较同类专家判断矩阵的相容性指标,该值越小,专家权重越大[6]。经过专家聚类分析,设 m 个专家分为 H 类,专家 i 被聚类在 G_h 类,该类专家数量以 φ_h 表示,D_i、D_h 分别为专家间及类别间的一致性差异值。类间权重系数 α_h 计算公式为:

$$\alpha_h=\frac{\varphi_h^2}{D_h}\Big/\sum_{h=1}^{H}\frac{\varphi_h^2}{D_h} \tag{4}$$

其中

$$D_i=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1,j\neq i}^{m}(w_i-w_j)^2\quad i,j=1,2,\cdots,m$$

$$D_h=\frac{1}{\varphi_h}\sum_{i=1}^{m}D_i\quad i\in G_h;h=1,2,\cdots,H$$

类内权重系数 β_i 计算公式为:

$$\beta_i=[1/(1+b\boldsymbol{I})]\Big/\sum_{j=1}^{\varphi_l}\frac{1}{1+b\boldsymbol{I}_j}$$

$$i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,\varphi_l \tag{5}$$

准则层最终权重 w_j^1 计算公式为:

$$w_j^1=\sum_{i=1}^{m}w_{ij}\alpha_h\beta_i \tag{6}$$

2.1.4 客观权重确定

采用变异系数衡量指标间相对变异程度,用信息熵刻画指标分布的离散特征,克服传统 CRITIC 法在衡量指标重要性时对波动性、离散性处理的局限。具体步骤见文献[7]。

2.2 灌区农业水权确权

由得到的准则层最终权重 w^1 及指标层权重 w^2 计算指标层相对目标层的最终权重 w_j^{T},即:

$$w_j^{\mathrm{T}}=w_i^1w_{ij}^2\Big/\sum_{j=1}^{n}w_i^1w_{ij}^2 \tag{7}$$

式中,w_i^1、w_{ij}^1 分别为准则 i 的最终权重、对应指标 j 的权重。

根据各指标的最终权重 w_j^{T} 及标准化矩阵 $\boldsymbol{Z}(z_{ij})_{n\times m}$ 计算各灌区农业水权分配比例 ω_i,从而得到各灌区的农业水权分配量。即:

$$\omega_i=\sum_{j=1}^{n}w_j^{\mathrm{T}}z_{ij}\Big/\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{n}w_j^{\mathrm{T}}z_{ij} \tag{8}$$

中国知网 https://www.cnki.net

3　实例应用

3.1　区域概况

天门市地处江汉平原北部,境内有汉北河、天门河和沉湖三大水系,全市水资源总量为 12.54×10^8 m^3,水资源丰沛。以天门市 4 个重点中型灌区进行应用实证,灌区设计灌溉面积共 224.84 km^2,效益范围涉及黄潭、彭市等 8 个乡镇,受益人口达 27.57 万人。灌区集排灌功能于一体,以灌排为主,同时担负防洪排涝、环境整治等功能,农业结构以种植业为主,主要种植水稻、棉花等。灌区现代化改造续建工程和农业用水权改革持续推进,灌区配套工程完善,用水计量设施覆盖全面。

天门市大观桥水库灌区等 4 个重点中型灌区的年取水许可量达 5 100×10^4 m^3,取水用途均为农业用水,取水类型以地表水为主。以 2023 年为基准年,以灌区现状水权总量 3 968×10^4 m^3 作为本次农业用水权分配的控制总量,各灌区年许可取水量见表 2。

表 2　灌区年取水许可量

Tab. 2　Annual permitted water withdrawal volume for irrigation district

灌区名称	类型	年许可取水量/10^4 m^3	现状水权/10^4 m^3
大观桥水库灌区	中型	1 800	1 038
绿水堰水库灌区	中型	1 300	930
清水挡灌区	中型	200	200
彭麻泵站灌区	中型	1 800	1 800

3.2　灌区农业水权分配

3.2.1　指标数据信息

根据天门市历年《水利统计年鉴》、《水资源公报》、灌区管理中心统计信息和农业用水权改革实地调研,得到灌区各指标数据,见表 3。由 origin2024 计算指标间皮尔逊相关性(图 2)可得,灌溉水有效利用系数与计量设施覆盖率相关系数达 0.99,单位养殖用水量则与多项指标呈强负相关,各指标间结构性关联和冲突较强,信息熵改进的 CRITIC 法相较熵权更适用于本文指标层客观赋权。

表 3　灌区指标信息

Tab. 3　Indicator information for the irrigation district

指标	大观桥水库灌区	绿水堰灌区	清水挡灌区	彭麻泵站灌区
C_1/km^2	58.03	52.03	21.34	93.38
C_2/(m^3·(亩·a)$^{-1}$)	900.00	861.00	820.00	950.00
C_3/(m^3·亩$^{-1}$)	380.00	382.00	385.00	382.00
C_4	0.54	0.56	0.52	0.54
C_5/%	25.00	26.00	23.00	27.00
C_6/%	86.50	85.00	84.30	86.50
C_7/%	58.80	57.40	56.70	58.31
C_8/%	73.40	73.91	70.63	75.20
C_9/%	31.64	29.46	28.60	37.80
C_{10}/%	95.00	93.00	93.80	96.00
C_{11}/%	96.00	94.90	90.00	96.00
C_{12}/%	6.50	6.40	6.10	4.00

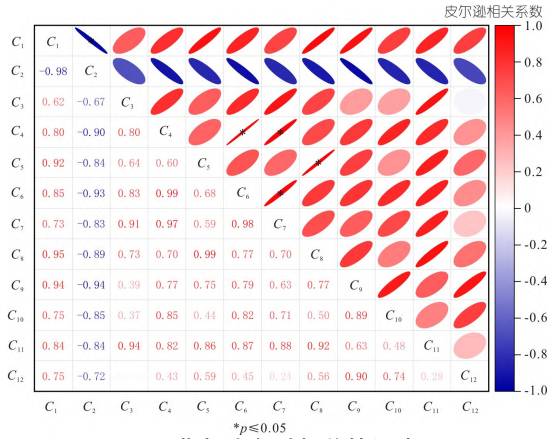

图 2　指标皮尔逊相关性矩阵图

Fig. 2　Pearson correlation matrix of the indicators

3.2.2　准则层因素权重

邀请 5 位从事农业用水权改革方面的专家组成评分组,根据评分标度对准则层打分构造准则层模糊判断矩阵(表 4)。

(1)构造模糊判断矩阵,见表 4。

表 4　准则层模糊判断矩阵

Tab. 4　Fuzzy judgment matrix at the criteria level

标度	专家 1				专家 2				专家 3				专家 4				专家 5			
值	B_1	B_2	B_3	B_4	B_1	B_2	B_3	B_4	B_1	B_2	B_3	B_4	B_1	B_2	B_3	B_4	B_1	B_2	B_3	B_4
B_1	0.5	0.7	0.6	0.8	0.5	0.8	0.7	0.7	0.5	0.7	0.7	0.8	0.5	0.7	0.6	0.8	0.5	0.6	0.8	0.7
B_2	0.3	0.5	0.4	0.6	0.2	0.5	0.5	0.6	0.3	0.5	0.4	0.6	0.3	0.5	0.6	0.7	0.4	0.5	0.7	0.6
B_3	0.4	0.6	0.5	0.7	0.3	0.5	0.5	0.6	0.3	0.6	0.5	0.7	0.4	0.4	0.5	0.6	0.2	0.3	0.5	0.5
B_4	0.2	0.4	0.3	0.5	0.3	0.4	0.4	0.5	0.2	0.4	0.3	0.5	0.2	0.3	0.4	0.5	0.3	0.4	0.5	0.5

(2)确定权重及一致性检验。由式(1)、(2)得到各专家对应准则层权重,并进行一致性检验。由表 5 可知,5 位专家给出的评分矩阵相容性指标均小于 0.1,模糊判断矩阵均通过一致性检验。

表 5　各专家准则层赋权及相容性指标值

Tab. 5　Criterion weights and consistency metrics for each expert

专家	准则权重				$I(F,W^*)$
	w_1	w_2	w_3	w_4	
1	0.300	0.233	0.267	0.200	0.083
2	0.308	0.233	0.242	0.217	0.080
3	0.308	0.233	0.258	0.200	0.094
4	0.300	0.258	0.242	0.200	0.085
5	0.300	0.267	0.208	0.225	0.078

3.2.3　专家权重

由式(3)计算 Spearman 秩相关系数,再将其转换为距离矩阵,利用最大距离聚类,使用 origin2024,Matlab 绘制相关性矩阵图和专家聚类图见图 3。结果显示,专家 1、专家 2、专家 3 评分结果显著相关,评价偏好高度一致,专家 4、专家 5 打分结果与前三位专家存在一定差异。取 $\lambda=0.2$,将专家分为两类,G_1={专家 1,专家 2,专家 3},G_2={专家 4,专家 5}。由式(4)~(5)计算专家类内权重及类间权重,见表 6。

3.2.4　指标综合权重计算

采用改进 CRITIC 法计算指标客观权重,并通过式(7)得到综合权重,权重汇总见表 7。

中国知网　https://www.cnki.net

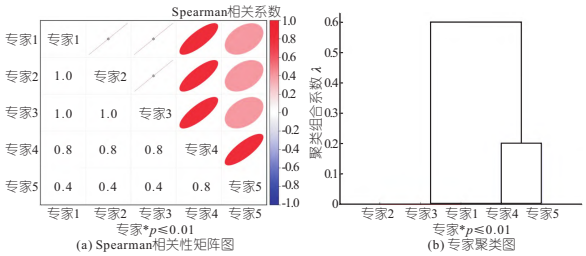

图 3 Spearman 相关性矩阵图和专家聚类图

Fig. 3 Spearman correlation matrix plot and expert clustering plot

表 6 专家权重

Tab. 6 Expert weights

专家	类间权重	类内权重	专家权重
1	0.797	0.338	0.270
2	0.797	0.343	0.274
3	0.797	0.319	0.254
4	0.203	0.490	0.099
5	0.203	0.510	0.103

表 7 权重汇总表

Tab. 7 Weight summary table

准则层	主观权重	指标层	客观权重	综合权重	准则层	主观权重	指标层	客观权重	综合权重
B_1	0.305	C_1	0.091	0.113	B_3	0.249	C_7	0.072	0.072
		C_2	0.045	0.056			C_8	0.071	0.071
		C_3	0.109	0.135			C_9	0.064	0.064
B_2	0.239	C_4	0.058	0.057	B_4	0.207	C_{10}	0.103	0.087
		C_5	0.091	0.088			C_{11}	0.081	0.068
		C_6	0.053	0.052			C_{12}	0.162	0.137

3.3 结果分析

不同赋权方法下的指标相对目标层权重对比见图 4。本文模型权重集中于亩均灌溉用水量(0.135)、计划用水偏差率(0.137)和设计灌溉面积(0.113),对其他指标权重分配相对均衡,反映了农业水权分配中对水资源利用效率及需求精度的高度关注。FAHP-CRITIC 与改进 CRITIC 方法尽管在整体分布上与本文模型具有一致性,但前者部分指标存在权重分散现象,如灌溉水有效利用系数与计量覆盖率的权重偏高,而改进 CRITIC 则强调计划用水偏差率(0.162),对单一指标的依赖性过强。熵权法则完全依赖客观差异性,对水质达标率(0.108)等波动性指标赋权偏高,而对亩均灌溉用水量(0.077)等核心指标重视不足,难以反映农业用水需求。本文模型通过专家聚类修正偏好差异影响,以改进 CRITIC 法消除指标冗余、提升区分度,赋权结果相对更优。

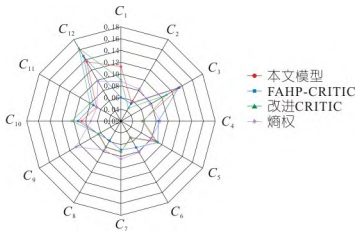

图 4 指标权重对比

Fig. 4 Comparison of indicator weights

利用式(8)得到各灌区农业水权分配比例,并将模型分配农业水权与现状水权对比,见表 8。四个灌区分配水量分别为 $1\ 238.40\times10^4$、807.13×10^4、198.90×10^4、$1\ 723.57\times10^4\ m^3$,大观桥水库灌区模型水权相较现状水权增加了 19.31%,其余灌区则分别减少了 13.21%、0.55%、4.25%。大观桥水库灌区设计灌溉面积和单位养殖用水量相对较高,且灌溉水有效利用系数和节水工程覆盖率较大,表明该灌区水资源管理上更具优势,使得其分配水权增幅较大。绿水堰灌区受设计灌溉面积较小、节水工程覆盖率和用水计量覆盖率略低的影响,模型分配农业水权减幅较大。清水垱灌区和彭麻泵站灌区水权变化较为平稳,计划用水偏差率较低,实际用水与核定需求较为吻合,因此模型优化后的分配结果与现状水权基本一致。综合来看,本文模型权重结构与分配水量符合各灌区农业用水现状,提升了灌区农业水权分配的科学性。

表 8 模型农业水权与现状水权对比

Tab. 8 Comparison between modeled and actual agricultural water rights

灌区名称	分水比例/%	分配水量/$10^4\ m^3$		变幅/%
		模型	现状	
大观桥水库灌区	31.21	1 238.40	1 038.00	19.31
绿水堰灌区	20.34	807.13	930.00	−13.21
清水垱灌区	5.01	198.90	200.00	−0.55
彭麻泵站灌区	43.44	1 723.57	1 800.00	−4.25

4 结论

本文改进的 FAHP-CRITIC 耦合模型在保持权重分布相对均衡的同时,突出了与农业用水紧密相关的关键指标,兼顾了农业水权优化过程中对公平性、效率性、可持续性和有效性的多目标决策需求。模型分配水量相较现状水权变幅在−13.21%～19.31%之间,符合灌区实际用水需求,满足取用水总量刚性约束,可为同类型灌区农业水权动态调整提供借鉴。

参考文献:

[1] 樊镕鑫,王双银,王哲,等. 基于层次分析法的灌区农业水权分配研究[J]. 水电能源科学,2022,40(12):103-106.

[2] 吴振,邵东国,顾文权. 基于主成分分析的区域初始水权分配[J]. 南水北调与水利科技,2016,14(4):179-184.

[3] 李聪,王亚林,杨小伟,等. 多准则视角下的农业初始水权分配研究——以湖北宜都市为例[J/OL]. 中国农村水利水电,2025:1-19.(2025-06-17). https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1419.tv.20250616.1648.057.html.

(下转第 195 页)

中国知网 https://www.cnki.net

象,均呈显著增强趋势。此外,尾水管锥管段和肘管段由广泛的回流主导,未发现明显的空化作用。

c. 在叶道涡发展过程中,机组内能量耗散与叶道涡具有相同的演化周期,且能量耗散领先空泡体积演化过程。主要的能量耗散发生在转轮和尾水管区域,且空化强烈、流态复杂的区域能量耗散较快。对比不同能量耗散途径,发现脉动熵产占能量耗散的主导地位,壁面熵产是其重要组成部分。

参考文献:

[1] ZHOU L J, LIU M, WANG Z W, et al. Numerical simulation of the blade channel vortices in a Francis turbine runner [J]. Engineering computations, 2017, 34(2): 364-376.

[2] ZHOU Z Q. Numerical study on the blade channel vorticity in a francis turbine[J]. Fluid dynamics & materials processing, 2021, 17(5): 1091-1100.

[3] CHENG H,ZHOU L J,LIANG Q W,et al. Numerical simulation of the runner blade channel vortex in Francis turbine[J]. IOP conference series: Earth and environmental science,2022,1037(1):012047.

[4] 王钊宁, 孙龙刚, 郭鹏程, 等. 混流式水轮机叶道涡形成分析及抑制研究[J]. 水力发电学报, 2020, 39(12): 113-120.

[5] 朱强,龚莉,袁玲丽,等.某低水头混流式水轮机叶道涡特性数值分析[J].水电站机电技术,2023,46(3):6-10.

[6] 郭涛,张立翔.混流式水轮机小开度下导水机构内湍流特性和叶道涡结构研究[J].工程力学,2015,32(6):222-230.

[7] LI Y Y,SUN L G,GUO P C. Investigation of the transient characteristics of the Francis turbine during runaway process[J]. Renewable energy,2024,237:121840.

[8] YU A, TANG Q H, CHEN H X, et al. Investigations of the thermodynamic entropy evaluation in a hydraulic turbine under various operating conditions [J]. Renewable energy, 2021, 180: 1026-1043.

[9] 冯建军,张钰,朱国俊,等.采用熵产理论的离心泵断电过渡过程特性[J].农业工程学报,2020,36(4):10-17.

[10] 李正贵, 王冬, 李德友, 等. 基于熵产-涡量的水泵水轮机转轮能量损失特性[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(6): 541-548.

Study on Evolution and Energy Dissipation Characteristics of Inter-Blade Vortex in Francis Turbine

LAN Gang[1], ZHAO Xian[1], GONG Li[2], WANG Zhao-ning[2], GUO Peng-cheng[2,3], SHEN Xiao-hua[2]

(1. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China;
2. Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., Deyang 618000, China;
3. School of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: When Francis turbine operates at condition of low partial loads, significant inter-blade vortex is easily induced, accompanied by intense energy dissipation, which has a crucial impact on the safe and stable operation of the turbine. This paper systematically analyzes the evolution of the inter-blade vortex through numerical simulations and investigates the internal energy dissipation characteristics based on entropy production theory. The results show that the inter-blade vortex undergoes a periodic evolution in the runner, with the cavitation volume pulsation frequency closely aligning with the rotational frequency of the runner. The most intense cavitation volume pulsation occurs at the interface between the blade trailing edge and the runner band. Due to cavitation effects, vortex structures corresponding to the inter-blade vortex appear near the suction side of the blades. As cavitation develops, turbulent structures such as lateral flows, recirculation, and separation flows intensify near the runner outlet. The draft tube is predominantly governed by extensive backflow, particularly in the cone and elbow sections. The energy dissipation process shares the same evolution cycle as the inter-blade vortex and precedes the cavitation volume evolution. Energy dissipation within the unit is mainly concentrated in the runner and draft tube regions, where cavitation is strong and the flow state is highly complex, leading to rapid energy dissipation. Additionally, pulsation entropy production is the dominant contributor, while wall entropy production also plays a significant role in energy dissipation.

Key words: inter-blade cavitation vortices; vortex evolution; energy dissipation; Francis turbine

(上接第 222 页)

[4] 姬东朝, 宋笔锋, 喻天翔. 模糊层次分析法及其在设计方案选优中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2006,28(11): 1692-1694, 1755.

[5] 陈华友, 赵佳宝. 模糊判断矩阵的相容性研究[J]. 运筹与管理, 2004, 13(1): 44-47.

[6] 何立华,王栎绮,张连营.基于聚类的多属性群决策专家权重确定方法[J].运筹与管理,2014,23(6):65-72.

[7] 孙彬,于海霞,刘丙军.基于改进 CRITIC 法的梅州市韩江区域初始水权分配[J].水电能源科学,2022,40(9):61-65.

Research on Agricultural Water Rights Allocation Based on Improved FAHP-CRITIC Method

CHEN Lei[1], HE Jun[1,2], PAN Shao-bin[3,4], ZHANG Rui[3,4], ZHAO Shu-jun[1], WEI Chong[1]

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Yichang 443002, China; 3. Hubei Water Resourses Research Institute, Wuhan 430070, China; 4. Hubei Water Saving Research Center, Wuhan 430070, China)

Abstract: To address the absence of expert preference representation and the challenge of reconciling group cognitive differences in agricultural water rights allocation, this study establishes a multi-level evaluation index system based on four criteria of resource adaptability, water-use efficiency, sustainable development, and institutional effectiveness. An improved fuzzy analytic hierarchy process (FAHP), which incorporates group decision-making theory and cluster analysis, is coupled with an entropy-enhanced criteria importance through intercriteria correlation (CRITIC) method to construct the FAHP-CRITIC model. Taking a key medium-sized irrigation district in Tianmen City as a case study, the model is empirically applied and compared with three conventional allocation methods. The results demonstrate that the improved FAHP-CRITIC model adjusts agricultural water rights within a range of -13.21% to 19.31% relative to the current allocation, while meeting rigid permit constraints and reflecting actual water use patterns. The model exhibits stronger scientific validity and practical applicability, providing a reference for the dynamic adjustment of agricultural water rights in similar southern humid-region irrigation areas.

Key words: agricultural water rights allocation; group decision-making; cluster analysis; improved FAHP-CRITIC method

中国知网 https://www.cnki.net