

用于非接触式表面测速的江河流量回归计算模型

Regression Method of Calculating River Real-time Discharge for Noncontact Current Gauging

蔡富东*

CAI Fu-Dong

摘要

非接触式江河测流技术具有不涉水、易实施、人工参与少、危险性低、测量速度快的优点。但非接触式测量只能直接测量河流表面多点的流速,不能像传统的接触式测量技术可以测量河流断面多点流速,从而不能直接测算江河瞬时流量。本文将建立基于表面流速的江河断面流量的回归计算模型,并分析该模型的误差性能。基于此模型,可以通过非接触式测流技术提供的表面流速、河流水位、断面数据在满足误差要求的范围内计算得到河流的瞬时流量。

关键词

非接触式 江河测流 雷达遥感

Abstract Noncontact river flow measurement is easier to implement and has lower risk due to its less artificial participation. Despite of its advantages, however, only surface velocities instead of velocities of a cross section are directly measured, which means the real-time discharge of the cross section of the river cannot be calculated as in those traditional methods. This paper proposes a regression model for calculating river real-time discharge under noncontact measuring condition. The error performance analysis of the model is also presented. Based on the model, the real-time discharge of the river can be calculated with surface velocities, river depth and cross section data provided by noncontact measurement.

Key words Current measurement Hydrological techniques Remote sensing by radar

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2014.01.24

1 引言

江河测流是指对江河的实时流量进行周期性动态测量。江河测流对掌握水情和水资源状况,进行水土保持保护环境,合理调配水资源,防洪减灾,甚至对跨江河或临江河的基础建设提出相应的设计要求,都具有重要意义。

江河测流传统上采用接触式测量技术。包括机械式流速仪、声学多普勒流速剖面仪(ADCP)等测流技术都是接触式测流技术。在接触式测流技术条件下,测量设施涉水,人工参与程度高,汛期危险性高,测量周期长。但是这些技术能够直接测量河流断面多点流速,理论上在不考虑测量跨度时间内流速变化情况下,只要这些流速足够密集,就可以准确计算河流的流量。

非接触式测流技术,如超高频雷达测流技术^[1]、电波流速仪^[2]、粒子图像测速(PIV)技术^[3]等,能够解决接触式测量存在的一些问题。非接触式江河测流技术具有不涉水、易实施、人工参与少、危险性低、测量速度快的优点。但非接触式测量只能直接测量河流表面多点的流速,不能像机械式流速仪、声学多普勒流速剖面仪(ADCP)那样可以测量河流断面多点流速,从而不能直接测算江河瞬时流量。

本文基于非接触式测流技术所测量的河流表面流速的比测数据,提出一种基于河流表面流速的江河流量回归计算模型。

2 非接触测流与接触式测流的特点对比及比测试验

非接触测量技术,包括超高频雷达流速场技术、在线式多点电波流速仪、粒子图像测速(PIV)技术等。这些技术的共同特点是只能直接测得河流表面多点的流速。本文基于超高频雷达流速场技术和传统机

* 山东信通电器有限公司 山东 淄博 255000

械式流速仪测试方法在山东东里水文站所作的大量的比测数据,提出非接触河流瞬时流量的计算模型,该模型适用于所有非接触式测流技术。

图1是非接触式河流表面流速测量与传统方式测流内容对比示意图。在传统的接触式测量条件下,多条铅垂线上的水面以下不同深度的河流流速 V_r 可以测量获得(如 V_{r31} 、 V_{r32} 、 V_{r33})。而在非接触测量条件下,仅能测量得到多个河流表面流速数据(如 V_1 、 V_2 、 V_3 、 $\dots$ 、 V_{n-1} 、 V_n)。

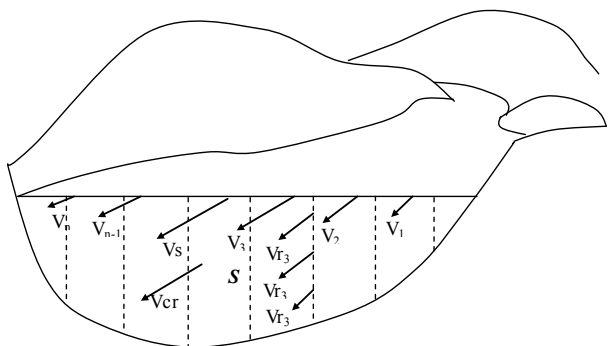


图1 非接触式河流表面流速测量与传统方式测流比较

在传统接触式测流系统中,测量设备直接测量得到河流断面多点流速及其对应的坐标位置,通过积分可以计算得到河流在断面的瞬时流量。

$$Mr = \int V_r \cdot dA \quad (1)$$

以 S 表示河流断面面积,定义接触时测流系统中河流断面的等效平均流速 V_{cr} 如下:

$$V_{cr} = \frac{Mr}{S} \quad (2)$$

定义非接触测量系统中河流表面平均流速 V_s 如下:

$$V_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (3)$$

本文将说明 Mr 、 V_{cr} 和 V_s 之间存在的关系以及计算模型。

在2011年、2012两年河流汛期的共计10个月的时间内,我们在山东省东里水文站采用超高频雷达非接触式对河流进行了大量表面流速测量,并同时进行了56次人工测量,用来进行比测试验。由于人工测量数据结果已经获得广泛认可,我们把人工测量作为流量的参考数据。在这56次对比测试中,非接触式测量河流表面平均流速 V_s 见图2(图中 n 表

示样本序号)。除了河流表面流速,河流水位数据 H 也可以通过非接触式方式测量获得,对应的水位测量数据 H 见图3。对应的人工测量的流量数据 Mr 见图4。

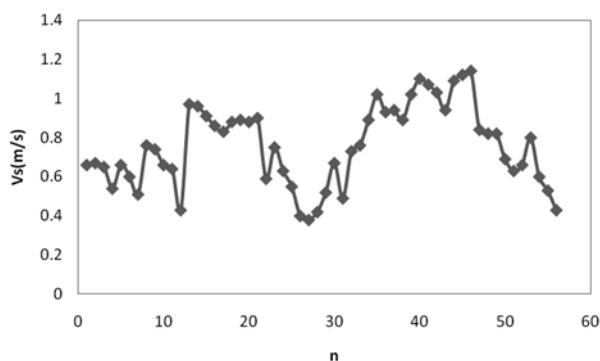


图2 非接触式测量得到的河流表面平均流速 V_s

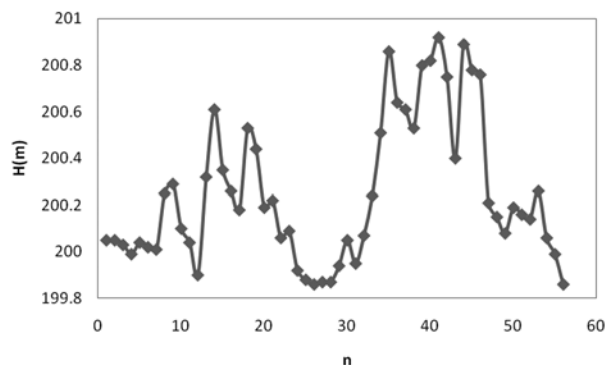


图3 河流水位高度 H

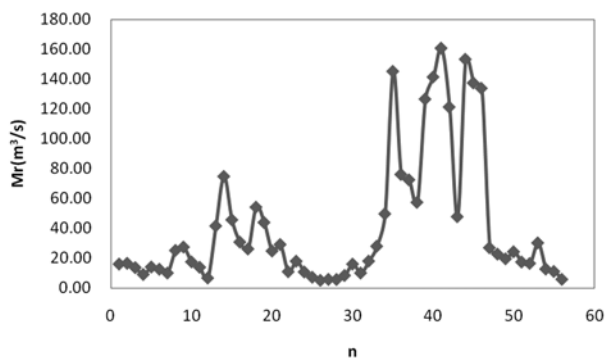


图4 人工测量河流实时流量 Mr

根据河流水位数据 H ,引用可靠的断面面积数据可获得河流断面面积 S ,该断面面积 S 是河流水位和时间的函数,本文忽略 S 随时间变化的影响,即

$$S = S(H) \quad (4)$$

下面分析河流表面流速与河流断面流量之间的关系。

3 表面流速与河流断面流量的线性关系及回归算法

根据公式(2),接触式条件下河流断面流量 Mr

是河流断面平均流速和河流断面面积的乘积。分析 M_r 与 $V_s \cdot S$ 的关系, 可以发现 M_r 与 $V_s \cdot S$ 存在高度相关性。图 5 展示了 2 年期间 56 组比测样本数据所存在的高度线性相关性, 相关系数 $R^2=0.998$, 显著超过样本数量所需要的相关系数的起码值, 所以 M_r 与 $V_s \cdot S$ 存在线性关系。

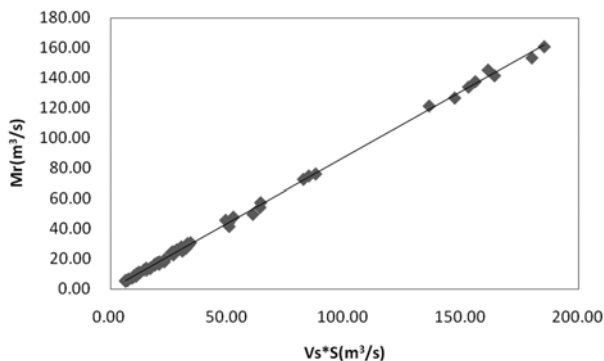


图 5 M_r 与 $V_s \cdot S$ 的线性相关性

考虑到 M_r 与 $V_s \cdot S$ 存在的线性相关性, 以 M 表示非接触式测流条件下的河流断面瞬时流量, 取

$$M = K \cdot V_s \cdot S - M_0 \quad (5)$$

根据公式 (2) 和公式 (5), 因而有

$$V_{cr} = K \cdot V_s - \frac{M_0}{S} \quad (6)$$

可以看出 K 表示了非接触测量条件下的表面平均流速 V_s 和接触式测量条件下河流断面平均流速的线性关系。只要获取了 K 值和 M_0 , 就能计算非接触式测流条件下的河流断面瞬时流量 M 。为了评价接触式河流断面瞬时流量模型的精度, 定义非接触式河流断面瞬时流量的相对误差:

$$\delta = \frac{M - M_r}{M_r} \times 100\% \quad (7)$$

可以得到:

$$\delta = \frac{k \cdot V_s - V_{cr} - M_0/S}{V_{cr}} \times 100\% \quad (8)$$

可见, 当截距 $M_0=0$ 时, 断面流量的相对误差与断面面积等断面数据无关。

K 和 M_0 通过最小二乘回归拟合算法获取。建立矛盾方程组:

$$M_{r_n} = K \cdot V_{s_n} \cdot S_n + M_0 \quad (9)$$

其中 $n=1, 2, \dots, N$ 。 N 为比测样本最大值, 得到 $K=0.874$, $M_0=0.051$ 。从而可以获得非接触式条件下河

流断面瞬时流量数据及其相对误差, 见图 6、图 7。

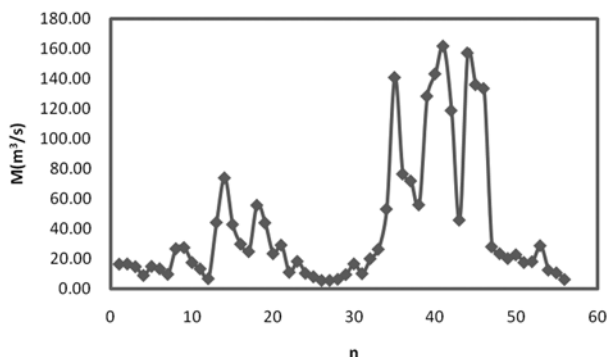


图 6 非接触式条件下河流断面瞬时流量 M

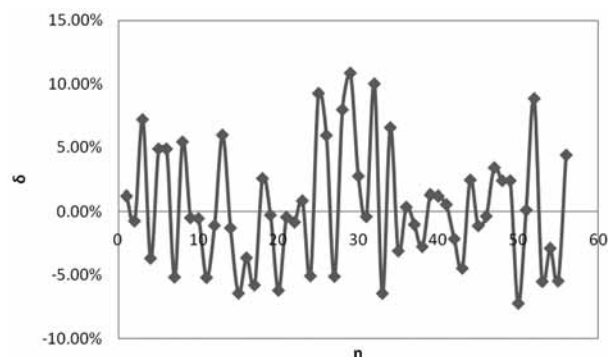


图 7 河流断面瞬时流量相对误差 δ

分析 M 和参考值 M_r 的误差, 可以得到, 样本的误差范围 $[-7.0\%, 11.4\%]$, 平均误差 $=0.63\%$, 误差均方差 $=4.7\%$ 。认为测量相对误差随机变量服从正态分布:

$$\Delta \sim N(\bar{\delta}, \sigma^2) \quad (10)$$

以 $\Psi(\delta; \bar{\delta}, \sigma)$ 表示累计分布函数, 误差置信区间 $[-10.0\%, 10.0\%]$ 的置信度为

$$P_{\pm 10\%} = \Psi(10.0\%, \bar{\delta}, \sigma) - \Psi(-10.0\%, \bar{\delta}, \sigma) = 96.5\% \quad (11)$$

误差置信区间 $[-5.0\%, 5.0\%]$ 的置信度为:

$$P_{\pm 5\%} = \Psi(5.0\%, \bar{\delta}, \sigma) - \Psi(-5.0\%, \bar{\delta}, \sigma) = 70.8\% \quad (12)$$

由于 $M_0 \approx 0$, 在实际计算中通常可以忽略 M_0 , 此时, 采用下面公式分别替代公式 (5)、公式 (6)、公式 (8):

$$M = K \cdot V_s \cdot S \quad (13)$$

$$V_{cr} = K \cdot V_s \quad (14)$$

$$\delta = \frac{k \cdot V_s - V_{cr}}{V_{cr}} \times 100\% \quad (15)$$

表 1 模型计算样本为 20 时的流量相对误差

n	K	$\bar{\delta}$	$\delta_{\min}$	$\delta_{\max}$	σ	$P_{\pm 10\%}$	$P_{\pm 5\%}$
1 ~ 20	0.875	0.45%	-7.10%	11.00%	4.65%	96.79%	71.60%
6 ~ 25	0.873	0.22%	-7.30%	10.70%	4.63%	96.88%	71.88%
11 ~ 30	0.878	0.79%	-6.80%	11.40%	4.66%	96.56%	70.96%
16 ~ 35	0.895	2.74%	-5.00%	13.50%	4.75%	93.30%	63.09%
21 ~ 40	0.878	0.79%	-6.80%	11.40%	4.66%	96.56%	70.96%
26 ~ 45	0.874	0.33%	-7.20%	10.80%	4.64%	96.84%	71.75%
31 ~ 50	0.872	0.10%	-7.40%	10.60%	4.63%	96.92%	71.97%
36 ~ 55	0.867	-4.67%	-8.00%	10.00%	4.60%	96.93%	72.01%

在此条件下再次计算样本的误差范围为 [-7.2%, 10.8%], 平均误差 $\bar{\delta}$ =0.33%, 误差均方差 σ =4.6%。误差置信区间 [-10.0%, 10.0%] 的置信度 $P_{\pm 10\%}$ =96.8%, 误差置信区间 [-5.0%, 5.0%] 的置信度为 $P_{\pm 5\%}$ =71.7%。

非接触式测流具有高度方便性, 易于进行在线测流, 从而提供大量的河流表面流速数据。这些数据一般没有对应的流量参考数据, 可以用来判定其误差大小。比测试验一般仅在设备安装调试初期, 试验次数也是有限的, 而不能对所有的非接触式测量数据进行比测试验。当采用 20 个比测数据通过本文的方法获取水面系数, 用于 56 个表面流速样本的对应的流量计算, 获得误差性能如表 1。其中 n 列是所采用的比测数据样本的序号。

表 1 说明 20 个比测样本所得到的误差性能与 56 个比测样本所得到的误差性能相当。说明 20 个比测样本基本满足模型误差要求。要进一步提高误差精度, 应从提高表面流速的测量精度入手。

4 结语

在非接触式条件下测量得到了河流表面流速数据, 不能直接测算河流断面流量。本文通过比测数据说明了非接触测量条件下的河流表面有效平均流速与参考流量之间的线形关系, 建立了参考河流断面瞬时流量的回归计算模型, 并分析了该模型的误差性能。该模型可以用于非接触式测量条件下计算河流断

面的瞬时流量。在此基础上, 非接触式河流测流需要只需更关注表面流速的精度以及如何获取更为准确的河流断面数据。

参考文献:

[1] J.E.Costa,R.T.Cheng, F.P.Haeni,et al.Use of radars to monitor stream discharge by noncontact methods. Water Resources Research, vol. 42, W07422, Jul 27 2006.

[2] Holman, Robert A. Plant, William J. Catalan, Patricio A. Haller, Merrick C.Optical and Microwave Detection of Wave Breaking in the Surf Zone.IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, pp.1879, Volume.49, Issue.6, 2011.

[3] Hauet, Alexandre Creutin, Jean-Dominique Belleudy, Philippe.Sensitivity study of large-scale particle image velocimetry measurement of river discharge using numerical simulation. Journal of Hydrology, pp.178, Volume.349, Issue.1-2, 2008.

(收稿日期: 2013-12-12)