

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtk.20180024

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 H Z, MA X W, LEI X H, 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)

# 南水北调中线工程渠道糙率计算方法研究

郑和震<sup>1,2</sup>, 马雄威<sup>3</sup>, 雷晓辉<sup>2</sup>, 秦 韬<sup>2</sup>, 孔令仲<sup>1</sup>, 尚毅梓<sup>2</sup>

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058; 2. 中国水利水电科学研究院 水资源所, 北京 100038;  
3. 北京市可持续发展促进会, 北京 100084)

**摘要:** 为了明确南水北调中线工程渠道糙率的合理取值, 分别选取杨开林公式、美国垦务局公式、美国陆军工程兵团公式, 以及优化方法来计算糙率, 并构建南水北调中线总干渠水力学模型进行检验。将模型方法应用到刁河节制闸—湍河节制闸渠段的10组稳定工况时, 4种方法计算出的糙率值分别为0.01538、0.0156、0.01389和0.0169, 代入水力学模型计算的刁河节制闸各工况闸后水位与实测值的相对误差总和分别为0.1744%、0.1586%、0.3028%和0.0947%。4种方法得到的糙率值代入水力学模型的模拟精度中, 优化方法最好, 建议作为中线渠道糙率计算的方法。

**关键词:** 南水北调中线工程; 水力学模型; 渠道糙率; 糙率计算方法

**中图分类号:** TV 68; TV 133 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)01-0158-06

## Research on computing method for channel roughness of the Middle Route of South to North Water Diversion Project

ZHENG Hezhen<sup>1,2</sup>, MA Xiongwei<sup>3</sup>, LEI Xiaohui<sup>2</sup>, QIN Tao<sup>2</sup>, KONG Lingzhong<sup>1</sup>, SHANG Yizi<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Institute of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

3. Beijing Promotion Association for Sustainable Development, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to determine the reasonable channel roughness values for the Middle Route of South to North Water Diversion Project, we selected three methods (Karlin Yang formula, U. S. Bureau of Reclamation formula, and U. S. Army Corps of Engineers formula) and established one optimized method to calculate the roughness; then we tested the validity of the roughness values using the hydraulic model for main canal of South to North Water Diversion Project. The model and the method were applied to ten stable working conditions of the channel from Diaohu Gate to Tuanhe Gate. The roughness values calculated by the four methods were 0.01538, 0.0156, 0.01389, and 0.0169, respectively. Then the roughness values were put into the hydraulic model to calculate the water level behind Diaohu Gate. The sum of relative error between calculated and measured values of the ten working conditions were 0.1744%, 0.1586%, 0.3028%, and 0.0947%, respectively. Results showed that the optimized method was the best at calculating channel roughness. We suggest that it be applied to South to North Water Diversion Project.

**Key words:** the Middle Route of South to North Water Diversion Project; hydraulic model; channel roughness; computing method for roughness

收稿日期: 2017-05-12 修回日期: 2017-12-06 网络出版时间: 2017-12-27

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171227.0934.002.html>

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07108-001); 国家科技支撑计划(2015BA07B03); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室代表性成果培育课题(2016CG05)

Funds: Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment(2017ZX07108-001); National Key Technology R & D Program of the Ministry of Science and Technology(2015BA07B03); Research Project of State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin(2016CG05)

作者简介: 郑和震(1990), 男, 湖北黄石人, 博士研究生, 主要从事水力学研究。E-mail: zhenghezhen@zju.edu.cn

通讯作者: 雷晓辉(1974), 男, 陕西澄城人, 教授级高级工程师, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: lxh@iw.hr.com

南水北调中线工程可缓解中国北方水资源短缺的问题,改善生态环境,促进经济社会可持续发展,具有重要的战略意义<sup>[1]</sup>。渠道糙率是工程设计、运行的关键技术参数之一,对渠道输水影响比较大,其取值的合理可靠性对工程有极其重要的意义<sup>[2]</sup>。目前水利工程多用曼宁系数来表示糙率,对于糙率有着两种不同的理解<sup>[3]</sup>:一种认为糙率是一个有着明确物理意义的系数,可用数学公式来描述,其影响因素主要包括壁面的粗糙程度、明渠的断面形状和水力半径、渠道的流量和水位、渠道断面的沿程变化和流态等<sup>[4-8]</sup>;另一种认为糙率是一个物理概念并不明确的参数,其中包含了各种不可知因素的影响,所以采取非线性的优选方法,逐步调整糙率的取值,使计算结果接近测量值,从而率定糙率<sup>[9-13]</sup>。

王光谦等<sup>[14]</sup>通过调研考察其他调水工程以及分析糙率取值规范和多种计算方法,推荐了中线总干渠糙率的设计值,此后许多研究建立中线干渠水力学模型的糙率取值均为设计值<sup>[15-17]</sup>。但是实际混凝土渠道糙率的范围为 0.011~0.019<sup>[18]</sup>,中线总干渠输水线路长、纵坡小、断面形状大小不一、渠道设计水深和流量由南向北递减,因此其糙率不应为定值,中线渠道糙率取值的不确定性影响水面线及过流能力<sup>[19]</sup>。杨开林<sup>[20]</sup>提出中线渠道沿程糙率的系统辨识模型,考虑渠道断面形状、底坡、渠长变化的影响,应用最小二乘法得到的渠道沿程糙率计算公式,利用南水北调中线京石段应急供水工程实测资料进行验证,并与美国垦务局公式计算结果进行对比,精度较高,可作为人工混凝土渠道糙率的计算依据。

南水北调中线工程于 2014 年 12 月 12 日正式通水,已有研究未利用工程运行实测数据对各渠段糙率进行率定。为满足目前工程运行管理的实际需求,本研究构建南水北调中线总干渠水力学模型,利用多种方法计算渠道糙率,并进行实例应用验证,选择出适合南水北调中线渠道糙率的计算方法。

## 1 研究区域

南水北调中线工程(图 1)自丹江口水库引水,向河南省、河北省、天津市和北京市供水。输水干线全长 1 277 km,总水头不足 100 m,渠道底坡为 1/25 000,总干渠上共有 64 座节制闸,97 座分水口门,54 座退水闸,以及渡槽、倒虹吸、隧洞等众多水力建筑物<sup>[6]</sup>,常规的运行方式为闸前常水位<sup>[21]</sup>。

## 2 数学模型

### 2.1 水力学模型

针对南水北调中线工程特点,对闸门、倒虹吸、渐变段等复杂的水力建筑物进行概化处理,然后与



图 1 南水北调中线总干渠线路

Fig. 1 Route map of the main canal of the Middle Route of South to North Water Diversion Project

圣维南方程组进行耦合,采用 Preissmann 格式对方程组进行离散,用双扫描法求解,实现渠道在各种工况下的水力响应过程的快速、准确模拟。

非恒定流计算采用圣维南方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{Q}{A} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{2A^2} \right) + g \frac{\partial Z}{\partial x} + g(S_f - S_0) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x$  和  $t$  分别为空间和时间坐标; $Q$  和  $A$  分别为断面流量和过水面积; $q$  为单位长度渠道上的侧向入流流量; $\alpha$  为动量修正系数; $Z$  为水位; $S_f$  为水力坡度。

$$S_f = \frac{Q|Q|}{K^2} \quad (2)$$

式中: $K$  为流量模数。

令式(1)中的时间项  $\frac{\partial A}{\partial t}$  和  $\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{Q}{A} \right)$  为 0,则得到恒定流计算式:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{2A^2} \right) + g \frac{\partial Z}{\partial x} + g(S_f - S_0) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

对于式(3)用式(1)的离散格式和数值计算方法进行求解,可使非恒定流收敛到相应的恒定流上。

### 2.2 渠道糙率计算方法

南水北调中线工程渠道明渠段全线为混凝土衬砌,渠道断面为梯形(图 2),水力半径与水深有着一

一对应关系:

$$R = \frac{(b + mh)h}{b + 2h\sqrt{1 + m^2}} \quad (4)$$

式中:  $R$  为水力半径(下同);  $b$  为渠道底宽;  $m$  为边坡系数;  $h$  为水深。

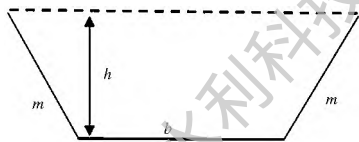


图2 梯形断面示意图

Fig. 2 Sketch map of trapezoid section

对于一维模拟, 一般认为某一断面的湿周上或者某一段渠道上具有相同的糙率<sup>[3]</sup>。糙率的推求方法有多种<sup>[22-23]</sup>, 选取认为渠道糙率具有明确物理概念的杨开林公式<sup>[20]</sup>、美国垦务局公式<sup>[24]</sup>和美国陆军工程兵团公式<sup>[25]</sup>, 并基于渠道糙率不具有明确物理概念这一思想建立优化方法, 共4种方法来计算糙率。

### 2.2.1 杨开林公式

杨开林<sup>[20]</sup>应用系统辨识方法, 依据水力学原理, 提出了适用于南水北调中线工程的渠道糙率计算公式:

$$n = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{22.9 \lg(1020R)} \quad (5)$$

式中:  $n$  为糙率(下同)。

### 2.2.2 美国垦务局公式

美国垦务局根据已建渠道的实测资料和室内试验分析, 推荐使用下述方法确定混凝土渠道的糙率:

当水力半径  $R \leq 1.2$  m 时, 糙率  $n = 0.014$ ;

当水力半径  $R > 1.2$  m 时, 糙率为:

$$n = \frac{0.056R^{\frac{1}{6}}}{\lg(9711R)} \quad (6)$$

### 2.2.3 美国陆军工程兵团公式

中线工程渠道可利用美国陆军工程兵团水力设计准则给出的式(7)来计算渠道沿程糙率<sup>[14]</sup>:

$$n = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{19.55 + 18 \lg(R/K_s)} \quad (7)$$

式中:  $K_s$  为等效粗糙度, 在工程运行初期可取  $0.00061$  m<sup>[20]</sup>。

### 2.2.4 优化方法

工程实际运行中可获取各节制闸的闸前闸后水位、流量及开度的实测数据和分(退)水闸的流量, 对于单渠段(图3)而言, 已知上节制闸的流量、渠段中分(退)水闸的流量和下节制闸的闸前水深, 则可由恒定流模型推求水面线, 进而确定上节制闸的闸后

水位。据此建立优化方法, 在糙率取值范围内, 使得上节制闸闸后水位多组工况下的模拟值和实测值的相对误差之和最小, 此目标下的糙率即为最优值。

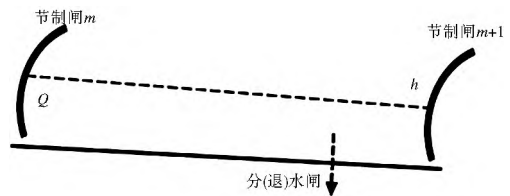


图3 单渠段示意图

Fig. 3 Sketch map of single pool

(1) 目标函数。

$$\min \sum_{i=1}^N \left| \frac{S_i - O_i}{O_i} \right| \quad (8)$$

式中:  $N$  为工况数量;  $O_i$  和  $S_i$  分别为上节制闸闸后水位在第  $i$  个工况的实测值和模拟值。

(2) 约束条件。

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max} \quad (9)$$

式中:  $n_{\min}$  和  $n_{\max}$  分别为糙率可取的最小值和最大值。

(3) 计算方法。

在糙率可取的最小值和最大值内按预定的步长进行离散, 然后逐一代入水力学模型, 并计算每个糙率对应的目标函数值, 目标函数值最小对应的糙率即为所求。

## 3 实例应用

选取刁河节制闸- 湍河节制闸之间的渠道进行应用, 刁河节制闸的闸后渠底高程为 138.456 m, 湍河节制闸的闸前渠底高程为 137.603 m, 渠道底宽为 19 m, 边坡为 2。选取 10 组稳定工况的数据(表1)进行分析。从表 1 可知, 各工况中, 刁河节制闸流量并不严格等于望城岗分水口和湍河节制闸流量之和, 但二者差值较小, 说明渠道的流量测量存在一定误差<sup>[26]</sup>, 本研究忽略原型观测误差的影响。水力学模型的上边界条件为流量, 下边界条件为水深。

经过计算, 各工况应用前 3 种方法得到的水力半径和糙率结果见表 2 和表 3。

各工况下各方法计算的刁河节制闸后渠道和湍河节制闸前渠道的糙率值差异较小, 将其平均值作为渠道的糙率, 则杨开林公式、美国垦务局公式和美国陆军工程兵团公式计算的糙率值分别为 0.01538、0.0156 和 0.01389, 将其代入水力学模型计算刁河节制闸的闸后水位, 并统计各工况模拟值与实测值的差值、差值绝对值的平均数以及各工况相对误差总和, 结果如表 4 所示。

表1 刁河节制闸- 湍河节制闸渠段工况(流量从小到大)

Tab.1 Working conditions of the channel from Diaohu Gate to Tuanhe Gate(from small to large discharge)

工况	时间	刁河节制闸(桩号 14.62 km)		湍河节制闸(桩号 36.444 km)		望城岗分水口(桩号 22.283 km)
		闸后水位/m	流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	闸前水位/m	流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )
1	2015年11月7日8时	145.455	78.700	145.379	76.030	0.510
2	2015年11月3日8时	145.345	80.210	145.259	74.430	0.500
3	2015年11月11日8时	145.545	90.450	145.459	87.250	0.560
4	2015年12月10日8时	145.515	97.900	145.399	94.170	0.580
5	2015年11月22日8时	145.625	105.720	145.459	103.360	0.570
6	2015年11月20日8时	145.615	108.730	145.469	108.070	0.470
7	2015年11月14日8时	145.705	109.360	145.589	103.560	0.570
8	2016年7月5日8时	145.755	118.25	145.564	114.310	0.650
9	2016年5月19日8时	145.770	127.250	145.574	125.210	0.500
10	2016年4月29日8时	145.685	138.450	145.434	135.310	0.640

表2 刁河节制闸后渠道糙率

Tab.2 Channel roughness behind Diaohu Gate

工况	水力半径 /m	杨开林公式	美国垦务局公式	美国陆军工程兵团公式
1	4.591	0.01534	0.01553	0.01383
2	4.534	0.01533	0.01551	0.01382
3	4.639	0.01535	0.01554	0.01384
4	4.623	0.01534	0.01554	0.01384
5	4.681	0.01535	0.01555	0.01385
6	4.676	0.01535	0.01555	0.01385
7	4.723	0.01536	0.01556	0.01386
8	4.749	0.01536	0.01557	0.01387
9	4.757	0.01536	0.01557	0.01387
10	4.712	0.01536	0.01556	0.01386
平均	4.669	0.01535	0.01555	0.01385

表3 湍河节制闸前渠道糙率

Tab.3 Channel roughness in front of Tuanhe Gate

工况	水力半径 /m	杨开林公式	美国垦务局公式	美国陆军工程兵团公式
1	4.996	0.0154	0.01563	0.01392
2	4.934	0.01539	0.01561	0.01391
3	5.038	0.0154	0.01564	0.01393
4	5.007	0.0154	0.01563	0.01393
5	5.038	0.01541	0.01564	0.01393
6	5.043	0.01541	0.01564	0.01393
7	5.104	0.01542	0.01565	0.01395
8	5.092	0.01542	0.01565	0.01394
9	5.097	0.01542	0.01565	0.01395
10	5.025	0.01541	0.01563	0.01393
平均	5.037	0.01541	0.01564	0.01393

表4 刁河节制闸后水位模拟值与实测值之差

Tab.4 Results between simulated and measured water level roughness after Diaohu Gate

工况	Level roughness after Diaohu Gate			
	设计糙率	杨开林公式	美国垦务局公式	美国陆军工程兵团公式
1	-0.6	-0.2	-0.1	-1.5
2	-1.6	-1.3	-1.1	-2.5
3	-0.2	0.3	0.5	-1.2
4	-1.8	-1.3	-1.1	-3
5	-4.8	-4.3	-4	-6.1
6	-2.7	-2.1	-1.8	-4.2
7	-1.1	-0.7	-0.4	-2.5
8	-6.4	-5.8	-5.5	-8
9	-4.5	-3.9	-3.5	-6.4
10	-6.4	-5.5	-5.1	-8.7
绝对值平均	3.01	2.54	2.31	4.41
相对误差总和(%)	0.2066	0.1744	0.1586	0.3028

个糙率取值下,利用水力学模型计算10组工况对应的刁河节制闸后水位,并计算各工况的模拟值与实测值的相对误差,然后求和,结果如图4所示。当相对误差总和最小(0.0947%)时,糙率为0.0169。

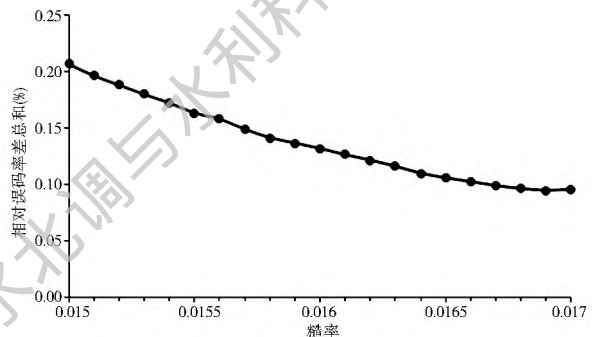


图4 相对误差总和与糙率取值关系图

Fig.4 Relationship between sum of relative error and roughness value

优化方法将糙率的取值范围选为0.015~0.017,离散步长为0.0001,则共有21个糙率值。在每一

## 4 结果分析

通过实例应用可知如下结果。

(1) 对于同一个断面,水深越大,则水力半径越大,那么用同一个公式计算出来的糙率则越大。但是目前中线渠道流量和水深变化不大,因此各工况的水力半径和糙率之间的差异较小,可用平均值来代替。

(2) 在目前运行阶段,对于同一个断面的同一个工况,各公式计算出来的结果关系为:美国垦务局公式>杨开林公式>设计值(0.015)>美国陆军工程兵团公式。

(3) 设计值、杨开林公式、美国垦务局公式、和美国陆军工程兵团公式这4种糙率值代入水力学模型计算出来的刁河节制闸后水位基本都小于实测值,且相对误差总和分别为0.2066%、0.1744%、0.1586%和0.3028%。

(4) 利用优化方法计算出来的糙率值为0.0169,能保证10组工况对应的刁河节制闸后水位的模拟值与实测值的相对误差总和(0.0947%)最小,并且比设计糙率及其他3种计算方法的相对误差总和要小。优化算法并未考虑糙率的物理含义,会把水力半径、壁面粗糙度、以及局部损失、测量误差等各种因素都综合考虑在糙率的取值里,使得各工况的模拟值与实测值的相对误差总和最小。

## 5 结论

南水北调中线工程已正式运行近两年时间,利用实测数据确定渠道糙率,对工程运行调度管理具有重要意义。构建南水北调中线总干渠水力学模型,结合对渠道糙率是否具有明确物理概念的两种理解,利用杨开林公式、美国垦务局公式、美国陆军工程兵团公式和优化方法来计算糙率,并将各方法计算的糙率值代入水力学模型推求水面线,验证糙率取值的合理性。

将上述模型方法应用到刁河节制闸—湍河节制闸渠道的10组稳定工况中,杨开林公式、美国垦务局公式、美国陆军工程兵团公式和优化方法计算出的糙率值分别为0.01538、0.0156、0.01389和0.0169,4种方法的糙率取值与糙率设计值代入水力学模型计算的刁河节制闸后水位与实测值的相对误差总和分别为0.1744%、0.1586%、0.3028%和0.0947%。杨开林公式和美国垦务局公式计算出的糙率值与设计值较为接近,且这3种糙率值代入水力学模型计算刁河节制闸后水位的精度相对较高;

美国陆军工程兵团公式的计算结果相对较差,且等效粗糙度 $K_s$ 难以精确量,建议不采取此种方法计算中线渠道的糙率;优化方法以渠道上节制闸后水位多组工况下的模拟值和实测值的相对误差之和最小为目标,计算出的糙率值能使得水力学模型模拟精度最高,建议用这种方法计算中线渠道糙率。

南水北调中线工程各渠段的属性条件与运行工况各异,在未来运行中渠道的流量和水深会发生变化,糙率在全线不可能一直为设计阶段的定值。建议对中线工程的水位和流量等测量设备进行校准,并在空间和时间两个维度上利用长系列实测数据对中线渠道糙率开展研究,明确糙率的合理取值,分析其内在规律,为工程运行调度管理提供技术支撑。

致谢:

本研究的所有数据均来自南水北调中线干线工程建设管理局,在此表示感谢。

参考文献(References):

- [1] 王浩,郑和震,雷晓辉,等.南水北调中线干线水质安全应急调控与处置关键技术研究[J].四川大学学报(工程科学版),2016,48(2):1-6.(WANG H,ZHENG H Z,LEI X H,et al. Study on key technologies of emergency regulation and treatment to ensure water quality safety of the main canal of Middle Routes of South to North Water Diversion Project[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition),2016,48(2):1-6.(in Chinese)) DOI: 10.15961/j.jsuese.2016.02.001.
- [2] 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 J M,SHI Z. Research on the absolute roughness of the typical channel of the South to North Water Diversion Project[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2007,26(5):75-79.(in Chinese))
- [3] 朱德军.南水北调中线明渠段事故污染特性模拟方法研究[D].北京:清华大学,2007.(ZHU D J. Study on numerical methods for water pollution accidents in the Middle Route open channel of South to North Water Transfer[D]. Beijing: Tsinghua University,2007.(in Chinese))
- [4] 何建京,王惠民.流动型态对曼宁糙率系数的研究[J].水文,2002,22(6):22-25.(HE J J,WANG H M. The effects of types of flow on Manning's roughness coefficient[J]. Hydrology,2002,22(6):22-25.(in Chinese))
- [5] BEN C Y. Open Channel Flow Resistance[J]. J. Hy. ASCE,2002,128(1):20-39. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:1(20).
- [6] SOONG D T. Estimating Manning's roughness coefficients for Illinois streams[C].广州:第八届海峡两岸水利科技交流研讨会,2004:230-237.
- [7] 胡旭跃,曾光明,黄国和,等.矩形明渠边界平均剪切应力变化规律研究[J].泥沙研究,2002,8(4):42-47.(HU X Y,ZENG G M,HUANG G H,et al. Study on the boundary shear stress

- in rectangular open channels [J]. *Journal of Sediment Research*, 2002, 8(4): 42-47. (in Chinese) DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2002.04.008.
- [8] LIU H S, XUE J. Theoretical analysis and numerical simulation of mechanical energy loss and wall resistance of steady open channel flow[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2016, 28(3): 489-496. DOI: 10.1016/S1001-6058(16)60653-4.
- [9] RAMESH R, BITHIN D S, MURTY B, et al. Optimal estimation of roughness in open channel flows[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, 126(4): 299-303. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2000)126:4(299).
- [10] DING Y, JIA Y F, ASCE M, et al. Identification of Manning's roughness coefficients in shallow water flows[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 130: 6(501). DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:6(501).
- [11] RAHMAN H K, JOHN J R W, PETER R W. Identification problem of Open Channel Friction Parameters[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 125: 5(552). DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:5(552).
- [12] BAO H J, ZHAO L N. Hydraulic model with roughness coefficient updating method based on Kalman filter for channel flood forecast[J]. *Water Science and Engineering*, 2014(1): 13-23. DOI: 10.3882/j.issn.1674-2370.2011.01.002.
- [13] AYVAZ M T. A linked simulation optimization model for simultaneously estimating the Manning's surface roughness values and their parameter structures in shallow water flows[J]. *Journal of Hydrology*, 500(2013): 183-199. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.07.019>.
- [14] 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(1): 8-14. (WANG G Q, HUANG Y F, WEI J H, et al. Identification of roughness coefficient value for the channel of the South to North Water Transfer(Middle Route) Project[J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2006(1): 8-14. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2006.01.004.
- [15] 刘国强. 长距离输水渠系冬季输水过渡过程及控制研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013. (LIU G Q. Research on transition mode of water delivering before freezing in winter and automatic method of long distance canal system[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013. (in Chinese))
- [16] 张大伟. 南水北调中线干线水质水量联合调控关键技术研究[D]. 上海: 东华大学, 2014. (ZHANG D W. Research on the key technology of the regulation of water quality and quantity of the Middle Route of South to North Water Diversion[D]. Shanghai: Donghua University, 2014. (in Chinese))
- [17] 陈翔. 南水北调中线工程应急调控与应急响应系统研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2015. (CHEN X. The research of emergency control and emergency response system of the Middle Route of the South to North Water Transfer Project[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015. (in Chinese))
- [18] 张小琴, 包为民, 梁为清, 等. 河道糙率研究进展[J]. *水力发电*, 2008, 34(6): 98-100. (ZHANG X Q, BAO W M, LIANG W Q, et al. Recent studies and progresses of the river roughness[J]. *Water Power*, 2008, 34(6): 98-100. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2008.06.030.
- [19] 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 K, WEI J H, WANG G Q. 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) DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2008.06.006.
- [20] 杨开林, 汪易森. 南水北调中线工程渠道糙率的系统辨识[J]. *中国工程科学*, 2012, 14(11): 17-23. (YANG K L, WANG Y S. System identification of channel roughness for middle route project of south to north water diversion[J]. *Engineering Science*, 2012, 14(11): 17-23. (in Chinese))
- [21] CUI W, CHEN W X, MU X P, et al. Canal controller for the largest water transfer project [J]. *Irrigation and Drainage*, 2014, 63, 501-511. DOI: 10.1002/ird.1817.
- [22] 赵瑞娟, 刘鸿涛, 陈伟. 输水渠道水力糙率计算方法比较[J]. *东北水利水电*, 2009(12): 9-10. (ZHAO R J, LIU H T, CHEN W. Comparison of calculation methods for hydraulic roughness of water conveyance canal[J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 2009(12): 9-10. (in Chinese) DOI: 10.14124/j.cnki.dbsld221097.2009.12.012.
- [23] 刘俊发, 曲志会, 刘鸿涛, 等. 混凝土衬砌渠道糙率系数估算方法[J]. *东北水利水电*, 2011(9): 3-4. (LIU J F, QU Z H, LIU H T, et al. Method for estimating roughness coefficient of concrete lining canal[J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 2011(9): 3-4. (in Chinese) DOI: 10.14124/j.cnki.dbsld221097.2011.09.002.
- [24] 刘斌, 庞进武, 祝瑞祥, 等. 美国长距离调水工程考察报告[J]. *人民长江*, 1994(7): 35-39. (LIU B, PANG J W, ZHU R X, et al. Investigation report of the long distance water transfer project in USA [J]. *Yangtze River*, 1994(7): 35-39. (in Chinese))
- [25] U. S. Bureau of Reclamation. Analysis and description of capacity tests in large concrete lined canals[M]. Denver, Colo: Technical Memorandum 661, 1964.
- [26] 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 K L, WANG Y S. Error analysis of roughness coefficient calibration for channels[J]. *Shuili Xuebao*, 2012, 43(6): 639-644. (in Chinese) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2012.06.004.