

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20200227

# 水力因素法在线推流模型研发与应用

舒大兴<sup>1</sup>, 韦立新<sup>2</sup>, 曹贯中<sup>2</sup>

(1.河海大学 水文水资源学院,江苏 南京 210098;2.长江委下游局,江苏 南京 210012)

**摘要:**防洪抢险水情信息服务对河道水位流量要素的实时性要求越来越高,有必要研究河道在线推流方法。H-ADCP已经投入一些应用,侧扫雷达和视频监测方法也在进行比测试验。从驱动河道水流运动的动力要素出发,建立水位、涨落率和落差水力因素与断面流量的关系模型。通过在线推流这些易得的综合水文要素信息,使用模型可以推算出断面实时流量过程。用长江大通站2018年39次ADCP实测流量资料率定模型参数,模型拟合相对标准差为1.45%。用2019年2359次实测水力因素推流计算值与刊印值比较结果中,相对误差平均值为-0.90%,相对误差标准差为1.21%。水力因素法流量在线推流模型计算流量的精度满足规范一类精度站误差指标要求,该方法可在河槽相对稳定的很多水文站推广应用。

**关键词:**水力因素;断面流量;在线推流;模型;标准差

**中图分类号:**P332.4;TV123

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-0852(2021)03-0013-06

## 0 引言

近年来,随着国家经济发展,对水资源管理越来越紧,水污染治理越来越严,水灾害防治要求越来越高。为了实时掌握可用的水资源,及时提供洪水警讯,转移群众,减少灾害损失,河道流量监测在水利信息化系统中起到了至关重要的作用。水文要素的雨量、水位、蒸发、水温、墒情等要素均已实现了在线自动监测,对流量的自动监测提出了应用要求。现有的巡测和驻测方式都很难满足水文自动化、信息化的要求,对断面相对稳定的河段,水文人在探索在线测速方面做过很多尝试。

近年我国引进了很多H-ADCP和V-ADCP,安装在河道断面两侧水下或河底,对断面上部分水流的流速进行在线测量,以此指标流速与流速仪比测的全断面平均流速建立相关关系,推求全断面流量。如清江高坝洲,水位在39.75~42.22m范围内,仪器安装高程39.59m, $V_{\text{指标}}$ 采用1~25区间测量值,相关方程为<sup>[1]</sup>:

$$V_{\text{断面}} = -0.3007V_{\text{指标}}^2 + 1.515V_{\text{指标}} + 0.0812 \quad (1)$$

而在西江干流梧州站的H-ADCP测流方案中,相关方程中还引进了水位信息,其相关方程为<sup>[2]</sup>:

$$V_{\text{断面}} = 0.4115 + (0.6634 + 0.0051H)V_{\text{指标}} \quad (2)$$

H-ADCP所测得的是河流水道部分水体的流速,将指标流速或其他要素(如水位)与实测断面平均流速建立相关关系后再推求断面流量。相关关系线的标准差值决定H-ADCP在线推流的推流精度。对于H-ADCP能够实测的部分水体,其流速测量精度满足水文测量的精度要求,这也是业内人士使用H-ADCP的理由。

非接触式雷达波在线测流系统采用领先的雷达技术非接触式测量水位和河流表面流速,有点雷达测速仪和侧扫雷达测速两种形式。雷达岸式安装方式提高了仪器的可靠性和人员的安全保障,降低了测站的维护成本和人员的劳动强度。雷达波在线推流系统可连续测得部分水面流速资料,是流量推算的一种新手段,易用性和测量精度均优于浮标测流法。但雷达波速受降雨、风力风向、波浪、航运等许多因素影响,特别是低流速时误差很大,单纯的雷达测速成果精度不能满足水文测验精度的要求,作为高洪应急估测流量,具有一定的参考价值。

近年国内外使用视频监控水面流速也进行了一些尝试,主要技术在于软件分析,包括图像预处理、干扰信号剔除、比例尺换算、图像识别、凹凸校正、流速

收稿日期:2020-06-28

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFE0106500)

作者简介:舒大兴(1964—),男,江西九江人,博士,主要研究方向为水文信息采集仪器。E-mail:njsdx9208@126.com

分布模型等<sup>[9]</sup>。高洪期水面存在自然漂浮物时,可根据漂浮物在一定时间内的移动距离计算水面流速;无固体漂浮物的情况下,可捕捉河水流动时表面产生的波浪,用智能识别技术分析波浪特征点位移进行水面流速监测<sup>[4]</sup>。但受雨雾天气和风力风向影响,夜间视频采集质量较差,标记识别困难,且水面波浪运动速度与水流运动的速度也是有差异的。

## 1 水力因素在线推流模型

根据曼宁公式分析,影响河道流量的主要因素有水位、断面形状、糙率和水面比降。对于断面相对稳定的恒定流,流量与水位呈单一关系。不稳定的水位流量关系是因为洪水涨落率产生附件比降,水位流量关系呈逆时针绳套;或者下游顶托影响使水面比降小于同水位恒定流比降,水位流量关系呈顺时针绳套。实际上洪水和回水往往是混合产生影响的,本文研究建立水力因素与断面流量的相关关系,利用实测水位、涨落率和落差这些容易准确获取的水力因素值在线推求河道瞬时流量。

### 1.1 洪水影响水力因素

河流是在重力作用下由高处流向低处的,作为一维非恒定渐变流,水流运动遵从圣维南方程组的动力方程,

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial x} = I_c - I_f \quad (3)$$

式中:第一项为时间惯性项,第二项为空间惯性项,第三项为附件比降项, $I_c$ 为重力项, $I_f$ 为阻力项。在河段顺直宽浅型的河流中,惯性项很小而被忽略,压力项不计,将河道洪水波视作运动波,此时, $I_c = I_f$ ,河道水位流量关系为单一线。

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} = \frac{dA}{dQ} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} \\ \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \end{cases} \Rightarrow \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{dA}{dQ} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \Rightarrow \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{dQ}{dA} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \Rightarrow \frac{\partial Q}{\partial t} + U \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

式中: $U = \frac{dQ}{dA}$ ,为运动波波速,因水位流量单值函数关系,有 $\frac{\partial Z}{\partial t} + U \cdot \frac{\partial Z}{\partial x} = 0$ ,为运动波水位演算方程。

对于河道洪水演进,压力项不能被忽略,将河道洪水波视作扩散波,需考虑洪水的附件比降,此时,

$$\frac{\partial z}{\partial x} = I_c - I_f \Rightarrow I_f = I_c - \frac{\partial z}{\partial x} \Rightarrow I_f = I_c + \frac{1}{U} \frac{\partial z}{\partial t} \quad (5)$$

借用谢才公式计算断面流量,

$$\begin{aligned} Q_f &= CA \sqrt{RI_f} = CA \sqrt{R} \sqrt{I_c + \frac{1}{U} \frac{\partial z}{\partial t}} \\ &= CA \sqrt{RI_c} \sqrt{1 + \frac{1}{UI_c} \frac{\partial z}{\partial t}} = Q_c \sqrt{1 + \frac{1}{UI_c} \frac{\partial z}{\partial t}} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $Q_f$ 为受洪水影响的扩散波流量; $Q_c$ 为不受洪水影响的运动波流量。

### 1.2 回水影响水力因素

发生洪水的时候,受河槽调蓄影响或下游河流顶托影响,同水位河道水面比降不同,此时水位流量关系为绳套线。用谢才公式计算河道流量,相同水位因水面比降不同的两流量之比:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{CA \sqrt{Ri_{f1}}}{CA \sqrt{Ri_{f2}}} = \frac{\sqrt{i_{f1}}}{\sqrt{i_{f2}}} = \frac{\sqrt{\Delta Z_1}}{\sqrt{\Delta Z_2}} \quad (7)$$

式中: $\Delta Z_1, \Delta Z_2$ 为与 $Q_1, Q_2$ 相应的河流水面落差。考虑落差的代表性和河槽形状的变化,对落差的指数进行优选,于是,对于相同水位不同流量时,有如下关系:

$$q = \frac{Q_1}{\Delta Z_1^\beta} = \frac{Q_2}{\Delta Z_2^\beta} = \frac{Q_B}{\Delta Z^\beta} = CA \sqrt{R} = f(Z) \quad (8)$$

式中: $q$ 为落差修正因素,是水位的单值函数; $\beta$ 为落差指数。

### 1.3 水力因素综合推流模型

(1)单一模型方程。对河槽相对稳定的稳定流,测站过水断面水位流量关系可用对数浮动多项式表示:

$$Y_c = A_0 + A_1 X + A_2 X^2 + \dots + A_m X^m \quad (9)$$

式中: $Y_c = \text{LN}(Q_c)$ , $Q_c$ 为定线流量; $X = \text{LN}(Z - Z_0)$ , $Z$ 为测流断面水位, $Z_0$ 为水位常数; $\text{LN}$ 为自然对数; $A_0, A_1, A_2, \dots, A_m$ 为待求系数; $m$ 为多项式模型的方次,与水位流量关系曲线的曲率有关,最高取7,按测点离差标准差最小优选得出最优方次。

将已知的实测水位和流量数据代入式(9),采用最小二乘法求解系数 $A$ 。

各级水位流量点放在一起定线,不同水位级测点偏离水位流量关系线的流量相对误差具有方差共性的特点,按照关系点偏离关系线相对误差进行统计符合误差分布规律。将水深和流量分别取对数后,按误差平方和最小为目标函数进行拟合定线求解系数,其偏离误差即为流量的相对误差。

(2)洪水模型方程。对洪水方程(6)两边取对数,得:

$$\text{LN} Q_f = \text{LN}(Q_c) + 0.5 \text{LN} \left( 1 + \frac{1}{UI_c} \frac{\partial z}{\partial t} \right) \quad (10)$$

对同一河段,  $UI_C$  的变化不大, 可取常数,  $\frac{\partial z}{\partial t}$  用水位涨落率表示,  $\frac{1}{UI_C} \frac{\partial z}{\partial t}$  为洪水校正因素, 量级很小, 根据泰勒级数展开, (10)式变为:

$$LNQ_F = LN(Q_C) + \frac{1}{2UI_C} \frac{dz}{dt} \quad (11)$$

(3)回水模型方程。对回水方程(8)两边取对数得:

$$LNQ_B = LN(q) + \beta LN(\Delta Z) \quad (12)$$

(4)混合影响模型方程。因河槽调蓄作用或下流顶托影响, 河道洪水输送过程往往是洪水和回水相伴发生的, 河道瞬时流量由洪水流量和河槽调蓄流量组成, 令  $Y = LN(Q) = \alpha LN(Q_F) + \gamma LN(Q_B)$ , 则有:

$$Y = \alpha LN(Q_C) + \frac{\alpha}{2UI_C} \frac{dz}{dt} + \gamma LN(q) + \gamma \beta LN(\Delta Z) \quad (13)$$

$LN(Q_C)$  和  $LN(q)$  都是水位的单值函数, 其加权求和也是水位的单值函数, 得混合影响河道流量模型:

$$Y = D_0 + D_1 X + D_2 X^2 + \dots + D_m X^m + D_{m+1} \frac{dz}{dt} + D_{m+2} LN(\Delta Z) \quad (14)$$

式中:  $\alpha$  为洪水影响权重,  $\gamma$  为回水影响权重,  $D_0, D_1, D_2, \dots, D_{m+2}$  为待求系数。

$Y = LN(Q)$ ,  $Q$  为河道瞬时流量;  $D_0 + D_1 X + D_2 X^2 + \dots + D_m X^m$  为稳定流流量, 反应水位、比降、糙率、河段形状等影响;  $D_{m+1} \frac{dz}{dt}$  为水位涨落率影响, 反应洪水附加比降对断面流量的影响;  $D_{m+2} LN(\Delta Z)$  为河道落差影响, 反应回水对断面流量的影响。

对于河槽相对稳定的河流, 洪水传播可视为扩散波, 主要受重力、压力和摩阻力的影响, 根据历年实测资料可获得摩阻力的影响特征, 实时监测测流断面水位涨落率和上下游水位差等就可推算出断面流量。具有造价低、运行稳定、测算准确的特点, 其推算流量可作为实时水情报讯流量。

### 1.4 模型参数求解

将河道流量与易得的、可在线推流的相关水力因素建立关系模型, 对每个特定的测站, 用实测资料对模型的参数进行率定, 以相对误差标准差平方和最小为目标函数, 对各相关因素的影响权重进行自动优化分配, 系数较大的则是具有显著性影响的水力因素。

已知实测水文要素序列, 流量  $Q_i (i=1, n)$ , 水位

$Z_i (i=1, n)$ , 涨落率  $(\frac{dz}{dt})_i$ , 落差  $\Delta Z_i$ , 将其代入式(14)得方程组:

$$Y_i = D_0 + D_1 X_i + D_2 X_i^2 + \dots + D_m X_i^m + D_{m+1} (\frac{dz}{dt})_i + D_{m+2} LN(\Delta Z_i) + \delta_i \quad (15)$$

式中:  $Y_i$  为实测流量序列的自然对数值;  $\delta_i$  为同水位实测流量与线上流量离差; 其余意义同前。

误差平方和:

$$S = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \sum_{i=1}^n [D_0 + D_1 X_i + D_2 X_i^2 + \dots + D_m X_i^m + D_{m+1} (\frac{dz}{dt})_i + D_{m+2} LN(\Delta Z_i) - Y_i]^2 \quad (16)$$

以误差平方和  $S$  最小为目标函数, 求解最优系数  $D_i (i=1, m+2)$ , 于是有式(17)。对式(17)求导后, 得式(18)。式(18)中:  $d_i = (\frac{dz}{dt})_i$ ;  $r_i = LN(\Delta Z_i)$ ,  $(i=1, n)$ ,  $n$  为测次数。求解式(18)方程组, 可得模型系数  $D_i (i=1, m+2)$ 。

$$\begin{cases} \frac{\partial \sum_{i=1}^n [D_0 + D_1 X_i + D_2 X_i^2 + \dots + D_m X_i^m + D_{m+1} (\frac{dz}{dt})_i + D_{m+2} LN(\Delta Z_i) - Y_i]^2}{\partial D_0} = 0 \\ \frac{\partial \sum_{i=1}^n [D_0 + D_1 X_i + D_2 X_i^2 + \dots + D_m X_i^m + D_{m+1} (\frac{dz}{dt})_i + D_{m+2} LN(\Delta Z_i) - Y_i]^2}{\partial D_1} = 0 \\ \frac{\partial \sum_{i=1}^n [D_0 + D_1 X_i + D_2 X_i^2 + \dots + D_m X_i^m + D_{m+1} (\frac{dz}{dt})_i + D_{m+2} LN(\Delta Z_i) - Y_i]^2}{\partial D_2} = 0 \\ \dots \\ \frac{\partial \sum_{i=1}^n [D_0 + D_1 X_i + D_2 X_i^2 + \dots + D_m X_i^m + D_{m+1} (\frac{dz}{dt})_i + D_{m+2} LN(\Delta Z_i) - Y_i]^2}{\partial D_m} = 0 \\ \frac{\partial \sum_{i=1}^n [D_0 + D_1 X_i + D_2 X_i^2 + \dots + D_m X_i^m + D_{m+1} (\frac{dz}{dt})_i + D_{m+2} LN(\Delta Z_i) - Y_i]^2}{\partial D_{m+1}} = 0 \\ \frac{\partial \sum_{i=1}^n [D_0 + D_1 X_i + D_2 X_i^2 + \dots + D_m X_i^m + D_{m+1} (\frac{dz}{dt})_i + D_{m+2} LN(\Delta Z_i) - Y_i]^2}{\partial D_{m+2}} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

## 2 模型应用验证

### 2.1 大通站概况

大通站位于安徽省池州市梅龙镇, 东经  $117^\circ 37'$ , 北纬  $30^\circ 46'$ , 为长江下游控制站, 集水面积  $1\ 705\ 383\text{km}^2$ , 距河口  $624\text{km}$ , 上下游  $10\text{km}$  范围内基本顺直, 汛期洪水涨落过程比较缓慢, 峰型平坦, 枯季受长江下游潮汐影响显著。河槽左岸河床为细沙, 有局部冲淤, 中部河床为沙土, 高洪略有冲淤。实测最大水深  $29.90\text{m}$ , 最大

$$\begin{cases} D_0 \sum^n_1 X_i^0 + D_1 \sum^n_1 X_i^1 + D_2 \sum^n_1 X_i^2 + \dots + D_m \sum^n_1 X_i^m + D_{m+1} \sum^n_1 d_i X_i^0 + D_{m+2} \sum^n_1 r_i X_i^0 = \sum^n_1 Y_i X_i^0 \\ D_0 \sum^n_1 X_i^1 + D_1 \sum^n_1 X_i^2 + D_2 \sum^n_1 X_i^3 + \dots + D_m \sum^n_1 X_i^{m+1} + D_{m+1} \sum^n_1 d_i X_i^1 + D_{m+2} \sum^n_1 r_i X_i^1 = \sum^n_1 Y_i X_i^1 \\ D_0 \sum^n_1 X_i^2 + D_1 \sum^n_1 X_i^3 + D_2 \sum^n_1 X_i^4 + \dots + D_m \sum^n_1 X_i^{m+2} + D_{m+1} \sum^n_1 d_i X_i^2 + D_{m+2} \sum^n_1 r_i X_i^2 = \sum^n_1 Y_i X_i^2 \\ \dots\dots \\ D_0 \sum^n_1 X_i^m + D_1 \sum^n_1 X_i^{m+1} + D_2 \sum^n_1 X_i^{m+2} + \dots + D_m \sum^n_1 X_i^{2m} + D_{m+1} \sum^n_1 d_i X_i^m + D_{m+2} \sum^n_1 r_i X_i^m = \sum^n_1 Y_i X_i^m \\ D_0 \sum^n_1 X_i^0 d_i + D_1 \sum^n_1 X_i^1 d_i + D_2 \sum^n_1 X_i^2 d_i + \dots + D_m \sum^n_1 X_i^m d_i + D_{m+1} \sum^n_1 d_i d_i + D_{m+2} \sum^n_1 r_i d_i = \sum^n_1 Y_i d_i \\ D_0 \sum^n_1 X_i^0 r_i + D_1 \sum^n_1 X_i^1 r_i + D_2 \sum^n_1 X_i^2 r_i + \dots + D_m \sum^n_1 X_i^m r_i + D_{m+1} \sum^n_1 d_i r_i + D_{m+2} \sum^n_1 r_i r_i = \sum^n_1 Y_i r_i \end{cases} \quad (18)$$

流量 92 600m<sup>3</sup>/s,发生在 1954 年 8 月 1 日,最小流量 4 620 m<sup>3</sup>/s,发生在 1979 年 1 月 31 日。

大通站是国家重要水文站,属一类流量精度站,受不同因素影响,水位流量关系多表现为复式绳套,一般采用连时序法进行资料整编。为了简化整编工作,2013 年开始进行水位流量单值化研究,选取距本站上游 80km 的安庆水位站作为参证站,结果表明<sup>[5]</sup>落差指数法在大通水文站资料整编中具有较好的适应性,每年的测流次数从 70~80 次减少到 30~40 次。

2.2 模型参数率定

本文选取 2018 年大通站全年的实测流量成果表、水位过程线和 2018 年安庆站的水位过程线,对模型中的参数进行率定。根据大通站的测站特性,取多项式最高方次  $m=5$ 。2018 年大通站共测流 39 次,将实测流量及相应的水位、涨落率和落差代入方程(18)中,生成最高方次正规方程组。用 VB.NET 编程,按  $m=1\sim 5$  循环从矩阵中取出子矩阵,逆矩阵求解线性方程组方法求解  $D_i$ ,得出多组多项式模型参数,计算实测点偏离关系线的相对误差标准差(见表 1)。

选中标准差最小多项式作为 2018 年大通站水力因素在线推流模型,方程如下:

$$Y=9.9694-1.9943X+2.4237X^2-1.0361X^3+0.1701X^4+0.0215 \frac{dz}{dt}+0.7447LN(\Delta Z) \quad (19)$$

计算机定线误差均值为零,相对标准差 1.45%,随机不确定度 2.9%,水位常数  $Z_0=2.70m$ 。满足《水文资料

整编规范》(SL247-2012)中一类精度站水力因素法定线精度指标,即系统误差 $<\pm 2\%$ ,随机不确定度 $<10\%$ 。

2.3 模型参数验证

水力因素法模型整合了资料整编与在线推流方法,利用当年实测流量和水力因素进行模型参数求解后再推求流量过程称为整编,利用历年实测流量和相应水力因素进行模型参数求解模型参数,结合当前实测的水力因素推求实时流量称为在线推流。将 2019 年大通站和安庆站实测水位过程计算的涨落率和落差代入到式(19)中,得到应用 2018 年定线模型推算的 2019 年大通站流量过程,序列较长,选取 1 月份低水位和 7 月份高水位的部分在线推流计算成果列于表 2 中。

2018 年定线模型所推算的 2019 年全部 2359 次推流计算值与人工整编刊印值比较结果中,相对误差平均值为-0.90%,相对误差标准差为 1.21%,相对误差在 $[-2\%, 2\%]$ 内占比 81.5%,相对误差在 $[-5\%, 5\%]$ 内占比 99.83%,推算流量精度满足《河流量测验规范》(GB50179-2015)的精度指标要求。

3 结论

当前的技术水平,各种在线推流监测方法只能获得指标流速,需要率定指标流速与断面平均流速关系曲线,并借用大断面资料计算过水断面面积再得到计算流量,而不能直接测量断面流量,因此,本文所述的所有在线推流方法依赖指标流速与断面平均流速的稳定性。

水力因素法流量在线推流模型综合了影响流量

表1 不同项数多项式模型与相对误差标准差关系

Table1 Relationship between polynomial model with different term number and standard deviation of relative error

$m$	$D_0$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	$D_6$	$D_7$	标准差/%
1	8.9332	0.5650	-0.0268	0.8664					2.41
2	9.2329	0.1681	0.1333	-0.0101	0.7689				1.46
3	9.0961	0.4524	-0.0542	0.0396	-0.0300	0.7675			1.46
4	9.9694	-1.9943	2.4237	-1.0361	0.1701	0.0215	0.7447		1.45
5	10.5858	-3.2040	2.7695	-0.4164	-0.2919	0.0895	0.1097	0.7134	1.50

变化的水位、糙率、断面形状、涨落率和落差 5 个重要水力因素,从河道水流运动的原始动力出发,将水位、糙率和断面因素对流量的影响隐藏在稳定流的水位流量关系中,综合研究了洪水的附加比降和河流水面落差混合因素对过水断面流量的影响,得出在线推流计算模型,可解决受洪水和回水混合影响的在线推流问题。

使用历史实测流量资料率定模型参数,就可推算当年的实时流量。经大通站 2018 年的实测资料求解模型系数,拟合定线的标准差为 1.45%,符合一类精度站的定线精度要求。用 2018 年模型参数推求 2019 年大通站的流量过程,与 2019 年的人工整编刊印成果比较,误差标准差为 1.21%,满足资料整编精度要求。

用实测流量资料率定优选模型系数,系数大小反应水力因素的权重,与测站特性有关。只需要监测本站

水位和参正站水位计算涨落率和落差就可推求瞬时流量。水位监测仪器技术成熟,运行稳定,造价便宜,可以简单方便地获取毫米级高精度水位信息。因此,水力因素法在线推流方法可在河槽相对稳定的水文站推广应用。

参考文献:

[1] 杜兴强,沈健,樊铭哲. H-ADCP 流量在线推流方案在高坝洲的应用与改进[J]. 水文, 2018,38(6):81-83. (DU Xingqiang, SHEN Jian, FAN Mingzhe. Application and improvement of H-ADCP online monitoring program at Gaobazhou station [J]. Journal of China Hydrology, 2018,38(6):81-83. (in Chinese))  
 [2] 杨禄记. 梧州水文站 H-ADCP 流速关系的率定[J]. 广西水利水电, 2010(2):45-50. (YANG Luji. H-ADCP rating at Wuzhou hydrologic station [J]. Guangxi Water Resource & Hydropower Engineering, 2010(2):45-50. (in Chinese))  
 [3] 杜耀东,张莉,王强,等. 基于视频的河流表面流速测验方法研

表2 2019年大通站刊印流量与模型推算流量比较表(部分)

Table2 Comparison of published and model calculated discharge of Datong station in 2019 (part)

序号	开始时间	水位 /m	刊印流量 /m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	涨落率 /m·s <sup>-1</sup>	落差 /m	推算流量 /m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	相对误差 /%
1	2019-1-1 00:00	5.76	16 300	0.0000	1.160	16 281	-0.12
2	2019-1-1 03:00	5.73	16 500	-0.0100	1.190	16 517	0.10
3	2019-1-1 07:20	5.68	16 600	-0.0115	1.215	16 640	0.24
4	2019-1-1 08:00	5.69	16 500	0.0150	1.200	16 523	0.14
5	2019-1-1 08:52	5.71	16 300	0.0231	1.180	16 373	0.45
6	2019-1-1 09:06	5.72	16 300	0.0429	1.170	16 303	0.02
7	2019-1-1 09:19	5.72	16 300	0.0000	1.170	16 287	-0.08
8	2019-1-1 10:00	5.74	16 200	0.0293	1.149	16 131	-0.43
9	2019-1-1 12:00	5.74	16 200	0.0000	1.146	16 089	-0.68
.....							
1733	2019-7-13 0:00	13.61	60 600	0.0133	2.080	59 757	-1.39
1734	2019-7-13 8:00	13.70	61 400	0.0112	2.090	60 528	-1.42
1735	2019-7-13 9:00	13.70	61 600	0.0000	2.100	60 729	-1.41
1736	2019-7-13 14:00	13.80	61 500	0.0200	2.050	60 297	-1.96
1737	2019-7-13 19:00	13.86	62 500	0.0120	2.082	61 367	-1.81
1738	2019-7-13 21:00	13.87	62 900	0.0050	2.101	61 839	-1.69
1739	2019-7-14 5:00	13.97	63 600	0.0125	2.088	62 210	-2.19
1740	2019-7-14 8:00	13.99	64 000	0.0067	2.100	62 599	-2.19
1741	2019-7-14 8:50	14.00	64 100	0.0120	2.098	62 628	-2.30
1742	2019-7-14 9:18	14.00	64 100	0.0000	2.100	62 656	-2.25
1743	2019-7-14 15:00	14.09	64 300	0.0158	2.068	62 553	-2.72
1744	2019-7-14 18:00	14.13	64 700	0.0133	2.071	62 882	-2.81
1745	2019-7-15 0:00	14.16	65 500	0.0050	2.103	63 794	-2.60
1746	2019-7-15 5:00	14.21	65 800	0.0100	2.095	63 957	-2.80
1747	2019-7-15 8:00	14.22	66 300	0.0033	2.110	64 357	-2.93
1748	2019-7-15 9:16	14.22	66 300	0.0000	2.112	64 398	-2.87
1749	2019-7-15 10:00	14.22	66 500	0.0000	2.117	64 511	-2.99
1750	2019-7-15 13:00	14.26	66 500	0.0133	2.099	64 393	-3.17

- 究[J]. 水文, 2011,31(1):189–192. (DU Yaodong, ZHANG Li, WANG Qiang, et al. A Video-based River Surface Velocity Measurement Method [J]. Journal of China Hydrology, 2011,31(1):189–191. (in Chinese))
- [4] 冯全, 张彦洪, 赵晓刚. 基于机器视觉的河水表面流速估计[J]. 农业工程学报, 2018,34(19):140–146. (FENG Quan, ZHANG Yanhong, ZHAO Xiaogang. Estimation of surface speed of river flow based on machine vision [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018,34(19):140–146. (in Chinese))
- [5] 张磊, 曹贯中. 大通水文站水位流量单值化研究[J]. 上海第二工业大学学报, 2014,31(1):73–77. (ZHANG Lei, CAO Guanzhong. Study on single valued processing of water level - discharge relationship at Datong Station [J]. Journal of Shanghai Second Polytechnic University, 2014,31(1):73–77. (in Chinese))

## Development and Application of Online Monitoring Model of Hydraulic Factor Method

SHU Daxing<sup>1</sup>, WEI Lixin<sup>2</sup>, CAO Guanzhong<sup>2</sup>

(1. School of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Lower Yangtze River Bureau of Hydrological and Water Resources Survey, Nanjing 210012, China)

**Abstract:** The hydrological information service for flood control and emergency requires more and more real-time water level and discharge, so it is necessary to study on-line flow monitoring methods. H-ADCP has been put into some applications, and side scan radar and video monitoring methods are also being tested. In this paper, based on the principle of driving flow movement, the relationship model between water level, fluctuation rate, drop hydraulic elements and section discharge is established. Through online monitoring of these easily available comprehensive hydrological information, the real-time section discharge process can be calculated by using the model. The model parameters are fitted with the ADCP measured discharge data of 39 times in 2018 at Datong station of the Yangtze River, and the relative standard deviation of the model fitting is 1.45%. In the verification results of 2359 calculations and published values in 2019, the average value of relative error is -0.90%, and the standard deviation of relative error is 1.21%. The accuracy of the flow calculated by the online monitoring model meets the requirements of the first class accuracy station error index in the specification. This method can be widely used in many stations with relatively stable river channel.

**Key words:** hydraulic factor; section discharge; online monitoring; model; standard deviation

(上接第 68 页)

## Study of Flood Simulation in Qingjiang River Basin Based on WRF-Hydro Model

GU Tianwei<sup>1</sup>, CHEN Yaodeng<sup>1</sup>, GAO Yufang<sup>1</sup>, PENG Tao<sup>2</sup>, HU Bo<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education /Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. HuBei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205, China)

**Abstract:** This paper constructed a flood forecast model based on WRF-Hydro model in the Qingjiang River basin, and calibrated the model parameters by using 9 typical flood events in 2015–2017. Besides, it analyzed the effects of flood simulation based on 4 typical flood events in 2017–2018. The results show that the Nash efficiency coefficients are between 0.50 and 0.94 in the hourly simulation of 13 typical flood events during the calibration and validation periods. In general, the simulation effects of single flood peak events perform better than that of multi flood peak events. The constructed flood forecast model based on WRF-Hydro model can be applied to Qingjiang River basin with complex terrain, which lays a foundation for further construction of atmospheric-hydrological coupling forecast model in similar areas.

**Key words:** flood simulation; WRF-Hydro model; Qingjiang River basin; applicability