

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20220491

二层测速方式超声波时差法测流参数自率定方法研究

李正最¹, 李昕潼², 张志明³

- (1. 湖南省水文水资源勘测中心, 湖南 长沙 410014;
2. 湖南赤道银河科技有限公司, 湖南 长沙 410205;
3. 内蒙古自治区水文水资源中心, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要:为解决超声波时差法比测率定的难题,采用二层测速方式构建基于垂向流速分布的河流断面水平层流速与断面平均流速的转换数学模型,通过二个水平层流速的信息提取与流速分布模型参数识别,获取河流断面流速分布特征,进而完成流量计算参数的率定,实现水平层流速与断面平均流速的转换计算。通过湘潭水文站实例验证,水平层流速与断面平均流速转换模型计算的流量成果精度能够满足流量测验精度要求。

关键词:超声波时差法;流速分布;流速转换模型;流量计算;参数自率定

中图分类号:P332;TV123

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2023)03-0101-06

0 引言

超声波时差法自1973年在湖南省梨水水文站流量测验试验研究开始^[1-2],在我国经历了近50 a发展历程,并已得到了应用,尤其在人工河渠的流量监测中发挥了重要作用^[3-9]。但天然河道由于河道断面不规整,加之影响因素较为复杂,超声波时差法所测到的一个或多个水平层流速对全断面流速是否具有很好的代表性,直接决定了时差法测流系统建设及投产应用的成败。

按照换能器的数量和安装方式的不同,超声波时差法测流的方式有多层测流法和单层测流法等。多层测流法是沿河渠两岸不同水深位置平行安装多对换能器,在断面上测出不同水深的水平层流速得到断面流速分布变化,据以计算各水平分层部分流量后采用分层部分流量累加计算断面流量^[7,10]。当测速层为 n 层时,测流断面可水平分割为 $n+1$ 层,其流量计算有限差分公式可表示为:

$$Q = \frac{k_{表}v_1 + v_1}{2}A_0 + \sum_{\mu=1}^{n-1} \frac{v_{\mu} + v_{\mu+1}}{2}A_{\mu} + k_{底}v_n A_n \quad (1)$$

式中: Q 为断面流量; v_{μ} 为第 μ 个测速层的水平层流速($\mu=1, 2, \dots, n$),当 $\mu=n$ 时即为河底盲区边界流速; A_0 为近表层过水断面面积; A_{μ} 为第 μ 部分过水断面面积; $k_{表}$ 为表层流速系数; $k_{底}$ 为底层流速系数。

单层测流法是在河渠两岸分别选择一个合适的位置,水平安装一对换能器,以换能器测得的该水平层流速代表全断面平均流速,据以推算断面流量。其断面流量计算公式可表示为:

$$Q = A\bar{V} = Ak_0v_0 \quad (2)$$

式中: A 为断面面积; \bar{V} 为断面平均流速; v_0 为固定测速层层流速; k_0 为固定测速层流速与断面平均流速转换系数,一般称为水平层流速系数;其余符号意义同上。

可见,无论多层测流法还是单层测流法,超声波时差法流量计算中均存在流速系数问题,都需进行比测率定。通常的方法是按《河流流量测验规范》(GB 50179)^[11]的要求平行布置一套转子流速仪法或走航式声学多普勒流速剖面仪法(ADCP)等常规测流设施,与超声波时差法同步进行全断面流量的精密测量,以分析时差法测量层流速与全断面流速之间的关

收稿日期:2022-12-05

网络首发日期:2023-06-16

网络首发地址:<https://kns.cnki.net/kcms2/detail/11.1814.P.20230615.1713.001.html>

基金项目:湖南省科技创新计划项目(2020SK2130);湖南省重大水利科技项目(XSKJ2019081-09)

作者简介:李正最(1964—),男,湖南攸县人,博士,教授级高级工程师,主要研究方向为水文学及水资源。E-mail:hnlzz@139.com

通信作者:李昕潼(1988—),女,湖南攸县人,硕士,主要研究方向为人工智能与复杂网络技术。E-mail:59369077@qq.com

系。天然河道由于水情条件复杂,率定期可能需要一个很长的过程,不仅费时费力,还可能导致时差法难以及时投产、发挥效益,这对于超声波时差法在新设水文测站中的应用是不利的。

本文研究了基于垂向流速分布的层流速与断面流速转换模型,在实际应用中,只需测量河流断面上两个水平层流速,即可通过所获取的层流速信息进行断面的流速分布的识别,进行水平层流速与断面平均流速的转换,完成断面流量计算,进而实现天然河道流量实时在线。应用该转换模型可以通过二层测速方式的超声波时差法测速资料实现时差法流量计算参数的自率定,而不需要平行布置一套常规测流设施进行同步流量比测,从而使超声波时差法在天然河道的流量测验中真正成为独立于常规流量测验方法之外的一种新的监测方法。

1 基于垂向流速分布的层流速与断面流速转换模型

河流垂向流速分布即横断面上不同位置垂线的流速分布变化,它主要受水深、河床糙率、含沙量、上下游断面变化等诸多因素的影响,其形态十分复杂^[12-14],因此需对不同分布形态的流速分布的断面流量计算方法进行深入探讨^[15]。根据明渠流速垂向和横向分布规律并结合特征点流速提取,王二平等提出了流量自动化测量方法^[16];王鸿杰等^[17]提出了基于横断面垂线平均流速分布的流量计算模型;韩继伟等^[18]结合时差法测流计算中一些实际问题,提出了虚拟垂线流速时差法流量计算方法;陈卫东等^[19]通过构建曲面流速分布模型用于对自动测流系统的流量计算。我们在长期的超声波时差法测流试验中,发现不同水平层流速信息的总是存在一定的互补性,每一个水平层流速都是断面流速分布规律的反应,通过二个及其以上的水平层流速信息的流速分布特征参数识别,可以得出流速在河道断面上的形态分布,结合断面面积测量信息,进而可以获取断面流量信息成果。

研究明渠水流流速垂线分布通常有三种方法。一是利用天然河道实测资料分析得出经验关系公式;二是对水流运动方程进行假设与简化处理,结合实测资料分析得到半经验半理论公式;三是通过数值计算方法求解水流运动方程以获得垂线流速分布。本次融合上述三种方法的优势,尝试以在流速分布研究中应用较为广泛对数流速分布和对各种流速分布形态适应较好的反正弦流速分布^[20]为典型,通过层流速信

息提取和数值计算,以获得垂线流速分布并进行水平层流速与断面流速的转换。

1.1 对数型流速分布情形的水平层流速与断面流速的转换

天然河渠垂线流速对数型分布公式为^[20]:

$$v_{\theta} = v_* \left(\frac{C}{\sqrt{g}} + \frac{1 + \ln \theta}{K_1} \right) \quad (3)$$

$$v_* = \sqrt{ghs} \quad (4)$$

式中: v_{θ} 为河渠断面垂线上相对水深为 θ 处的流速; θ 为从河底起算的相对水深值,其值在0~1之间; v_* 为动力流速; C 为谢才系数; g 为重力加速度,一般取 $g=9.81 \text{ m/s}^2$; K_1 为卡门常数; h 为垂线水深; s 为水面坡降。

据式(3)和式(4),可推得垂线平均流速公式为:

$$v_{\varphi} = C\sqrt{hs} \quad (5)$$

式中: v_{φ} 为垂线平均流速;其余符号意义同上。

于是,测流断面上的断面平均流速可按式求得:

$$\bar{V} = \frac{1}{A} \int_0^B v_{\varphi} h dB = \frac{1}{A} \int_0^B C\sqrt{S} h^{1.5} dB \quad (6)$$

式中: B 为断面水面宽;其余符号意义同上。

进一步将上式写成有限差分形式,则有:

$$\bar{V} = \frac{C\sqrt{s}}{A} \sum_{\mu=1}^n h_{\mu}^{1.5} b_{\mu} \quad (7)$$

式中: h_{μ} 为第 μ 部分面积平均水深($\mu=1, 2, \dots, n$); b_{μ} 为第 μ 部分面积部分水面宽;其余符号意义同上。

如按二层测速方式,在断面上安装1-1和2-2这两个固定水平层换能器,如图1所示。

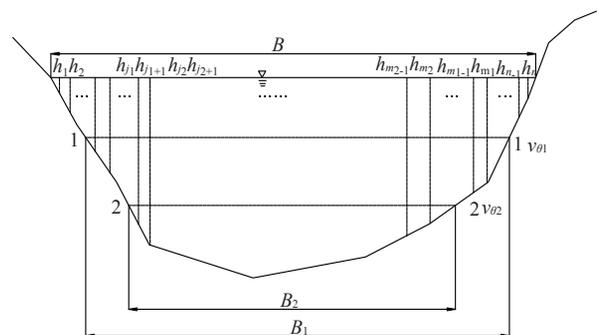


图1 二层测速方式超声波时差法换能器安装示意图

Fig.1 Transducer installation diagram of ultrasonic time difference method for two-layer speed measurement mode

则对于1-1水平层而言,其层平均流速可经适当变换后积分求得,即:

$$v_{01} = \frac{1}{B_1} \int_0^{B_1} \left[C\sqrt{hs} + \frac{\sqrt{ghs}}{K_1} (1 + \ln \theta) \right] dB \quad (8)$$

式中: v_{θ_1} 为1-1水平层平均流速; B_1 为1-1水平层河面宽度; 其余符号意义同上。

进一步将上式写成有限差分形式, 并以 $j1$ 代表1-1水平层以下起始垂线号、 $m1$ 代表1-1水平层以下最终垂线号, 则有:

$$v_{\theta_1} = \frac{C\sqrt{s}}{B_1} \left[\sum_{\mu=j1}^{m1} h_{\mu}^{0.5} b_{\mu} + \frac{\sqrt{g}}{CK_1} \sum_{\mu=j1}^{m1} (1 + \ln \theta_{\mu}) h_{\mu}^{0.5} b_{\mu} \right] \quad (9)$$

令:

$$N_{11} = \sum_{\mu=j1}^{m1} h_{\mu}^{0.5} b_{\mu}$$

$$N_{12} = \sum_{\mu=j1}^{m1} (1 + \ln \theta_{\mu}) h_{\mu}^{0.5} b_{\mu}$$

则1-1水平层平均流速公式, 即式(9)可简写为:

$$v_{\theta_1} = \frac{C\sqrt{s}}{B_1} \left[N_{11} + \frac{\sqrt{g}}{CK_1} N_{12} \right] \quad (10)$$

因卡门常数 K_1 与水面流速系数 K_0 之间有水力联系, 且有^[20]:

$$K_1 = \frac{\sqrt{g} K_0}{C(1 - K_0)} \quad (11)$$

以之代入式(10), 则有:

$$v_{\theta_1} = \frac{C\sqrt{s}}{B_1} \left[N_{11} + \frac{1 - K_0}{K_0} N_{12} \right] \quad (12)$$

由式(2)可推得, 层流速系数 $k_{\theta} = \bar{v}/v_{\theta}$, 因而对于1-1水平层其流速系数可表示为:

$$k_{\theta_1} = \frac{\bar{v}}{v_{\theta_1}} = \frac{B_1 N}{N_{11} + \frac{1 - K_0}{K_0} N_{12}} \quad (13)$$

其中, $N = \sum_{\mu=1}^n h_{\mu}^{1.5} b_{\mu}$ 。

由式(13)可知河渠断面的水平层流速系数, 主要与河渠断面的形态和测验河段的水面流速系数 K_0 有关, 而河渠断面形态可以通过断面测量资料获得。至此, 水平层流速系数的推算问题又转换成了水面流速系数的推算问题。

在图1中, 同理对2-2水平层求层平均流速, 并以 $j2$ 代表2-2水平层以下起始垂线号、 $m2$ 代表2-2水平层以下最终垂线号, 同理可得:

$$v_{\theta_2} = \frac{C\sqrt{s}}{B_2} \left[N_{21} + \frac{1 - K_0}{K_0} N_{22} \right] \quad (14)$$

$$k_{\theta_2} = \frac{B_2 N}{N_{21} + \frac{1 - K_0}{K_0} N_{22}} \quad (15)$$

上两式中: v_{θ_2} 为2-2水平层平均流速; B_2 为2-2水平层河面宽度; k_{θ_2} 为2-2水平层流速系数。且有:

$$N_{21} = \sum_{\mu=j2}^{m2} h_{\mu}^{0.5} b_{\mu}$$

$$N_{22} = \sum_{\mu=j2}^{m2} (1 + \ln \theta_{\mu}) h_{\mu}^{0.5} b_{\mu}$$

再由式(2)对1-1水平层和2-2水平层分别求断面流量, 则有:

$$k_{\theta_1} v_{\theta_1} = k_{\theta_2} v_{\theta_2} \quad (16)$$

将式(13)和式(15)代入上式, 则有:

$$K_0 = 1 / \left(1 + \frac{B_2 v_{\theta_2} N_{11} - B_1 v_{\theta_1} N_{21}}{B_1 v_{\theta_1} N_{22} - B_2 v_{\theta_2} N_{12}} \right) \quad (17)$$

由上式可知, 水面流速系数 K_0 仅与断面形态和两个水平层流速有关。

因此在应用超声波时差法测流时, 投产应用前可施测两个水平层流速, 结合断面测量资料, 即可由式(17)计算出水面流速系数 K_0 , 再按式(13)和式(15)便能顺利求解两个固定水平层的层流速系数 k_{θ_1} 和 k_{θ_2} 。

1.2 反正弦流速分布情形的水平层流速与断面流速的转换

反正弦垂线流速分布是根据涡流互换理论推导出来的万能流速分布模式, 其垂线流速分布式为^[20]:

$$v_{\theta} = v_{\varphi} \left[1 + \left(\frac{\pi}{8} - \arcsin \sqrt{1 - \theta} + \sqrt{\theta} \sqrt{1 - \theta} \right) \frac{\sqrt{2g}}{K_4 C} \right] \quad (18)$$

式中: K_4 为反正弦分布万能系数, 当设定反正弦流速分布与对数型流速分布水面流速相等时, 可推得

$$K_4 = \frac{\sqrt{2}\pi}{8} K_1; \pi \text{ 为圆周率, 取 } 3.1416; \text{ 其余符号意义同上。}$$

按照与上节对数型流速分布情形同样的推导思路和方法, 可分别对图1中的1-1、2-2水平层通过积分

求分层平均流速, 以 $K_4 = \frac{\sqrt{2}\pi}{8} K_1 = \frac{\sqrt{2g}\pi}{8C} \frac{K_0}{1 - K_0}$ 代入,

并相应写成有限差分形式(推导过程从略), 即可得:

$$v_{\theta_1} = \left[\left(1 + \frac{1 - K_0}{K_0} \right) N_{11} - \frac{8(1 - K_0)}{\pi K_0} N_{13} \right] \frac{\sqrt{gs}}{B_1} \quad (19)$$

$$k_{\theta_1} = \frac{\bar{v}}{v_{\theta_1}} = \frac{B_1 N}{\left(1 + \frac{1 - K_0}{K_0} \right) N_{11} + \frac{8(1 - K_0)}{\pi K_0} N_{13}} \quad (20)$$

$$v_{\theta_2} = \left[\left(1 + \frac{1 - K_0}{K_0} \right) N_{21} - \frac{8(1 - K_0)}{\pi K_0} N_{23} \right] \frac{\sqrt{gs}}{B_2} \quad (21)$$

$$k_{\theta_2} = \frac{\bar{v}}{v_{\theta_2}} = \frac{B_2 N}{\left(1 + \frac{1 - K_0}{K_0} \right) N_{21} + \frac{8(1 - K_0)}{\pi K_0} N_{23}} \quad (22)$$

以上四式中: $N_{13} = \sum_{\mu=j1}^{m1} h_{\mu}^{0.5} b_{\mu} (\arcsin \sqrt{1 - \theta} + \sqrt{\theta} \sqrt{1 - \theta})$, $N_{23} = \sum_{\mu=j2}^{m2} h_{\mu}^{0.5} b_{\mu} (\arcsin \sqrt{1 - \theta} + \sqrt{\theta} \sqrt{1 - \theta})$; 其余符号意义同上。

将上述四式代入式(16),即得:

$$K_0 = \left[1 + \frac{B_1 v_{\theta_1} N_{21} - B_2 v_{\theta_2} N_{11}}{B_2 v_{\theta_2} \left(N_{11} - \frac{8}{\pi} N_{13} \right) - B_1 v_{\theta_1} \left(N_{21} - \frac{8}{\pi} N_{23} \right)} \right]^{-1} \quad (23)$$

可见,运用反正弦垂线流速分布式同样可以通过施测两个水平层流速,结合断面测量资料,由式(23)计算出水面流速系数。然后据式(20)和式(22)求解两个水平层的层流速系数。

因此运用对数型垂线流速分布和反正弦垂线流速分布推导的流速转换系数公式,均不需要通过与常规测流方法的比测,就可以完成超声波时差法流量计算参数的率定。

2 实例验证

湘潭站是湘江进入洞庭湖的总控制站,控制集水面积81 638 km²,历史实测最高水位41.95 m,历史实测最大流量26 200 m³/s。该站测验河段顺直,河床由细沙、卵石组成,断面基本稳定,高水时水面宽可达750 m。长江和洞庭湖洪水的回水影响可达测验断面,因此该站受洪水涨落率和长江与洞庭湖的回水顶托综合影响,水位流量关系较为复杂,常用绳套曲线、连时序和落差法等方法整编流量资料。为探索超声波时差法在宽河道应用的可行性,该站曾连续10余年进行了超声波双机时差法测流试验,取得了大量的试验资料^[21]。

2.1 层流速与断面流速转换的验证

收集湘潭站92次二层测速方式的超声波时差法测速试验资料,测速层设置方式为:

(1)当水位高于38.50 m时,时差法测速层为30.0 m与37.5 m固定高程层(水文站冻结基面高程,下同);

(2)当水位在34.50 m~38.50 m时,时差法测速层为30.0 m与34.2 m固定高程层。

以92次二层测速方式超声波时差法测速数据,差分计算步长按河流断面测量的转折点进行控制,用式(17)和式(23)分别推算对数型和反正弦流速分布对应的水面流速系数 K_0 ,然后绘制水位与水面流速系数关系线,再根据水位与水面流速系数查算不同水位的水面流速系数 K_0 ,结合河道断面测量资料由式(13)和式(15)求解对数型流速分布相应不同固定点高程层水位与层流速系数关系,或由式(20)和式(22)求解反正弦流速分布相应不同固定点高程层水位与层流速系数关系。图2所列即为湘潭站反正弦垂线流速分布相应的水位与水面流速系数关系及30.00 m、34.20 m、37.50 m固定高程层的水位与层流速系数关系图;对数型垂线流速分布相应的水位与水面流速系数关系及30.00 m、34.20 m、37.50 m固定高程层的水位与层流速系数关系图与图2形态类同,为节省篇幅从略。

在上述92次二层测速方式超声波时差法测速试验的同时,用测船搭载转子流速仪多法多点法同步施测流量,流量变幅为493 m³/s~19 200 m³/s。取二层测速试验中的任一层流速值,据式(2)和相应的层流速系数求解超声波时差法流量值,以转子流速仪测量成果为标准值,分别计算单次流量误差、系统误差、标准差和随机不确定度。

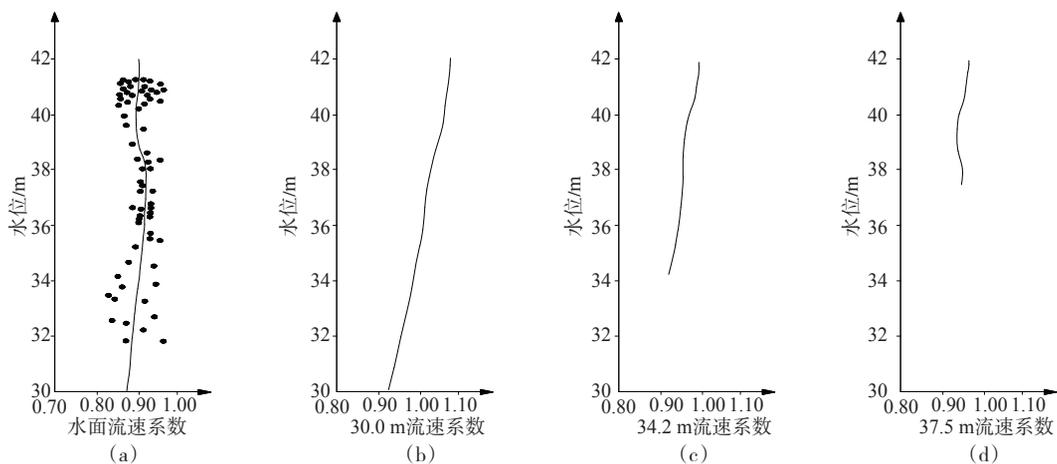


图2 湘潭站水位与水面流速系数、水平层流速系数关系

Fig.2 The relationship between water level and water surface velocity coefficient, water level and horizontal layer velocity coefficient of Xiangtan hydrological station

(1) 单次流量误差:

$$R_i = \frac{Q_{ms,i} - Q_{mc,i}}{Q_{mc,i}} \times 100 \quad (24)$$

式中: R_i 为第 i 次流量相对误差, %; $Q_{ms,i}$ 第 i 个时差法测次计算的流量值, m^3/s ; $Q_{mc,i}$ 为第 i 个转子流速仪多线多点法测次的流量值, m^3/s 。

(2) 系统误差:

$$m_Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_{ms,i} - Q_{mc,i}}{Q_{mc,i}} \times 100 \right) \quad (25)$$

式中: m_Q 为流量系统误差, %; n 为流量测次总数; 其余符号意义同上。

(3) 标准差:

$$\sigma_Q = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_{ms,i} - Q_{mc,i}}{Q_{mc,i}} \times 100 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (26)$$

式中: σ_Q 为流量标准差, %; 其余符号意义同上。

(4) 随机不确定度:

$$X'_Q = 2\sigma_Q \quad (27)$$

式中: X'_Q 为置信水平为 95% 的随机不确定度; 其余符号意义同上。

按上述方法计算的 92 次流量测量成果误差统计结果列入表 1, 由表可知流量测验精度达《河流流量测验规范》(GB 50179—2015) 一类站精度要求。

表 1 由单层流速系数推算时差法流量误差统计

Table1 The flow error statistics of the time difference method are extrapolated from the single-layer flow velocity coefficient

流速分布形式	对数型分布	反正弦分布
单次流量误差范围/%	-5.0~4.9	-4.0~4.3
系统误差/%	-0.1	0
测次标准差/%	2.5	2.2
测次随机不确定度/%	5.0	4.4

2.2 二层测速方式单次测速即时转换流量验证

上一种验证计算, 是以收集多个测次流速测量资料后建立水位与水面流速系数的平均关系实现流量计算的。这种方式对于新设测站应用时差法而言, 仍然需要一段前期资料收集时间, 通过测量二个水平层流速以获取流速分布参数(如水面流速系数和层流速系数等), 建立该测验断面的水位或其他因素与流速系数关系后, 才能实现层流速与断面流速的转换计算。

考察公式(17)可知, 每个单次二层水平层测速即可即时计算相应于对数型垂线流速分布相应的水面流速 K_0 值, 由 K_0 代入式(13)和式(15)可求得两个水平层相应于对数型分布的层流速系数。同理, 由式(23)

可计算每个单次二层水平层测速相应于反正弦分布的水面流速 K_0 值, 由 K_0 代入式(20)和式(22)可求得二个水平层相应于反正弦垂线流速分布的层流速系数。因此可以通过单次二层测速方式的超声波时差法水平层测速直接获取层流速与断面平均流速转换系数。对 92 次二层测速方式超声波时差法测速资料单次独立求解层流速系数并相应计算流量, 同样以转子流速仪同步测流成果为标准值, 进行误差统计, 结果列入表 2。

表 2 二层测速方式单次测速即时转换流量误差统计

Table2 Single speed measurement instant conversion flow error statistics for two-layer speed measurement mode

流速分布形式	对数型分布	反正弦分布
单次流量误差范围/%	-7.0~7.5	-7.2~7.0
系统误差/%	-0.5	-0.2
测次标准差/%	4.0	3.5
测次随机不确定度/%	8.0	7.0

由表 2 可知, 由于受流速脉动和其他偶然因素的影响, 利用单次二层测速方式超声波时差法的层流速即时进行层流速与断面流速的转换计算, 流量成果误差较通过多次二层测速方式资料建立层流速系数转换关系线后推算的流量误差(如表 1)偏大。据《河流流量测验规范》(GB 50179—2015) 标准评价, 表 2 的流量测验误差达到二类精度水文站流量测验精度要求。

3 结语

(1) 基于垂向流速分布的层流速与断面流速转换模型, 是利用超声波时差法自身的二层测速信息进行流量计算参数识别实现层流速与断面平均流速的转换计算的, 应用该模型无需平行布置一套常规测流设施对时差法流量计算参数进行比测率定。湘潭站的超声波时差法实例验证结果表明, 通过本文构建的层流速与断面平均流速转换模型计算的流量成果精度满足正常水文测验的流量测验精度要求。其中收集一定数量的二层测速资料率定出水位(或其他水力因素)位与层流速系数关系后, 其流量测算精度满足《河流流量测验规范》(GB 50179—2015) 一类站精度; 利用单次二层测速信息即时解算层流速与断面流速转换系数直接推算流量, 其流量测算精度可达到《河流流量测验规范》(GB 50179—2015) 二类站精度要求。

(2) 从基于垂向流速分布的层流速与断面流速转换模型计算条件看, 层流速系数主要取决于水流的结构特征和河流断面形态, 因此当河流断面发生较大变化或测站控制条件发生较大变化致使流速垂向分布

规律改变时,应对水面流速系数和层流速系数进行校正和检验;在湘潭站的试验研究中发现:采用二层测速方式进行超声波时差法流量计算参数率定时,如两个测速层相距过近流量计算误差有偏大的趋势,有关二层测速方式的测速层间距布设优化尚待深入探索;本文是以对数垂向流速分布和反正弦垂向流速分布为典型推导层流速与断面流速转换模型的,从湘潭站的验证计算成果看两种流速分布均具有一定的适应性,而反正弦垂向流速分布推导的模型的适应性更优,有关其它流速分布和这两种流速分布对其它河流的适应性需要进一步研究和验证。

参考文献:

- [1] 湖南省水文总站超声试验组. 湖南省水文总站梨水水文站. 超声波时差法测速[J]. 水文, 1982(2):2-7.
- [2] 湖南省水文总站超声试验组. 湖南省水文总站梨水水文站. 超声波时差法测速技术在梨水水文站的应用[J]. 水利水电技术, 1982(4):1-5.
- [3] 雷艳, 范秀华, 赖旭. 梯形渠道多声道超声波测流数学模型及计算方法[J]. 武汉水利电力大学学报, 1997, 30(1):11-16.
- [4] 刘尚为. 时差法多声道超声波流量计及其在引水工程中的应用[J]. 海河水利, 2005(5):31-33, 41.
- [5] 姚永熙, 陆燕. 声学时差法流量计在明渠流量测验中的应用[J]. 水利水文自动化, 2006(1):1-5.
- [6] 白炳锋, 林湘如, 程鹏. 时差式超声波流量计在山区性河道的应用[J]. 黑龙江水利科技, 2014, 42(6):172-174.
- [7] 刘正伟, 张丽花. 多声道时差法在牛栏江—滇池补水工程流量自动监测中的应用[J]. 水利水电技术, 2016, 47(12):96-99.
- [8] 周晓强, 任华, 王书亮. 超声波时差法测验技术在东台市堤东灌区水资源监测中的应用[J]. 江苏水利, 2019(6):7-11.
- [9] 韩冰. 时差法超声波流量计在矩形渠道测流中的应用分析[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2022(2):29-31, 34.
- [10] 王俊, 刘东生, 陈松生, 等. 河流流量测验误差的理论与实践[M]. 武汉:长江出版社, 2017.
- [11] GB 50179—2015, 河流流量测验规范[S].
- [12] 陈森林, 肖舸, 赵云发, 等. 河道断面流速分布函数研究[J]. 水利学报, 1999(4):70-74.
- [13] 孙东坡, 王二平, 董志慧, 等. 矩形断面明渠流速分布的研究及应用[J]. 水动力学研究与进展, 2004, 19(2):144-151.
- [14] 刘星, 贺晓春. 天然河道断面流速分布计算[J]. 水运工程, 1999(11):29-31.
- [15] 杨政凡, 李正最. 用积分层流速推求断面流量方法的探讨[J]. 水文, 1991(1):32-36.
- [16] 王二平, 金辉, 关靖, 等. 矩形明渠流速分布规律及流量自动化测量方法[J]. 华北水利水电学院学报, 2007, 28(6):13-16.
- [17] 王鸿杰, 张建云, 王兴泽, 等. 基于横断面垂线流速分布的流量计算模型研究与应用[J]. 水文, 2019, 39(5):50-54.
- [18] 韩继伟, 牛睿平, 王岩, 等. 虚拟垂线流速时差法流量计算方法研究[J]. 水文, 2020, 40(1):52-57.
- [19] 陈卫东, 潘杰, 胡尊乐, 等. 曲面流速分布模型构建及其在自动测流系统中的应用[J]. 水文, 2022, 42(2):19-24.
- [20] 热列兹拿柯夫著, 中华人民共和国水利部水文局译. 河流水文测验方法在水力学基础上的论证[M]. 北京:水利出版社, 1956.
- [21] 杨政凡. 河道超声波测速(双机)技术介绍[J]. 水利水文自动化, 1989(2):18-28, 47.

Research on Parameter Self-calibration Method of Ultrasonic Time Difference Method for Two-layer Speed Measurement Mode

LI Zhengzui¹, LI Xintong², ZHANG Zhiming³

(1. Hydrological and Water Resources Survey Center of Hunan Province, Changsha 410014, China;

2. Hunan Equastar Technology Co., Ltd, Changsha 410205, China;

3. Hydrology and Water Resources Center of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010020, China)

Abstract: In order to solve the problem of comparative measurement and parameter calibration of ultrasonic time difference method, this study used two-layer velocity measurement mode to construct a mathematical model for the conversion of horizontal layer velocity and section average velocity of river section based on vertical velocity distribution. Through the information extraction of two horizontal layer velocity and the parameter identification of velocity distribution model, the distribution characteristics of river section velocity are obtained, and then the parameter calibration is completed to realize the conversion calculation of horizontal layer velocity and section average velocity. Through the example verification of Xiangtan hydrological station, the accuracy of the flow results calculated by the horizontal layer velocity and the cross-section average velocity conversion model can meet the accuracy requirements of the discharge measurement.

Keywords: ultrasonic time-difference method; velocity distribution; flow velocity conversion calculation model; discharge calculation; parameter self-calibration