

基于原型观测的输水渠道糙率取值及变化分析

张雨山¹,王双银¹,臧聪敏¹,尚毅梓²,白云岗³

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100;
2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038;
3. 新疆水利水电科学研究院,新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要:为了研究长距离渠道糙率的合理取值,依据北疆输水工程总干渠2011—2016年逐日水位、流量数据,采用曼宁公式反算典型断面糙率,并构建一维非恒定流水动力模型对渠段糙率进行校核,分析长距离渠道糙率在渠段间的差异及边壁粗糙度随运行时间的变化情况。结果表明:断面的实测糙率与顺直渠段糙率相符,总干渠顺直段糙率在0.015~0.016,弯道明显的渠段,弯度校正因子在1.15~1.50,大小与弯道复杂程度相关;渠道糙率随运行时间呈增长趋势,总干渠等效粗糙度中期运行的年增幅约为18.54%。

关键词:渠道糙率;原型观测;水动力模型;北疆输水工程

中图分类号:TV133 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)01-0024-06

Variation analysis of roughness coefficient value for water conveyance channels based on prototype observation// ZHANG Yushan¹, WANG Shuangyin¹, ZANG Congmin¹, SHANG Yizi², BAI Yungang³ (1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Xinjiang Institute of Water Resources and Hydropower Research, Urumchi 830000, China)

Abstract: To study the reasonable roughness value of a long-distance channel, the roughness for a typical section of the Beijiag Water Transfer Project was inversely calculated using Manning formula based on the prototype observation water level and discharge data from 2011 to 2016. One-dimensional unsteady hydrodynamic model was established to verify the roughness value and its spatial difference between channel sections and temporal variation with performance period was analyzed. The results show that the measured roughness of the section is consistent with that of the straight channel section, the roughness of the straight section of the main channel is from 0.015 to 0.016. Correction for the effect of channel curves is from 1.15 to 1.50, which is related to the complexity of the curve. The channel roughness increases with the running time, and the annual increase of the equivalent roughness K_s was 18.54 %.

Key words: channel roughness; prototype measurement; hydrodynamic model; Beijiag Water Transfer Project

长距离输水工程对区域经济发展和受水区城市建设具有重要战略意义,糙率作为衡量水头损失的重要参数,其取值的合理直接影响渠道的调度和输水。长距离渠道的过流能力受断面、衬砌面粗糙程度、底坡等多方面影响而呈现不确定性^[1],糙率存在较大的变化范围,而水面线对糙率的变化较为敏感^[2],现有的经验取值和公式计算存在较大误差^[3],难以满足渠道水力计算的要求^[4]。

目前国内混凝土渠道的原型观测糙率在0.011~0.019之间^[5-6],对于长距离渠道,其沿程糙率分布不均匀。原型观测数据只针对具体断面^[7-8],且缺少基于长期观测数据的糙率分析^[9],而水力计算中采用的糙率通常为渠段乃至渠道的综合糙率^[10]。为此,本文以北疆输水工程总干渠为研究对象,在对2011—2016年断面观测数据统计分析的基础上,采用非恒定流数学模型,分段率定渠道糙率,通过模拟值与实测值的时、空间对比,对总干渠糙率取值及糙率修正因子进行了定量分析,为该工程的糙率取值和工程管理维护提供依据,并为同类型渠道提供参考。

1 研究方法

1.1 糙率计算公式

在阻力平方区,谢才-曼宁公式是计算糙率的水力学基本公式^[11],因其计算的稳定性,被广泛应用于河渠的糙率计算中。计算公式为

n = \frac{A}{Q} R_w^{\frac{2}{3}} \sqrt{J} \tag{1}

式中: n 为糙率; R_w 为水力半径; A 为断面面积; Q 为流量; J 为水力坡度。

对于梯形断面渠道,水力半径计算式为

R_w = \frac{(b + hm)h}{b + 2h\sqrt{1 + m^2}} \tag{2}

式中: b 为渠道底宽; h 为水深; m 为边坡系数。

美国垦务局和陆军兵团根据实测资料和试验分析提出了形式相近的混凝土渠道糙率经验公式^[12],其区别在于美国垦务局公式将描述边壁不平整度的等效粗糙度 K_s 作为定值取 0.001 25,而美国陆军兵团公式将 K_s 作为变量处理^[13];工程中常将粗糙特征类似的表面糙率当作统一常数,采用经验进行取值,Cowan 等^[14-16]根据已有工程的经验总结,将渠段糙率的影响因素分为不同单元,在确定顺直、光滑渠段糙率的基础上,再计算不同因素的影响值。计算式为

n_c = a(n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \tag{3}

式中: n_c 为渠段综合糙率; n_b 为顺直、断面完好渠段的糙率基准值,通常作为渠道糙率的取值下限; n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 分别为渠道表面不规则度、断面变化、渠道内阻水物、渠道生物附着对糙率的影响值; a 为弯曲渠段的弯度校正因子。

1.2 非恒定流数学模型

圣维南方程组是一维非恒定渐变流的基本方程^[17],由连续方程和动量守恒方程组成,方程为

\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{Q|Q|}{C^2 AR_w} = 0 \end{cases} \tag{4}

式中: q 为侧向入流; C 为谢才系数; g 为重力加速度; x 为计算距离; t 为时间。

为了完整地实现长距离渠道全输水期的工况模拟,采用稳定性较高的 Abbott 六点隐式差分法对圣维南方程组进行离散,利用追赶法求解。节点按照水位、流量、水位交替布置,提高了模型计算稳定性,可在较大的克朗数下保持收敛。糙率系数由明渠恒定流的谢才-曼宁公式计算,参与一维非恒定流的计算^[18], R 作为曼宁糙率的重要变量,采用过水断面

面积与湿周的比值所定义的有效水力半径。

1.3 精度评价

采用定量评估法评价模型精度,采用均方根误差(RMSE) E_{RMS} 衡量模拟值与实测值之间的实际偏差,平均绝对百分误差(MAPE) E_{MAP} 衡量相对偏差,采用 R 值评价拟合度,计算公式为

E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n_a} \sum_{i=1}^{n_a} (X_{r,i} - X_{m,i})^2} \tag{5}

E_{MAP} = \frac{1}{n_a} \sum_{i=1}^{n_a} \left| \frac{X_{r,i} - X_{m,i}}{X_{r,i}} \right| \times 100 \tag{6}

R = \frac{\sum_{i=1}^{n_a} (X_{m,i} - \bar{X}_m)(X_{r,i} - \bar{X}_r)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n_a} (X_{m,i} - \bar{X}_m)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n_a} (X_{r,i} - \bar{X}_r)^2}} \tag{7}

式中: n_a 为系列长度; X_r 为实测值; X_m 为模拟值。

1.4 单因素敏感度

采用单因素敏感性分析的方法计算渠道水面线对水力参数变化的敏感度:

S = \frac{\Delta m}{m} / \frac{\Delta \alpha}{\alpha} \tag{8}

式中: S 为敏感度; $\Delta \alpha / \alpha$ 为水力参数的相对变幅; $\Delta m / m$ 为水面线的相对变幅。当 $S \leq 0.05$ 时表示该指标不敏感,当 $0.05 < S \leq 0.20$ 时表示一般敏感, $S > 0.20$ 时表示其为敏感指标^[19]。

2 工程概况及数据

2.1 渠道概况

北疆输水工程于 2000 年建成运行,2016 年渠首引水达到 7.12 亿 m^3 ,最大引水流量达到 96.7 m^3/s 。工程地处寒温带,每年输水期为 4 月 27 日至 9 月 16 日,冬季停水期均存在冻融循环,最大冻土深度为 1.5 m。其中总干渠全长约 130 km,设计输水流量 68 m^3/s ,均采用混凝土预制板衬砌,表面无明显生物附着,水质为地表水 III 类以上,含沙量较低,泥沙运移影响可忽略。工程投入运行时间较长,衬砌板面受水流冲刷出现不同程度的麻面,受地质和环境情况的影响(冻胀和地基不均匀沉降等),不同渠段的边壁平整度也有一定差异。

2.2 原型观测

自渠首 2 km 至 130 km 处选择 4 个观测断面作为典型断面,间隔在 20 ~ 30 km,断面位于距渠系建筑物较远的顺直渠段,断面结构完整且水流较为平稳。在渠道上方布置测桥进行观测,采用流速面积法测流,测速垂线间隔为 1 m,测流历时在 60 ~ 100 s,得到渠道自 4 月开闸引水至 9 月关闸的逐日水位、流量数据,时间跨度为 2011—2016 年(2013 年缺测),

观测渠道基本参数见表 1。

表 1 典型断面基本参数

断面	形状	底坡	边坡	底宽或弧半径/m	设计糙率
2+990	平底梯形	1/10 000	1/2	3.40	0.017
20+000	平底梯形	1/12 500	1/2	4.00	0.017
49+320	平底梯形	1/12 500	1/2	4.00	0.017
93+656	弧底梯形	1/11 500	1/2	8.47	0.017

2.3 实测数据数理统计

采用式(1)反算各断面的逐日糙率值,由于断面的水位、流量数据是基于同一地点的重复测验,初步判断糙率系列具有正态性。将各断面糙率系列进行正态分布拟合,结果表明各输水期的糙率系列均服从正态分布,限于篇幅仅列出 2+990 断面 2016 年的糙率正态拟合如图 1 所示。将各断面不同输水期的糙率系列正态拟合后的期望值与标准差统计如表 2 所示。

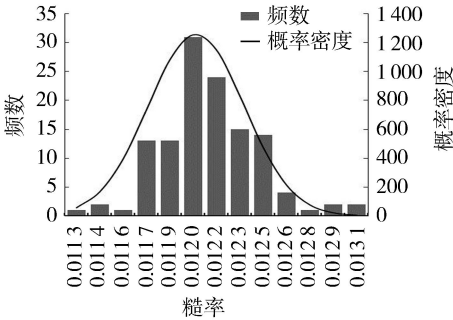


图 1 断面糙率正态分布拟合

3 数学模型

3.1 模型构建

选取总干渠 0+000 ~ 57+300 区段为研究段,为反映渠道实际情况,通过 Google earth 绘制带有坐标的渠道底图,采用分段率定的方法率定糙率^[20],根据沿线的建筑物和弯道情况,将研究段分为渠段 1(0+000 ~ 9+185)、渠段 2(9+185 ~ 48+000)和渠段 3(48+000 ~ 57+300),概化渠道如图 2 所示。

模型边界条件设置上,上游边界为进水口实测流量过程,下游边界为渠段末实测水位过程,内部边界为分水口实测流量过程;模型计算上,为满足最大计算距离大于建筑物前后断面长度且克朗数小于 10,最大计算距离取 2 000 m,模拟时间步长选择 5 min。与实际观测频率相同逐日输出结果,通过迭

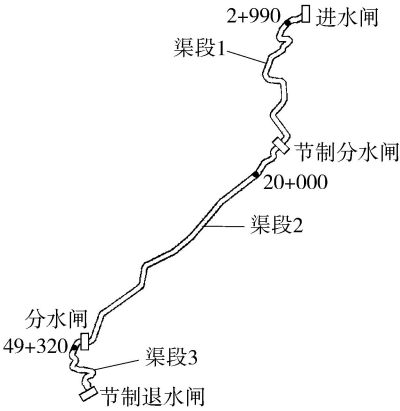


图 2 研究段渠线布置

代率定渠段糙率^[21],流程如图 3。

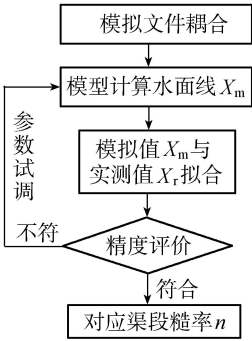


图 3 模型糙率率定流程

3.2 参数取值及敏感性分析

模拟渠段的基本水力参数包括渠段糙率、闸门收缩系数和局部水头损失系数,采用 Cowan^[14]提出的基准值修正的方法,以顺直段原型观测结果为取值下限,根据弯道情况,以弯度校正因子 $a = 1.5$ 为取值上限。由于渠道无明显附着物,且单个渠段内断面一致,其余影响值可忽略,即渠段糙率取值区间为 $[n, 1.5n]$;节制闸在稳定输水期处于全开状态,自由出流情况下收缩系数只与断面形式有关,建筑物进、出口水头损失计算采用式(9)计算,并以模型推荐值的最小值作为取值下限,闸门收缩系数根据模型参考取值区间,各参数取值区间见表 3。

$$\begin{cases} \zeta_1 = \zeta_{in} \left(1 - \frac{A_{s1}}{A_1} \right) \\ \zeta_2 = \zeta_{out} \left(1 - \frac{A_{s2}}{A_2} \right)^2 \end{cases} \quad (9)$$

式中: A_{s1} 、 A_{s2} 分别为建筑物进口和出口断面面积;

表 2 典型断面输水期糙率期望值与标准差

年份	2+990 断面		20+000 断面		49+320 断面		93+656 断面	
	期望值	标准差	期望值	标准差	期望值	标准差	期望值	标准差
2011	0.0124	0.000 303	0.0148	0.000 816	0.0127	0.000 569	0.0128	0.000 891
2012	0.0125	0.000 160	0.0147	0.000 294	0.0126	0.000 291	0.0129	0.000 763
2014	0.0129	0.000 221	0.0152	0.000 701	0.0128	0.000 435	0.0138	0.000 715
2015	0.0131	0.000 208	0.0158	0.000 437	0.0131	0.000 476	0.0140	0.000 306
2016	0.0120	0.000 317	0.0162	0.000 991	0.0136	0.000 519	0.0144	0.000 581

A_1 、 A_2 分别为建筑物前、后渠道断面面积;常数 $\zeta_{in}=0.5$ 、 $\zeta_{out}=1.0$ 。

表3 参数取值范围

参数名称	参数取值
渠段1糙率	0.012~0.018
渠段2糙率	0.015~0.018
渠段3糙率	0.013~0.024
隧洞进口水头损失系数	0.30~0.50
隧洞出口水头损失系数	0.50~1.00
节制闸收缩系数	0.61~0.63
节制闸进口水头损失系数	0.20~0.50
节制闸出口水头损失系数	0.30~0.50

采用单因素敏感性分析法计算渠道水面线对糙率、闸门收缩系数 U_c 和建筑物水头损失系数变化的敏感度 S 。在保持其他水力参数取值不变的情况下,糙率取值及对应渠道断面水位变化如表4所示。上游2+940断面渠道水深对糙率变化的敏感度为0.21;下游49+270断面的敏感度为0.27,表明渠道水位对沿程糙率的敏感度指标为敏感,糙率每上升0.002,渠道水位约有0.10~0.15m的抬升,且不同位置的敏感度有差异。

表4 不同糙率变幅下渠道水深变化

n	n 相对变幅/%	2+990断面平均水深/m	水深相对变幅/%	49+320断面平均水深/m	相对水深变幅/%
0.015		4.02		3.78	
0.017	13.33	4.12	2.24	3.93	3.92
0.019	26.67	4.21	4.80	4.07	7.65
0.021	40.00	4.32	7.52	4.21	11.22
0.023	53.33	4.43	10.36	4.33	14.63

对建筑物进、口水头损失系数及闸门收缩系数同样采用控制变量的方式分析其敏感度,渠道水深对建筑物进出口水头损失系数敏感度为0.010~0.012,对闸门收缩系数敏感度为0.003~0.004,均表现为不敏感。由敏感性分析可知,在水动力模型中,渠道水位对沿程糙率的变化表现最为敏感,通过拟合实测水位过程与模拟水位过程的方法可以较精准地率定渠段糙率。

3.3 模型率定

对渠道水位和流量过程进行数学模拟,按照弯道和过水建筑物的分布,将渠道分为3个渠段进行分析,选取2016年各渠段对应的典型断面实测逐时水位资料,分别对各段参数进行率定。通过对糙率在内的各参数试调^[22],明确各参数对水流计算的影响,使各断面的模拟水位过程与实测水位过程相符,使模型可以反映渠道真实的水流过程,并依此确定水力参数取值。其中2016年输水期典型断面的拟合情况如图4所示。

3.4 精度评价

将边界条件替换为2011—2015年的实测数据,

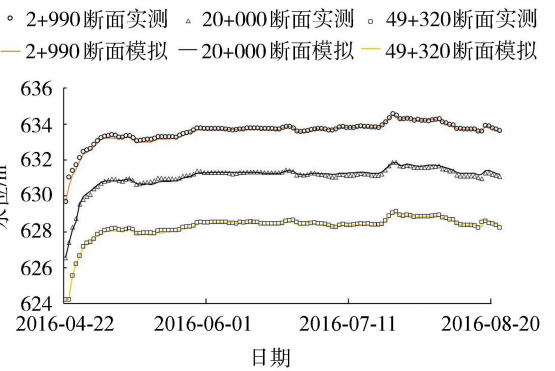


图4 典型断面模拟与实测水位过程拟合

采用研究段上、下游典型断面作为控制断面,对模型进行验证。分别采用RMSE和MAPE评价模拟值和实测值的偏差情况,采用 R 值评价二者的相关性,对各年输水期模拟结果精度进行评价,结果如表5所示。 E_{RMS} 在6cm以内, E_{MAP} 在1.08%以内, R 值在0.925以上,表明模拟值和实测值拟合度较高,模型能反映目标渠道的实际水流特征,其率定的水力参数可靠。

表5 模型精度评价

年份	控制断面	E_{RMS}/cm	$E_{MAP}/\%$	R
2011	2+990	6	0.81	0.956
	49+320	5	0.87	0.990
2012	2+990	5	0.94	0.993
	49+320	6	1.08	0.925
2014	2+990	5	0.94	0.993
	49+320	5	0.84	0.996
2015	2+990	4	0.65	0.995
	49+320	6	0.69	0.930
2016	2+990	5	1.01	0.995
	49+320	6	0.98	0.983

4 结果分析

4.1 渠段糙率特征

将渠段糙率与实测典型断面糙率对比如表6,根据工程采用糙率精度,取两位有效数字,计算典型断面糙率与渠段糙率的比值。

数学模型计算采用的为渠段综合糙率 n_c ,原型观测为渠道顺直部分的断面糙率 n_b ,由于各渠段内的断面一致,且无明显边壁附着,式(3)可以写为 $n_c=an_b$ 。在无明显弯道的渠段2, $a=1.00\sim1.07$, $n_b=0.015\sim0.016$,表明典型断面的实测值可以代表顺直渠段的综合糙率;渠段1由于存在较明显的弯道, $a=1.15\sim1.25$,而在弯道较复杂的渠段3, $a=1.46\sim1.54$ 。渠段2实际渠长和首尾直线距离的比值为1.12,而渠段3的比值为1.56,表明弯道对渠段综合糙率有较大的影响,且弯度校正因子的大小与弯道复杂程度呈正相关关系。

表 6 渠段及断面糙率对比

年份	渠段 1			渠段 2			渠段 3		
	n_c	2+990 断面 n_b	a	n_c	20+000 断面 n_b	a	n_c	49+320 断面 n_b	a
2011	0.015	0.012	1.25	0.015	0.015	1.00	0.019	0.013	1.46
2012	0.015	0.013	1.15	0.015	0.015	1.00	0.019	0.013	1.46
2014	0.016	0.013	1.23	0.016	0.015	1.07	0.019	0.013	1.46
2015	0.016	0.013	1.23	0.016	0.015	1.07	0.020	0.013	1.54
2016	0.015	0.012	1.25	0.016	0.016	1.00	0.021	0.014	1.50

4.2 年际特征

根据原型观测结果(表 2),糙率随时间存在一定变幅,典型断面糙率在 6 年间整体呈上升趋势,变幅在 7%~12%。为排除其他因素影响,选择能代表顺直渠段综合糙率的 20+000 断面,其糙率随年际变化如图 5 所示,线性拟合的糙率年增幅为 0.000 28。

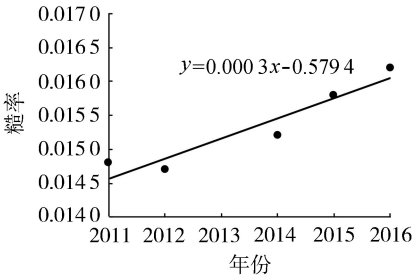


图 5 20+000 断面糙率年际变化

除去进行翻新的渠段 1,渠段 2、渠段 3 的综合糙率在 6 年间的增幅分别为 1.1%与 9.4%,与断面实测糙率变幅基本相符。弯道渠段糙率增幅大于顺直段,表明在断面与衬砌情况一致的条件下,弯道段的水流冲刷情况相较于顺直段更为严重,是工程需要重点维护的渠段。在不同运行时期或衬砌维护水平较差的情况下,渠段糙率的增大需要重视。

北疆输水工程水质条件较好且几乎没有生物附着存在,对长期运行下的渠道糙率影响较小,对于含沙量低且定期清淤的渠道,不易产生长期淤积,糙率增长的主要原因是边壁平整度的变化。根据渠道的运行记录,存在影响衬砌面的因素有衬砌面的老化脱落,渠底和边壁的鼓胀、裂缝等,而 2016 年自渠首向下进行的 5 km 衬砌面翻新使 2+990 断面糙率相较于上一年减小了约 8.4%,表明在断面形式不变的情况下,渠道边壁情况是渠段糙率的主要影响因素,高寒地区的冻融循环和不稳定的基岩导致的衬砌老化与渠道不平整是渠道维护面临的主要问题。

为量化边壁粗糙程度的影响,选取将边壁等效粗糙度 K_s 作为变量的美陆军兵团公式,采用最小二乘法^[23]率定 K_s ,使经验公式计算值与实测数据的偏差最小,计算公式为

$$J_{\min} = \sum_{i=1}^{n_a} \left[n_i - \frac{R_i^{\frac{1}{6}}}{19.56 + 18 \lg(R_i/K_s)} \right]^2 \quad (10)$$

式中: R_i 为对应水力半径; n_i 为实测糙率。

与糙率趋势相同,各渠段 K_s 的年增长率如表 7 所示。根据各渠段长度的加权平均,北疆输水工程总干渠的 K_s 年增长率为 18.54%,其中 2016 年渠段 1 翻新后的初始 K_s 值为 0.000 15。

表 7 等效粗糙度增长率

渠段	渠段长度/m	K_s 年增长率/%
渠段 1	9 185	15.09
渠段 2	38 815	20.15
渠段 3	9 300	15.23

根据混凝土渠道运行经验,渠道糙率随时间增长,20~30 a 达到一个较稳定水平^[12],根据 K_s 的增幅和投入运行时间,总干渠处于中期运行水平,在不进行类似衬砌面翻新和大面积维修的情况下,北疆渠道 K_s 远期可取 0.001 3~0.001 9。总干渠糙率在远期运行水平预期可达 0.018~0.022,将超过 0.017 的渠道设计糙率,为保证渠道的稳定输水,对衬砌老化严重渠段的翻新工作十分必要。

5 结 论

a. 北疆输水工程总干渠水动力模型中,糙率取值每增加 0.002,渠道水位约有 0.10~0.15 m 的抬升,为敏感参数,MIKE11 模型可以在较短时间,通过典型断面实测流量、水位数据对长距离渠道不同段的渠段综合糙率进行率定,在使用实测资料计算的同时避免了单一断面观测对长距离渠道糙率取值的局限性。

b. 北疆渠道顺直段糙率取值在 0.015~0.016,糙率受边壁粗糙程度和弯道的影响明显,弯道段的弯度校正因子取值在 1.15~1.5,且与弯道复杂程度呈正相关;总干渠新衬砌渠段的 K_s 可取 0.000 15,无维修、清淤情况下,总干渠 K_s 年增长率为 18.54%,渠道边壁粗糙程度随时间的变化与渠道衬砌材质、水流冲刷、混凝土老化等因素有关,不同渠道甚至不同渠段的 K_s 增幅存在一定差异,不进行衬砌维护的情况下渠道糙率在远期运行水平预计会超过设计值。

参考文献:

[1] 王开,魏加华,王光谦.大型渠道糙率系数设计取值的不确定性影响分析[J].应用基础与工程科学学报,2008,16(6):870-878. (WANG Kai,WEI Jiahua,WANG Guangqian. Uncertainty in design value of roughness coefficient for large scale channel and effects analysis [J]. Journal of Basic Science and Engineering,2008,16(6):870-878. (in Chinese))

[2] CAMP T R. Discussion-determination of Kutter's n for sewer partly filled [J]. Transaction of the American Society of Civil Engineers, 1944,109(1):223-239.

[3] 张罗号.明渠水流阻力研究现状分析[J].水利学报,2012,43(10):1154-1162. (ZHANG Luohao. Analysis of the present situation of open channels roughness [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012,43(10):1154-1162. (in Chinese))

[4] 杨开林,汪易森.渠道糙率率定误差分析[J].水利学报,2012,43(6):639-644. (YANG Kailin, WANG Yisen. Error analysis of roughness coefficient calibration for channels [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012,43(6):639-644. (in Chinese))

[5] 韩凯,丁法龙,茅泽育.长距离有压输水工程泵站水锤的数值分析[J].水利水电科技进展,2020,40(2):69-75. (HAN Kai,DING Falong,MAO Zeyu. Numerical analysis of water hammer in a long-distance pressurized water transfer project [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(2):69-75. (in Chinese))

[7] 董槐三,潘永贤,陈耀忠.几种衬砌渠道糙率的原型观测[J].水力发电,1981(12):39-43. (DONG Huaian, PAN Yongxian,CHEN Yaozhong. Prototype observations of roughness of several channels[J]. Water Power, 1981(12):39-43. (in Chinese))

[8] 曾祥,黄国兵,段文刚.混凝土渠道糙率调研综述[J].长江科学院院报,1999,16(6):1-4. (ZENG Xiang, HUANG Guobing, DUAN Wengang. Summarization of investigation on roughness of concrete channels [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1999,16(6):1-4. (in Chinese))

[9] 陈耀忠.引滦入津隧洞糙率两次原型观测成果综述[J].水利水电科技进展,2005,25(2):58-61. (CHEN Yaozhong. Summary of two times' prototype observation results of roughness coefficient for water diversion tunnel from Luanhe River to Tianjin City [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005,25(2):58-61. (in Chinese))

[10] 翟东汉,何武全,赖红兵,等.模袋混凝土复合断面衬砌渠道糙率系数原型观测试验研究[J].干旱地区农业研究,2019,37(5):33-39. (ZHAI Donghan,HE Wuquan, LAI Hongbing, et al. Prototype observation study on roughness coefficient of bag concrete composite section lining channel [J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2019,37(5):33-39. (in Chinese))

[11] 马吉明,史哲.南水北调典型宽浅渠道糙率系数研究[J].水力发电学报,2007,26(5):75-79. (MA Jiming, SHI Zhe. Research on the absolute roughness of the typical channel of South-to-North Water Diversion Project [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2007,26(5):75-79. (in Chinese))

[12] 王光谦,黄跃飞,魏加华,等.南水北调中线工程总干渠糙率综合论证[J].南水北调与水利科技,2006,4(1):8-14. (WANG Guangqian,HUANG Yuefei,WEI Jiahua, et al. Comprehensive demonstration on roughness of main cancel of Middle Route Project of South to Novth Water Diversion[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science Technology,2006,4(1):8-14. (in Chinese))

[13] 郑和震,马雄威,雷晓辉,等.南水北调中线工程渠道糙率计算方法研究[J].南水北调与水利科技,2018,16(1):158-163. (ZHENG Hezhen,MA Xiongwei,LEI Xiaohui, et al. Research on computing method for channel roughness of the middle route of South-to-North Water Diversion Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018,16(1):158-163. (in Chinese))

[14] COWAN W L. Estimating hydraulic roughness coefficients [J]. Agricultural Engineering,1956,37(7):473-475.

[15] CHOW V T. Open channel hydraulics[M]. New York: Mcgraw-Hill Book Company,1959.

[16] ALDRIDGE B N, GARRELT J M. Roughness coefficients for streams in Arizona[R]. Washington D. C.: U. S. Geological Survey,1973.

[17] 陈素红,刘孟凯,邢领航.基于多亲遗传算法的渠道非恒定流糙率率定模型及其应用[J].水电能源科学,2013,31(5):81-83. (CHEN Suhong,LIU Mengkai,XING Linghang. Channel roughness calibration model based on multi-parent genetic algorithm and its application [J]. Water Resources and Power, 2013,31(5):81-83. (in Chinese))

[18] 王守勤,胡星,储德义.淮河蚌埠以下河道治理前后糙率变化[J].水利水电科技进展,2014,34(6):62-65. (WANG Shouqin,HU Xing,CHU Deyi. Analysis of the river roughness of Huaihe River channels in lower reaches of Bengbu before and after its regulation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014,34(6):62-65. (in Chinese))

[19] 李一鸣,管光华,陈琛,等.渠道糙率影响因素分析及预测模型研究[J].灌溉排水学报,2017,36(2):1-7. (LI Yiming,GUAN Guanghua,CHEN Kun, et al. Technical measures of rural irrigation engineering based on ecological concept[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017,36(2):1-7. (in Chinese))

(下转第 73 页)