

Grid-Based Determination Method for Water Depth-Discharge Curve of the Irregular Cross-Section*

Fanglu Zhou¹, Jinbai Huang^{2#}, Bin Wang³

¹Daqing Songnen Project Management Office, Daqing

²Department of Water Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou

³Department of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin
Email: #huangjinbaihy@yahoo.cn

Received: Feb. 17th, 2013; revised: Mar. 1st, 2013; accepted: Mar. 19th, 2013

Copyright © 2013 Fanglu Zhou et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: Most of the cross-section form of the natural river channel is irregular and the stage-discharge curve ($h\sim Q$ curve) is higher-order implicit function which causes the difficulties in deriving curve directly. In this study, the sectional form was determined by crossing section measurement, and the flow area corresponding to the different water depth was estimated by number of grid which was inserted in the adopted cross-section. The parameters used in calculation were calibrated through leveling survey and experiment, and the stage-discharge was achieved by calculation, therefore a practicable method was provided for flow calculation under the various irregular sections of hydrology.

Keywords: Irregular Cross-Section; Grid; Water Depth-Discharge Curve

基于栅格的不规则断面水深 - 流量关系曲线确定方法*

周方录¹, 黄金柏^{2#}, 王斌³

¹大庆市松嫩工程管理处, 大庆

²扬州大学水科学与工程学院, 扬州

³东北农业大学水利与建筑学院, 哈尔滨

Email: #huangjinbaihy@yahoo.cn

收稿日期: 2013年2月17日; 修回日期: 2013年3月1日; 录用日期: 2013年3月19日

摘要:天然渠道断面大多是不规则的, 水深 - 流量关系多为高阶隐函数, 直接绘制比较困难。本文引入栅格, 基于断面测量确定选定断面的形状, 以在选定断面上插入栅格的数量推求不同水深的过流面积, 通过水准测量及试验等方法率定计算参数, 计算确定水深 - 流量的关系曲线。为水文学上在不规则断面下的流量计算提供一种可用的方法。

关键词: 不规则断面; 栅格; 水深 - 流量关系曲线

1. 引言

水力学中有许多函数曲线是关于未知数的高阶

*基金项目: 国家自然科学基金(41271046)。

#通讯作者。

作者简介: 黄金柏(1974-), 男, 汉族, 副教授, 博士, 硕士研究生指导教师, 扬州大学水利科学与工程学院&东北农业大学水利与建筑学院, 研究方向为水文水资源, 数字流域以及干旱地环境科学等。

隐函数, 如水深 - 流量($h\sim Q$)关系曲线, 直接绘制这些曲线一般很难^[1]。水位流量关系是水利水电工程规划设计的基本依据, 水文观测资料证明, 河道中任何断面的水位与流量关系, 都不是单一曲线, 而是一多值对应的曲线族^[2]。天然河道中的水流经常是不恒定的, 流量一般随时间而变化。在水文资料的

整理中, 通常是根据实测水位、流量资料, 建立水位流量的关系曲线, 通过水位流量关系曲线, 可把水位变化过程转换成相应的流量变化过程, 并进一步求得各种统计特征值, 以供国民经济各部门及工程规划设计应用^[3]。由于天然河道断面情况、工程情况、资料情况以及洪水特性等的不同, 在具体项目中, 往往需要结合工程实际, 选择适宜的资料和方法拟定水位流量关系^[4]。有关确定(拟合)断面水深 - 流量关系的研究有很多, 戴凌全等(2010)利用最小二乘法推算了河流的水深流量关系^[5]; 潘道宏等(2010)用遗传算法求解最小二乘支持向量机参数, 再将最小二乘支持向量机应用于水位流量关系拟合^[6]; 程银才等(2011)采用多层递阶和回归分析相结合的方法, 对稳定水位流量关系曲线进行了高水延长计算^[7]; 王燕飞等(2011)基于构建保凸保单调的分段幂函数确定河流的水位流量关系^[8]。

因现有的用于确定水位流量的关系的方法普遍缺乏物理性, 即不是基于河道材料的物理性质及其表现的水力学特性来实现对水深流量关系的确定。本研究引入栅格概念, 基于水力计算和河道材料物理性(粒径)的关系, 即在选定实验断面插入栅格的数量推求过流断面面积, 以水准测量结合实验的方法率定计算参数, 计算确定水深 - 流量关系曲线, 探讨确定天然河道各种不规则断面条件下水深 - 流量关系曲线的一般方法。

2. 基础公式

研究所用的基本公式为曼宁平均流速公式和流量计算公式(式(1)~(2)), 因为天然河道的断面形状多是不规则的, 在实际计算时, 首先要推求不同水深时的过流面积, 进而计算不同水深时的流量。

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$Q = vA(h) \quad (2)$$

式中, v 为水流速度, ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), n 为曼宁粗度系数 ($\text{s}\cdot\text{m}^{-1/3}$), R 为水力半径, (m), I 为水力坡降, 计算时以河道坡度近似代替, Q 为流量, ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$), A 为过流面积, (m^2), h 为水深, (m)。

3. 水深 - 流量关系曲线的确定

3.1. 方法及步骤

研究采用的确定水深 - 流量关系曲线的方法和步骤如下:

- 1) 对观测断面进行测量, 确定断面形状。
- 2) 根据断面的大小和断面的长宽比, 确定采用栅格的尺寸。
- 3) 率定参数: 过流面积与水力半径由不同水深对应的栅格数确定; 河道坡度一般由水准测量确定; 曼宁粗度系数(糙率)可根据本文介绍的方法由实验确定或根据河道固体粒径的实际情况参照水力学现有研究结果。
- 4) 计算不同水深对应的流量, 建立水深 - 流量 ($h-Q$) 关系曲线。

3.2. 试验断面

为了评价本文确定的不规则断面水深 - 流量关系方法的灵敏性, 即在各种尺度的断面上, 水位随时间变动频繁且变化幅度不大时仍然能对流量实现较准确的计算, 实验选在某山区小流域主河道的一个断面上进行, 该断面的形状由横断测量确定, 河道的坡度由对该断面所在河段的水准测量确定, 试验断面及其所在河段纵断面形状的结果如图 1(a)和(b)所示。

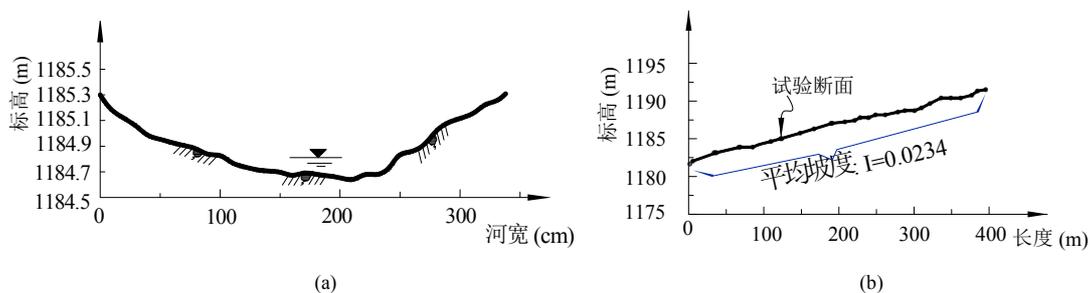


Figure 1. Cross-section form & longitudinal profile of river channel: (a) Cross-section form; (b) Longitudinal profile of river channel
图 1. 横断面及河道的纵断面: (a) 横断面形状; (b) 河道纵断面

3.3. 栅格插入

对于任意断面, 过流面积是水深的函数, 在图 1(a) 所示的断面上, 过流面积随水深的变化规律很难直接确定。根据公式(1)和(2), 确定不规则断面下过流面积与水深的关系是进一步推求流量随水深变化关系的前提。本文引入栅格概念, 根据不同水深条件下在断面上插入的栅格数量, 来推求不同水深时的过流面积。

理论上, 栅格尺寸越小, 即在同一水深条件下, 断面上插入的栅格数越多, 以栅格数量换算的面积越接近于该水深对应的过流面积。在实际应用中, 选取栅格尺寸时, 应考虑河道断面的规模及长宽比, 即栅格的大小应与河道尺寸相适应。图 1(a)所示的断面, 在河宽为 3.3 m 时, 其对应的最大水深为 0.65 m, 对应的断面面积为 2.145 m²。选取栅格的尺寸为宽度方向 0.1 m、竖直方向(水深)0.05 m(尺寸: 0.1 m × 0.05 m, 面积: 0.005 m²), 则在该断面上插入栅格数量最多时为 429 个, 图 2 为断面插入栅格后的示意图。

根据图 2 可以推求不同水深对应的过流面积, 如水深为 0.1 m 时, 过流面积为相当于 11 个栅格的面积 (0.055 m²), 当水深为 0.3 m 时, 过流面积相当于 75 个栅格的面积 (0.375 m²)。选取不同的水深, 推求出其对应的过流面积, 因为最终求解的问题是水深 - 流量 ($h \sim Q$) 曲线, 水深与过流面积的关系只是求解水深 - 流量曲线的一个步骤并包含在推求水深 - 流量关系曲线过程中, 所以不必单独绘制水深 - 过流面积 ($h \sim A$) 曲线。需要说明的是, 在该栅格尺寸条件下, 当水深小于 0.05 m 时, 过流面积不足 1 个栅格面积, 所以在试验断面计算微小流量时(水深小于 0.05 m), 须选择尺寸更小的栅格。

3.4. 参数确定

参数率定是准确计算的基础, 计算所用参数由如

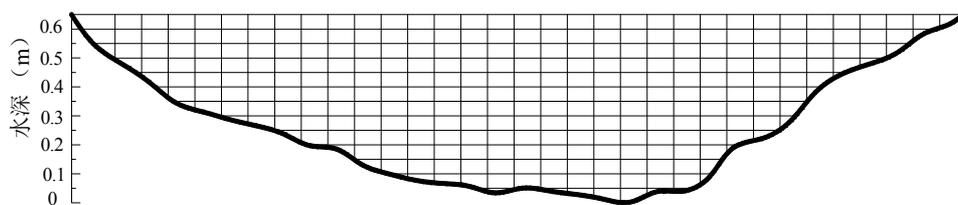


Figure 2. Flow area and number of grid
图 2. 过流面积与栅格数

下方法确定。

1) 坡度与水力半径

河道坡度由水准测量确定, 其值为 0.0234(图 1(b))。不同水深对应的湿周长度可由如图 2 所示的不同水深对应栅格数的边长累加近似推求, 进而, 根据过流面积和所对应的湿周, 计算出不同水深时的水力半径。

2) 糙率(曼宁粗度系数)

糙率(曼宁粗度系数)是综合反映渠道断面粗糙情况对水流影响的一个系数, 其值一般由实验数据测得。本文以 Bathurst 公式(式(3))来率定糙率 n , 以该公式确定糙率的方法在山区流域的实用性已得到验证^[9]。根据 Bathurst 公式以试验方法计算糙率(n)的过程如下。

$$\frac{v}{v_*} = 10.57 \left[\frac{R}{d_{84}} \right]^{2.34} \left[\frac{b}{h} \right]^{7(\lambda - 0.08)} \quad (3)$$

$$v = Q / (bh) \quad (4)$$

$$v_* = \sqrt{ghI} \quad (5)$$

$$\lambda = 0.139 \log_{10} \left[1.91 \frac{d_{84}}{R} \right] \quad (6)$$

式(3)~(6)中, b 为河宽, (m), d_{84} 为试验材料 84% 的粒径, (m), v_* 为摩擦速度, ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), g 为重力加速度, ($9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$), λ 为一计算需要引入系数, 其值由式(6)计算, 其它参数与上述对应相同。

为确定不同试验材料的 d_{84} 和 n 的关系, 试验断面被设定为宽幅长方形, 其水力半径 R 可近似地由水深 h 代替 ($R = h$)。试验河段的坡降 I 由水准测量确定。在选定一个 d_{84} 后, 利用式(3)、式(4)和式(5)联立、采用不同的流量反复计算, 可求出不同流量 Q 对应的水深 h 和流速 v , 而后, 把计算得到的 h 值和对应的流速 v 分别代入式(1)(设定条件下 $R = h$), 可计算出不同 d_{84} 条件下的 n 值, 根据试验结果, 可得到不同的 d_{84}

与对应 n 值的关系曲线(图3)。

当洪水发生时, $R/d_{84} > 1.5$ 的条件下, 曼宁粗度系数可由 Bray 公式(式(7))计算。

$$n = 0.104I_w^{0.177} \quad (7)$$

式中, I_w 为均匀流河段的水力坡度。

在不同流量条件下, 由 Bathurst 公式和 Bray 公式计算的 n 值如图4所示, 随着流量的增大, n 值逐渐减小, 当流量大于 $60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 时, n 趋于一个常数。

3.5. 流量计算

根据对图 1(a)所示的试验断面所处河段的固体粒径等实际情况调查的结果, 研究所选河段的 n 值范围应为 $0.06 \sim 0.1$ 。因为在研究所选断面上观测得到的最大流量小于 $3.0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 根据图4所示结果, 计算时糙率 n 近似地选取为 0.095 , 计算图 1(a)所示断面不同水深对应的流量, 其结果如图5(式(8))所示。对该曲线准确性的验证, 采用流速计在断面上直接测量流速, 而后根据过流面积换算成流量(观测流量), 与利用式(8)直接计算结果(计算流量)相比较, 根据多次随机比较的结果, 验证了该曲线的正确性。需要说明的是, 以此方法建立的水深 - 流量($Q \sim h$)关系曲线, 在流量很小时计算值与实际值常会产生较大的误差。

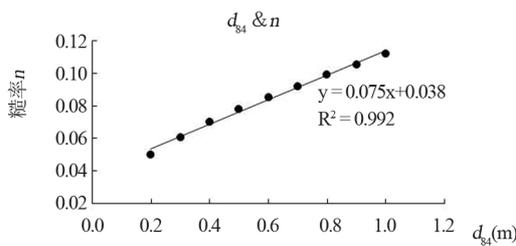


Figure 3. Relationship between d_{84} and n
图3. d_{84} 和 n 的关系

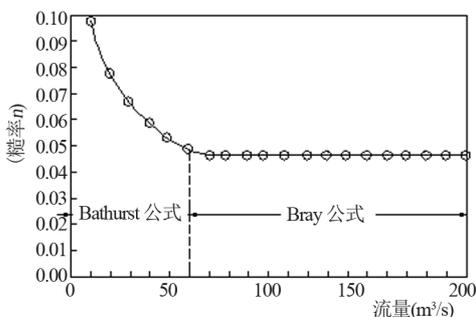


Figure 4. Relationship between discharge and n
图4. 流量与糙率 n 的关系

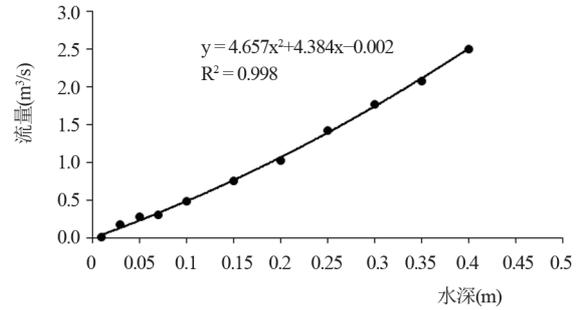


Figure 5. Water depth-discharge ($h \sim Q$) curve
图5. 水深 - 流量($h \sim Q$)关系曲线

$$Q = 4.657h^2 + 4.384h - 0.002 (h > 0) \quad (8)$$

式(8)中各参数与前述相同。

对用上述方法建立的水深 - 流量关系曲线, 可利用随机观测的流量检验关系曲线的正确性。

4. 结语

本文引入栅格插入法, 通过率定计算参数, 建立了利用曼宁公式计算不规则断面水深 - 流量关系曲线的一般方法, 为水文学上不规则断面下的流量计算提供一种可用的方法。

参考文献 (References)

- [1] 门宝辉, 王学军, 林运东. Excel 在绘制复杂水力学函数曲线中的应用[J]. 东北水利水电, 2001, 19(7): 33-34. MEN Baohui, WANG Xuejun and LIN Yundong. Application of excel in drawing complex hydraulics function curve. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2001, 19(7): 33-34. (in Chinese)
- [2] 茹建辉. 河道水位流量关系曲线和水面线的设计计算[J]. 广东水利水电, 2008, 1: 1-7. RU Jianhui. Design calculation of level-discharge curve and flow profile of a river course. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2008, 1: 1-7. (in Chinese)
- [3] 刘焕芳. 各种水位流量关系的成因分析[J]. 西北水资源与水工程, 1994, 5(3): 88-91. LIU Huanfang. Analysis on cause of information of the relationships between water level and flow discharge. Water resources & Water Engineering, 1994, 5(3): 88-91. (in Chinese)
- [4] 梅立庚. 水力学法在水位流量关系拟定中的应用[J]. 海河水利, 2006, 6: 47-48. MEI Ligeng. Application of hydraulics approach in study out for connection between water level and flow. Haihe Water Resources, 2006, 6: 47-48. (in Chinese)
- [5] 戴凌全, 戴会超, 蒋定国, 等. 基于最小二乘法的河流水位流量关系曲线推算[J]. 人民黄河, 2010, 32(9): 37-39. DAI Lingquan, DAI Huichao, JIANG Dingguo, et al. Estimation of stage-discharge curve based on least square method. Yellow River, 2010, 32(9): 37-39. (in Chinese)
- [6] 潘道宏, 任华. 基于遗传算法和最小二乘支持向量机的水位流量关系拟合[J]. 水利科技与经济, 2010, 116(5): 493-494. PAN Daohong, REN Hua. Calibration of stage-discharge curve

- based on genetic algorithm and least square support vector machine. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2010, 116(5): 493-494. (in Chinese)
- [7] 程银才, 范世香. 水位流量关系曲线高水延长方法新探讨[J]. *水电能源科学*, 2011, 29(7): 8-9.
CHENG Yincai, FAN Shixiang. Discussion on extending of high water level for discharge rating curve. *Water Resources and Power*, 2011, 29(7): 8-9. (in Chinese)
- [8] 王燕飞, 黄燕荣. 基于保凸保单调的分段幂函数在水位流量关系曲线拟合中的应用[J]. *红水河*, 2011, 30(6): 19-23.
WANG Yangfei, HUANG Yanrong. Application of subsection-power functions in fitting of stage-discharge relation curve based on convexity and monotonicity preserving. *Hongshui River*, 2011, 30(6): 19-23. (in Chinese)
- [9] Study on numerical analysis duties of sedimentation characteristics in front of the intake; Study on rational method of sediment flushing in front of the intake. *Japan Institute of Systems Research*, 1999: 30-32.