

■ 灌溉水源与输配水系统 ■

文章编号: 1672-3317(2022)06-0105-09

实测堰流精度效应影响下的泄流计算方法研究

焦萱^{1,4}, 赵兰浩^{1*}, 王正中^{2,3}, 邱勇⁴

(1.河海大学 水利水电学院, 南京 210024; 2.西北农林科技大学 旱区寒区水工程安全研究中心 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 西安 712000; 3.中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000; 4.云南农业大学 水利水电学院, 昆明 650201)

摘要:【目的】明确直角堰在不同结构布置选型下的超泄特性与其大小关系。【方法】针对简化综合流量系数假设下,基本堰流关系模型率定中的短系列多元回归处理范式使用局限问题,由试验统计特征下的不同实测堰流精度率定结果发现了短系列因果映射关系中的实测堰流精度统计效应,进而建立了多维可变堰流特征变量模糊概率关联分布识别和实测堰流精度效应下的一致性泄流响应机制。【结果】超泄特征变量前后堰宽比 a/c 、侧堰长度 b 和展宽比 L/W 参与的多元短系列泄流计算是一种区别于传统直线型断面因果映射关系模型的多维可变模糊概率关联分布响应;从算法机理的角度揭示了相同堰顶水头 H 下,前后堰宽比 a/c 、侧堰长度 b 和展宽比 L/W 对于指标测流量 $[Q'_{cr}]$ 的表征贡献无先后大小之分,具有同等显著地位。【结论】综合现有文献成果中不同短系列实测堰流精度样本的应用率定与验证表明,方法计算结果和试验统计结果一致性较好,研究成果可为相关工程的复核设计提供参考。

关键词: 直角堰型; 试验统计; 基本堰流关系模型; 实测堰流精度; 泄流计算方法

中图分类号: TV83

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2021421

OSID:



焦萱, 赵兰浩, 王正中, 等. 实测堰流精度效应影响下的泄流计算方法研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(6): 105-112, 146.
JIAO Xuan, ZHAO Lanhao, WANG Zhengzhong, et al. Calculating Water Flow Rate with Measurement Errors of the Weir Considered[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(6): 105-112, 146.

0 引言

【研究意义】溢流堰作为溢洪道中一种用途广泛的泄流防洪设施,其流量施测及控制不仅是水流边界近似的基本条件,也是加强水资源合理分配及雨洪高效利用的重要保障。近年来,随着极端气候出现频率的加快及人类活动建设需要,可能最大洪水 PMF 或最大降水 PMP 的工程设计理念已不能满足全球普遍提高的泄水建筑物洪水标准要求,甚至还要考虑溃坝等极端致灾因子影响下的未来不确定超泄复核问题^[1-3]。相比短期增加溢洪道或改变溢洪道尺寸的除险加固思路限制,寻找一种区别于常见直线式挡水泄流,即能解决传统泄流型式与地形、生态间日渐凸显的矛盾,又能用于已建工程升级改造的结构布置型式格外迫切。

【研究进展】直角堰型整体构造简洁,溢流前缘长,环境适应性强,在当前泄流宽度有限又想提高作

用水头泄流能力的工程实际下是一种相对经济可靠的新选择^[4]。作为结构布置选型的关键,首先要明确不同物理情境下的超泄特性及其大小,主要是以概化水工模型试验研究为主,张靖等^[5]、Zhang 等^[6]率先基于直线堰型的参数化改变方案对比,得出了试验综合流量系数估算公式及相应流量扩大倍数;李庆梅等^[7]通过不同侧堰长度变化下的泄流拟合分析,提出了直角堰型泄流能力大小并不受侧堰长度变化影响的结论;邱勇等^[8]利用侧堰平面位置对前堰长度的影响,发现了前堰长度与泄流能力大小呈非线性变化的特性;周鑫宇等^[9]融合前堰和侧堰协调作用变化的考量,明确了侧堰在泄流能力大小差异化表达中的次要影响;王尚金等^[10]在对比观察实际过堰水流流态演变时,指出了以往部分组合变量研究的片面性,并在文献[5]的变量选择基础上进一步证明了多结构特征变量下的直接非线性溢流前缘长度变化;综合上述研究多为短系列试验回归系数 R 的实测精度控制近似结果,受制于短系列多元非线性回归处理范式使用的局限问题,相比泄流量与堰顶水头呈稳定回归系数相关的直线型断面,直角堰流伴结构耦合运动惯性及侧堰隐性非恒定输入影响客观存在,但尚未见到相关内

收稿日期: 2021-09-02

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金项目(2018Y068)

作者简介: 焦萱(1994-),男,博士研究生,主要从事流固耦合及水工结构抗震方面研究。E-mail: jiaoxuan@stu.ncwu.edu.cn

通信作者: 赵兰浩(1980-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事流固耦合及水工结构抗震方面研究。E-mail: zhaolanhao@hhu.edu.cn

容的文献资料报道。

【切入点】最新文献[11]中尝试将智能黑箱算法用于求解多结构特征变量下的直角堰型泄流能力大小并取得一定成效，但无推理映射关系所需的大样本容量及数值计算精度却是有限工程实践难以满足且适用的。【拟解决的关键问题】参考文献[12-14]中系统随机变量综合作用下的数值结果，由输出结果围绕概率守恒分布均值线作随机游走的现象学本质，本文拟在水工模型试验比照及统计结果响应概率可靠一致的理论分析基础上，通过试验统计特征下的实测堰流精度率定结果分析，得到短系列因果映射关系中的实测堰流精度效应，进而在随机点尺度量测下，建立实测堰流精度效应影响下的直角堰流计算方法，以期对多元非线性映射系统中由多结构特征变量不确定性影响导致的数值响应分布差异进行较为全面的描述。

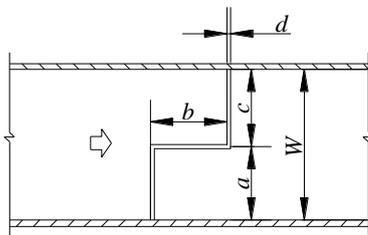
1 基本堰流模型短系列实测堰流精度统计效应

1.1 试验统计特征下的实测堰流精度率定结果

直角堰型的过堰水流属于纵向泄流和横向分散流的混合形态，存水宫室后堰流途经横向侧堰后转为纵向下泄水流，进而与泄水前堰流高低交互混掺，流场空间向量运动复杂，具有典型的三维结构相依特征（图 1（a））^[10]。考虑到防洪、取水及缓解冲折水流对下游渠道冲刷等要求，其几何结构布置主要包括垂直于泄水方向轴线的前堰和后堰，以及平行于对称面轴线的侧堰 3 部分（图 1（b））。



(a) 前堰、侧堰及后堰水流流态



(b) 直角堰型结构布置分布

注 a 为前堰宽度； b 为侧堰长度；
 c 为后堰宽度； d 为堰体厚度； W 为渠道宽

图1 直角堰型泄流原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of right angle weir discharge principle

由图 1 可知，一定渠道宽度、相同堰顶水头下，直角堰型相比直线式挡水泄流布置明显增加了溢流

前缘长度扩展的可能并有助于提高有限流域超泄能力的产生。基于结构尺寸断面概化，考虑波的传播扩散及近似摩阻对沿程水流输运的影响，可由传统非恒定流 Saint Venant's 方程组对相应堰流推导量的定变分离集数组成进行校正归一并引入拟 Lipschitz 等价变换得其基本堰流关系模型为：

$$\begin{cases} Q=CORH^n \\ COR=\left[\frac{n'}{\langle \cdot \rangle} \left(S_0 - \frac{\partial H}{\partial l}\right)^2\right]^n, \end{cases} \quad (1)$$

式中： Q 为泄流量（L/s）； COR 为泄流系统行为表征系数； H 一般为距前堰 3~5 倍堰高处堰顶水头^[15]（m）； S_0 为渠道坡度； l 为渠道底坡长（m）； n' 为曼宁系数； $\langle \cdot \rangle$ 为推导量纲定变分离集数； n 为自然有确界限。

其中 $\langle \cdot \rangle$ 作为 COR 的重要组成部分，无固定数值参照，需要通过泄流边界水流特性的具体试验观测得到，以定量获取广泛流量工况下的堰顶水头变化。但对 $\langle \cdot \rangle$ 中相关变量组成关系的率定，实际多以短系列试验回归系数 R 的不同实测精度控制近似为主，由最小二乘法分别令试验测流量和观测变量噪声为 $Q_n=[q_1, q_2, q_3, \dots, q_n]^T$ 和 $V_n=[V_1, V_2, V_3, \dots, V_n]^T$ ，则已知样本容量为 n 的情况下对目标函数 L 求参数得：

$$\begin{cases} \arg \min_{\hat{R}_n} J=(V_n^T R_n V_n)^{-1} V_n^T R_n Q_n \\ R_n = \begin{bmatrix} \sigma_1^{-2} & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & \sigma_n^{-2} \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (2)$$

式中： J 为样本估计值 \hat{R}_n 的选择矩阵； R_n 为样本参数矩阵； σ_n^{-2} 为样本噪声方差。

故对于同一客观物理实际过程，由于实测样本变量自身选择的不确定，存在简化综合流量系数假设下的基本堰流关系模型可能表达形式多样化：

1) 张靖等^[5]、Zhang 等^[6]的泄流关系模型，回归系数 $R=0.951$ 。为了研究直角堰型的泄流能力大小，张靖团队以基本直线型堰流模型为基础，对参数化水工模型试验数值影响表现采用综合流量系数假设进行简化拟合率定，进而得到了等效直线堰宽作用下的渠道宽度泄流表达式为：

$$\begin{cases} Q=m_w W \sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}} \\ m_w=0.208-0.126 \frac{H}{P}+0.331 \frac{L}{W}-0.027 \frac{a}{c} \end{cases} \quad (3)$$

该式说明，直角堰型的泄流能力大小由已知结构几何参数赋予，其作用特征变量可能包括堰顶水头 H （m）、堰高 P （m）、前堰宽 a （m）、后堰宽 c （m）、

渠道宽 W (m) 和等效直线堰宽 L (m) 6 种。上述变量影响的回归处理表现为堰顶水头与堰高比 H/P 、展宽比 L/W 和前后堰宽比 a/c 分别与综合流量系数 m_w 呈正相关，且直接影响相应泄流能力的数值表达。

2) 王尚今等^[10]的泄流关系模型，回归系数 $R=0.990$ 。王尚今等^[10]直接以结构几何参数非线性作用变量对比试验为基础，通过观察实际水流-结构的耦合交互形态差异，进一步分析得到了考虑溢流前缘长度变化下的等效直线堰宽流量系数 m_L 为：

$$m_L = \frac{a_{p1} H^{b_{p1} + c_{p1}}}{a_{p2} H^{b_{p2} + c_{p2}}}, \quad (4)$$

式中： a_{p1} 、 a_{p2} 、 b_{p1} 、 b_{p2} 、 c_{p1} 、 c_{p2} 分别为与结构参数有关的函数回归型参数表达^[8]。

1.2 短系列因果映射关系中的实测堰流精度效应

对式 (1) 中幂函数类型的因果映射关系推断确定，加性误差因函数性质失效转而采用乘积误差 ϵ 进行回归拟合率定，考虑多变量组合统计序列的最小二乘法方差 σ^2 游走影响，设可导不同回归拟合组成参数关系 $F=Q(h)$ 对实测变化统计序列 $[h_i, q_i]$ 的非线性测度为 $q_i(h_i)$ ，对应变换测度为 \hat{F}_i ，则函数在点 $Q_i(h_i)$ 处忽略小量级项的泰勒展开值为：

$$\sum_{i=1}^n [Q_i(h_i) - \hat{Q}_i(h_i)]^2 \approx \sum_{i=1}^n (F_i - \hat{F}_i)^2 \left(\frac{dQ(h_i)}{dF} \right)^2, \quad (5)$$

式中： h 、 q 分别为堰顶水头、测流量统计序列变化值，其中 i 为自然变数。

故理论推求 $\sum_{i=1}^n (F_i - \hat{F}_i)^2$ 最优的线性回归系数不满足 $\sum_{i=1}^n (Q_i(h) - \hat{Q}_i(h))^2$ 的残差平方和关系最小，即当实测率定样本不包括堰流事件发生的极值或形成分布较短时，对相关泄流能力特性的系统行为描述缺少全面本质的特征差异性作用揭示，使得相应参数的确定表达难以适用，进而易受随机环境下不同实测精度影响，导致可靠性统计结果适用范围失真。为直观评价现有直角堰型率定关系模型的泄流能力计算效果，对比选取文献[9]中的 21 组实测验证数据进行满足文献[16]中推荐可信控制条件下的变比尺适应性精度计算分析，结果见图 2。

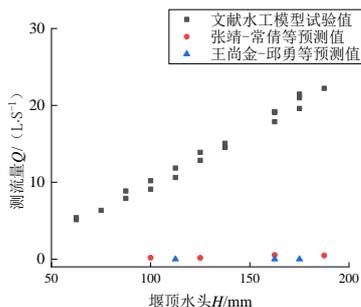


图 2 模型计算值与实测数值比照结果

Fig.2 Comparison results between model calculated and measured

由图 2 可知，当以文献[17]中的确定可靠相对量测误差 8% 记，且充分考虑各堰流计算模型的应用条件及试验水流表面张力影响，将统计对比变化序列参考阈值取 0 L/s 时，各泄流关系模型计算点据与实测分布一致性较差，但有效区间内的数值单调性满足式 (1) 中的直角堰型基本确定性函数关系性质，现引入纵横指标变量倚变连系定义得其在确定函数关系下的统计形变保持判断为：

$$\begin{cases} u=h_i \\ v=q_i \gamma(h_i) \left[1 - \frac{\phi(h_i)}{q_i} \right] \end{cases}, \quad (6)$$

式中： u 、 v 为变量率定函数表征； $\phi(h_i)$ 为 Q 倚 H 的回归方程； $\left[1 - \frac{\phi(h_i)}{q_i} \right]$ 为经验形变识别方程； $\gamma(h_i)$ 为变换保持参变量。

排除理想大样本假设下的形变渐进稳定条件，当考虑有限实测随机环境精度变化量测作为基于多种直角堰流特征变量组合作用的某种不确定性而建立的某种特殊概率期模糊反馈度量时，在涉及不同确定实测精度回归参变的情况下，由形变函数理论可证，式 (5) 存在局部概率单向形变满足适应，且反量替换表达不足的情况：

$$\frac{\sum(u_i - \bar{u}_i)^2}{\sum(u_i - \bar{u})^2} \neq 1 - \frac{\sum(y_i - \bar{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2}, \quad (7)$$

式中： u_i 、 \bar{u}_i 和为样本变量回归系数 R 的求解参数； y_i 、 \bar{y}_i 和 \bar{y} 为回归变量回归系数 r 的求解参数。

同时综合当前等效直线堰宽下综合流量系数多元非线性回归选配函数性质的相似性，受制于多元非线性回归处理范式的有限，存在变量实测样本容量的无指标确定缺陷使得相应函数的数形表达属于欠或过拟合证明的可能。相比泄流量与堰顶水头呈稳定线性系数相关的直线型断面，不同试验方案下的直角堰流属于伴多种结构尺寸耦合作用的惯性运动，侧堰隐性非恒定输入影响的客观存在，使得短系列因果映射关系在重积分概念下分解为：

$$F(H, Q) = \int_{h_i}^{\infty} \int_{q_i}^{\infty} f(h, q) dh dq = \int_{h_i^n}^{\infty} \int_{q_i^n}^{\infty} f(h, q) |J| dh_i^n dq_i^n$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial h_i^n} & \frac{\partial h}{\partial q_i^n} \\ \frac{\partial q}{\partial h_i^n} & \frac{\partial q}{\partial q_i^n} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中： $F(H, Q)$ 为直角堰型反馈度量表征； $f(h, q)$ 为不同维度直角堰型模糊边缘表征； $f(h_i^n, q_i^n)$ 为直角堰型多变量边缘表征。

即随机点尺度量测下，直角堰型多元短系列堰流计算模型通常难以确定性构建表达且更倾向于一种区别于传统短系列因果映射关系的多维可变模糊概率关联分布响应机制，称为实测堰流精度效应影响。

2 实测堰流精度效应影响下直角堰流计算方法

2.1 多维可变堰流特征变量模糊概率关联分布识别

2.1.1 可变堰流特征变量边缘子集序列概率标定

由等价关系(\equiv)可知, 存在一个不同类归表征数域子集 J 使得 $\equiv_J = \{(\{A_r\}_r^O, \{A_r\}_r^H) \in R^+ \times R^+ | \text{存在 } n \in N^+, \text{ 使得 } \{A_r\}_r^O - \{A_r\}_r^H = nJ\}$ 。设 Ω 为影响堰流形成的特征变量集, 则表征域内的不同泄流量或堰顶水头有标集合 $\{A_r\}_r \in \Omega$ 关系 r 满足:

$$\begin{cases} \Delta (\{A_r\}_r \in \Omega) Cr \\ r=r^{-1} \\ r \cdot r^{-1} \in r \end{cases}, \quad (9)$$

式中: Δ 为恒同关系。

可设 G_r 为直角堰型实测堰流精度基础集内满足有序偶 $\{(\{A_r\}_r^O, \{A_r\}_r^H) | \{A_r\}_r^O \in \{A_r\}_r^O, \{A_r\}_r^H \in \{A_r\}_r^H\}$ 条件的一个几何覆盖边缘子集, 由变量统计可靠性结果比照特征, 令 G_r 在不确定差异下的累积概率分布表达选择为^[18]:

$$F_{G_r} = \begin{cases} \sum_{x_i < x} p(X=x_i); & \text{第一种情况} \\ \int_{-\infty}^x f(x) dx; & \text{第二种情况} \end{cases}, \quad (10)$$

式中: x 为集合元素; $p(X=x_i)$ 为集合元素点概率; $f(x)$ 为概率分布密度函数。

其中参考影响分布选择表达的定性参数组成及集合元素序列长短需要, 决定辅助采用 Maximum Likelihood 法进行循迹定量确定:

$$\hat{a}_i = \text{argmax} \sum_{i=1}^n \ln f_i(x_i; a_i), \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & G_{r_1} G_{r_2} + \beta G_{r_1} G_{r_2} (1-G_{r_1})(1-G_{r_2}); \quad C(G_{r_1}, G_{r_2}) \\ & \varphi_{\theta}^{-1} [\varphi_{\theta}(G_{r_1}) + \varphi_{\theta}(G_{r_2}) + \varphi_{\theta}(G_{r_3}) + \dots + \varphi_{\theta}(G_{r_n})]; \quad C(G_{r_1}, G_{r_2}, G_{r_3} \dots G_{r_n}; \theta) \\ & \varphi_{\tau} [\varphi^{-1}(G_{r_1}) + \varphi^{-1}(G_{r_2}) + \varphi^{-1}(G_{r_3}) + \dots + \varphi^{-1}(G_{r_n})]; \quad C(G_{r_1}, G_{r_2}, G_{r_3} \dots G_{r_n}; \tau) \\ & (\varphi_R [\varphi^{-1}(G_{r_1}) + \varphi^{-1}(G_{r_2}) + \varphi^{-1}(G_{r_3}) + \dots + \varphi^{-1}(G_{r_n})]; \quad C(G_{r_1}, G_{r_2}, G_{r_3} \dots G_{r_n}; \tau) \end{aligned}, \quad (15)$$

式中: β 为形成参变量; θ 为变量相关参变量; φ^{-1} 为角标参数的分位逆函数; φ 为角标参数的分位函数; τ 为积矩相关矩阵。

最终采用 Inference of Function for Margins 法分析推得其关联分布识别扩张的诱导度量 d_n 组成为:

$$\begin{cases} \hat{\theta} = \text{argmax} \sum_{i=1}^n \ln c[F_i(x_i, a_i) \theta_i] \\ \hat{c} = \text{argmax} \sum_{i=1}^n \ln c[F_i(x_i, a_i) \theta_i] \end{cases}, \quad (16)$$

式中: $\hat{\theta}$ 为定性参数组成; θ_i 为定量参数组成; c 为形成常数。

进而以标定边缘子集特征变量分布的拓扑架构扩张连接函数关系为基础进行多维分布一致的有界

式中: \hat{a}_i 为定性参数组成; a_i 为定量参数组成。

同时基于随机自然分布 $F_r(X_i)$ 和经验精度概率累积表达 $F_{Gr}(X_i)$ 构造的改进 Kolmogorov-smimov 检验识别量 D_n 表示为:

$$\begin{cases} D_i = \sup |F_r(X_i) - F_{Gr}(X_i)| \\ D_n = \max D_i \end{cases}, \quad (12)$$

式中: D_i 为单元素集合最大偏差; D_n 为区间元素集合极大偏差。

2.1.2 多维堰流特征变量关联分布识别扩张

假设可变直角堰流特征变量联合相依特征及不确定性出席差异, 实测堰流精度基础集中有标子集 $\{A_r\}_r^O$ 或 $\{A_r\}_r^H$ 关于 (+) 成为交换群, 且存在数积, 故代数序结构下, 由函数协调相融性质可得其不同边缘子集的进阶拓扑还原依据为:

$$\begin{aligned} \tau' &= \frac{2}{n(n-1)} \sum_{1 \leq i < j \leq n} \text{sign}(x_j - x_i) (y_j - y_i) \\ r &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}\right) \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n}\right)}} \end{aligned}, \quad (13)$$

式中: x, y 分别为被 i, j 标记的不同变量子集元素值; τ' 为 kendall's 秩形系数; r 为线性型系数。

由此参考 Sklan 定理对分离表示成边缘分布与条件分布之积的多元随机变量关联分布进行耦合维度转换得:

$$H(x_1, x_2, x_3 \dots x_n) = C[T_1(x_1), T_2(x_2), T_3(x_3) \dots T_n(x_n)], \quad (14)$$

式中: $H(x_1, x_2, x_3 \dots x_n)$ 为多元联合分布; C 为连接函数; $T_n(x_n)$ 为标定边缘子集特征变量分布。

其中令 C 的不同连接函数型选择为^[19]:

性检验识别决策^[20]:

$$\begin{cases} AIC = 2(k - \ln G_r) \\ BIC = k \ln(n) - 2 \ln(G_r) \end{cases}, \quad (17)$$

式中: AIC 、 BIC 分别为信息准则值; k 为变量参数个数; n 为样本数量。

2.2 实测堰流精度效应下的一致性响应机制

2.2.1 随机多元输入尺度下的变量一致性响应输出

以上述直角堰流特征变量的先验多维概率关联分布识别扩张 $f_i(X)$ 为输入源建立输出响应机制, 并根据实际工程运行需要设置若干临界数值分类区间以防止响应输出抵界失效, 堰流区间内的基本堰流模型

响应关系如下：

$$Q'=g(X), \quad (18)$$

式中： Q' 为输入测流量 (L/s)； $g(X)$ 为模型一致性推理学习响应面。

其中，区间临界测流量 Q'_{cr} (L/s) 控制下的模型输出响应发生概率为：

$$p(Q') = \int_{-\infty}^{\infty} I(g(X) \ll Q'_{cr}) f_x(X) dx$$

$$I(g(X) \ll Q'_{cr}) = \begin{cases} 1; & g(X) \ll Q'_{cr} \\ 0; & g(X) > Q'_{cr} \end{cases} \quad (19)$$

式中： I 为判断函数。

考虑到组合方程积分的复杂性，依据代数序结构中变量延拓与几何维度变化无关的性质^[18]，采用Levy-Lindberg 中心极限定理进行概率转换服从，则由 Monte Carlo 模拟仿真计算得到的数值发生概率为：

$$p(Q') = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I(g(X) \ll Q'_{cr}) \quad (20)$$

2.2.2 PSO-LSSVM 一致性推理学习响应面

参考客观流动介质输运的时间序列震荡、空间分

$$\begin{cases} V = wV + C_1 \text{rand}(\) (P'_{Best} - P) + C_2 \text{rand}(\) (g_{Best} - P) \\ P' = P' + V \\ w = w_{max} - t^* \left(w_{max} - \frac{w_{min}}{t_{max}} \right) \end{cases}, \quad (22)$$

式中： C_1 、 C_2 为响应因子； $\text{rand}(\)$ 为介于0~1之间的随机取值； w 为加权因子； P'_{Best} 为单值最优解； g_{Best} 全局最优解； w_{max} 、 w_{min} 分别表示 w 的最大值和最小值； t 、 t_{max} 是当前迭代及最大迭代次数。

3 方法应用与验证

3.1 边缘子集变量标定行为统计

参考最新水工建筑物泄水及灌溉标准^[21]，由Dirichlet 边界流量试验工况假设，排除过堰水跃回流淹没对局部堰顶水头的影响，分别对现有文献成果特

布不均和采样结果不重复特征刻画，选择LSSVM 向量机器学习并构建泄流量与堰流特征变量边缘子集间的多维模糊概率关联分布的一致性推理学习响应面：

$$g(\widehat{X}) = \sum_{i=1}^n a_i K(x, x_i) + b$$

$$\begin{bmatrix} 0 & \Theta^T \\ \Theta^T & \Omega' + C'I' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{g} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

$$K(x, x_i) = \exp \left\{ -\frac{|x-x_i|^2}{\sigma^2} \right\}$$

式中： $a=[a_1, a_2, a_3, \dots, a_n]^T$ ； $\hat{g}=[g_1, g_2, g_3, \dots, g_n]$ ； $\Theta=[1, 1, 1, \dots, 1]^T$ ； C' 为适应罚值； I' 为单位矩阵； $\Omega'=K(x_i, x_j)$ ； $K(X_i, X_j)$ 是满足 Mercer 条件的对称高斯径向基核函数。

其中，影响LSSVM 向量机推理效率的相关参数优化由加权减量的改进 PSO 算法进行初始化搜索迭代更新，以可能避免传统试错或经验达成所导致的模型性能不可靠或不稳定问题，继而以广义均方误差为目标函数条件对相应数值变化求解的速率 V 和位置 P' 进行确定：

征变量取值下的不同案例样本序列进行有效来源半径筛选，最终得到 187 组原始标定边缘子集变量的短系列实测堰流精度样本行为统计描述（图 3）。

原始标定边缘子集变量统计序列 ($N > 40$) 在置信性水平 α 取 0.010 的条件下，当改进检验识别量值 $D_{n,p} \leq D_{187,99\%}$ 时，差异不确定概率分布下的累积选择表达成立，反之^[22]。当存在多个累积表达选择时，参考夹逼优选原则^[19]，对不同检验识别量 D_n 进行自然排序匹配得到各标定边缘子集变量的最优先验行为分布算子（表 1）。

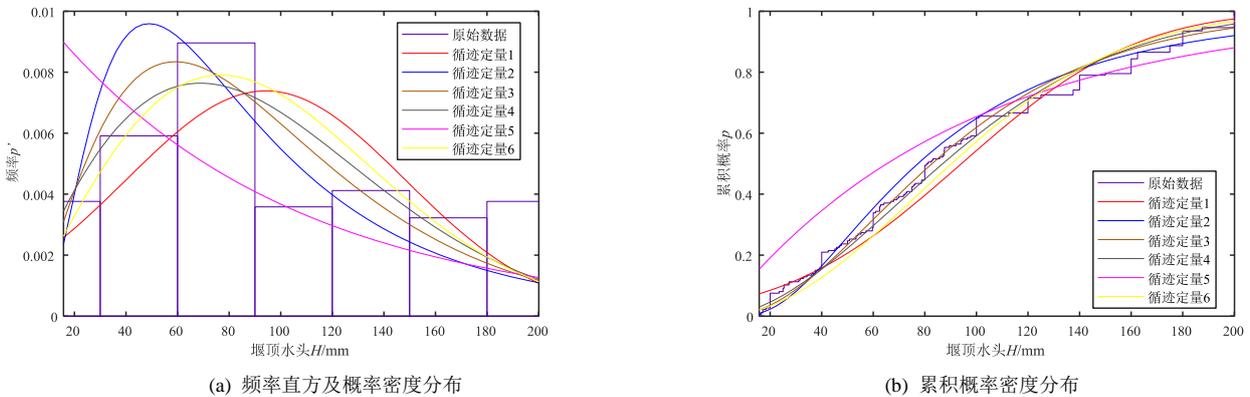


图3 实测堰流精度样本行为统计描述（以堰顶水头H为例）

Fig.3 Statistical of sample behavior of measured weir flow accuracy (taking weir crest head h as an example)

表 1 标定边缘子集最优先验行为分布算子

Table 1 Distribution operator of the highest priority a priori behavior of the calibrated edge subset

标定边缘子集	累计选择表达	先验行为分布算子		
		形状参数 k	尺度参数 θ	位置参数 u
G_H	$\frac{1}{\Gamma(k)\theta^k} x^{k-1} e^{-\frac{x}{\theta}}$	2.686	35.056	-
G_c^a	$1 - e^{-\frac{x}{\theta}}$	-	1.559	-
G_b	$\frac{1}{\Gamma(k)\theta^k} x^{k-1} e^{-\frac{x}{\theta}}$	8.326	15.748	-
$G_{L/W}$	$\frac{1}{\Gamma(k)\theta^k} x^{k-1} e^{-\frac{x}{\theta}}$	0.367	2.125	-

3.2 多维关联分布识别扩张确定

为了更好地描述各直角堰流特征变量间的非线性

表 2 标定边缘子集分布维度指标依赖性分析

Table 2 Dependency analysis of distribution dimension indicators of calibrated edge subsets

标定边缘子集	G_H	G_c^a	G_b	$G_{L/W}$
G_H	1.000 (1.000)	0.173 (0.264)	-0.126 (-0.214)	-0.090 (0.190)
G_c^a	0.173 (0.264)	1.000 (1.000)	0.0762 (-0.072)	0.177 (-0.161)
G_b	-0.126 (-0.214)	0.076 (-0.072)	1.000 (1.000)	0.217 (0.378)
$G_{L/W}$	-0.090 (0.190)	0.177 (-0.161)	0.217 (0.378)	1.000 (1.000)

表 3 多维关联分布识别扩张一致有界性统计决策分析

Table 3 Statistical decision analysis of uniform boundedness for multidimensional correlation distribution

诱导度量	d_1				d_2				
	1.000	0.346	-0.019	-0.025	1.000	0.357	-0.017	-0.021	
扩张依赖参数矩阵 ($\hat{\tau}_i$ 或 $\hat{\theta}_i$)	0.346	1.000	0.192	0.375	0.357	1.000	0.204	0.387	
	-0.019	0.192	1.000	0.394	-0.018	0.204	1.000	0.410	
	-0.025	0.375	0.394	1.000	-0.021	0.388	0.410	1.000	
扩张自由度 ν	1.289 × 10 ⁷				—				
分析值	AIC	-78.214				-76.378			
	BIC	-58.860				-53.797			

对比选用表 3 中分析值偏离统计有界原点的最小程度作为决策依据, 在相关诱导度量设置下的多维堰流特征变量分布完备化识别扩张表达为:

$$C(G_H, G_{a/c}, G_b, G_{L/W}) = T_{\theta, 1.289 \times 10^7} [T^1 \nu(G_H), T^1 \nu(G_{a/c}), T^1 \nu(G_b), T^1 \nu(G_{L/W})], \quad (23)$$

式中: $T_{\theta, 1.289 \times 10^7}$ 三阶完备化空间度量表达; $T^1 \nu$ 为单因素度量表达逆函数。

3.3 PSO-LSSVM 一致性推理学习响应面求解

以多维关联分布识别扩张作为输入, 通过参数搜索范围均为 $[2 \times 10^{-1}, 2 \times 10^3]$ 的算法优化得到响应面的核函数参数 σ^2 及惩罚因子 C 设置分别为 0.5 和 8, 然后将任意多重边缘子集变量关联影响下的堰顶水头-测流量包络曲线 $C_{S_r} = (H_r(S_r, T), Q_r(S_r, T))$ 代入多维边缘子集拓扑架构张成联系的完备化分布识别扩张表达 $C(G_H, G_{a/c}, G_b, G_{L/W})$ 得输出响应面方程为:

$$F_{C_{S_r}}(H_r, Q_r, r) = C(T', H_r, Q_r), \quad (24)$$

式中: $T' = C(R_{a/c}, R_b, R_{L/W})$ 。

性、对称/非对称转化表达特性, 由算子协调相融性质分别对各原始标定边缘子集的最优先验行为分布进行多维结构互补及无偏有效性关联, 并得到定性指标下的依赖性判断分析结果如表 2, 其中加粗字体为线性相关系数 r , 非加粗字体为 kendall's 秩系数 r' 。由表 2 可知, 各原始标定边缘子集在不同组合维度间具有对称结构且带有随机正负依赖性, 总体为弱相关表征, 这与前文变量统计可靠性结果比照特征是一致的, 可以通过相应代数、序结构构造可变堰流特征变量边缘分布识别扩张的连接函数。在多维关联分布识别的情况下, 取可能随机诱导度量进行拓扑架构扩张连接函数关系, 得到的一致有界性统计决策分析见表 3。

如图 4 所示, 对局部置信区间内的曲线族系做外切线约束, 然后将不同形变曲线上的计算节点进行拾取, 可以发现实测精度效应影响下同一待测流量对应多个堰顶水头值的非因果映射关系的事实, 说明求解得到的响应面可以作为衡量实测堰流精度效应影响计算的响应机制。

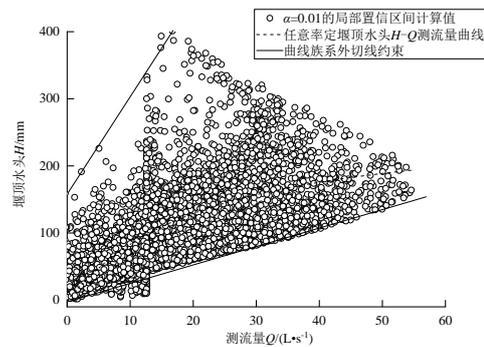


图 4 PSO-LSSVM 一致性推理学习响应面求解结果
Fig.4 PSO-LSSVM consistency reasoning learning response surface solution results

进而对比不同工况下的变比尺实测试验统计结果，将临界测流量 Q'_{cr} 控制下的区间划分为[0,10]、[10,20]、[20,30]、[30,40] 4类，得到临界测流量 Q'_{cr} 控制下的区间数值响应结果见表4。

表4 临界测流量 Q'_{cr} 控制下区间数值响应对比

Table 4 Comparison of interval numerical response under critical discharge control Q'_{cr}

区间	[0,10]	[10,20]	[20,30]	[30,40]
响应面求解值出现概率 p	0.416	0.354	0.145	0.061
试验统计值出现概率 p'	0.393	0.344	0.209	0.054
区间均值计算相对误差	0.011	-0.061	0.073	0.069

由表4 临界测流量 Q'_{cr} 控制下的分类区间数值响应对比可知，不同区间内的响应面求解值与试验统计值出现概率一致性较好，且计算得到的区间均值相对误差较小，均小于 0.1，表明实测堰流精度效应影响下的直角堰流计算方法能够满足相关工程复核设计精度需要。

4 讨论

考虑短系列试验样本中实测堰流精度效应影响下的不确定性响应机制构建表达，图5 分别给出各直角堰流特征变量边缘子集序列在多维模糊概率关联中的边缘保留分布求解，从图5 可以直观看出 G_{LW} , G_b , G_{LW} , $G_{a/c}$ 或 G_b , $G_{a/c}$ 一定的条件下，各边缘保留倚靠关系分布值随构成变量的增大而增大，整体分

布正态性较好，无偏度依赖及累积变异值的出现，这符合现有试验成果统计事实，即一定数值区间范围内，前后堰宽比 a/c 、侧堰长度 b 和展宽比 L/W 越接近临界最大值时，其对应堰顶水头 H 和测流量 Q 也越趋近临界值，故能够对多元非线性系统中由多结构特征变量不确定性影响导致的数值响应分布差异进行较为全面的描述。同时区别于基本堰流关系模型在传统简化综合流量系数假设下不同实测精度变量选择控制近似的方法，相同堰顶水头 H 下，对比前后堰宽比 a/c 、侧堰长度 b 和展宽比 L/W 对于指标测流量 $[Q'_{cr}]$ 的表征贡献显著性，无先后大小之分，具有同等地位，从算法机理角度揭示了以展宽比 L/W 为代表的等效直线堰宽 W 及包含多种特征变量的综合流量系数 m_0 可以被选为传统因果映射回归处理方法中固定变量的原因，但相比泄流量与堰顶水头呈稳定回归系数相关的直线型单一特征变量断面，其主要差异体现在分别以各特征变量边缘子集保留分布内可变概率数值的出现及可能联合模糊概率数值的产生作为结构耦合作用影响的直接几何非恒定输入、输出，建立了多维可变特征断面下的堰流一致性响应机制，进而解决了有限随机点尺度测量下确定欠或过拟合函数形表达的问题，这也侧面印证了作为超泄特征变量 a/c 、 b 和 L/W 参与的多元短系列泄流计算模型通常难以确定性回归构建表达，实测堰流精度效应影响的客观存在性。研究成果可为类似工程的复核设计提供参考。

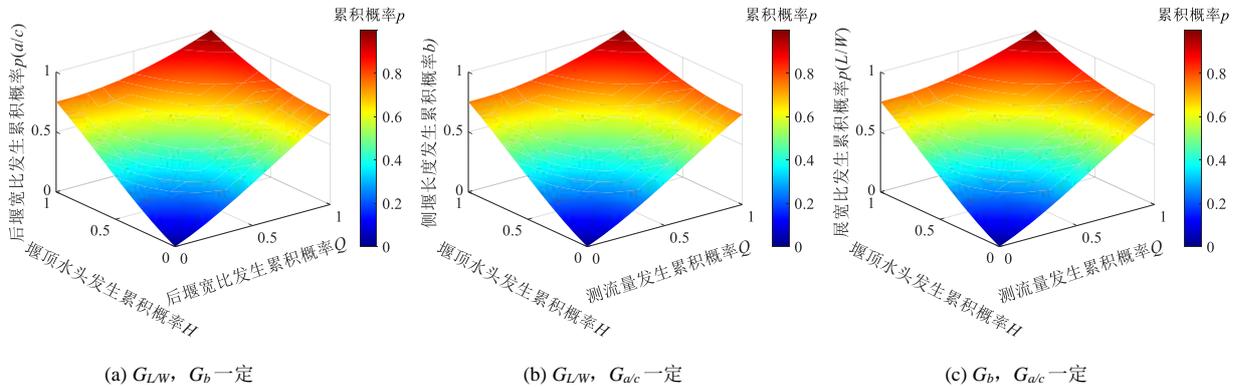


图5 多维模糊概率关联中的不同边缘保留分布

Fig.5 Different edge preserving distributions in multidimensional fuzzy probability Association

5 结论

- 1) 实测堰流精度效应影响下，超泄特征变量前后堰宽比 a/c 、侧堰长度 b 和展宽比 L/W 参与的多元短系列泄流计算模型通常难以确定性构建表达且更倾向于一种区别于传统直线型断面因果映射关系的多维可变模糊概率关联分布响应。
- 2) 区别于基本堰流关系模型在传统简化综合流量系数假设下不同实测精度泄流特征变量选择控制

近似的方法，从算法机理的角度揭示了相同堰顶水头 H 下，前后堰宽比 a/c 、侧堰长度 b 和展宽比 L/W 对于指标测流量 $[Q'_{cr}]$ 的表征贡献无先后大小之分，具有同等显著地位。

- 3) 综合现有文献成果中不同短系列实测堰流精度样本的应用率定与验证结果，由临界测流量 Q'_{cr} 控制下的分类区间数值响应对比可知，方法计算值与试验统计值出现概率一致性较好，且区间均值相对误差均小于 0.1，表明实测堰流精度效应影响下的直角堰

流计算方法能够为相关工程的复核设计提供参考。

参考文献:

- [1] 王兆印, 张晨笛. 西南山区河流河床结构及消能减灾机制[J]. 水利学报, 2019, 50(1): 124-134, 154.
WANG Zhaoyin, ZHANG Chendi. River bed structure and energy dissipation and disaster reduction mechanism in Southwest Mountainous Areas[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50 (1): 124-134, 154.
- [2] 王文娥, 廖伟, 陈土成, 等. 堰槽组合设施测流机制试验研究[J]. 水科学进展, 2021, 32(6): 922-932.
WANG Wen'e, LIAO Wei, CHEN Tucheng, et al. Experimental study on flow measurement mechanism of weir trough combined facilities[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(6): 922-932.
- [3] 盛金保, 厉丹丹, 蔡尊, 等. 大坝风险评估与管理关键技术研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, 48(10): 1 057-1 067.
SHENG Jinbao, LI Dandan, CAI Qian, et al. Research progress on Key Technologies of dam risk assessment and management[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2018, 48(10): 1 057-1 067.
- [4] 教育部科技查新工作站(N12). 科技查新报告(201836000N120002)[R]. 昆明: 教育部科技查新工作站(N12), 2018.
Science and technology novelty search workstation of the Ministry of Education (N12). Science and technology novelty search report (201836000n120002)[R]. Kunming: Science and Technology Novelty Search Workstation of the Ministry of Education (N12), 2018.
- [5] 张靖, 常倩, 张庆华, 等. Z形薄壁堰过流能力试验[J]. 水利水电科技进展, 2017(6): 38-43.
ZHANG Jing, CHANG Qian, ZHANG Qinghua, et al. Overflow capacity test of Z-shaped thin-walled weir[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017 (6): 38-43.
- [6] ZHANG Jing, ZHANG Qian, LI Shuning, et al. Experimental study on discharge coefficient of a gear-shaped weir[J]. Water Science and Engineering, 2018, 11(3): 86-92.
- [7] 李庆梅, 邱勇, 王尚今, 等. 侧堰长度变化对直角折线堰过流能力影响研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(6): 177-181.
LI Qingmei, QIU Yong, WANG Shangjin, et al. Study on the influence of the length change of side weir on the discharge capacity of right angle broken line weir[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2019, 17 (6): 177-181.
- [8] 邱勇, 陆怀茶, 周鑫宇, 等. 侧堰位置对生态河道直角折线堰泄流影响分析[J]. 浙江水利水电学院学报, 2020, 32(1): 10-14.
QIU Yong, LU Huaicha, ZHOU Xinyu, et al. Impact of side weir position on discharge of rectangular broken line weir in ecological river[J]. Journal of Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, 2020, 32 (1): 10-14.
- [9] 周鑫宇, 邱勇, 王尚今, 等. 直角折线堰在生态河道中的应用研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(3): 135-138.
ZHOU Xinyu, QIU Yong, WANG Shangjin, et al. Application of right angle broken line weir in ecological river[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2020, 18 (3): 135-138.
- [10] 王尚今, 邱勇, 周鑫宇, 等. 溢流前缘长度变化对直角折线堰过流能力影响研究[J]. 水利规划与设计, 2020, 4(6): 162-167.
WANG Shangjin, QIU Yong, ZHOU Xinyu, et al. Study on the influence of the length change of overflow front on the overflow capacity of right angle broken line weir[J]. Water Resources Planning and Design, 2020, 4 (6): 162-167.
- [11] 邱勇, 杨泽文, 周鑫宇, 等. 基于BP神经网络的直角折线堰过流能力预测[J]. 水电能源科学, 2021, 39(3): 74-77.
QIU Yong, YANG Zewen, ZHOU Xinyu, et al. Prediction of discharge capacity of rectangular broken line weir based on BP neural network[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(3): 74-77.
- [12] 叶恩立, 周宜红. 施工导流堰前水位分布的概率密度演化方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(2): 209-215.
YE Enli, ZHOU Yihong. Probability density evolution method of water level distribution in front of construction diversion weir[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22 (2): 209-215.
- [13] MORTAZAVI Seyedmortazavi, MOHAMADI Maryam, JOUZDANI Javid. MTBF evaluation for 2-out-of-3 redundant repairable systems with common cause and cascade failures considering fuzzy rates for failures and repair: a case study of a centrifugal water pumping system[J]. Journal of Industrial Engineering International, 2018(14): 281-291.
- [14] 胡志根, 刘全, 贺昌海, 等. 基于Monte-Carlo方法的土石围堰挡水导流风险分析[J]. 水科学进展, 2002(5): 634-638.
HU Zhigen, LIU Quan, HE Changhai, et al. Risk analysis of water retaining and diversion of earth rock cofferdam based on Monte Carlo method[J]. Advances in Water Science, 2002 (5): 634-638.
- [15] 刘善均, 许唯临, 王伟, 等. 宽浅式水库库水位差异对泄水建筑物下泄流量的影响[J]. 四川大学学报(工程科学), 2003(3):18-20.
LIU Shanjun, XU Weilin, WANG Wei, et al. Influence of water level difference of wide shallow reservoir on discharge of discharge structure[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2003 (3): 18-20.
- [16] KNIGHT Donaldw, HAMED Mohammade. Boundary Shear in Symmetrical Compound Channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1984, 110(10): 1 412-1 430.
- [17] 水电水利工程常规水工模型试验规程. DL/T 5244—2010[S].
- [18] KHANJANI Shirazrashed, KHODAYIFAR Salman, PARDALOS Pa-Panosm. Copula theory approach to stochastic geometric programming[J]. Journal of Global Optimization, 2021(81): 435-468.
- [19] APPLEBY Marcus, FLAMMIA Steven, MCCONNELL Gary, et al. SICs and Algebraic Number Theory[J]. Foundations of Physics, 2017, 47(1):1-18.
- [20] ALGER Jeffryr, MINHAJUDDIN Abu, SHERRY Adean, et al. Analysis of steady-state carbon tracer experiments using akaike information criteria[J]. Metabolomics, 2021, 17(7): 1-15.
- [21] 水利水电工程等级划分及洪水标准. SL 252—2000[S].
- [22] MOSLEH Ali. Common cause failures: An analysis methodology and examples[J]. Reliability Engineering System Safety, 1991, 34(3): 249-292.

(下转第 146 页)