



引江济淮工程江淮沟通段跌水工程群 汇流口通航水流条件分级研究*

施奇¹, 王涛², 汪清³

- (1. 安徽省(水利部淮河水利委员会)水利科学研究院, 水利水资源安徽省重点实验室, 安徽蚌埠 233000;
2. 安徽省引江济淮集团有限公司, 安徽合肥 230601;
3. 安徽省水利水电勘测设计研究总院有限公司, 安徽合肥 230088)

摘要: 对大型人工运河跌水工程群开展汇流口通航水流条件分级研究, 可筛选出若干典型跌水工程作为重点研究对象开展数值模拟或物模试验研究, 并为后续跌水工程群的全面通航安全评价提供技术支持。跌水工程汇流口通航水流条件主要与汇流比、汇流角、流量、堰宽、干渠水深等量化影响因子及汇流口布置形式等相关, 依据量化影响因子构建的通航水流条件复杂度分级评价指标可定量反映汇流口通航水流条件的复杂程度。采用最小-最大标准化法及K均值聚类分析法, 依据评价指标将江淮沟通段跌水工程群分级为4个类别, 再从全部50座跌水工程中筛选出18座通航水流条件复杂度较大、汇流口布置形式代表性较好的典型跌水工程作为重点研究对象, 典型跌水工程在各汇流口布置类型中的分布较均衡。

关键词: 跌水工程; 通航条件; 分级; 评价指标; 聚类分析

中图分类号: U 61; TV 147

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)03-0092-07

Classification of navigation flow conditions at confluence of water drop project group in Yangtze-Huaihe communication section of Yangtze-to-Huaihe Water Diversion Project

SHI Qi¹, WANG Tao², WANG Qing³

- (1. Anhui & Huaihe River Institute of Hydraulic Research, Key Laboratory of Water Conservancy and Water Resources of Anhui Province, Bengbu 233000, China;
2. Anhui Provincial Group Limited for Yangtze-to-Huaihe Water Diversion, Hefei 230601, China;
3. Anhui Survey & Design Institute of Water Resources & Hydropower Co., Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: The classification of the navigation flow conditions at the confluence of a large-scale water drop project group on an artificial canal can pave the way for the selection of several typical water drop projects as the key research objects for numerical simulation or physical model tests and provide technical support for the subsequent comprehensive navigation safety evaluation of the water drop project group. The navigation flow conditions at the confluence of a water drop project mainly depend on quantitative influencing factors, such as the confluence ratio, confluence angle, flow, weir width, and water depth of the main channel, and the type of the confluence layout. The evaluation index for classifying the complexity of navigation flow conditions constructed on the basis of the quantitative influencing factors can quantitatively reflect the complexity of the navigation flow conditions at the confluence. Using the minimum-maximum standardization method and the K-means cluster analysis method, the paper classifies the water drop project group in the Yangtze-Huaihe communication section into four

收稿日期: 2022-06-13

*基金项目: 安徽省引江济淮集团有限公司科技项目(YJJH-JHGT-ZX-20190823178)

作者简介: 施奇(1981—), 男, 工程师, 从事水力学及河流动力学的研究。

categories according to the evaluation index. Then, it selects 18 typical water drop projects with highly complex navigation flow conditions and highly representative types of confluence layouts from the 50 water drop projects as the key research objects. These typical water drop projects are in a relatively balanced distribution in various types of confluence layouts.

Keywords: water drop project; navigation condition; classification; evaluation index; cluster analysis

我国 2035 年将打通南北向跨流域水运大通道,建设新大运河,统筹推进长江、珠江、淮河等主要水系间、京杭运河黄河以北段复航工程以及平陆运河等运河沟通工程^[1],未来一段时间将是我国运河工程建设的高峰期。大型人工运河开挖时原有水系被打断,往往需建设数十座跌水工程,使现有水系平顺汇入运河干渠^[2]。跌水工程下泄的支流来水与运河干渠交汇后产生的斜向水流会影响汇流口附近的通航安全。受条件限制,一般无法对所有的跌水工程一一进行数值模拟或物理模型试验以研究其汇流口通航水流条件。为解决此问题,可先行开展跌水工程群汇流口通航水流条件分级研究,筛选出若干典型跌水工程重点开展数值模拟或物模试验;其余非典型跌水工程则可选择汇流口布置类型相同、分级评价指标值相近的典型跌水工程作为相似跌水工程,依据相似跌水工程的通航水流条件及量化评价指标的差异进行通航安全近似评价。开展跌水工程群汇流口通航水流条件分级研究,对科学确定通航安全研究的重点研究对象、系统完成跌水工程群通航安全评价具有十分重要的意义,也是开展引江济淮工程江淮沟通段 50 座跌水工程汇流口通航水流条件分级研究的目的。

目前国内鲜有航运建筑群通航水流条件分级研究的文献,分级、分区的研究方法更多地应用在国土、农田等行业相关研究中。苗长虹等^[3]建立了生态、粮食、资源、经济等评价指标体系,采用 K 均值聚类分析方法开展黄河流域高质量发展分区分级分类调控策略研究。张喆^[4]通过对众多影响因子赋予相应权重构建综合量化评价指标,采用灰色聚类方法对区域所有栅格进行归类

分级,开展甘肃省西部地区矿山地质灾害危险性分区评价。原亚超等^[5]采用 K 均值聚类、分级分区等研究方法开展黄土高原台塬区域麦田土壤养分的管理分区研究。朱志松等^[6]开展模糊聚类理论下的地质工程适宜性研究,通过层次分析法形成评价因子权重分级并建立模糊聚类评判方法,通过评价因子赋值叠加进行地质工程建设适宜性分区。在上述各项研究中,对量化评价指标的归类分级较多地采用了各种聚类分析方法,其中 K 均值聚类算法因执行效率高、易于操作得到广泛使用^[7-8]。

本研究将分级及聚类分析方法引入江淮沟通段跌水工程群汇流口通航水流条件研究中:由汇流比(支流流量与干、支流总流量比值)、汇流角、流量、堰宽、干渠水深等汇流口通航水流条件主要量化影响因子建立通航水流条件复杂度分级评价指标;采用最小-最大标准化法及 K 均值聚类分析方法,根据分级评价指标将江淮沟通段跌水工程群分级为 4 个类别;自全部 50 座跌水工程中筛选出 18 座通航水流条件复杂度较大、汇流口布置形式代表性较好的典型跌水工程,其在各汇流口布置类型中的分布较均衡;将 18 座典型跌水工程作为江淮沟通段跌水工程群通航安全研究的重点研究对象,并为跌水工程群后续的全面通航安全评价提供技术支撑。

1 工程概况

引江济淮工程由引江济巢、江淮沟通和江水北送 3 段组成,其中江淮沟通段为引江济淮工程输水线路的中段,由图 1 可见,江淮沟通段自派河口经江淮分水岭,至东淝河入淮河口,

全长约 156.2 km。江淮沟通段输水干渠作为人工运河，属江淮运河的北段，航道等级为Ⅱ级，可通航 2 000 吨级船舶，是安徽境内沟通淮河和长江流域航运的唯一线路，建成后将促进形成平行于京杭运河的我国第 2 条南北水运大通道^[9]。

江淮沟通段人工运河干渠挖宽挖深后，为使现有水系平顺汇入干渠且不影响通航，需建设 50 座跌水工程，下泄水流汇入运河干渠时会在汇流口形成一定范围的斜向水流，产生回流和分离型小漩涡，横流和回流使航行船舶(队)产生横漂和扭转^[10]，增加船舶操纵的难度，影响通航安全。

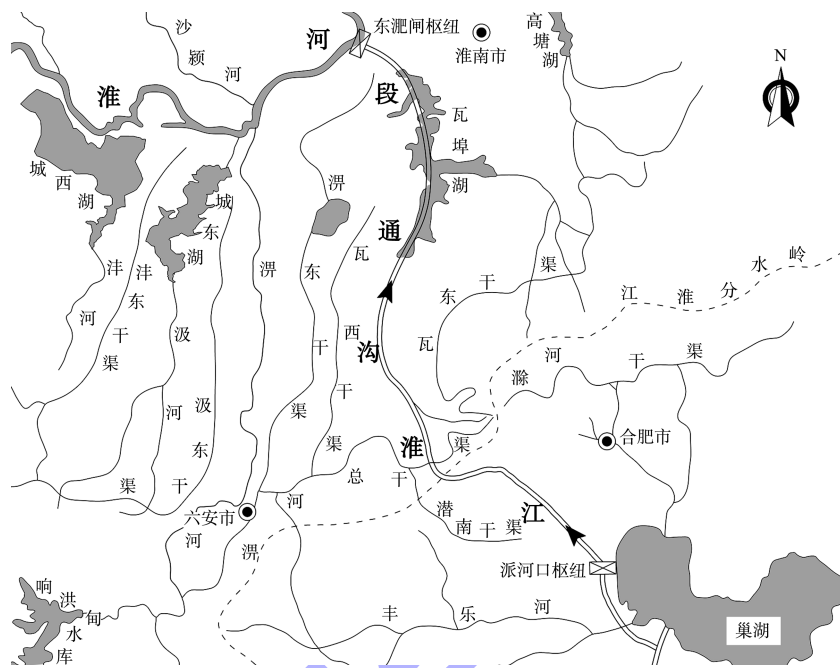


图 1 引江济淮工程江淮沟通段总平面

跌水工程下游汇流口通航水流条件主要量化影响因子有：汇流比 β 、汇流角 α 、干渠来流流量 $Q_{干}$ 、跌水工程上游支流来流流量 Q 、堰宽 B 、干渠水深 H 等；同时，跌水工程下游扩散段两侧边墙、边坡与干渠岸坡的连接布置作为交汇区域的固壁边界，直接影响汇流口水流运动的总体流态及跌水工程下泄水流的转向效果，因此汇流口布置形式也是跌水工程汇流口通航水流条件的重要影响因素之一。

由于数量众多，设定 50 座跌水工程的编号为 1~50。50 座跌水工程汇流比 β 值为 0.01~1.00；汇流角 α 为 30°~90°，其中 90°正交的有 42 座；因与江淮分水岭之间距离的差异，50 座跌水工程位置处干渠 20 a 一遇来流流量 $Q_{干}$ 为 15.5~1 567.6 m³/s；上游支流满槽来流流量 Q 为 2.5~511.0 m³/s，其中大于 100 m³/s 的有 8 座，小于 20 m³/s 的有 19 座；跌水工程堰净宽 B 为 3.0~30.0 m；干渠 20 a 一遇

水深 H 为 10.3~10.8 m。

江淮沟通段跌水工程群汇流口布置 4 类代表形式及主要水力参数见图 2，50 座跌水工程的汇流口布置形式对应类型见表 1。由图 2 和表 1 可以看出，江淮沟通段跌水工程群汇流口布置有 4 类代表形式：1) H_1 类，跌水工程下游扩散段两侧边坡采用左右不对称圆弧锥坡与干渠岸坡衔接，此类布置跌水工程汇流角均小于 90°，共 8 座；2) H_2 类，跌水工程下游扩散段两侧边坡采用对称圆弧锥坡与干渠岸坡衔接，各跌水工程锥坡圆弧半径略有差异，共 10 座；3) H_3 类，跌水工程下游扩散段两侧边墙、边坡采用对称垂直边墙及圆弧锥坡与干渠岸坡衔接，各跌水工程间边墙及圆弧锥坡尺寸略有差异，共 29 座；4) H_4 类，跌水工程下游扩散段采用其它对称衔接形式布置，共 3 座，其汇流口布置与其它跌水工程均不相同。

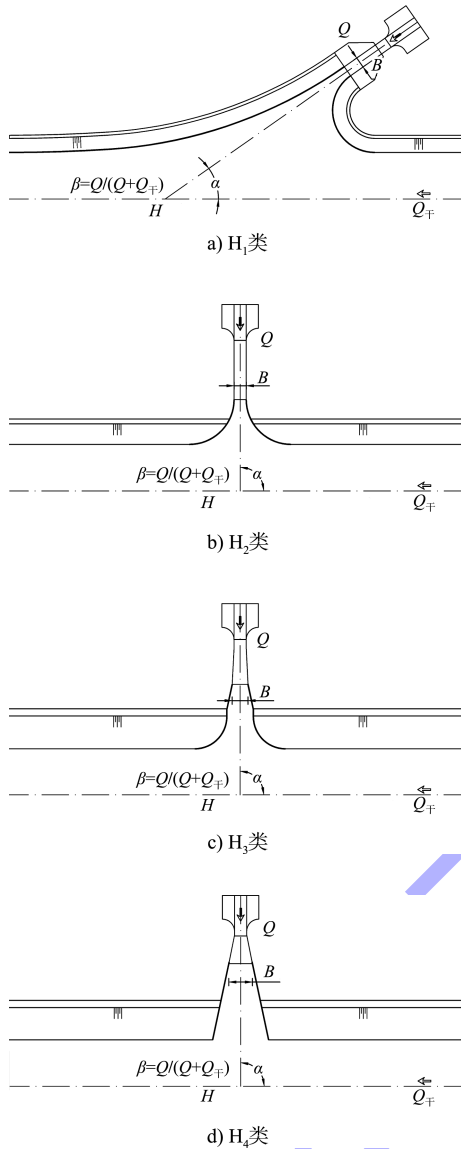


图2 跌水工程群汇流口布置4类代表形式及主要水力参数

表1 50座跌水工程汇流口布置形式的对应类型

汇流口布置类型	工程数量	工程编号
H ₁	8	2,3,4,9,12,14,22,45
H ₂	10	1,5,6,7,8,10,11,13,15,17
H ₃	29	19,20,21,23,24,25,26,27,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,46,47,48,49,50
H ₄	3	16,18,28

2 分级量化评价指标

江淮沟通段跌水工程群通航水流条件分级研究首先需构建量化评价指标。利用 β 、 α 、 Q 、 B 、 H 等通航水流条件主要量化影响因子构建通航水流条件复杂度指标 K 。一般情况下, β 越大,代表

跌水工程下泄的 Q 占比越大,对汇流口通航水流条件产生的影响越大; α 越大,汇流口相同流速下产生的横向流速及回流流速就越大; $Q/(BH)$ 越大,意味着跌水工程下泄水流在汇流口产生的平均流速越大,流向相同时产生的横向流速就越大。据此得到通航水流条件复杂度指标 K 值计算式为:

$$K = \sqrt{\beta} \sin \alpha Q / (BH) \quad (1)$$

式(1)中对 β 采用开方处理,既突出了 β 对汇流口通航水流条件的较大影响,也避免大多数 β 较小的跌水工程 K 指标值分布过于集中的情况。 K 值可定量反映跌水工程下游汇流口通航水流条件的复杂程度。

江淮沟通段跌水工程群的2种典型通航工况为5 a一遇及20 a一遇通航工况。对全部50座跌水工程2种典型通航工况分别进行 K 指标值计算,得到50座跌水工程5 a一遇通航工况 K 指标值为0.008~1.145 m/s,20 a一遇通航工况 K 指标值为0.004~1.120 m/s。采用最小-最大标准化方法进行标准化处理以计算 K 的归一化值^[11]:

$$K'_i = (K_i - K_{\min}) / (K_{\max} - K_{\min}) \quad (2)$$

式中: K'_i 为任一跌水工程某一通航工况下 K 指标归一化值; K_i 为该跌水工程相同工况下的 K 指标值; K_{\min} 为全部50座跌水工程相同工况下 K 指标最小值; K_{\max} 为全部50座跌水工程相同工况下 K 指标最大值。江淮沟通段跌水工程群通航水流条件复杂度指标归一化值 K' 分布见图3。

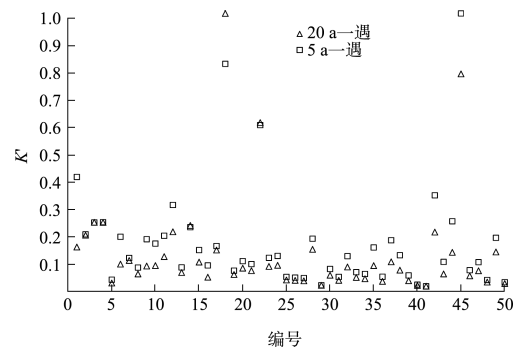


图3 跌水工程群通航水流条件复杂度指标归一化值 K' 分布

由图3可以看出:1)50座跌水工程5 a一遇及20 a一遇两通航水流条件复杂度指标归一化值

中, $K' \geq 0.15$ 的值共 27 个, 在图中上部区域分散分布; $K' < 0.15$ 的值共 73 个, 在图中下部区域分布较集中; 2) 一般 K' 值越大则汇流口通航水流条件复杂度越大, 有 18 座跌水工程 5 a 和 20 a 一遇两典型通航工况 K' 值均小于 0.15, 这些跌水汇流口通航水流条件复杂度相对较低; 3) 同一跌水工程由于 5 a 和 20 a 一遇两通航工况下的 β 、 Q 、 H 等不尽相同, 导致两工况下的 K' 不完全相同: 有 46 座跌水工程 5 a 一遇通航工况 K' 值大于 20 a 一遇设计通航工况, 一般大 0.000 1~0.256 9, 主要原因是前者 β 大于后者; 有 4 座跌水工程 5 a 一遇通航工况 K' 值小于 20 a 一遇设计通航工况, 一般小 0.000 2~0.184 7, 主要原因是后者 Q 较大。

3 跌水工程通航水流条件复杂度分级

取每一跌水工程 5 a 和 20 a 一遇两通航工况 K' 较大值组成数据集以反映该跌水工程汇流口通航水流条件复杂度最大的情况。比如, 1 号跌水工程两通航工况 K' 值分别为 0.33、0.02, 则取较大值 0.33 作为 1 号跌水工程的 K' 指标值置入数据集中。

采用 K 均值聚类算法对包含 50 个个体的 K' 数据集进行聚类分析, 依据距离函数发掘 K' 数据集中个体的相似性, 分入到指定数量的类别中, 并自动计算各类别的中心值及取值区间。与凭主观经验人为确定的各类别取值区间相比, 采用 K 均值聚类算法进行类别划分能够确保同一类别内个体保持良好的相似性, 划分更加科学合理。

根据图 3, 江淮沟通段 50 座跌水工程 K' 值表现为局部分散、大部集中, 根据个体数量先将数据集分入 6 个类别中, 对应的类别中心值分别为 1.000、0.600、0.344、0.195、0.107、0.036, 各类别跌水工程数量分别为 2、1、3、12、13、19; 各类别取值区间的上、下边界为相邻两类别中心值的均值或数据集 K' 个体极值, 由此得到 6 个类别的取值区间分别为 [1.000, 0.800]、(0.800,

0.472]、(0.472, 0.270]、(0.270, 0.151]、(0.151, 0.072]、(0.072, 0.000]。因前 3 个类别个体数量太少且 K' 值均较高, 为提高其个体数量及类别代表性, 将其合并为 1 个类别, 最终得到江淮沟通段 50 座跌水工程按通航水流条件复杂度指标分级见表 2 和图 4。

表 2 江淮沟通段 50 座跌水工程指标分级

类别	K' 值取值区间	跌水工程数量	跌水工程编号
K_1	[1.000, 0.270]	6	1、12、18、22、42、45
K_2	(0.270, 0.151]	12	2、3、4、6、9、10、11、14、28、37、44、49
K_3	(0.151, 0.072]	13	7、15、16、17、20、21、23、24、32、35、38、43、47
K_4	(0.072, 0.000]	19	5、8、13、19、25、26、27、29、30、31、33、34、36、39、40、41、46、48、50

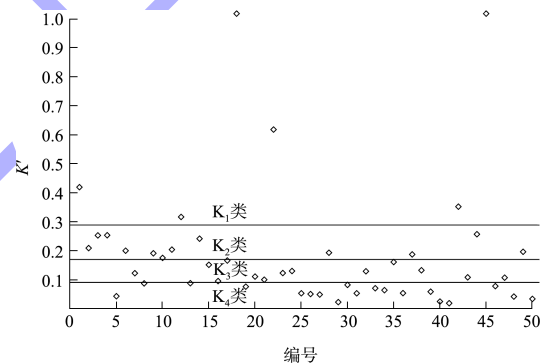


图 4 江淮沟通段 50 座跌水工程指标分级

由表 2 和图 4 可以看出: 1) 江淮沟通段跌水工程群按通航水流条件复杂度分级为 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 等 4 个类别, 自类别 K_1 到 K_4 , K' 值域区间高度及对应跌水工程汇流口通航水流条件复杂度逐渐降低; 2) K_1 类别跌水工程 K' 值分布区间为 [1.000, 0.270], 共有 6 座跌水工程, β 为 0.38~1.00, 过堰最大单宽泄量为 5.5~17.0 m^2/s , α 除 22 号跌水工程为 63°外其余均为 90°; 3) K_2 类别跌水工程 K' 值分布区间为 (0.270, 0.151], 共有 12 座跌水工程, β 为 0.16~0.71, 过堰最大单宽泄量为 4.1~17.5 m^2/s , α 除编号 2、3、4、9、14、44 跌水工程为 30°~65°外其余均为 90°; 4) K_3 类

别跌水工程 K' 值分布区间为 $(0.151, 0.072]$, 共有 13 座跌水工程, β 为 $0.07 \sim 0.42$, 过堰最大单宽泄量为 $2.9 \sim 7.5 \text{ m}^2/\text{s}$, α 均为 90° ; 5) K_4 类别跌水工程 K' 值分布区间为 $(0.072, 0.000]$, 共有 19 座跌水工程, β 为 $0.01 \sim 0.17$, 过堰最大单宽泄量为 $0.8 \sim 5.2 \text{ m}^2/\text{s}$, α 除编 8 号跌水工程为 83° 外其余均为 90° ; 6) K_1 类别 β 、过堰单宽泄量、 α 总体均较大, 故通航水流条件复杂度整体最大; K_4 类别虽 α 较大, 但 β 、过堰单宽泄量总体最小, 故通航水流条件复杂度整体最低; K_2 、 K_3 类别居中, 虽然 K_2 类别部分跌水工程 β 、过堰单宽泄量较大, 但 α 为 $30^\circ \sim 65^\circ$, 相对较小, 降低了其 K' 值及汇流口通航水流条件复杂度。

4 典型跌水工程的选择

对于江淮沟通段汇流口布置类型为 H_1 、 H_2 、 H_3 等 3 类的跌水工程, 相同类型跌水工程的下游扩散段翼墙或边坡与干渠岸坡的衔接布置即约束

汇流口水流运动的固壁边界十分相似, 导致跌水工程下泄水流在汇流口转向时产生偏流、回流的区域较为接近, 从而使汇流口交汇水流流态总体较为相近。若两相同汇流口布置类型跌水工程的通航水流条件复杂度指标值也接近, 则其汇流口水流运动的相似性进一步提高, 这样的两个跌水工程可视为通航水流条件相似跌水工程。

典型跌水工程的选择首先依据通航水流条件复杂度的大小, 因为通航水流条件复杂度较大的跌水工程支流下泄水流对通航安全影响相对较大, 需要开展重点研究; 同时也要兼顾汇流口布置形式代表性, 即所选典型跌水工程在 4 种汇流口布置类型中都有相对均衡的分布, 以便其它非典型跌水工程都可依据汇流口布置类型相同、量化评价指标相近的相似典型跌水工程研究成果及量化评价指标差异进行通航安全近似评价。

按照上述思路, 江淮沟通段跌水工程群共筛选出 18 座典型跌水工程, 见表 3。

表 3 江淮沟通段 18 座典型跌水工程选择

典型跌水工程编号	支流满槽泄量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	K' 值	分级类别	汇流口布置类型	选择理由
1、12、18、22、42、45	55.0、97.0、183.0、 206.0、133.0、511.0	0.401、0.298、1.000、 0.600、0.333、1.000	K_1	H_2 、 H_1 、 H_4 、 H_1 、 H_3 、 H_1	18 号跌水工程为 H_4 类
2、3	252.0、368.0	0.190、0.234	K_2	H_1	两跌水工程邻近, 通航水流条件可能相互影响
16、28	11.8、73.7	0.076、0.175	K_3 、 K_2	H_4	H_4 类
4、6、11、14、44、49	218.0、45.8、58.2、 198.0、70.9、98.3	0.235、0.181、0.185、 0.223、0.238、0.178	K_2	H_1 、 H_2 、 H_2 、 H_1 、 H_3 、 H_3	K_2 类别中 K' 值较大
35、37	29.1、32.6	0.142、0.169	K_3 、 K_2	H_3	K_2 、 K_3 类别中 K' 值较大且为 H_3 类

由表 3 可以看出: 1) 典型跌水工程保留了通航水流条件复杂度最大的 K_1 类别中的全部 6 座跌水工程, 剔除了复杂度最低的 K_4 类别中的全部 19 座跌水工程; 2) 保留了临近且通航水流条件可能相互影响的 2 座跌水工程及 H_4 类中全部 3 座汇流口布置与其它跌水工程均有较大不同的跌水工程; 3) 对剩余 K_2 、 K_3 类别跌水工程, 先剔除了全部

满槽泄量小于 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 、支流来水对汇流口通航水流条件总体影响较小的跌水工程, 对余下跌水工程兼顾汇流口布置形式代表性筛选出 K' 指标值相对较大的跌水工程; 4) 典型跌水工程中汇流口布置类型为 H_1 、 H_2 、 H_3 、 H_4 类跌水工程的数量分别为 7、3、5、3, 占各类型跌水工程总数百分比分别为 87.5%、30.0%、17.2%、100%; 5) H_1 类跌水

工程因支流满槽泄量大导致 K' 值较大, 入选比例较高; H_4 类各跌水工程汇流口布置与其它所有跌水工程都不同, 无法匹配相似典型跌水工程对其进行通航安全近似评价, 故均选为典型跌水工程; 部分 H_2 、 H_3 类典型跌水工程因考虑适当调高该类型中典型跌水工程比例而入选。

本研究筛选出 18 座典型跌水工程作为后期江淮沟通段跌水工程群通航水流条件重点研究对象, 将通过三维数值模拟或物理模型试验进行深入研究; 其余 32 座非典型跌水工程均可匹配到汇流口布置类型相同且量化评价指标值相近的相似典型跌水工程, 依据相似典型跌水工程研究成果及与相似典型跌水工程量化评价指标的差异, 分析其汇流口最大横向流速及最大回流流速的近似值, 从而进行通航安全近似评价。

5 结论

1) 跌水工程汇流比、汇流角、支流流量、堰宽、干渠水深以及汇流口布置形式是影响汇流口通航水流条件的主要因素, 采用这些量化影响因子构建的通航水流条件复杂度指标可定量反映跌水工程下游汇流口通航水流条件的复杂程度。

2) 采用 K 均值聚类分析方法, 根据通航水流条件复杂度指标值将跌水工程群分级为 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 等 4 个类别; K_1 类别跌水工程汇流比、单宽泄量、汇流角均较大, 故通航水流条件复杂度整体最大; K_4 类别虽汇流角较大, 但汇流比、单宽泄量最小, 故通航水流条件复杂度整体最低; K_2 、 K_3 类别居中, 其中 K_2 类别部分跌水工程汇流比、单宽泄量较大, 但汇流角为 $30^\circ \sim 65^\circ$, 相对较小, 降低了其通航水流条件复杂度。

3) 自全部 50 座跌水工程中筛选出 18 座通航水流条件复杂度较大、汇流口布置形式代表性较好的跌水工程作为典型跌水工程, 典型跌水中 H_1 、

H_2 、 H_3 、 H_4 等 4 类汇流口布置形式跌水工程的数量分别为 7、3、5、3, 占各类型跌水工程总数的百分比分别为 87.5%、30.0%、17.2%、100%; 典型跌水工程的选择在主要依据量化评价指标的同时充分兼顾了汇流口布置类型的均衡分布。

4) 本研究确定了江淮沟通段跌水工程群通航水流条件的重点研究对象, 为后期跌水工程群的全面通航安全评价提供了技术支撑。

参考文献:

- [1] 杨靓, 李歌清, 黄力, 等. 湘桂赣粤运河开发重点问题亟待研究[J]. 综合运输, 2022, 44(1): 25-27.
- [2] 张辉, 虞邦义, 贲鹏, 等. 引江济淮跌水工程汇流口通航条件三维数值模拟[J]. 水运工程, 2021(8): 111-116.
- [3] 苗长虹, 张佰发. 黄河流域高质量发展分区分级分类调控策略研究[J]. 经济地理, 2021, 41(10): 143-153.
- [4] 张喆. 甘肃省西部地区矿山地质灾害危险性分区评价方法研究[J]. 世界有色金属, 2021(11): 100-101.
- [5] 原亚超, 冯美臣, 王超, 等. 黄土高原台塬区域麦田土壤养分的管理分区[J]. 山西农业科学, 2020, 48(5): 745-750, 760.
- [6] 朱志松, 潘金匹. 模糊聚类理论下的地质工程适宜性研究[J]. 世界有色金属, 2020(22): 208-209.
- [7] 晏杰. 聚类分析在家庭类型划分中的应用方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2007, 7(1): 137-142.
- [8] 张文君, 顾行发, 陈良富, 等. 基于均值-标准差的 K 均值初始聚类中心选取算法[J]. 遥感学报, 2006, 10(5): 715-721.
- [9] 陈艳, 黄涛. 引江济淮工程派河口复线船闸建设规模[J]. 水运工程, 2021(11): 105-110, 191.
- [10] 周华兴, 郑宝友, 李金合, 等. 船闸引航道口门区水流条件限值的探讨[J]. 水运工程, 2002(1): 38-42.
- [11] 张秀梅, 王涛. 模糊聚类分析方法在学生成绩评价中的应用[J]. 渤海大学学报(自然科学版), 2007, 28(2): 169-172.

(本文编辑 王传瑜)