



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.04.021

李甲振, 郭永鑫, 甘明生, 等. 河工模型试验加糙方法综述[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(4): 129-135. LI Jia zhen, GUO Yong xin, GAN Ming sheng, et al. Overview of roughening methods in river model experiments[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(4): 129-135. (in Chinese)

河工模型试验加糙方法综述

李甲振¹, 郭永鑫¹, 甘明生², 许金鹏³, 黄伟¹

(1. 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; 2. 中国建筑股份有限公司, 北京 100037; 3. 河南省南阳市水文水资源勘测局, 河南 南阳 473000)

摘要: 原模型阻力相似是开展河工模型试验的基本要求, 模型试验的糙率复核受目标值、波动幅值、模型材质及研究重点等多因素的影响, 选用合理的加糙手段可大幅提升试验效率和精度。为解决现阶段河工模型试验中存在的加糙方法种类繁多、技术条件复杂、难以快速选择适宜加糙方法的问题, 对国内外常用的加糙方法进行了归纳总结, 将加糙方法划分为点块型加糙、条带型加糙和膜片型加糙三种方法。介绍了每种方法常用的加糙体, 详细说明了各加糙方法的实现手段、优点、不足以及糙率值的可调整范围。草垫为代表的膜片型加糙可实现的糙率峰值达 0.08 以上, 梅花十字架加糙可实现的糙率峰值约 0.06, 条带型加糙可实现的糙率峰值约为 0.04, 粘贴尼龙网、玻璃膜以及密实加糙可实现的糙率峰值约为 0.02, 刨坑加糙方法基本不能提高模型表面糙率。给出了相应的适用条件、加糙范围及对水流结构的影响, 以及部分糙率计算方法, 以期研究者可根据试验目的快速准确地选取适宜的加糙方法, 提高研究效率。

关键词: 模型试验; 加糙方法; 点块型加糙; 条带型加糙; 膜片型加糙

中图分类号: P21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)04-0129-07

Overview of roughening methods in river model experiments

LI Jia zhen¹, GUO Yong xin¹, GAN Ming sheng², XU Jin peng³, HUANG Wei¹

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. China State Construction Engineering Corporation Limited, Beijing 100037, China;

3. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Nanyang City of Henan Province, Nanyang 473000, China)

Abstract: Resistance similarity is an essential requirement in river model experiments. Roughness recheck is affected by the target value, fluctuation amplitude, model material, and research emphasis. A reasonable roughening method will substantially improve the experiment efficiency and accuracy. In order to help researchers quickly choose a reasonable roughening way from the various existing methods, we sorted and reviewed the commonly used roughening methods, which were classified into three types: block type roughening, strip type roughening, and patch type roughening. We introduced the commonly used roughening elements of each method and described in detail the realization means, advantages, drawbacks, and adjustable roughness range of each method. The patch type roughening methods represented by plastic grass cushions can achieve a roughness value larger than 0.08. The block type roughening methods represented by cross plates in the form of plum blossom can obtain a peak roughness value of about 0.06. The peak roughness value of strip type roughening methods is 0.04. Sticking nylon nets or glass film and compact roughening can generally realize a roughness value no larger than 0.02. Digging pits on the model can hardly increase its surface roughness. In addition, this paper presents the methods' application conditions, roughening ranges, and influ

收稿日期: 2016-07-14 修回日期: 2016-12-12 网络出版时间:

网络出版地址:

基金项目: 国家自然科学基金(51609265); 国家重点研发计划(2016YFC0401808)

Funds: National Natural Science Foundation of China(51609265); The State Key Development Program(2016YFC0401808)

作者简介: 李甲振(1989-), 男, 山东泰安人, 工程师, 博士, 主要从事水力学及河流动力学方面研究。E-mail: nej1989@126.com

ence on flow structure, and some roughness calculation methods. It is hoped that with this paper, researchers can determine roughening methods quickly and exactly according to their experiment goals, and improve their research efficiency.

Key words: model experiment; roughening method; block type roughening; strip type roughening; patch type roughening

进行河工模型试验时,一般按照重力相似准则进行设计,原模型需满足阻力相似要求。选定几何比尺后,即可根据原型糙率和比尺确定模型表面所需要的糙率值。通常,利用混凝土、有机玻璃材质进行放样所制作模型的糙率小于需求值,因此,需要对模型表面进行加糙^[1]。对于宽深比较大的河道,一般采用变态模型,变态率越大,所需的河床糙率也越大^[2]。如何对模型表面进行加糙,反映原型的水力特性,成为了试验需要解决的首要问题。一般情况下,模型加糙需要考虑以下问题:(1)目标糙率的大小,据此确定可供选择的加糙方式;(2)试验研究的重点,考虑加糙对水流结构及流速分布的影响;(3)模型制作的材质,使加糙易于实现;(4)加糙的可调节性,糙率复核通常经过多次调整后才能实现,因此,加糙方式需易于调整。

本文对常用的加糙方式进行了概述,将其划分为点块型加糙、条带型加糙和膜片型加糙,分析了不同加糙方式的适用条件、实现方式、优缺点以及糙率计算方式,指出了研究需要解决的难点问题和关键技术。

1 点块型加糙

点块型加糙,是将加糙体按照一定的排列方式粘贴在河床上实现加糙的。常见的点块型加糙方式有密实加糙、梅花加糙、刨坑加糙等。

1.1 密实加糙

密实加糙,是将加糙用的沙、砾石或卵石彼此紧密排列,基本上不留空隙,进行加糙的一种方法。这种无间距加糙的方式基本不破坏底部水流结构,在紊动结构和水流分布的相似性模拟方面具有一定的优势^[3]。对于粒径 $d=0.13\sim 8\text{ mm}$ 的加糙颗粒,糙率可按照张有龄公式计算^[4]

$$n=0.0166d^{1/6} \quad (1)$$

对于 $d=4.3\sim 26.4\text{ mm}$ 的较粗加糙颗粒,糙率可根据天津水运工程研究所公式计算

$$n=0.0138d^{1/6} \quad (2)$$

有效水深 h 与实际水深 h' 之间的关系为^[5]

$$h=h'-(0.2\sim 0.3)d \quad (3)$$

密实加糙是一种比较传统的加糙方法,可实现的糙率较小。采用直径 26.4 mm 的颗粒进行加糙时,可获得的糙率为 0.023 。尽管密实加糙的材料

消耗量和排布工作量较大,糙率的调整较为复杂,但由于更接近天然河床的情形,对底部水流结构的影响小,因此,常用于模型水深较小、局部流态相似要求较高的浅滩试验和枯水河床部分,如有可能,应尽量采用这种加糙方式^[6]。

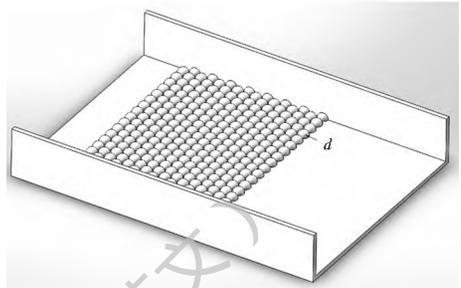


图1 密实加糙

Fig. 1. Block roughening with compact layout

1.2 梅花加糙

梅花加糙,是将加糙用的沙、砾石或卵石按梅花形均匀地粘牢在河床上。梅花加糙的计算公式为

$$n=Kd^{1/6} \quad (4)$$

系数 K 取值可参阅文献[6],它随着颗粒间距与颗粒直径比值 L/d 的增加先增大,后减小,最大值 $L/d=2.5$ 为左右。使用梅花加糙时,颗粒直径一般不超过水深的 10% 。相比密实加糙,相同粒径颗粒采用梅花形布置可获得更大的糙率,但改变了河床的糙率分布,影响紊动结构和流速分布的相似性,因此,常用于一维和平面二维水流问题的模拟^[5]。

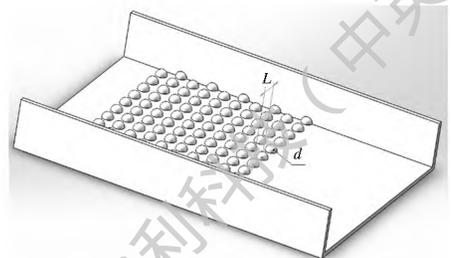


图2 梅花加糙

Fig. 2. Block roughening with plum blossom layout

作为一种能产生较大糙率的加糙方式,沙、砾石或卵石之外的其他加糙体在梅花加糙中得到了广泛应用,如平板、十字板、Y型加糙体、三角块等。梅花形平板和十字板加糙可在较小的雷诺数时进入阻力平方区,获得较大的糙率^[7,8];加糙体所占水体体积小,通常小于 1% ,有利于行蓄洪区库容和河道槽蓄

的相似。对于梅花形平板加糙, 当来流不垂直于平板时, 平板对水流的作用易造成流态失真, 因此, 该加糙体不适用平面上束窄或拓宽、弯道以及分汇流的情形, 仅适用于顺直河道的加糙⁹⁾。十字板加糙体在满足形体小、阻力大、进入阻力平方区雷诺数小的情况下, 解决了平板加糙不适用水流方向变化的问题。调整糙率时, 修改十字板高度或拔掉部分十字板较为方便, 因此, 常以 1.05~1.10 倍目标糙率进行设计。糙率计算公式为

$$n = \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{8g}} R^y \quad (5)$$

式中: λ 为阻力系数, $\lambda = 5.823 \frac{(\Delta/b)^{0.191}}{(L/b)^{0.999} (h/\Delta)^{1.189}}$;

Δ 为十字板高度(m); b 为十字板宽度(m); L 为相邻十字板间距(m); h 为有效水深, $h = H_0 - \eta \Delta$ (m); H_0 为以河底为计算基面的水深(m); η 为系数; R 为水力半径, 计算时以水深 h 替代; $h/\Delta = 2 \sim 4$ 时, $y = 1/3$; $h/\Delta = 4 \sim 7$ 时, $y = 1/4$; $h/\Delta > 7$ 时, $y = 1/5$ 。梅花形十字板加糙在淮河防洪模型中的应用取得了满意的成果¹⁰⁾。Y 型加糙体是一种 Y 型塑料, 通过强力胶粘贴于河床。Y 型加糙体在长江防洪模型中获得应用, 可调整的糙率范围为 0.015~0.040。朱代臣¹¹⁾ 对宽度 $b = 1.2$ cm, 高度 $\Delta = 1$ cm, 厚度 $d = 0.2$ cm 的 Y 型加糙体进行试验, 给出了不同糙率范围的加糙间距。糙率在 0.015 附近时, 间距以 20 cm 为宜; 糙率在 0.020 附近时, 间距以 15 cm 为宜; 糙率大于 0.028 时, 间距以 5 cm 为宜。使用三角块加糙体进行加糙时, 有正向和反向梅花形加糙两种布置形式, 反向布置的糙率略大于正向布置。徐华¹²⁾ 对腰长 $b = 3$ cm, 底边 $a = 2$ cm 的三角块加糙体进行了多间距的系列试验, 给出了不同间距的糙率值。三角块厚度为 15 mm, 间距 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 时, 糙率值为 0.0285, 可见, 三角块加糙体可实现的糙率值较小。但它的优势为来流方向不同时, 糙率也不同, 这与潮汐河流涨落潮时阻力不同是一致的¹³⁾。李鹏飞¹⁴⁾ 将弹性较好的环状橡胶圈梅花形布置作为试验用柔性加糙体, 其加糙效果随着垂直水流方向投影面积的增加而增大。

加糙体按照梅花形排布时, 水流经过加糙体后, 在背水面形成涡流区, 并与主流区的水体发生能量交换, 引起阻力增大, 糙率增加。随着间距的增大, 背水面的涡流区范围扩大, 能量损耗增加, 模拟的糙率值也增大, 其峰值一般在 $L/d = 2 \sim 3$ ¹⁵⁾。之后, 随着颗粒间距的增加, 模拟糙率值减小。上述几种加糙体中, 平板、十字板加糙体对行蓄洪区库容及河道槽

蓄的影响最小; Y 型、三角块加糙体在来流方向不同时, 糙率变化, 适用于糙率随水流方向改变的工况。

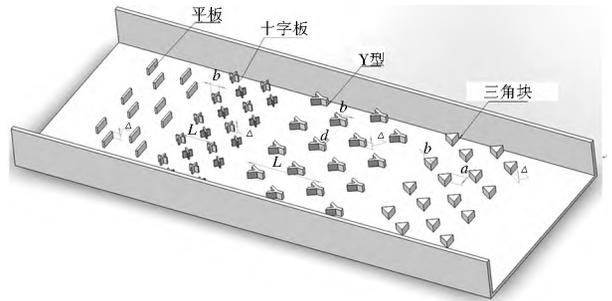


图3 其他加糙体

Fig. 3 Other roughening elements

1.3 刨坑加糙

刨坑加糙, 是在模型表面刨制小坑进行加糙的一种方式。经过实践, 刨坑对河床糙率的影响并不明显, 这主要是因为刨坑的方法不能显著提高模型表面的当量绝对粗糙度, 坑内水体以自旋为主, 不能显著增加糙率。李纯良¹⁶⁾ 在混凝土表面每隔 3.37 cm 布置一排间距为 3.20 cm 的坑; 坑的形状近似为四面体, 底面为边长 1.5 cm 的等腰三角形, 深 0.9 cm, 体积为 0.29 cm³, 所获得的糙率近似于混凝土抹面的糙率 0.011。

2 条带型加糙

2.1 凹槽加糙

利用混凝土材质制作的模型, 表面抹光的糙率一般在 0.010~0.011; 在混凝土未干结前, 可利用扫帚等对表面进行打毛, 以增加模型糙率, 但数值一般不超过 0.014。长江口处河道模型试验中, 通过在模型表面刮制 W 型波纹凹槽进行加糙; 凹槽的尺寸是宽 0.8 cm、深 0.8 cm, 模型达到的糙率为 0.019¹⁷⁻¹⁸⁾。笔者在其模型试验中, 也曾通过表面刮制宽深 0.6~0.7 cm 的 W 型波纹凹槽进行加糙, 实现的糙率值为 0.018。该加糙方法操作简单, 容易实现。考虑混凝土特性及 W 型凹槽的制作, 建议的加糙深度一般不超过 1 cm, 糙率值一般小于 0.020。

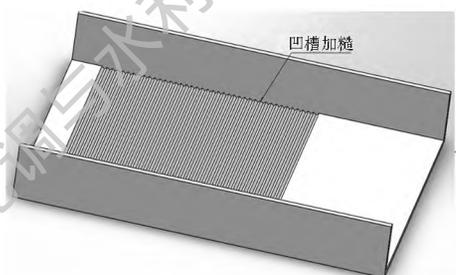


图4 凹槽加糙

Fig. 4 Roughening with grooves

2.2 水中拉线加糙

对于河床平顺的渠道,水中拉线是一种较为便捷的加糙方式。水中拉线加糙是在渠底两侧预先密集埋设铁钉,间距一般为5~10 cm;将绳索拴在铁钉上,通过增加对水流的扰动实现加糙目的。该加糙方式可实现的糙率值达0.04,随绳距的增大而减小,当绳距大于80 cm时,加糙效果已经不明显了。M. Asim^[19]对1.0 mm和1.5 mm绳索的试验表明,绳索直径对糙率的影响并不明显。前文提及的点块型加糙方式在改变糙率时,往往需要停水,去掉已粘贴的加糙体并调整间距,或对加糙体进行修剪、拔除,干结后再次进行试验;糙率调整周期长,通常至少需要十几天的时间。水中拉线可以在不停水的情况下改变糙率,操作简便,糙率复核工作可在两三天时间完成。但水中拉线加糙破坏了水体的流场结构,影响断面流速分布和河道输沙,一般在研究水面线问题时应用,在浑水和动床试验糙率不足时使用^[20]。

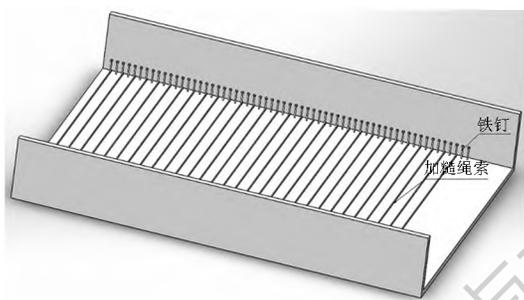


图5 水中拉线加糙

Fig. 5 Roughening with ropes

2.3 粘贴条带加糙

粘贴条带加糙是将有机玻璃、塑料材质的加糙条或吸管等按照一定的规律粘贴在底板上进行加糙的一种方式^[21]。卞华^[22]对三角形、半圆形、矩形和圆形加糙条的紊流结构进行研究,矩形条带的加糙效果最好。当加糙条间距 λ 高度 $k=8$ 时,当量糙率最大。利亚平^[23]、D W Knight^[24]对不同尺寸加糙条的试验也证实了间距为加糙条高度的8~9倍时,加糙效果最明显,粘贴条带加糙一般用于糙率值不超过0.03的河工模型。将条带波浪状或交错式布置,可进一步提升加糙效果,在泄水工程陡坡段的消能防冲中应用较多^[25,26]。需要注意的是,当加糙条间距大于高度的8倍时,为大尺度漩涡的存在和发展创造了条件,0.6~1.3倍加糙条高度范围的水体流速分布发生偏离,不满足对数型流速分布^[22,27]。

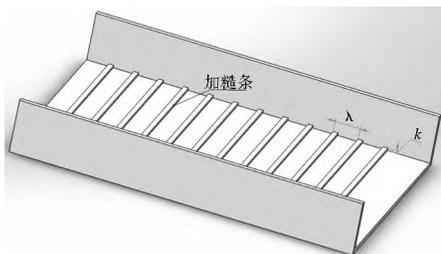


图6 粘贴条带加糙

Fig. 6 Roughening by pasting stripes

2.4 扦插条筷加糙

扦插条筷加糙是将长度大于宽度的橡皮条或竹筷采用梅花形排列插入模型床面或壁面实现加糙的^[28]。糙率可用下述方法估算^[29]

$$n = \left[\frac{C_x N d}{2g} R^{1.33} + n_0^2 \right]^{0.5} \quad (6)$$

式中: n 为加糙后模型的综合糙率; n_0 为加糙前模型的综合糙率; C_x 为竹筷阻力系数, $C_x = 10.52 C_{x0}$, $C_{x0} = 671.14 R e^{-0.6615}$; N 为单位面积上竹筷总数; R 为水力半径; g 为重力加速度; d 为竹筷的直径。扦插条筷加糙常用于淤积状态下水面线问题的研究。

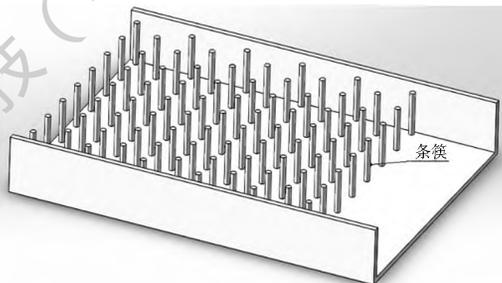


图7 扦插条筷加糙

Fig. 7 Roughening with chopsticks

3 膜片型加糙

膜片型加糙,是一种在模型的表面粘贴膜片进行加糙的方式,常用的膜片有尼龙网、玻璃膜、塑料草垫等,见图8。在香港锦田主排水道雨洪渠道模型试验中,王涛^[30]利用厚0.7 mm,网格间距为1 mm的尼龙网模拟浆砌块石护坡。为保持有机玻璃模型的可视性,孙东坡^[31]在表面粘贴玻璃膜进行加糙。纹理越深,加糙效果越明显;加糙膜纹理垂直来流方向的糙率最大。尼龙网和玻璃膜可实现的糙率值一般不超过0.020,加糙时,制作成块状进行粘贴,便于撕除进行糙率调整。

利用塑料草垫进行加糙,可实现的加糙范围为0.027 4~0.081 3^[32],常用于表面较平整的有机玻璃、混凝土、钢质和木质模型的加糙;减小糙率时,在草垫格栅的节点上摘除塑料草即可。其加糙效果的影响因素主要是草间距、叶开度、高度以及单片叶的

尺寸。草间距越小、开度越大、草越高、单片叶尺寸越大,加糙效果越明显;叶片平面舒展型草垫的加糙效果优于竖向笼缩型草垫。由于工业化生产的草垫具有统一的规格和尺寸,因此,草垫对水流底部流速的干扰也是比较均匀的。通过对底部紊动强度的分析,草垫加糙要求模型水深不小于 3.0~3.5 cm。邬年华^[33]对鄱阳湖实体模型采用梅花形石块加糙和塑料草垫加糙相结合的方法,实现了模型和原型的水流运动条件相似。



图 8 膜片型加糙

Fig. 8 Patch type roughening

利用膜片加糙,特别是塑料草垫,可以实现很大的糙率值,但目前关于膜片加糙对底部水流结构的影响研究相对较少。

4 糙率的计算

糙率计算根据曼宁糙率系数的基本计算方程确定^[34]

$$n = \frac{AR^{2/3}}{Q} \sqrt{s_0 + \frac{h_1 - h_2}{L} + \left(\frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2} \right) \frac{Q^2}{2gL}} \quad (7)$$

式中: n 为渠道糙率; Q 为流量 (m^3/s); h 为水深 (m); A 为断面面积 (m^2); R 为水力半径 (m); L 为渠道长度 (m); s_0 为底坡; g 为重力加速度 (m/s^2); 下标“1”表示上游,下标“2”表示下游。当流态接近恒定均匀流时,上述公式计算结果准确;当流态按照恒定非均匀渐变流处理时,可根据实测资料的平均值推算糙率初值,并通过水面线的反复推算对初值进行校正,获得其精准值^[35]。

进行糙率计算时,水深计算基准面的选择主要有三种:(1)直接取河床底面作为计算基准面。(2)将加糙体所占水体的体积平摊至整个床面,平摊厚度即为水深抬高值,即,平摊厚度

$$\Delta = \frac{V}{A} \quad (8)$$

式中: V 为加糙体所占水体体积 (m^3); A 为床面面积 (m^2)。 (3)加糙体所占水体体积 V 考虑加糙体后面旋涡的体积,卢汉才^[6]认为加糙体后面的旋涡形状为一平放的锥体,影响距离为颗粒直径的 10~12 倍,虞邦义^[15]认为旋涡区为四分之一椭球体(长轴为两排加糙体间距,短轴为加糙体垂直来流方向宽

度,高度为加糙体高度)。

5 主要认识

通过对国内外河工模型试验加糙方法的概述,将其划分为点块型加糙、条带型加糙和膜片型加糙三种方法,分析了各方法的适用条件、加糙范围及对水流结构的影响,通过系统分析总结得出如下认识:

(1)考虑河床加糙目标值,以草垫为代表的膜片型加糙可实现的糙率峰值达 0.08 以上,梅花十字板加糙可实现的糙率峰值约 0.06,条带型加糙可实现的糙率峰值为 0.04,粘贴尼龙网、玻璃膜以及密实加糙可实现的糙率峰值约为 0.02,刨坑加糙方法基本不能提高模型表面糙率。

(2)从对水流结构的影响考虑,密实加糙更接近天然河床情况,对水流结构的影响最小,膜片型加糙次之;条带型加糙和梅花加糙一般常用于一维、二维水流问题研究,而在三维问题的研究中,建议使用密实加糙和膜片型加糙方法。

(3)从糙率调整的角度考虑,水中拉线加糙方法最便捷,膜片型加糙和梅花型十字板加糙方法次之,需要调整加糙体间距的点块型加糙和其他条带型加糙最为复杂。

(4)河道槽蓄量对水流水力特性影响较大的模型,建议使用梅花形十字板加糙或水中拉线加糙。

参考文献(References):

- [1] Mogahey C, Samuels P G, Knight D W. Advice, methods and tools for estimating channel roughness [J]. Water Management, 2009, 162(6): 353-362. DOI: 10.1680/wama.2009.162.6.353
- [2] 马健,孙东坡,曹卫平,等.概化弯道段潮汐模型系统设计与制作[J].海洋工程,2009(2):104-109. (MA Jian, SUN Dong po, CAO Wei ping, et al. Design and construction for generalized model of tidal river bend [J]. The Ocean Engineering, 2009(2): 104-109. (in Chinese)) DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2009.02.017)
- [3] Cheng N S. Resistance coefficients for artificial and natural coarse bed channels: Alternative approach for large scale roughness [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 141(2): 325. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000966
- [4] 惠遇甲,王桂仙.河工模型试验[M].北京:中国水利水电出版社,1999. (HUI Yur jia, WANG Gur xian. River model experiment [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 1999. (in Chinese))
- [5] 谢鉴衡.河流模拟[M].北京:水利电力出版社,1990. (XIE Jian heng. River simulation [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1990. (in Chinese))
- [6] 侯志军,侯俊建,孙一.定床模型糙率模拟试验研究[J].人民黄

- 河, 2014(2): 13-15. (HOU Zhi jun, HOU Jiaojian, SUN Yi. Roughness simulated method for fixed bed model trial test[J]. Yellow River, 2014(2): 13-15. (in Chinese))
- [7] Ingham D B, Tang T, Morton B R. Steady two-dimensional flow through a row of normal flat plates[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1990, 210(1): 281-302.
- [8] Carvalho R F D, Lorena M. Roughened channels with cross beams flow features[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2012, 138(8): 748-756. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000457
- [9] 梁斌, 陈先朴, 邵东超, 等. 大变态非恒定流河工模型的加糙技术[J]. 水利水电技术, 2001(10): 26-28. (LIANG Bin, CHEN Xiapu, SHAO Dongchao, et al. Roughening method in distorted river model of unsteady flow[J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 2001(10): 26-28. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2001.10.009
- [10] 梁斌, 陈先朴, 邵东超, 等. 梅花形十字板加糙的原理及实践[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2005(2): 258-262. (LIANG Bin, CHEN Xiapu, SHAO Dongchao, et al. Theory and applications of roughness made by cross plates in the form of plum blossom on river model[J]. Journal of Hydrodynamics (Ser. A), 2005(2): 258-262. (in Chinese)) DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2005.02.018
- [11] 朱代臣, 孙贵洲, 柴晓玲, 等. Y型加糙体水力阻力试验研究[J]. 长江科学院院报, 2008(1): 5-7. (ZHU Daichen, SUN Guizhou, CHAI Xiaoling, et al. Experimental study on hydraulic resistance of roughening elements shaped as letter "Y"[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008(1): 5-7. (in Chinese))
- [12] 徐华. 潮汐河工模型三角块梅花形加糙试验研究及其应用[D]. 南京: 南京水利科学研究所, 2006. (XU Hua. Research on roughness of quincunx-pasted triangle blocks and its application in tidal river model test[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2006. (in Chinese))
- [13] 徐华, 夏益民, 夏云峰, 等. 潮汐河工模型三角块梅花形加糙试验研究及其应用[J]. 水利水运工程学报, 2007(4): 55-61. (XU Hua, XIA Yimin, XIA Yunfeng, et al. Research on roughness of quincunx-pasted triangle blocks and its application in tidal river model test[J]. Hydro Science and Engineering, 2007(4): 55-61. (in Chinese)) DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640x.2007.04.009
- [14] 李鹏飞, 文恒, 李智峰. 模型明槽柔性加糙相对糙率的确定[J]. 水科学与工程, 2005(6): 10-12. (LI Pengfei, WEN Heng, LI Zhifeng. Study on defining relative roughness of flexible roughening in model flume[J]. Water Science and Engineering Technology, 2005(6): 10-12. (in Chinese))
- [15] 虞邦义. 河工模型相似理论和自动控制技术的研究及其应用[D]. 南京: 河海大学, 2003. (YU Bangyi, Research and application for river model similarity theory and automatic measuring and controlling technique[J]. Nanjing: Hohai University, 2003. (in Chinese))
- [16] 李纯良. 定床加糙的试验研究[J]. 华北水利水电学院学报, 1991(3): 59-64. (LI Chunliang. An experimental study of roughening for fixed bed model of river[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 1991(3): 59-64. (in Chinese))
- [17] 马健, 孙东坡, 张士乔, 等. 潮汐弯道段取水口水温场研究[J]. 水力发电学报, 2006(6): 119-124. (MA Jian, SUN Dongpo, ZHANG Tujiao, et al. Temperature field of water intake and outlet of tidal river bend[J]. Journal of hydroelectric engineering, 2006(6): 119-124. (in Chinese))
- [18] 张士乔, 马健, 孙东坡, 等. 复式断面弯道段的水流流态研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2007(6): 990-994. (ZHANG Tujiao, MA Jian, SUN Dongpo, et al. Flow pattern of compound section river bend[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2007(6): 990-994. (in Chinese))
- [19] M. Asim, 王龙, 郑钧, 等. 明渠试验加糙方法研究[J]. 水利水电技术, 2008(2): 67-70. (M. Asim, WANG Long, ZHENG Jun, et al. A new roughening method for experiment on open channel flow[J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 2008(2): 67-70. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2008.02.004
- [20] 罗肇森, 孙梅秀. 河工模型中几种人工糙率的计算[J]. 水利水运科学研究, 1981(2): 70-82. (LUO Zhaosen, SUN Meixiu. Calculation of several types of artificial roughness elements in river models[J]. Waterway Transportation Scientific Research, 1981(2): 70-82. (in Chinese)) DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640x.1981.02.007
- [21] Hyun B S, Sun E J, Kim T Y. Turbulent flow over two-dimensional rectangular shaped roughness elements with various spacings [C]. P6. DOI: 10.1109/OCEANSAP.2006.4393827
- [22] 卞华, 李福田, 刘长辉, 等. 二维加糙明渠紊流结构的试验研究[J]. 河海大学学报, 1998(1): 95-100. (BIAN Hua, LI Futian, LIU Changhui, et al. Investigation on turbulent structures in two-dimensional strip roughness flume[J]. Journal of Hohai University, 1998(1): 95-100. (in Chinese))
- [23] 利亚平. 具有人工加糙底部的河槽的水力学计算[J]. 人民长江, 1995(8): 55-56. (LI Yaping. Hydraulic calculation of channel with artificial roughening bottom[J]. Yangtze River, 1995(8): 55-56. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.1995.08.013
- [24] Knight D W, Macdonald A J. Hydraulic resistance of artificial strip roughness[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 1979, 105(6): 675-690.
- [25] 康德民, 黄显旗, 詹承偶. 槽底采用双人字形齿槛加糙[J]. 小水电, 1997(1): 27-28. (KANG Demin, HUANG Xianqi, ZHAN Chengou. Groove bottom roughening with double-toothed sill[J]. Small Hydro, 1997(1): 27-28. (in Chinese))
- [26] 张明义, 高建新. 人工加糙技术在乌拉泊水库溢洪道陡坡段中的应用[J]. 水利规划与设计, 2010(2): 57-60. (ZHANG Mingyi, GAO Jianxin. Application of artificial roughening technique in spillway of Mooring Ulla reservoir[J]. Water Conservancy Planning and Design 2010(2): 57-60. (in Chinese))
- [27] Ashrafian A, Andersson H I. The structure of turbulence in a

- rod roughened channel[J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 2004, 27(1): 65-79. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2005.04.006
- [28] Thompson G T, Roberson J A. A theory of flow resistance for vegetated channels [J]. Transactions of the Asae, 1976, 19(2): 288-293.
- [29] 屈孟浩. 黄河动床模型试验理论和方法[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005. (QU Meng hao. Model experiment theory and method with movable bed in the Yellow River[M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2005. (in Chinese))
- [30] Tao W, Yang K L, Guo X L, et al. Experiment study hydraulic roughness for Kan Tin main drainage channel in Hong Kong [J]. Journal of Hydrodynamics, 2012, 24(5): 776-784. DOI: 10.1016/S1001-6058(11)60303-X
- [31] 孙东坡, 李全家. 水力模型制作的一种新型加糙方法[J]. 人民长江, 2014(3): 87-89. (SUN Dong po, LI Quan jia. A new roughness increasing method for hydraulic model[J]. Yangtze River, 2014(3): 87-89. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2014.03.005)
- [32] 赵海镜, 田世民, 王鹏涛, 等. 水工模型试验中的草垫加糙方法研究[J]. 水力发电学报, 2015(4): 77-82. (ZHAO Hai jing, TIAN Shi min, WANG Peng tao, et al. Study on roughening method of hydraulic model with grass cushions[J]. Journal of hydroelectric engineering, 2015(4): 77-82. (in Chinese))
- [33] 邬年华, 黄志文, 刘同宦, 等. 鄱阳湖实体模型定床相似关键技术研究[J]. 江西水利科技, 2012, 38(4): 219-223. (WU Nian hua, HUANG Zhi wen, LIU Tong huan, et al. Key technology research on the similar of the Poyang Lake fixed bed model [J]. 2012, 38(4): 219-223. (in Chinese))
- [34] 杨开林, 汪易森. 渠道糙率率定误差分析[J]. 水利学报, 2012(6): 639-644. (YANG Kai lin, WANG Yi sen. Error analysis of roughness coefficient calibration for channels[J]. Journal of hydraulics, 2012(6): 639-644. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2012.06.004)
- [35] 张小琴, 包为民, 梁文清, 等. 河道糙率问题研究进展[J]. 水力发电, 2008(6): 98-100. (ZHANG Xiao qin, BAO Wei min, LIANG Wen qing, et al. Recent studies and progresses of the river roughness[J]. Water Power, 2008(6): 98-100. (in Chinese))