

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0059

韩继伟, 邵军, 符伟杰, 等. 明渠时差法流量计流量计算方法分析研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2): 196-201. HAN J W, SHAO J, FU W J, et al. Study of ultrasonic flow meter method for open channel flow calculation[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 196-201. (in Chinese)

明渠时差法流量计流量计算方法分析研究

韩继伟^{1,2}, 邵军^{1,2}, 符伟杰^{1,2}, 戴佳琦^{1,2}

(1. 水利部南京水利水文自动化研究所, 南京 210012; 2. 水利部水文水资源监控工程技术研究中心, 南京 210012)

摘要: 目前国内外对明渠时差法流量计流量计算方法研究较少, 对时差法流量计流量计算方法进行系统完整的研究, 从时差法测验原理、理论标定系数 k_1 的计算方法、水道断面面积的计算方法、现场标定系数 k_2 的计算方法, 详细阐述了明渠时差法流量计流量计算方法, 提出了线性插值计算理论标定系数 k_1 的方法。以南水北调输水断面运河站为例采用线性插值计算理论标定系数 k_1 的方法, 进行时差法流量计流量计算, 计算结果与流速仪法对比显示两者一致性较好, 误差可控。进而为工程技术人员提供参考; 为国产化时差测流装置提供重要技术支撑; 为我国重点通航河道和低流速实时在线流量监测提供技术保障。

关键词: 时差法流量计; 流量计算方法; 理论标定系数; 现场标定系数

中图分类号: TV13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)02-0196-06

Study of ultrasonic flowmeter method for open channel flow calculation

HAN Jiw ei^{1,2}, SHAO Jun^{1,2}, FU Weijie^{1,2}, DAI Jiaqi^{1,2}

(1. Nanjing Automation Institute of Water Conservancy and Hydrology, the Ministry of Water Resources, Nanjing 210012, China; 2. Research Center on Hydrology and Water Resources Monitoring of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210012, China)

Abstract: At present there is few research on the ultrasonic flow meter method for flow calculation. This paper presents a systematic study on this method. It elaborates on the ultrasonic flow meter method for flow calculation in terms of the principle of ultrasonic test, the calculation method for theoretical calibration coefficient k_1 , the calculation method for channel cross section area, and the calculation method for field calibration coefficient k_2 . It puts forward the linear interpolation method for calculating theoretical calibration coefficient k_1 . Taking the Yunhe station of the South to North Water Transfer Project as a case study, we used linear interpolation to calculate the theoretical calibration coefficient k_1 , and calculated the flow by the ultrasonic flow meter method. The calculation results were compared with the results of the current meter method. The comparison showed good consistency and controllable error. This study can provide a reference for engineering and technical personnel, provide important technical support to the localization of ultrasonic measurement devices, and provide technical support to the real time online flow monitoring of key navigable channels and low velocity in China.

Key words: ultrasonic flow meter; flow calculation method; theoretical calibration coefficient; field calibration coefficient

近年来, 河流流量在线测验成为水文工作者研究的热点, 目前有接触式的有水平固定式 ADCP、时

差法、二线能坡法; 非接触式有雷达测流、激光粒子图像测流等^[1,3]。非接触主要是测量表面流速, 影

收稿日期: 2017-08-18 修回日期: 2017-12-21 网络出版时间: 2018-02-07
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180206.1741.012.html>

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(Y916015); 水利部“948”项目(201502)

Funds: Special Funds for Basic Research Expenses of Central-level Public Welfare Scientific Research Institutions(Y916015); Project 948 of Ministry of Water Resources(201502).

作者简介: 韩继伟(1981-), 男, 江苏南京人, 工程师, 主要从事水文仪器算法研究。E-mail: xzhjwei2005@126.com

响因素较多,主要应用于高洪流量测验,精度稍差;接触式测量的水层流速或垂线流速,影响因素较少,主要应用于常规流速测量以及水资源计量测量,南水北调不少输水断面就是采用接触式时差法在线流量测量系统,也称为明渠时差法在线测量系统或者超声波时差法在线流量测量系统。明渠时差法测流的优点是能够测得全断面的瞬时流速、流量及其连续变化过程,并且可以数字或过程线的形式显示;原理简单,人工内外业工作量少;无需过河设备,操作安全,劳动强度低,还适用于受回水顶托、冰凌、潮汐和受水工建筑物影响的河段的测流;测速范围大,有测低速和高速的能力;便于遥测,为迅速提供江河水情、及时做出洪水预报为防洪抢险指挥创造了有利条件^[4,6]。因此明渠时差法是一种江河自动化测流最有前途的方法^[7]。明渠时差法流量计测验计算方法关系到流量测验精度;关系到水资源计量的准确性;关系到水生态水安全的治理;关系到水环境质量;关系到人们的生产生活。继而明渠时差法流量测验计算方法最值得水文学者关注研究。本文从关注其测验原理开始。

1 时差流量测验原理

时差法测速布置如图 1 所示。在河流两岸边 A、B 两点水下某深度处,相对地装置一对电声可逆的换能器,其间距为 L,该层水流平均流速为 v,水流方向与 AB 的夹角为 θ,水流在 AB 方向的分速度为 v₁,超声波在静水中传播速度为 c。

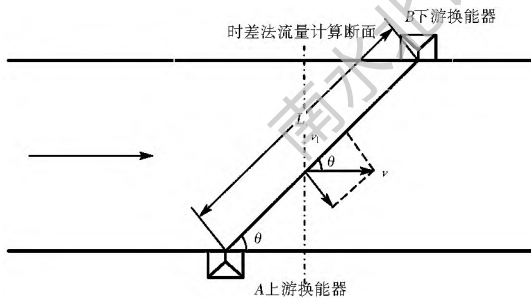


图 1 时差法测流布置

Fig. 1 The flow measurement layout of the ultrasonic method

如果上游换能器 A 作为发波器向对岸发射超声波(即顺流发射),经 T₁ 时间后,此时超声波的速度是 c+ v₁,超声波在水流中传播历时 T₁ 为 T₁ = $\frac{L}{c+ v_1}$;反之,若以 B 作为发波器, A 作为收波器(即逆流发射),在相同的水流速度影响下,超声波的速度应是 c- v₁,其传播历时 T₂ 为 T₂ = $\frac{L}{c- v_1}$ 。T₂ 与 T₁ 联立求得 v₁ 见式(1)^[1-3,5-7,8-14]。由图 1 知水

层平均流速 v 见式(2)。

$$v_1 = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \tag{1}$$

$$v = \frac{v_1}{\cos\theta} = \frac{L}{2\cos\theta} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \tag{2}$$

2 时差法流量计算

时差法流量计流量计算采用流速面积法,分为单声路系统和多声路系统。两种系统均是采用断面平均流速与断面面积相乘计算,多声路系统流量计算相对简单,具体可参考国际标准 ISO 6416。本文主要研究单声路系统流量计算,依据传感器测量水层平均流速 v 和由测量水位 Z 计算过水断面面积 A 以及理论流速标定系数 k₁ 计算平底明渠断面流量,参见 ISO 6416;非平底明渠流量 Q 按式(3)计算。

$$Q = k_1 k_2 v A \tag{3}$$

式中:Q 表示时差法计算流量(m³/s);k₁ 表示理论流速计算的标定系数;k₂ 为现场安装造成的标定系数;v 为时差法传感器实测水层平均流速(m/s);A 表示过水断面面积(m²)。

2.1 k₁ 的确定

依据 ISO 6416: 2004(E) 的测量规范^[4],许多宽阔的天然河流,流速分布与水位有一定的关系^[15-20]。理论流速计算的标定系数 k₁ 对于不同的安装水深有不同的数值。这些值是在规则梯形渠道上,其断面形态见图 2;平均水深在 1.939 m 到 2.201 m 范围内,深度为 0.149 m 到 1.613 m 之间的确定的 7 条单独的超声波线速度的野外观测结果。每条单独的超声波线速度做了 15 组实验,经统计分析得各个相对位置的流量理论标定系数 k₁ 值,详见表 1。以换能器相对位置为横坐标,理论标定系数 k₁ 为纵坐标,绘制换能器相对位置与 k₁ 的关系见图 3。

表 1 ISO 6416 的 k₁ 相关数值
Tab. 1 The numerical values for ISO 6416 k₁

h/H	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
k ₁	0.846	0.863	0.882	0.937	0.979	1.039	1.154	1.424

注:h/H 为换能器的入水深与平均水深的比值

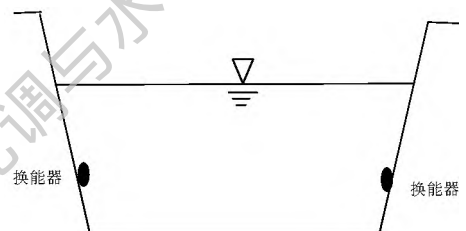


图 2 规则梯形断面形态

Fig. 2 Shape of regular trapezoidal cross section

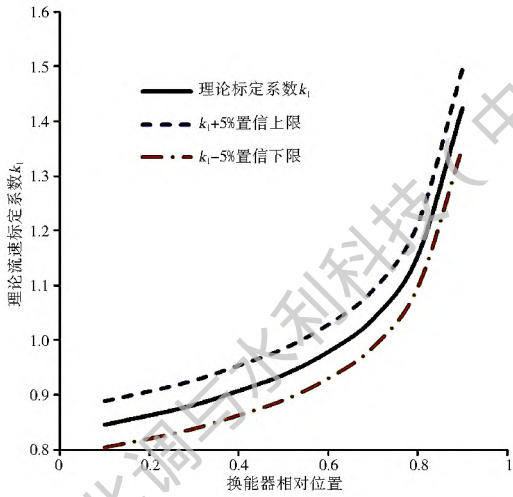


图 3 换能器相对位置与 k_1 关系

Fig. 3 Relation between the relative location of transducer and k_1

换能器入水深与实际水深比值 B_z 按式(4)计算

$$B_z = (Z - Z_0) / H \quad (4)$$

式中: B_z 表示 Z 水位对应换能器入水深与平均水深 H 比值; Z_0 表示换能器安装高程(m)。依据 B_z 值在表 1 中线性插值求出对应水位 Z 的 k_1 值, 单声路 B_z 的取值 0.4~0.7, 即 k_1 的取值 0.908~1.039。

2.2 水道断面面积的计算

由测量的断面数据起点距 $D_{QDJ}(i)$ 和河底高程 $H_{HD}(i)$, 以及垂线号 $i=1, 2, 3, \dots, n$; 目前时差法是采用水位面积曲线来查算水道断面面积的, 或者将水位面积曲线建立回归模型进而计算水道断面面积。这两种计算方法和实际的过水断面面积有一定的计算误差, 为减小这种误差这里提出采用实时水位计算相应的水道断面面积的方法。

(1) 测深垂线的确定。

测深垂线的选择(布设)要满足水道断面形状的要求, 布设宜均匀, 并能控制河床的转折点, 使部分水道断面面积无大割补情况。依据实测水位从测量的断面数据中选取起点距 $D_{QDJ}(j)$ 和河底高程 $H_{HD}(j), j=1, 2, 3, \dots, l$ 。

(2) 间距的计算。

由水位根据断面数据进行线性插值计算出左水边 Z_{SB} 和右水边 Y_{SB} , 间距按式(5)计算

$$\left. \begin{aligned} J_1(1) &= D_{QDJ}(1) - Z_{SB} \\ J_1(j) &= D_{QDJ}(j) - D_{QDJ}(j-1) (j=2, 3, 4, \dots, l) \\ J_1(l+1) &= Y_{SB} - J_1(l) \end{aligned} \right\} (5)$$

式中: J_1 表示间距(m); l 为测深垂线系数; 其他符号意义同前。

(3) 水深的计算。

水深的计算较简单, 水位减去测深垂线的对应河底高程便是水深。值得注意的是左右水边的水

深。具体计算公式如下

$$\left. \begin{aligned} S_s(0) &= 0 \\ S_s(j) &= Z - H_{HD}(j) (j=1, 2, 3, \dots, l) \\ S_s(l+1) &= 0 \end{aligned} \right\} (6)$$

式中: S_s 表示垂线水深(m); 其他符号意义同前。

(4) 水道断面面积的计算。

测深垂线将水道断面划分成若干个大大小小的梯形, 水道断面面积的计算就是计算这些大大小小的梯形面积, 然后将面积累计起来。计算公式如下:

$$A = \sum_{i=1}^{l+1} \frac{S_s(i-1) + S_s(i)}{2} \times J_1(i) \quad (i=1, 2, 3, \dots, l+1) \quad (7)$$

2.3 现场标定系数 k_2 的确定

对于非平底、无复式断面的明渠, 理论系数 k_1 会有所偏离, 需通过现场标定系数 k_2 来纠正; k_2 是现场河道断面的质地、形状以及水位等因子的函数; 这些因子是如何定量的影响 k_2 的尚未确定, 即无其函数的表达式。具体标定方法如下。

采用标准流量计, 不同水位同时监测的方法来标定, 按式(8)计算

$$k_2 = \frac{Q_s}{Q} \quad (8)$$

式中: Q_s 为标准流量计监测流量(m^3/s); Q 为 $k_2=1$ 时差法流量计监测流量(m^3/s); 其他符号意义同前。将不同水位标定的 k_2 值作为控制点依据实测水位进行插值计算相应的 k_2 值。

3 研究实例

3.1 概况

京杭大运河徐州段又称中运河, 上接韩庄运河, 自黄楼村入邳州境内, 在新沂市窑湾镇二湾附近入骆马湖, 并自皂河闸出骆马湖入宿迁境内。中运河徐州境内河道长 55 km, 主要承泄南四湖和邳苍地区洪水以及邳苍分洪道分泄的沂河洪水, 同时兼负航运和南水北调东线输水任务。

运河水文站位于江苏省邳州市运河镇大运河左岸, 是中运河入湖流量, 兼有南水北调东线输水计量任务, 流量测验任务十分繁重, 加上过往船只甚多, 使用常规缆道测流难度极大。为提高流量测验精度, 实现流量实时在线和水情自动传输, 以期达到大大解放生产力的目的, 需要寻求新的流量测验方法。运河水文站时差法流量测验断面位于徐海公路桥下游, 铁路桥上游 100 m, 左岸是邳州运河镇索家村, 断面是复式的, 两岸的河漫滩较长, 总宽度约 1 000 m, 主槽宽 280 m, 详见图 4。

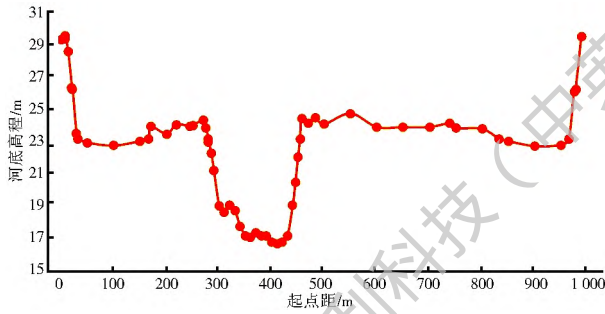


图4 运河水文站时差法流量测验断面

Fig. 4 Test cross section for ultrasonic flow measurement at Yunhe hydrological station

3.2 时差法流量的计算

按照第2节介绍的计算方法,分别计算理论标定系数 k_1 、现场标定系数 k_2 、还有水道断面面积 A ,见表2;根据式(3)计算时差法流量计测验流量,并分析计算与流速仪法的相对误差,详见表3、图5。

表2 运河站时差法流量计流量计算参数

Tab. 2 Parameters for flow calculation by ultrasonic flow meter method at Yunhe station

序号	水位/m	k_1	k_2	$v/(m \cdot s^{-1})$	A/m^2
1	23.68	0.908	2.08	0.48	958
2	24.15	0.921	2.38	0.53	1 138
3	23.20	0.892	1.48	0.18	871
4	23.20	0.892	1.48	0.18	871
5	23.31	0.896	1.55	0.15	891
6	23.93	0.915	2.04	0.68	1035
7	23.27	0.895	1.52	0.28	883
8	23.13	0.89	1.43	0.24	858
9	23.06	0.887	1.39	0.29	845
10	22.93	0.882	1.25	0.22	822
11	22.94	0.883	1.27	0.21	824
12	22.94	0.883	1.27	0.22	824
13	22.95	0.883	1.28	0.19	826
14	23.70	0.908	1.84	0.61	964
15	23.41	0.899	1.61	0.25	909

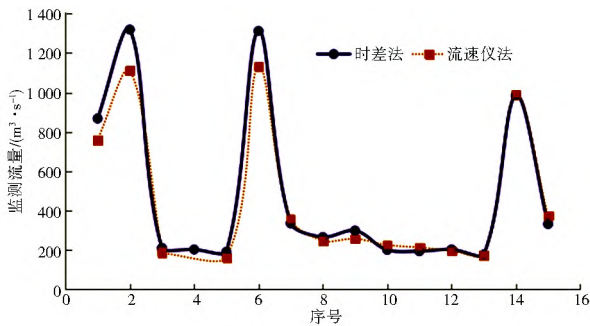


图5 时差法与流速仪法监测流量对比

Fig. 5 Comparison of monitored flow by ultrasonic method and current meter method

表3 运河站时差法流量计流量计算成果

Tab. 3 Flow calculation results by ultrasonic flow meter method at Yunhe station

序号	水位/m	时差法 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	流速仪法 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	相对 误差(%)
1	23.68	867	759	14.17
2	24.15	1 318	1 110	18.74
3	23.20	211	194	8.90
4	23.20	203	185	9.78
5	23.31	191	163	17.19
6	23.93	1 311	1 130	16.03
7	23.27	335	358	- 6.49
8	23.13	266	247	7.80
9	23.06	299	257	16.36
10	22.93	201	226	- 11.18
11	22.94	194	213	- 8.83
12	22.94	203	196	3.5
13	22.95	177	174	1.7
14	23.70	983	989	- 0.60
15	23.41	332	373	- 10.99

3.3 时差法流量的计算结果分析

水位从22.93 m到24.15 m变幅1.22 m;时差法流量177~1 318 m^3/s ;对应流速仪流量174~1 130 m^3/s 。相对误差1.7%~18.7%,所有值都在20%以内,最小值仅1.7%;时差法流量计测的最小流量是177 m^3/s ,流速仪测得的最小流量是174 m^3/s ,两者相差3 m^3/s ,相对误差1.7%;时差法流量计测的最大流量是1 311 m^3/s ,流速仪测得的最大流量是1 130 m^3/s ,两者相差181 m^3/s ,相对误差16.03%;水位24.15 m时,相对误差最大18.74%。

综上所述,单声路时差法测流系统不适合水位变幅较大的河流,高洪测验误差稍大。

运河站水位大于24.22 m时是复式断面^[21],漫滩面积较大,时差法测验误差稍微大。计算时 k_2 实际比测仪4次,也就是4个控制点,15测次的 k_2 是采用4个控制点计算出来的;随着比测次数增加时差法测验精度会逐渐降低,也就是说,通过增加比测次数,可以降低测验误差。总体看来,时差法和流速仪法一致性较好,精度可控。

4 结论

(1) 采用线性插值计算理论标定系数 k_1 的时差法流量计能满足一般河流流量测验要求,其与流速仪法一致性较好,精度可控。

(2) 时差法测流在复式断面上尚可使用精度稍

差,单式断面使用效果更佳。

(3)通过增加现场比测可以提高复式断面的测验精度,但复式断面单声路时差法流量计流量计算方法有待于进一步研究。因此本文的方法有一定的适用条件,水位变幅不太大的非平底且无复式断面的明渠应用效果较好。

(4)以上研究成果可为工程技术人员提供参考;为国产化时差测流装置提供重要的技术支撑,进而为我国的重点通航河道和低流速的实时在线流量监测提供技术保障。

参考文献(References)

- [1] 姚永熙.水文仪器与水利自动化[M].南京:河海大学出版社,2001:97-98.(YAO Y X. Hydrological instruments and automated water[M]. Nan jing: Hohai University Press, 2001: 97-98. (in Chinese))
- [2] 刘雅鸣.水利技术标准汇编水文卷水文测验[M].北京:中国水利水电出版社,2002:1102-1106.(LIU Y M. Water conservancy technical standard assembly hydrological volume hydrological[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2002: 1102-1106. (in Chinese))
- [3] 林祚顶,朱春龙,余达征,姜永富.水利现代化与水文新技术[M].北京:中国水利水电出版社,2008:109-113(LIN Z D, ZHU C L YU D Z, JIANG Y F. New technology of water conservancy modernization and hydrological[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2008: 109-113. (in Chinese))
- [4] ISO 6416, Hydrometry Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method[S].
- [5] 赵德友.运河水文站流量自动监测系统建立与实现技术[J].水利信息化,2011,6(3):68-72(ZHAO D Y. Canal hydrologic flow of automatic monitoring system establishment and implementation technology[J]. Water Information, 2011, 6(3): 68-72. (in Chinese))
- [6] 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,2006,3(1):1-5.(YAO Y X, LU Y. Acoustic time difference method flow meter in the application of open channel flow test[J]. Water Conservancy Hydrological Automatic, 2006, 3(1): 1-5. (in Chinese))
- [7] 王彦芳,王小平,宋万民,等.时差法超声波流量计的高精度测量技术[J].微计算机-测控自动化,2006,22(6):198-200.(WANG Y F, WANG X P, SONG W M, et al. High precision method of time difference ultrasonic flow meter measurement technology[J]. Micro Computer Letter - Measurement and Control Automation, 2006, 22(6): 198-200. (in Chinese))
- [8] 王慧.时差法超声波流量计数据处理方法的研究[D].大连:大连理工大学,2010.(WANG H. The method of time difference ultrasonic flow meter data processing method research[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [9] 张学庆.流量测量的意义及流量传感器的现状[J].石油化工自动化,2005(5):99-101.(ZHANG X Q. The significance of the

flow measurement and the current situation of the flow sensor [J]. Journal of Petrochemical Industry Automation, 2005(5): 99-101. (in Chinese))

- [10] 梁国伟,蔡武昌.流量测量技术及仪表[M].北京:机械工业出版社,2002.(LIANG G W, CAI W C. Flow measurement technology and instrument [M]. Beijing: China Machine Press, 2002. (in Chinese))
- [11] 阎明.高精度低功耗时差法超声波流量计的设计[D].大连:大连理工大学,2007.(YAN M. The design of high precision micro power consumption time difference method ultrasonic flow meter [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [12] 吴斌,赵刚,夏冰.浅谈超声波流量计的分类和实际应用[J].现代计量仪器与技术,2006(11):53-55.(WU B, ZHAO G, XIA B. Introduction to the classification of the ultrasonic flow meter and the actual application[J]. Modern Measurement Instruments and Techniques, 2006(11): 53-55. (in Chinese))
- [13] 兰纯纯.时差法超声波流量计的研究[D].重庆:重庆大学,2006年.(LAN C C. The study of the method of time difference ultrasonic flow meter [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006. (in Chinese))
- [14] 李广峰,刘防,高勇.时差法超声波流量计的研究[J].电测与仪表,2000(9):13-19.(LI G F, LIU FANG, GAO Y. The study of the method of time difference ultrasonic flow meter [J]. Electric Measurement and Instrument, 2000(9): 13-19. (in Chinese))
- [15] PARDO E, SAN EMETERIO J L, RODRIGUEZ M A, et al. Noise reduction in ultrasonic NDT using undecimated wavelet transforms[J]. Ultrasonics, 2006, (44): e1063-e1067.
- [16] VACLAV M, RADISLAV S, STANISLAV S, et al. Signal to noise ratio enhancement based on wavelet filtering in ultrasonic testing[J]. Ultrasonics, 2009, 49(8): 752-759.
- [17] GUILHERME C, JAFAR S. Adaptive thresholding technique for denoising ultrasonic signals[C]. IEEE Ultrasonics Symposium, 2005(1): 544-547.
- [18] LZARO J C, SANEMETERIO J L, RAMOS A, et al. Influence of thresholding procedures in ultrasonic grain noise reduction. using wavelets[J]. Ultrasonics, 2002, 40(1): 263-267.
- [19] LI W, QUE P W. Optimal scale wavelet transform for the identification of weak ultrasonics signals [J]. Measurement, 2009, (42): 164-169.
- [20] MANDARD E, KOUAME E, BATTALUT R, et al. Transit time ultrasonic flowmeter: velocity profile estimation [C]. 2005 IEEE International Ultrasonics Symposium. 2005: 763-766.
- [21] 周沛永,郑长陵.运河站水文站时差法流量测验效果分析[J].科技与生活,2012(6):99-100.(ZHOU P Y ZHENG C L. Canal hydrologic time difference method flow test stand effect analysis[J]. Science and Technology and Life, 2012. (6): 99-100. (in Chinese))
- [22] 谭德强.气体超声波流量计的应用与研究[J].仪器仪表标准化与计量,2013(4):34-35.(TAN D Q. Application and re-

- search of gas ultrasonic flow meter [J]. Instrumentation Standardization and Measurement, 2013 (4) : 34-35. (in Chinese)
- [23] 王茹. 超声波流量计和电磁流量计特点及区别比较分析[J]. 科技与企业, 2012 (15) : 357-357. (WANG R. Characteristics and differences of ultrasonic flow meters and electromagnetic flow meters[J]. Technology and Enterprises, 2012 (15) : 357-357. (in Chinese))
- [24] 邹蓬, 吕传玉, 李凤名. 时差法超声波流量计的原理和设计[J]. 建设科技, 2012 (4) : 88-89. (ZOU P, LYU C Y, LI F M. The principle and design of ultrasonic flowmeter of jet lag method[J]. Construction Technology, 2012 (4) : 88-89. (in Chinese))
- [25] 王梅. 便携式超声波流量计在循环水管道上的应用[J]. 数字技术与应用, 2012 (6) : 113-113. (WANG M. Application of portable ultrasonic flowmeter in circulating water pipeline [J]. Digital Technology and Application, 2012 (6) : 113-113. (in Chinese))
- [26] 李超. 超声波流量计在能源计量中的应用[J]. 江苏现代计量, 2013(11) : 31-33. (LI C. Application of ultrasonic flow meter in energy measurement[J]. Jiangsu Modern Metrology, 2013 (11) : 31-33. (in Chinese))
- [27] 李玉华. 超声波流量计和电磁流量计各自特点及区别比较[J]. 能源与节能, 2012 (9) : 94-96. (LI Y H. Characteristics and differences of ultrasonic flow meters and electromagnetic flow meters[J]. Energy and Energy Conservation, 2012 (9) : 94-96. (in Chinese))
- [28] 陈中华. 超声波流量测量技术在企业中的实践应用[J]. 广东科技, 2012, 21(9) : 126-127. (CHEN Z H. The practical application of ultrasonic flow measurement technology in enterprises[J]. Guangdong Science and Technology, 2012, 21 (9) : 126-127. (in Chinese))

(上接第 176 页)

- [16] 李文生, 李文, 尹尚先. 综采一次采全高顶板导水裂缝带发育高度研究[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(6) : 104-107. (LI W S, LI W, YIN S X. Study on development height of water flow crack zone in roof Above Fully Mechanized One Passing Full Seam Mining Face[J]. Coal Science & Technology, 2012, 40(6) : 104-107. (in Chinese) DOI: 0.13199/j.cst.012.6.109.iwsh.034.
- [17] 尹会永, 魏久传, Liliana Leticariu, 等. 下组煤露头区导水裂缝带高度综合确定[J]. 煤矿开采, 2015(3) : 89-92. (YIN H Y, WEI J C, Liliana, Leticariu, et al. Water conducting fissure zone height of outcrop area of lower group coal seam[J]. Coal Mining Technology, 2015 (3) : 89-92. (in Chinese) DOI: 10.13532/j.cnki.cn11-677/t.d.2015.03.026.
- [18] 徐海红, 乔皎, 王铮. 小庄矿井采煤对地下水的的影响及保水采煤措施[J]. 煤田地质与勘探, 2014 (6) : 64-67. (XU H H, QIAO J, WANG Z. The influence of underground coal mining on groundwater and measures for water conservation while mining in Xiaozhuang mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2014(6) : 64-67 (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2014.06.013.
- [19] 余学义, 刘樟荣, 赵兵朝, 等. 王家沟煤矿条带充填开采导水裂隙发育规律研究[J]. 煤炭工程, 2015(5) : 83-86. (YU X Y, LIU Z R, ZHAO B C. Research on law of water flowing fracture development due to strip filling mining in wangjiagou coal mine[J]. Coal Engineering, 2015 (5) : 83-86. (in Chinese) DOI: 10.11799/ce201505028.
- [20] 缪协兴, 王安, 孙亚军, 等. 干旱半干旱矿区水资源保护性采煤基础与应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2) : 217-227. (MIAO X X, WANG A, SUN Y J, et al. Research on basic theory of mining with water resources protection and its application to arid and semi-arid mining areas [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2009, 28(2) : 217-227. (in Chinese))
- [21] 李涛, 王苏健, 韩磊, 等. 生态脆弱矿区松散含水层下采煤保护层合理厚度[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1) : 98-105. (LI T, WANG S J, HAN L, et al. Reasonable thickness of protected loess under loose aquifer in ecologically fragile mining area, 2017, 42(1) : 98-105. (in Chinese)). DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.5016.
- [22] 朱万成, 魏晨慧, 张福壮, 等. 流固耦合模型用于陷落柱突水的数值模拟研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009 (5) : 928-933. (ZHU W C, WEI C H, ZHENG F Z, et al. Investigation of water inrush from karst subsidence column by using a coupled hydro mechanical model [J]. Chinese Journal of Underground Space & Engineering, 2009(5) : 928-933. (in Chinese))
- [23] LOUIS C. Rock Hydraulics[A]. In: Rock Mechanics[C]. ed. by LMuller, 1974.
- [24] 李地元, 李夕兵, 张伟, 等. 基于流固耦合理论的连拱隧道围岩稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5) : 1056-1064. (LI D Y, LI X B, ZHANG W, et al. stability analysis of surrounding rock of multi-arch tunnel based on coupled fluid solid theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2007. 2007, 26(5) : 1056-1064. (in Chinese))
- [25] RUTQVIST J, TSANG C F. A study of cap rock hydro-mechanical changes associated with CO₂ injection into a brine formation [J]. Environmental Geology, 2002, 42: 296-305. DOI: 10.1007/s00254-001-0499-2.