

基于多因素模糊综合评判的河网糙率求解

霍 光¹,王义刚²

(1.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点试验室,江苏 南京 210098 ;2.河海大学海洋学院,江苏 南京 210098)

摘要:将模糊数学的理论和方法引入到河网糙率计算中,通过多相模糊统计法和建立在模糊一致矩阵基础上的决策方案优选法,确定糙率模糊集的隶属函数及断面平均流速、水力半径、水面比降等因素的权重,最终由最大隶属度原则确定糙率所在的模糊子集.对河网糙率进行多因素模糊综合评判,可以将河网各河道糙率值控制在一较小区间范围内,再在该范围内对糙率值进行微调,确定最终糙率值.以珠江三角洲 1998 年 7 月洪水为例,对该方法进行验证,计算结果与实际结果相吻合.

关键词:河网;糙率;隶属函数;权重;隶属度

中图分类号:TV43+.5 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2006)05-0518-04

数值模拟是河道研究的主要方法之一.用该法率定模型时,要用试错法调试每一河道糙率,若河网规模较大,则调试工作量十分巨大.作为一敏感参数,糙率的确定是数值计算的关键,其取值直接影响水力计算结果.糙率不仅与表面粗糙程度有关,还受水力要素及水流特性的影响,是一个综合水力摩阻系数,对河道水流及其冲淤变化计算成果和工程造价有很大影响.天然河道糙率与很多因素有关,而影响糙率的因素又比较复杂,因此常用河道的实测水文资料推求糙率.目前计算糙率的公式和方法主要有反演算法、分级处理法、水位拟和法、阻力最小化原理和应用实测流量推求糙率等.

本文将模糊数学的理论和方法^[1-3]引入到河网糙率计算中,通过多相模糊统计法和建立在模糊一致矩阵基础上的决策方案优选法,确定糙率模糊集的隶属函数,以及断面平均流速、水力半径、水面比降等因素的权重,最终通过最大隶属度原则确定糙率所在的模糊子集.基于多因素模糊综合评判的河网糙率求解,可以将河网各河道糙率值控制在一较小区间范围内,为河网糙率研究提供了一种新的方法.

1 糙率影响因素分析

过去计算糙率使用的是均匀流中断面法的谢才公式:

$$n = \frac{A}{Q} R^{2/3} S^{1/2}$$

在新的糙率规范中新增了恒定非均匀流和非恒定流的计算公式,分别为

$$n = \frac{AR^{2/3}}{Q} \sqrt{S + S_V} \qquad n = \frac{AR^{2/3}}{Q} \sqrt{S + S_V + S_W} \qquad (1)$$
$$S = \frac{\Delta Z}{L} \qquad S_V = \frac{\alpha(V_{\pm}^2 - V_{\mp}^2)(1 - \xi)}{2gL} \qquad S_W = \frac{1}{g} \frac{\Delta V}{\Delta L}$$

式中: n ——曼宁糙率系数; Q ——恒定流流量; A ——断面面积; R ——水力半径; S ——水面比降; S_V ——动能比降; S_W ——加速比降; α ——动能校正系数,一般取 1; ξ ——局部损失系数, $\xi_{收}=0$,突然扩散时 $\xi_{扩}=0.5 \sim 1.0$,逐渐扩散时 $\xi_{扩}=0.3 \sim 0.5$; $V_{\pm}, V_{\mp}$ ——上、下游断面流速; ΔV ——流速差; ΔL ——间距.

糙率 n 并非是一个单纯反映边壁粗糙状况的系数,还受水力要素和水流特性的影响,是一个综合水力系数.多年来研究者们不断探求糙率和各影响因素之间的关系.Koloseus 等^①在明渠水面稳定性的试验中发

收稿日期:2005-11-12
基金项目:国家自然科学基金资助项目(50339010)
作者简介:霍光(1977—),男,广东中山人,博士研究生,主要从事河口、海岸动力学及泥沙运动的研究.
① KOLOSEUS H J, DAVIDIAN J. Free-surface instability correlation. Geological Survey Water-Supply Paper, 1970.

现,佛汝德数 $Fr = v^2/gh$ 对于水面处于非平稳状态下的摩阻力有很大影响.何建京等^{[4]①}的研究资料表明,糙率随断面平均流速的增大而减小.李榕^[5]对明渠流的研究表明,佛汝德数 Fr 和平均水深与水力半径的比值 $\bar{h}/R$ 对糙率 n 值的变化起着决定性的作用.谢绍平等^[6]分析部分测站的 S_W ,发现 S_W 一般很小($S_W/S < 1\%$),按新规范规定可以忽略不计.因此可以不考虑水流形态,回归到谢才公式,认为糙率的主要影响因素为断面平均流速 V 、水力半径 R 与水面比降 S ,即 $n = f(V, R, S)$.

2 工程实例

天然河道的变化非常复杂,河网中各个河道相互影响,同一河道的糙率随着水位的不同而略有变化,而河床沙砾大小和草木生长情况^[7]对河道糙率也有一定的影响.虽然如此,对于糙率 n 值的选择已积累了比较丰富的实测资料,其值一般在 $[0.01, 0.05]$ 之间.

本文以珠江三角洲西北江上游河网 1998 年 7 月洪水工况为例,各河道编号见图 1.将糙率在区间 $[0.01, 0.05]$ 分为 8 个模糊子集,进行断面平均流速、水力半径、水面比降的多因素模糊综合评判.

2.1 确定模糊集合、隶属函数及综合评判矩阵

将河道糙率确定为断面平均流速 V 、水力半径 R 、水面比降 S 3 个因素 8 个模糊子集的模糊集合,其中 $A_1 \dots A_8$ 为河道糙率所处区间范围.

因素集: $U = \{V, R, S\}$

模糊子集: $A = \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_8\}$,其中: $A_1 = [0.01, 0.015]$, $A_2 = (0.015, 0.02]$, $A_3 = (0.02, 0.025]$, $A_4 = (0.025, 0.03]$, $A_5 = (0.03, 0.035]$, $A_6 = (0.035, 0.04]$, $A_7 = (0.04, 0.045]$, $A_8 = (0.045, 0.05]$

隶属函数是模糊集理论应用于实际问题的基石,确定隶属函数的方法有模糊统计法、推理确定法、滤波函数法等.本文结合河道糙率的实际情况,采用“多相模糊统计法”确定河道糙率在 8 个区间的隶属函数为

$$\mu_A = \int f_{\xi}(u) \lambda u$$

通常 ξ 具有正态分布,即 $N(u, \sigma^2)$. u, σ 为 ξ 的均值、标准差.

则
$$\begin{cases} \mu_{A1}(x) = 1 - \Phi(\frac{x - u_1}{\sigma_1}) \\ \mu_{A2}(x) = \Phi(\frac{x - u_1}{\sigma_1}) - \Phi(\frac{x - u_2}{\sigma_2}) \\ \mu_{A8}(x) = \Phi(\frac{x - u_7}{\sigma_7}) \\ \Phi(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \end{cases}$$

为标准正态分布的分布函数.

通过已确定的糙率隶属函数,可求出断面平均流速 V 相对于河道糙率 $A_1 \dots A_8$ 子集的隶属度(表 1).该值表示某一因素下河道糙率在 8 个区间中的隶属程度.同理可求出水力半径 R 、水面比降 S 的隶属度,在此基础上,建立河道①糙率的模糊综合评判矩阵:

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} 0.0597 & 0.1868 & 0.3178 & 0.2763 & 0.1263 & 0.0296 & 0.0033 & 0.0002 \\ 0.0399 & 0.1562 & 0.2889 & 0.2321 & 0.0808 & 0.0120 & 0.0007 & 0.1894 \\ 0.2097 & 0.2214 & 0.1847 & 0.1581 & 0.1345 & 0.0701 & 0.0189 & 0.0026 \end{bmatrix}$$

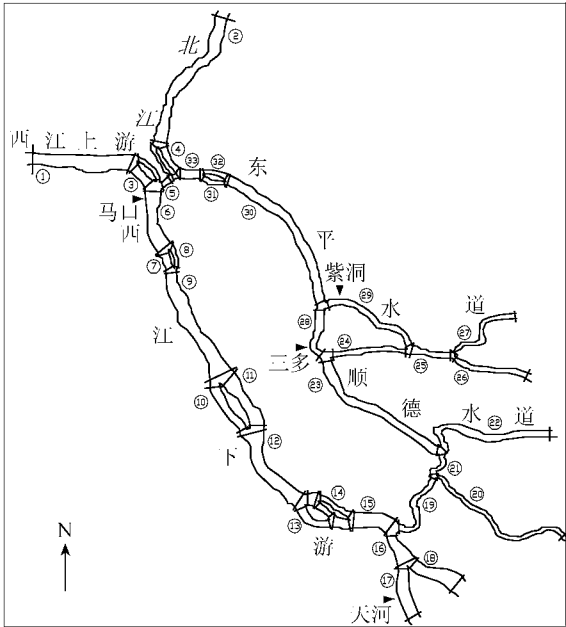


图 1 河道编号
Fig.1 Numbering of river channel

① FRED C S. The flow of water in flumes. Technical Bulletin No 393. Washington D C :United States Department of Agriculture ,1933 :41-47.

表1 断面平均流速的糙率隶属度

Table 1 Membership degree of roughness of average sectional velocity

隶属度	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8
$\mu_A(v_1)$	0.037 5	0.180 2	0.369 4	0.301 7	0.098	0.012 6	0.000 6	0
$\mu_A(v_2)$	0.115 1	0.305 7	0.367 4	0.175 9	0.033 4	0.002 4	0.000 1	0
$\mu_A(v_3)$	0.144 6	0.331 5	0.350 3	0.147 5	0.024 5	0.001 6	0	0
$\mu_A(v_4)$	0.168 5	0.347 4	0.334 9	0.128 5	0.019 5	0.001 2	0	0
$\mu_A(v_5)$	0.090 1	0.276 8	0.378 4	0.206 2	0.044 6	0.003 8	0.000 1	0
$\mu_A(v_6)$	0.034 4	0.171 7	0.365 3	0.309 6	0.104 4	0.013 9	0.000 7	0
$\mu_A(v_7)$	0.008 7	0.075 1	0.268 2	0.380 4	0.215 1	0.048 2	0.004 2	0.000 1
$\mu_A(v_8)$	0.028 7	0.155 3	0.355 8	0.324 6	0.117 8	0.016 9	0.000 9	0
$\mu_A(v_9)$	0.022 8	0.135 9	0.341 3	0.341 3	0.135 9	0.021 4	0.001 4	0
$\mu_A(v_{10})$	0.005 2	0.054 1	0.228 4	0.382 3	0.255 0	0.067 6	0.007 1	0.000 3
$\mu_A(v_{11})$	0.001 3	0.021 4	0.135 9	0.341 3	0.341 3	0.135 9	0.021 5	0.001 4
$\mu_A(v)$ 平均值	0.059 7	0.186 8	0.317 8	0.276 3	0.126 3	0.029 6	0.003 3	0.000 2

2.2 确定权重因子及隶属度

评价因素的权重反映了多因素综合评价中各个因素的重要程度.河道糙率是 $f(V,R,S)$ 的一个函数,断面平均流速 V 、水力半径 R 与水面比降 S 对糙率值均有影响,但影响各不相同.本文结合专家调查法和资料^[3-4]分析,得出 V,R,S 各因素对糙率的影响强弱依次为:最强、较强、最弱.考虑是多因素下的模糊综合评判,故需先建立优先关系矩阵 $B=(b_{ij})$,其中 (b_{ij}) 为糙率函数中 V,R,S 3个因素的优先关系系数.

$$b_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{如果在因素 } u \text{ 下, } x_j \text{ 优于 } x_i \\ 0.5 & \text{如果在因素 } u \text{ 下, } x_i \text{ 与 } x_j \text{ 等优} \\ 1 & \text{如果在因素 } u \text{ 下, } x_i \text{ 优于 } x_j \end{cases}$$

通过
$$r_{ij} = \frac{r_i - r_j}{2n} + 0.5 \quad r_i = \sum_{l=1}^n b_{il}$$

将 b_{ij} 改造为一致模糊矩阵 $R=(r_{ij})_{n \times n}$,再运用方根法计算优度值 $s_i = \overline{s_i} / \sum_{l=1}^n s_l$,可确定出糙率函数中 V,R,S 各因素的权重系数

$$W = (W_V, W_R, W_S) = (0.454 \ 0.335 \ 0.211)$$

根据已经求出的河道糙率因素集中各因素下的单因素模糊矩阵,可以得知断面平均流速 V 、水力半径 R 及水面比降 S 各因素下的河道糙率隶属度.由于各因素对糙率的影响强弱不同,在计算糙率各区间隶属度时,需考虑各因素的权重,所以河道糙率在 $A_1 \dots A_8$ 各区间的最终隶属度为

$$U = W \cdot R = [0.085 \ 0.184 \ 0.280 \ 0.236 \ 0.113 \ 0.032 \ 0.006 \ 0.064]$$

2.3 由最大隶属度原则确定模糊子集

利用已求出河网中各河道糙率在8个子集中的隶属度,根据最大隶属度原则,最终确定河道糙率所处区间.以河道①为例,其最大隶属度为0.280,所处模糊子集为 A_3 ,同理可得西北江上游河网其余各河道所在模糊子集(表2).再在此区间内对珠江三角洲河网水沙数学模型糙率值进行微调,确定模型中最终糙率值,

表2 各河道模糊子集与实际糙率统计

Table 2 Statistics of fuzzy subset and factual roughness of each river channel

河道	模糊子集	最终糙率值	河道	模糊子集	最终糙率值	河道	模糊子集	最终糙率值
①	A_3	0.024	⑫	A_4	0.027	㉓	A_3	0.025
②	A_4	0.030	⑬	A_4	0.027	㉔	A_3	0.025
③	A_3	0.024	⑭	A_4	0.027	㉕	A_3	0.025
④	A_4	0.030	⑮	A_4	0.027	㉖	A_4	0.030
⑤	A_2	0.015	⑯	A_4	0.027	㉗	A_3	0.025
⑥	A_3	0.024	⑰	A_4	0.028	㉘	A_3	0.025
⑦	A_3	0.024	⑱	A_4	0.028	㉙	A_3	0.025
⑧	A_3	0.024	⑲	A_3	0.025	㉚	A_3	0.025
⑨	A_3	0.024	⑳	A_2	0.020	㉛	A_3	0.025
⑩	A_3	0.024	㉑	A_3	0.025	㉜	A_3	0.025
⑪	A_3	0.024	㉒	A_3	0.025	㉝	A_3	0.025

并通过实测资料对最终糙率值进行率定 ,以检验数学模型中调试糙率值的合理性 .通过验证马口、三多、紫洞、天河的水位、流量、含沙量 ,证明了一维水沙数学模型的可靠性 ,同时也说明多因素模糊综合评判的糙率求解方法是可行的 .

3 结 论

本文以珠江三角洲 1998 年 7 月洪水工况为例 ,对西北江上游河网的 33 条河道进行了断面平均流速、水力半径、水面比降的糙率多因素模糊综合评判 ,由最大隶属度原则确定出各河道的模糊子集 ,计算结果与实际调试糙率值所处区间基本一致 .河道⑤的计算模糊子集为 A_2 ,而实际调试值为 0.015 ,应属于 A_1 模糊子集 .这主要是由于河道⑤位于思贤窖 ,是西、北江交汇处 ,水流相互作用剧烈 ,水文情况复杂、多变 ,但计算值与实际调试值还是较为接近的 .通过对河网糙率多因素模糊综合评判 ,可以将河网各河道糙率值控制在一较小范围内 ,再在该范围内对糙率值进行微调 ,确定最终糙率值 ,减小糙率率定的工作量 .糙率受水草生长情况、河滩与河槽的土壤性质及颗粒大小等综合因素的影响 ,同一河道的糙率值也会随水位、流量的变化而变化 .但是当水位、流量变化不是十分剧烈时 ,各种工况下的糙率值变化不会很大 .在调试数学模型时 ,可以先确定出一种工况下的糙率模糊子集 ,其他工况以此为基础进行调试 .基于模糊综合评判的糙率求解方法 ,不仅适用于河网地区 ,还可以推广到河口、海岸地区 ,在二、三维数学模型中也具有一定的应用价值 .

参考文献 :

[1] 黄健元 . 模糊集及其应用 [M] . 西宁 : 宁夏人民教育出版社 , 2000 31-40 .
[2] 韩立岩 , 汪培庄 . 应用模糊数学 [M] . 北京 : 首都经济贸易大学出版社 , 1998 2-12 .
[3] 何建京 , 王惠民 . 流动型态对曼宁糙率系数的影响研究 [J] . 水文 , 2002 (12) 22-53 .
[4] 金聪 . 模糊数学在边坡稳定性动态分析中的应用 [J] . 露天采煤技术 , 1996 (1) : 16-19 .
[5] 李榕 . 关于影响曼宁粗糙系数 n 值的水力因素探讨 [J] . 水利学报 , 1989 (12) 62-66 .
[6] 谢绍平 , 梁楚坚 . 贯彻新规范中对有关糙率计算问题的探讨 [J] . 广东水利水电 , 1999 (6) 8-11 .
[7] 李艳红 , 赵敏 . 含植物河流动力学实验研究——流速、摩阻流速及曼宁糙率系数垂直分布 [J] . 水动力学研究与进展 , 2004 (7) 513-519 .

Determination of roughness of river network based on comprehensive multi-factor fuzzy evaluation

HUO Guang¹ , WANG Yi-gang²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
2. College of Ocean , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract The theory and method of fuzzy mathematics are introduced into the calculation of roughness of river network . The polyphase fuzzy statistics and optimization of decision scheme based on fuzzy consistent matrix are applied to determine the membership function of roughness fuzzy set and the weight of some factors , such as the average sectional velocity , hydraulic radius , surface slope , etc . Finally , the roughness fuzzy subsets are determined by the principle of the maximum membership degree . Based on comprehensive multi-factor fuzzy evaluation of roughness of river network , the roughness of individual reaches can be limited to a small range , and through micro modification , the roughness is finally obtained . The method is verified with the flood in July , 1998 in Pearl Delta , and the calculated results are in good agreement with the reality .

Key words river network ; roughness ; membership function ; weight ; membership degree