

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20180359

# 基于横断面垂线平均流速分布的流量计算模型 研究与应用

王鸿杰<sup>1,2</sup>, 张建云<sup>3</sup>, 王兴泽<sup>1,4</sup>, 贺瑞敏<sup>3</sup>

(1.河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098; 2.河南省水文水资源局,河南 郑州 450003;  
3.南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210029;  
4.辽宁省水文局,辽宁 沈阳 110003)

**摘要:**深入分析横断面流速分布特性,提出横断面垂线平均流速分布模型及计算公式。该模型利用大断面、河道水位及断面上一条垂线的平均流速,即可较准确地计算出断面上任意一条垂线的平均流速,从而计算出断面流量。这种方法缩短了测流历时,在保证测流精度的同时,为防汛调度决策延长了预见期。讨论了该方法的应用条件、误差来源和误差控制方法。为明渠实时在线监测提供了一种新的方法,为明渠流量计研发奠定了理论基础。

**关键词:**横断面流速分布;水文测验;水资源监测;明渠流量计

**中图分类号:**P332.4

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-0852(2019)05-0050-05

流量是指单位时间内通过某一过水断面的水体体积,是河流重要的水文特征。流量测验方法很多,常用的有流速面积法、水力学法、物理法、化学法、直接法。化学法和直接法适用于小流量测流;水力学法较简便,通过测得水位和率定好的流量系数(水位流量关系),计算出流量,适合遥测和在线监测;物理法是利用声、光、电、磁等物理学原理测定流量,方法种类有超声波法、电磁法和光学法。物理法优点:(1)仪器不干扰原来的水流结构;(2)快速、连续地测流;(3)操作安全。流速面积法是最基本、最常用的一种测流方法,由测量的流速乘以测算的过水断面面积而得到。流速仪测流是流速面积法中最具代表性的一种测流方法,ISO标准规定以流速仪测流为真值,再去校验或率定其它测流方法。

根据《河流流量测验规范》要求<sup>[1]</sup>,采用流速面积法测流,需要在断面上布设足够多的测速垂线、在每条垂线上还要布设多个测点,测得每个测点的流速,计算垂线平均流速和垂线间部分平均流速,再计算断面流量。因测点太多,一次大江大河的测验过程,一般需要

几个小时。为了缩短测流历时,陈兴伟等<sup>[2]</sup>提出了垂线上的流速分布模型,包括对数型、抛物线型、椭圆型及指数型等。目的是简化垂线上的测点,在一条测速垂线上测一点或两点流速,通过模型公式计算出垂线平均流速,从而缩短测流时间。而对于流速在横断面上的分布,所有教科书及规范均无具体模型,只有文字描述,到目前为止,尚无一种公认的横断面垂线流速分布模型。

本文综合分析一般河流的水深流速关系及其特点,在保证流量测验精度的前提下,提出一个可以较准确地描述横断面垂线平均流速分布的计算模型。应用该模型,利用有限的测速垂线,计算出断面流量,缩短测流历时,实现实时在线测流。该模型的应用对研究泥沙运动、河床演变及水文测验技术等均有潜在的推广应用价值。

## 1 垂线平均流速分布模型

天然河道中水流可以近似看作稳定不均匀流,在

收稿日期:2018-09-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51679144;51779146)

作者简介:王鸿杰(1966-),男,河南郑县人,教授级高级工程师,主要从事水文水资源、水文测验方面研究。E-mail:whj@hnsi.gov.cn

通讯作者:贺瑞敏(1975-),男,内蒙古察右后旗人,教授级高级工程师,主要从事防洪减灾、水文水资源研究。E-mail:rmhe@nhri.cn

窄深河道中,断面平均流速符合曼宁公式<sup>[3]</sup>:

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

式中: $\bar{v}$ 为河道过水断面平均流速; $n$ 为糙率; $R$ 为河道过水断面水力半径; $S_e$ 为河段能面比降。

用垂线均匀地将过水断面分成若干部分,如图1所示,两条垂线间间距为 $b$ ,垂线号为 $j(j=1,2,\dots,i,\dots,n)$ ,每条垂线对应的起点距为: $B_1, B_2, \dots, B_{i-1}, B_i, B_{i+1}, \dots, B_n$ ,垂线水深为: $h_1, h_2, \dots, h_{i-1}, h_i, h_{i+1}, \dots, h_n$ ,将过水断面划分为 $n+1$ 部分。垂线平均流速分别为 $v_1, v_2, \dots, v_{i-1}, v_i, v_{i+1}, \dots, v_n$ 。

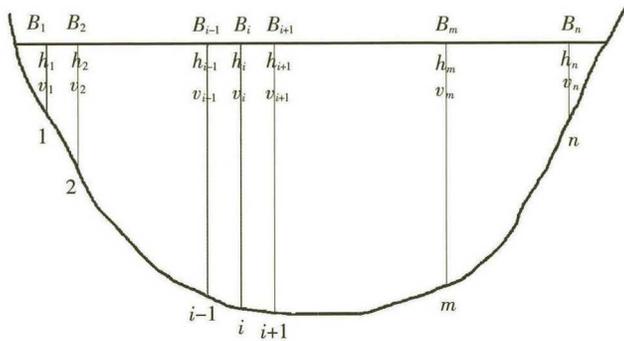


图1 断面垂线分布

Fig.1 Vertical distribution of the sections

把任一部分过水断面看作是独立的过水断面,在垂线 $i+1$ 与 $i-1$ 之间的平均流速 $\bar{v}_i$ 可用曼宁公式表示为:

$$\bar{v}_i = \frac{1}{n_i} R_i^{2/3} S_{e(i)}^{1/2} \quad (2)$$

式中: $\bar{v}_i, n_i, R_i, S_{e(i)}, A_i, L_i$ 分别为垂线 $i+1$ 与垂线 $i-1$ 之间的部分平均流速、河床糙率、水力半径、能面比降、过水面积、湿周。其中,

$$R_i = \frac{A_i}{L_i} \quad (3)$$

当各条垂线间距 $b$ 足够小且相等时,从第 $i-1$ 条垂线到第 $i+1$ 条垂线河底可认为是直线,垂线平均流速在这个范围内也是线性变化的,所以垂线 $i$ 的平均流速为:

$$v_i = \frac{v_{i-1} + v_{i+1}}{2} \quad (4)$$

并且在两垂线之间部分平均流速等于两垂线平均流速的算术平均值<sup>[6]</sup>,则:

$$\bar{v}_i = \frac{v_{i+1} + v_{i-1}}{2} \quad (5)$$

所以,

$$v_i = \bar{v}_i = \frac{1}{n_i} R_i^{2/3} S_{e(i)}^{1/2} \quad (6)$$

当 $b \rightarrow 0$ 时, $A_i = 2b \frac{h_{i+1} + h_{i-1}}{2} = 2bh_i, k_{fi}$ 为垂线 $i$ 处河

底斜率,则: $L_i = \sqrt{(2b)^2 + (2bK_{fi})^2} = 2b\sqrt{1+K_{fi}^2}; R_i = \frac{A_i}{L_i}$

$$= \frac{2bh_i}{2b\sqrt{1+K_{fi}^2}} = \frac{h_i}{\sqrt{1+K_{fi}^2}}$$

对于任意两条垂线 $i$ 与 $m$ ,有:

$$\begin{aligned} v_i &= \frac{n_m}{n_i} \left( \frac{S_{e(i)}}{S_{e(m)}} \right)^{1/2} \left( \frac{R_i}{R_m} \right)^{2/3} v_m \\ &= \frac{n_m}{n_i} \left( \frac{S_{e(i)}}{S_{e(m)}} \right)^{1/2} \left( \frac{1+k_{fi}^2}{1+k_{fm}^2} \right)^{1/3} \left( \frac{v_m}{h_m} \right)^{2/3} h_i \end{aligned} \quad (7)$$

令 $k_v = \left( \frac{v_m}{h_m} \right)^{2/3}, k_{ci} = \frac{n_m}{n_i} \left( \frac{S_{e(i)}}{S_{e(m)}} \right)^{1/2} \left( \frac{1+k_{fi}^2}{1+k_{fm}^2} \right)^{1/3}$ ,则式

(7)可简化为:

$$v_i = k_{ci} k_v h_i^{2/3} \quad (8)$$

式中: $v_m$ 为测速垂线 $m$ 的垂线平均流速; $k_{fi}, k_{fm}$ 分别为垂线 $i$ 和垂线 $m$ 处的形状系数,即河底的斜率; $k_{ci}$ 为垂线影响系数,是断面糙率不均匀分布、能坡不均匀分布及断面形状等因素在垂线 $i$ 处产生的综合影响,反映的是断面质地的不均匀、河段不顺直及形状不规则产生的影响,是起点距的函数,可通过实测资料进行率定,经多站实测资料分析,一般取值在0.5~1.5之间; $k_v$ 为动力因子,与测速垂线的平均流速成正比,与测速垂线水深的 $2/3$ 次方成反比,是垂线产生流速的动力因素,其对垂线平均流速的作用远大于垂线影响系数 $k_{ci}$ 。

式(8)即断面垂线平均流速分布模型。通过该模型,只需三个输入量:断面水位和测速垂线的平均流速( $v_m$ )及该垂线起点距,结合实测大断面数据,即可计算出断面上任一条垂线的水深( $h_i$ )及平均流速( $v_i$ ),进而推算断面流量。

根据《河流流量测验规范》要求,在设置测验断面时要求选择在顺直河段<sup>[1]</sup>,因此符合规范的测验河段水流是稳定非均匀流<sup>[4]</sup>,垂线平均流速沿横断面是连续可导的。为防止垂线平均流速出现跳变的现象,计算时各垂线的实测垂线平均流速及河底高程采用三次样条插值<sup>[5]</sup>。

式(8)表明,某一时刻,过水断面某垂线平均流速与该垂线水深的 $2/3$ 次方成正比。通过该公式,可以解释为什么接近两岸边的流速小于中泓流速,且水深最大处水面流速最大,以及垂线平均流速沿河宽分布与断面形状相似等问题<sup>[6]</sup>。

对于一个已知的大断面,在比较平缓的河底处布设测速垂线,其垂线影响系数可能通过实测资料率定,也可以通过断面形状系统推算。根据当前水位,借用大断面数据,可推算出断面上任一垂线的水深,再利用测流垂线的垂线平均流速,计算动力因子,通过式(8),可以计算出断面上任一垂线的平均流速,进而计算两条垂线间的部分流量 $q_i = \bar{v}_i A_i$ ,各部分流量累加即为断面流量 $Q = \sum_{i=1}^n q_i$ ,从而构造基于横断面垂线平均流速分布的流量测算模型(见图2)。

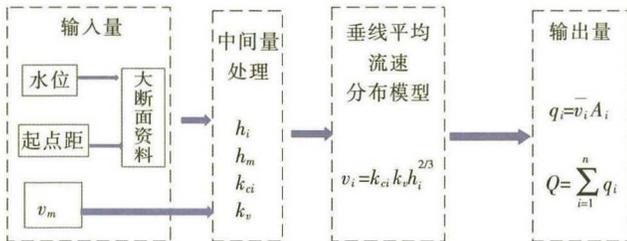


图2 基于横断面垂线平均流速分布的流量计算模型

Fig.2 The computational model for river flow based on the distribution of mean velocity on cross-section's vertical line.

实测垂线平均流速可以采用流速仪多点法测算;也可采用单波束超声波多普勒流速仪直接测垂线平均流速;在流速大、漂浮物多的山区河流,可采用非接触式的电波流速仪测水面流速、再乘以水面系数得垂线平均流速;在紧急情况下,甚至可以利用中泓浮标乘水面系数作垂线平均流速,再用模型推洪峰流量。

为了提高流量计算精度,计算部分流量时,部分面积 $A_i$ 可取垂线 $i$ 与垂线 $i-1$ 间包围面积的一半及垂线 $i$ 与垂线 $i+1$ 间包围面积的一半之和。

## 2 参数率定方法

在模型应用于某个断面之前,首先需要确定测速垂线的位置,然后根据测速垂线的位置,率定测速垂线对其他垂线的影响系数。

### 2.1 有实测资料参数率定

对于有 $n$ 次实测资料的断面,可通过已有的实测资料率定垂线影响系数 $k_{ci}$ 。把垂线 $m$ 作为测速垂线,对于 $j$ 测次,垂线 $m$ 的垂线平均流速为 $v_{m(j)}$ ,水深为 $h_{m(j)}$ ,则,动力因子 $k_{v(j)} = \frac{v_{m(j)}}{h_{m(j)}^{2/3}}$ 。

某一垂线 $i$ 第 $j$ 测次的水深为 $h_{i(j)}$ ,实测垂线平均流速为 $v_{i(j)}$ ,垂线影响系数 $k_{ci(k)}$ ( $k=1, 2, \dots, 1000$ )从0.5

到1.5,以0.001为步长,当该垂线的垂线影响系数 $k_{ci(k)}$ 取某一值时,根据公式(8),则该垂线 $j$ 测次计算垂线平均流速为: $v_{i(j)(k)} = k_{ci(k)} k_{v(j)} h_{i(j)}^{2/3}$ 。由于存在测验和计算误差, $j$ 测次的流速计算误差为 $\Delta V_{i(j)(k)} = V_{i(j)(k)} - V_{i(j)}$ , $n$ 个

$$\text{测次的标准差为: } \delta_i = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n \Delta V_{i(j)(k)}^2}{n-1}}。$$

在1000个 $k_{ci(k)}$ 中,总有一个值使标准差 $\delta_i$ 最小,那么这个 $k_{ci(k)}$ 值,即为测速垂线 $m$ 对垂线 $i$ 的影响系数。

### 2.2 无资料断面参数率定

对于新设水文站,由于没有实测资料,难以采用上述方法对垂线影响系数进行率定,但可以根据断面的形状及河底介质通过 $k_{ci} = \frac{n_m}{n_i} \left( \frac{S_{e(i)}}{S_{e(m)}} \right)^{1/2} \left( \frac{1+k_{fm}^2}{1+k_{fi}^2} \right)^{1/3}$ 进行率定。在选择水文测站时,要求测验河道水流平顺,水面没有横比降,无漩涡、回水、死水,因此 $\left( \frac{S_{e(i)}}{S_{e(m)}} \right)^{1/2} = 1$ 。

可根据断面不同垂线的质地,大致确定不同垂线处河底局部糙率,进而通过 $k_{ci} = \frac{n_m}{n_i} \left( \frac{1+k_{fm}^2}{1+k_{fi}^2} \right)^{1/3}$ 计算出垂线 $i$ 的垂线影响系数。

在河道顺直、形状规则、质地均匀且测速垂线设在平坦河底又无实测资料的测流断面,垂线影响系数接近1,可取值1。

## 3 垂线平均流速分布模型的应用及验证

本模型是基于部分过水断面流量适用于曼宁公式假设,可以通过测得的垂线平均流速与计算的垂线流速比较来验证模型,如果计算结果与实测值比较一致,则认为该假设成立,模型可用,否则,假设不成立,模型不可用。

应用河南省信阳龙山水文站南干渠2010~2011年37次实测流量资料,对模型进行了应用验证。

龙山水文站位于河南省信阳市光山县,是淮河一级支流潢河上一座拦河枢纽,控制流域面积1220km<sup>2</sup>,分南干渠、北干渠和溢洪道。北干渠为城市供水渠,渠内多有水草,水深较浅,采用流速仪测流,溢洪道平时很少运用,采用ADCP测流;南干渠是电站的引水渠,长7.7km,上下游受闸门的控制,水位流量关系受上下游水工程影响严重,既有淹没孔流,又有淹没堰流,流态变化多端,难以用水位流量关系及水工建筑物法推流。渠道顺直,测流断面在闸下465m处,断面形状为梯形,没有横比降,经常有2~3m的水深,岸边稍有水草,河底轻度淤

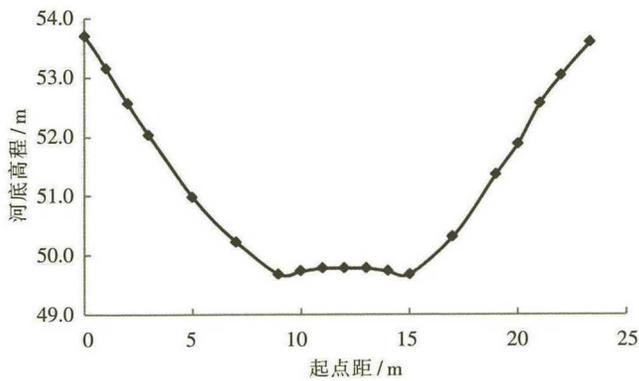


图3 黄河龙山水文站南干渠大断面

Fig.3 The section of the south canal at at Longshan hydrometry station on theHuang River

积。为验证模型,南干渠 37 次实测流量全部采用精测法测流。龙山南干渠大断面见图 3,垂线影响系数用最小标准差法进行率定,各垂线影响系数见表 1。

通过对龙山 2010~2011 两年 37 次实测流量分析,取起点距 11m 处河道中泓垂线平均流速,各垂线以 0.5m 为间隔,计算横断面上各垂线平均流速,最后推算断面流量。37 次计算流量平均误差为 0.80%,最大误差为 10.32%,累积频率 75%的误差为-3.55%,累积频率 95%的误差为 6.82%,完全满足精测法垂线精筒分析要求的累积频率 75%以上的误差不超过±5%、累积频率 95%以上的误差不超过±10%精度要求<sup>[7]</sup>。最大误差出现在 2011009 测次,从该测次实测流速分布图上看,起点距 11m 处垂线平均流速明显偏大,若采用 9m 与 13m 两条垂线流速的平均值 0.23m/s,则计算流量为 9.90m<sup>3</sup>/s,误差只有 1.12%。通过模型计算各垂线平均流速误差见表 2,最小误差及系统误差(平均误差)均为 0,最大误差只有±0.03~±0.05,计算垂线流速与实测垂线流速高度一致,因此假设成立,部分过水断面也适用于曼宁公式,模型可用。

#### 4 模型误差分析及误差控制方法

应用垂线平均流速分布模型推算流量的误差主要

来源于以下几个方面。一是垂线实测测点流速本身脉动产生的影响,称为 I 类误差。二是垂线测点对垂线平均流速的代表性影响所产生误差,称为 II 类误差<sup>[8]</sup>。I、II 类误差均直接影响垂线平均流速的精度,进而影响到断面流量的计算精度。三是模型中的垂线影响系数是从多次的实测资料率定优化的系数,反映的施测期间断面糙率、水面能坡及横向坡度等综合条件,是一种平均状态,对具体到某一次测流过程,可能带来一定的计算误差,称为第 III 类误差。

对于 I、II 类误差,可采用在线式多次复测的方法或直接测垂线平均流速的单波束超声波多普勒流速仪解决<sup>[9]</sup>。此外,测验断面应尽可能选择顺直、河槽断面规则、河床和岸边无乱石、土堆及水草等阻水物的测验河段<sup>[7]</sup>。在必要的情况下,可对断面进行人工护砌,创造理想的流态分布条件,可有效地控制测验误差,提高测验精度。在不同水位级时,测验河段的阻水物,对水流的大小及方向的影响,甚至断面可能出现死水区范围,也是不一样的,如果在不同水位级采用不同的垂线影响系数,有利于减小第 III 类误差。

测量误差是难以避免的,为了提高精度,可增加一条测速垂线,作为校正垂线,用以评定计算精度,校正计算值。因两条垂线的实测流速都可能有误差,可采用校正垂线流速计算误差的一半,作为原垂线测量误差的校正依据,这样可以避免出现较大的计算误

表2 计算垂线平均流速误差统计

Table2 The statistics of the computation errors of mean - velocity on vertical line

起点距 / m	误差 / m·s <sup>-1</sup>			最大误差测次	有效测次
	最小	平均	最大		
5	0.00	0.00	0.04	2011009	33
7	0.00	0.00	-0.04	2010008	33
9	0.00	0.00	-0.03	2010010	37
13	0.00	0.00	-0.05	2010009	37
15	0.00	0.00	-0.04	2010004	37
17	0.00	0.00	-0.04	2010008	37
19	0.00	0.00	-0.04	2011024	33

表1 黄河龙山水文站南干渠断面垂线影响系数

Table1 The effecting coefficient of vertical - line on the section of the south canal at at Longshan hydrometry station on the Huang River

起点距 / m	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5
影响系数	0.910	1.095	1.240	1.262	1.200	1.115	1.040	0.995	0.970	0.950	0.930	0.908	0.890	0.882
起点距 / m	9.0	9.5	10.0	10.5	11.5	12.0	12.5	13.0	13.5	14.0	14.5	15.0	15.5	16.0
影响系数	0.890	0.916	0.950	0.980	1.005	1.000	0.992	0.980	0.962	0.940	0.917	0.900	0.898	0.910
起点距 / m	16.5	17.0	17.5	18.0	18.5	19.0	19.5	20.0	20.5	21.0	21.5	22.0		
影响系数	0.936	0.970	1.010	1.060	1.129	1.220	1.326	1.390	1.369	1.320	1.320	1.320		

差,但可能会因校正垂线流速测量不准时,人为的增加小的计算误差。在黄河龙山水文站南干渠断面起点距 17m 处增加一条测速垂线,作为校正垂线进行推流,并用历史实测资料进行参数率定,则 37 次平均误差为 -0.06%,最大误差为 6.23%,均方差 2.33%,累计 75%计算误差为 1.99%,累计 95%计算误差为 -4.49%,明显优于单条测速垂线计算成果。

## 5 结论

(1)垂线平均流速分布模型以过水断面为基础,通过一条或两条测速垂线,借用大断面,可快速、较为精确地推算出断面流量。该方法显著缩短了测流历时,测验精度满足精度要求。因此,适合大洪水期间报讯、水文巡测、水文应急测验、水资源监测等应用,也可以据此研制实时在线的明渠流量计。

(2)该模型适用于河段顺直,河槽的底坡、断面形状、糙率等因素比较稳定,且水流集中,无分流、岔流、斜流、回流等明显影响的河道,顺直河段长度应大于洪水时主河槽宽度的 3 倍。

(3)由于模型采用了概化的垂线影响系数,因此具体应用时不可避免的产生一定的误差。对于复杂的测验河段,应对垂线影响系数进行水位分级,不同级别的水位,使用不同的垂线影响系数,以提高测验精度。

### 参考文献:

[1] GB 50179 - 2015, 河流流量测验规范[S]. (GB 50179 - 2015, Code

- for Liquid Flow Measurement in Open Channels [S]. (in Chinese))
- [2] 陈兴伟,林木生,程年生,等. 粗糙透水床面明渠水流的垂线流速分布[J]. 水科学进展, 2013,24(6):849-854. (CHEN Xingwei, LIN Musheng, CHENG Niansheng, et al. Velocity profile of turbulent open-channel flows over rough and permeable beds [J]. Advances in Water Science, 2013,24(6):849-854. (in Chinese))
- [3] 李家星, 赵振兴. 水力学 [M]. 南京: 河海大学出版社, 2001. (LI Jiaying, ZHAO Zhenxing. Hydraulics [M]. Nanjing: Hohai University Press, 2001. (in Chinese))
- [4] 王俊. 长江水文测验方式方法技术创新的探索与实践[J]. 水文, 2011,31(S1):1-3. (WANG Jun. Innovation of hydrometry for Yangtze River basin [J]. Journal of China Hydrology, 2011,31(S1):1-3. (in Chinese))
- [5] 郭红丽,谢悦波,胡健伟,等. 水文站在线流量测验方法初探[J]. 水文, 2018,38(1):41-45. (GUO Hongli, XIE Yuebo, HU Jianwei, et al. Discussion on online discharge measurement method for hydrometry station[J]. Journal of China Hydrology, 2018,38(1):41-45. (in Chinese))
- [6] 谢悦波. 水信息技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. (XIE Yuebo. Collection of Water Information and Data Processing [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2009. (in Chinese))
- [7] 罗国平. 水文测验 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017. (LUO Guoping. Hydrometry [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2017. (in Chinese))
- [8] 钱学伟,陆建华. 水文测验误差分析与评定[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (QIAN Xuewei, LU Jianhua. Analysis and Assessment of Hydrometry Errors [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2017. (in Chinese))
- [9] 张建云,唐镇松. 水文自动测报系统应用技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (ZHANG Jianyun, TANG Zhensong. Application Technology of Hydrologic Data Acquisition System [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2017. (in Chinese))

## Research and Application of Flow Calculation Model Based on Average Flow Velocity Distribution of Cross Section Vertical Line

WANG Hongjie<sup>1,2</sup>, ZHANG Jianyun<sup>3</sup>, WANG Xingze<sup>1,4</sup>, HE Ruimin<sup>3</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Hydrology and Water Resources Bureau of Henan Province, Zhengzhou 450003, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 4. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Liaoning Province, Shenyang 110003, China)

**Abstract:**Based on the analysis of the cross-sectional velocity distribution characteristics, this paper proposed a cross-sectional vertical mean velocity distribution model and calculation formula. The model can calculate the average flow velocity of any vertical line at the section by using the large section, so as to calculate the section flow. This method can shorten the flow measurement duration, and ensure the flow measurement accuracy, and prolong the foresight period for flood control scheduling decision. The application conditions, error sources and error control of the method were also discussed. It also provides a new method for real-time online monitoring of open channel, which lays a theoretical foundation for the development of open channel flow meter.

**Key words:**velocity distribution at cross-section; hydrometry; water resources monitoring; open channel flow meter