

时差法超声波流量检测三步互相关算法研究

柏思忠 张加易

(中煤科工集团重庆研究院有限公司 重庆 400039)

摘要: 对时差法超声波流量检测中互相关算法计算量大的问题进行了研究,指出了减少计算量的3个方面——参与运算的数据容量、每次相关运算乘加次数和相关运算的累计次数,提出了一种采用预处理、粗相关和精相关三步相关算法,将计算量减少3~5个数量级;并以 λ 型超声波流量检测方法中的三步互相关算法为例,将整体运算时间控制在ms级,达到了实时性要求,为Z型、V型等时差法超声波流量检测的互相关算法大幅度减少计算量提供了一种有效的解决方案。

关键词: 超声波; 流量计; 三步互相关; 粗相关; 精相关; 先验波形

中图分类号: TH814.92

文献标志码: A

文章编号: 1003-0506(2016)08-0042-04

Study on three-step cross-correlation algorithm for ultrasonic flow detection by time-difference method

Bai Sizhong Zhang Jiayi

(China Coal Technology Engineering Group Chongqing Research Institute, Chongqing 400039, China)

Abstract: Based on the analysis of the problem of computing a large amount about cross-correlation algorithm for ultrasonic flow detection by time-difference method, the authors pointed out the three aspects of reducing the amount of calculation, firstly operation data quantity, secondly multiply-add operation quantity of each correlation operation, and lastly correlation operation quantity. A three-step cross-correlation algorithm was proposed, which is based on preprocessing, rough correlation and fine correlation. It can decrease the calculation quantity by 3~5 orders of magnitude; λ type ultrasonic flow detection method was also applied as an example, the overall computation time was controlled in ms level, which has met the real-time requirement. Finally, it has provided an effective solution to greatly reduce computation of cross-correlation algorithm for Z type, V type time-difference method of ultrasonic flow detection.

Keywords: ultrasonic; flowmeter; three-step cross-correlation; rough correlation; fine correlation; transcendental waveform

0 引言

超声波信号的传播时间是时差法超声波检测仪进行流量推算的关键参数。超声波接收信号的检测方法在时域分析中,使用最广泛的检测方法是动态阈值检测法、包络线检测法和最大互相关检测法等。其中最大互相关检测法是利用随机信号的相似性来检测流体流量的方法,虽然信号在传输过程中会发生畸变,但只要信号还保持原来的相似性,时差测量精度就不会改变,具有更大的实用性,但是互相关计算量大^[1-5],对采样频率和设备计算速度的要求较

高。在超声波测距文献^[6-7]中用到的分步相关法可以减少计算量,但是还存在2个问题:①多周期驱动影响流量检测时近距离接收信号识别;②计算量减少得不够,流量检测需完成顺流和逆流两次互相关运算,实时性难以保证。在超声波流量检测文献^[8-9]中,采用数字极性相关法来降低运算的复杂程度,但是超声波接收信号的振荡特性影响数字极性化最大互相关值计算的准确性。针对最大互相关算法计算量大的问题进行研究和分析,采用预处理、粗相关和精相关三步互相关算法大幅度减少了计算量。

收稿日期: 2016-06-24; 责任编辑: 秦爱新 DOI: 10.19389/j.cnki.1003-0506.2016.08.010

基金项目: 国家“十二五”科技支撑项目(2014BAC17B00 CQ1503)

作者简介: 柏思忠(1978—),男,四川阆中人,助理研究员,硕士,2007年毕业于重庆大学,研究方向为瓦斯抽放流量计量和监测监控。

引用格式: 柏思忠,张加易.时差法超声波流量检测三步互相关算法研究[J].中州煤炭,2016(8):42-45,51.

Bai Sizhong, Zhang Jiayi. Study on three-step cross-correlation algorithm for ultrasonic flow detection by time-difference method[J]. Zhongzhou Coal, 2016(8): 42-45, 51.

1 互相关算法分析

设发送信号函数为时限信号 $V_E = A_E f(t)$ ($0 < t \leq t_0$) $f(t) = 0$ ($t < 0$ 或 $t > t_0$)。对应接收信号为信号幅度和相位均发生变化,时间上有一定延时的时限信号 $V_R = A_R f(t - t_d)$ ($t_d < t \leq t_0 + t_d$) A_E, A_R 均为信号幅值。设2个不同路径的接收信号时间相差 τ , 考虑相同环境,叠加的噪声信号一致,噪声信号均为 $n(t)$ 2个接收端的信号分别为 $g_1(t) = A_{R1} f(t - t_{d1}) + n(t)$ 和 $g_2(t) = A_{R2} f(t - t_{d2}) + n(t)$, 所以 $g_1(t)$ 与 $g_2(t)$ 进行互相关运算见式(1):

$$R_{12}(\tau) = g_1(t) \otimes g_2(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} g_1(t) g_2(t - \tau) dt$$

$$= \int_{t_0}^{t_0+t_{d1}+t_{d2}} [A_{R1} f(t - t_{d1}) + n(t)] [A_{R2} f(t - t_{d2} - \tau) + n(t - \tau)] dt \quad (1)$$

因噪声信号 $n(t)$ 与 $f(t)$ 不相关,积分后为0,噪声 $n(t)$ 的自相关函数只有在为0的时候有值,其他时候为0。假设 $t_{d2} > t_{d1}$, 则得到式(2):

$$R_{12}(\tau) = A_{R1} A_{R2} \int_{t_0}^{t_0+t_{d2}} [f(t - t_{d1})] [f(t - t_{d2} - \tau)] dt \quad (2)$$

互相关函数 $R_{12}(\tau)$ 的最大值对应的2个数列下标差值乘以采样速率就是 t_{d2} 和 t_{d1} 的时间差,即2个接收波形分别到达2个接收端的时间差。其中 A_{R1}, A_{R2} 为信号幅值, t_{d1}, t_{d2} 为接收信号相对发射信号的延时。

在实际工程应用中,对接收信号采样离散化^[10-11],假设 M 是 (t_{d1}, t_{d2}) 离散点数 (n_{d1}, n_{d2}) 中的较大值,式(2)变为离散卷积和得到式(3),每个取值 n 对应需要 M 次乘加运算,按照 M 个取值计算,整体计算量为 M^2 ;假设每个采样数据为8位数据(1 Byte),最大采样数据容量 $M = 10^5$ Bytes,整体计算量为 10^{10} ,处理器按照单周期乘加运算、50 MIPS 的性能计算,花费时间需要200 s以上,完全无法满足实时性的要求。这就要求大大减少计算量,整体计算量包括3个方面:①参与运算的最大数据容量 M ;②每次相关运算乘加次数;③相关运算的累计次数即 n 的取值范围。所以应对这3个方面进行分析和研究,大幅度减少计算量。

$$R_{12}(n) = A_{R1} A_{R2} \sum_{k=0}^M r(k - n_{d1} - n) r(k - n_{d2}) \quad (3)$$

2 分步互相关算法

分步互相关算法采用预处理^[12]、粗相关和精相关三步实现减少互相关计算量如图1所示(以两列接收波形、大于8位的AD为例)。

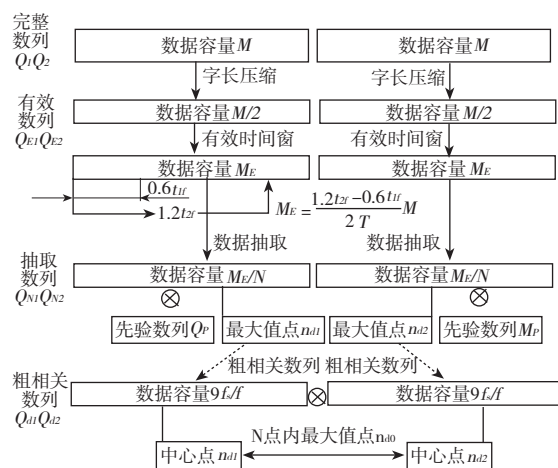


图1 三步互相关算法示意

Fig. 1 Three-step cross-correlation

① 预处理。数据字长压缩减少数据位数,然后利用有效时间窗^[13]截取有效时间范围内的数列,减少参与运算的最大数据容量 M ,得到有效数列 Q_{E1} 和 Q_{E2} 。② 粗相关。对①预处理完的数列按抽取比为 N 进行抽取得到数列 Q_{N1} 和 Q_{N2} ,利用 l (7~9) 个周期先验接收波形数列 Q_P 对抽取后的数列进行互相关运算,得到最大互相关值对应点 n_{d1} 和 n_{d2} ,大幅度减少每个 n 值对应乘加运算次数。③ 精相关。针对②中得到的最大相关值,在完整的采样数列中,分别以 n_{d1} 和 n_{d2} 为中心、9个周期数据(采样频率与信号频率比值 f_s/f) 容量、相关值 $n \in [n_{d1} - N/2, n_{d1} + N/2]$ 范围内进行最大互相关计算,得到所有采样数据的最大互相关值对应点 n_{d0} ,减小相关值 n 的取值范围。从参与运算的最大数据容量 M 、每个 n 值对应乘加运算次数和 n 的取值范围3个方面大幅度减少。

2.1 预处理

预处理主要采用字长压缩和有效时间窗的方法减少参与运算的数据容量。超声波气体流量检测时采样速率通常是超声波信号频率的50倍以上的采样速率来保证测量精度,采用高精度AD采样保证幅度准确性,满足最大量程保证时间完整性得到的

完整采样数列 Q_1 和 Q_2 数据容量均为 M 。首先针对 AD 采样数据位数进行字长压缩,减少到 8 位(每个点 1 Byte) 根据最大值情况去掉最高位或最低位保留最大值最高位为 1,其他值采用相同处理方式全部处理为 8 位 相对于 10/12/14/16 位 AD 数据容量 M 可减少一半;然后根据预设管径 ϕ 和安装角度 θ 估算超声波行程 l_f 、顺流传播的最小时间 t_{1f} 和逆流传播的最大时间 t_{2f} ,完整的采样数据时间 T 从超声波发射开始 到最大量程对应时间截止 实际有效时间按照 $0.6t_{1f}$ 开始到 $1.2t_{2f}$ 截止 实际有效时间窗为 $[0.6t_{1f}, 1.2t_{2f}]$,可以大大减少数据容量 M 。例如超声波收发频率采用 200 kHz,10 位 AD 采样(每个点 2 Bytes) 采样速率 20 MSPS,流量计最大量程对应行程 1 m,空气中超声波速度按照 340 m/s 计算,实际管径 DN100 mm,超声波换能器安装角度 $\theta = 30^\circ$,最大流速 60 m/s,完整的采样数据容量 $M = 117\ 647$ Bytes $t_{1f} = 0.5 \times 10^{-3}$ s $t_{2f} = 0.714 \times 10^{-3}$ s,完整的采样数列 Q 经过有效时间窗处理后,采用字长压缩每个点数据 2 Bytes 变为 1 Byte,有效数列 Q_E 数据容量 $M_E = 11\ 143$ Bytes,数据容量 M_E 减少为 $M/10$ 。当然,减少量不是一个定值,管径越大有效时间窗越大,能够减少的数据越少。

2.2 粗相关

粗相关是对预处理完的有效数列 Q_E ,按抽取比为 N 进行抽取得到数列 Q_N ,利用 l 个周期先验接收波形数据对数列 Q_N 进行互相关运算,得到粗略的最大互相关值对应点 n_d ,大幅度减少每个 n 值对应乘加运算次数。

(1) 进行粗相关计算时只需要按照工程应用的一般要求,对信号采样保持正弦信号的完整特性宜采用 5 ~ 10 倍的信号速率,可以对有效数列 Q_E 采用抽取比 N (一般取值为 10 ~ 100) 减少采样数据得到数列 Q_N 。

(2) 超声波接收波形如图 2 所示,应用小波分析^[14]中放大变化细节的思想,生成先验波形如图 3 所示,将检测目标最大波峰保持不变,加大其他峰值的衰减速度,进行互相关运算时最大互相关值更加凸显。正常接收波形在 7 ~ 9 个周期时幅度会有明显变化^[15],先验波形采用 l (通常取 7 ~ 9,假设为 9) 个周期,采样速率为信号频率的 10 倍($10f$),先验波形对应数列 Q_p 的数据容量 $M_p = 90$ Bytes。

(3) 利用先验波形数列 Q_p 和抽取数列进行 Q_N 最大互相关运算,每次运算最大点数为 M_p ,得到最

大互相关值对应点 n_d 的计算量为 $M_d = M_p \times M_E/N$ 。

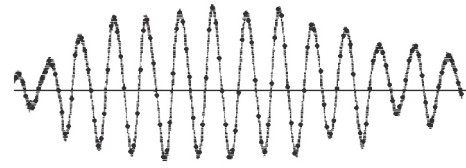


图2 超声波接收波形

Fig. 2 Ultrasonic receiving wave

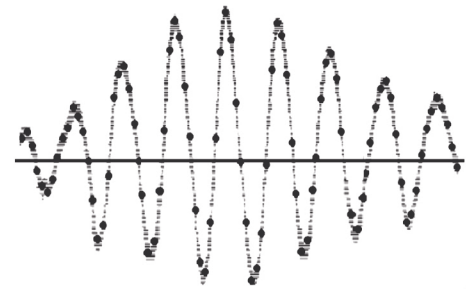


图3 先验波形

Fig. 3 Transcendental waveform

2.3 细相关

对粗相关计算结果,结合采样波形分析,由于采用了抽取比 N ,有效采样数列 Q_E 的最大互相关值可能前移或者后移 $N/2$ 个采样点如图 4 所示:

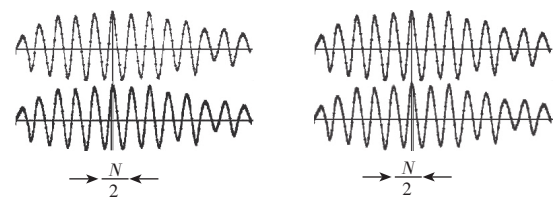


图4 抽取数列 Q_N 最大互相关值偏移示意

Fig. 4 Maximum mutual off value of Q_N

所以需要对粗相关的结果 n_d 在有效采样数列中进一步进行互相关计算,以 n_d 为中心,7 ~ 9 个周期数据容量(这里取 $9f_s/f$),相关值 $n \in [n_{d1} - N/2, n_{d1} + N/2]$ 范围内进行最大互相关计算,如式(4)所示,得到完整采样数据的最大互相关值对应点 n_{d0} ,计算量为 $9Nf_s/f$ 。

$$R_{12}(n) = A_{R1}A_{R2} \sum_{k=0}^{9f_s/f} r(k - n_{d1} - n) r(k - n_{d2}) \quad (4)$$

3 应用验证

分步相关算法在 λ 型互相关时差法超声波流量检测^[16]实际应用中,超声波收发信号 $f = 200$

kHz,最大时间 $T = 1 \text{ ms}$,采样速率 $f_s = 50 \text{ MSPS}$,10位AD数据,数据存储容量 $M = 10^5 \text{ Bytes}$,管径为100 mm,安装角度为 30° ,流速范围 $v \in [0.1, 60] \text{ m/s}$,空气中超声波传播速度按 $v_c = 340 \text{ m/s}$ 计算。不采用分步相关法直接计算,计算量为 10^{10} 。采用三步分步相关法:①采用字长压缩和有效时间窗减少参与运算的数据量, $M_E = \frac{1.2t_{2f} - 0.6t_{1f}}{2T} = 11 \ 143$

Bytes,计算量为所有数据移位实现字长压缩,每字节一次运算需要 $M_E = 11 \ 143 \text{ Bytes}$;②采用数列抽取结合先验数列进行粗相关计算,抽取比 $N = \frac{f_s}{10f} =$

25,抽取序列 Q_N 的数据容量为 $M_N = \frac{M_E}{N} = 446$

Bytes,先验数列数据容量 $M_p = 90 \text{ Bytes}$,两个接收波形数列计算量为 $2M_N \times M_p = 80 \ 280 \text{ Bytes}$;③精相关得到最大互相关值对应点 n_{d0} ,计算量为 $9Nf_s/f = 56 \ 250 \text{ Bytes}$ 。所有步骤计算量合计为 $M_E + M_N + 2M_N \times M_p = 147 \ 673 \text{ Bytes}$ 和直接计算相比,计算量减少到约 $1/70 \ 000$,按照 50 MIPS 的CPU计算性能,单周期乘加计算,单次计算时间仅需要 0.03 s ,完全能够满足实时性要求,实际应用中CPLD配合AD完成数据采样和预处理,用Cortex-M3的ARM内核完成粗相关和精相关运算,完成单次所有运算和数据传输共耗费时间约 0.2 s 。

4 结语

本文分析了超声波流量检测互相关算法计算量大的问题,主要从参与运算的数据容量 M 、每次相关运算乘加次数和相关运算的累计次数3个方面减少计算量,提出了一种采用预处理、粗相关和精相关三步相关算法。采用分步相关算法,在 λ 型互相关时差法超声波流量检测应用中,将互相关算法的计算量减少4~5个数量级,约 0.2 s 就能完成一次流量检测,达到了实时性要求。三步互相关算法还可广泛应用到Z型时差法、V型时差法等其他时差法超声波流量检测互相关检测算法中,大幅度减少计算量,使互相关检测达到实时性要求,在实际中得到广泛应用。

参考文献(References):

[1] 陈建,孙晓颖,林琳,等.基于单周期互相关滤波的超声波TOF检测方法[J].仪器仪表学报,2014,35(3):664-670.

Chen Jian, Sun Xiaoying, Lin Lin, et al. Accurate ultrasonic TOF measurement method based on monocycle cross-correlation filtering [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(3): 664-670.

- [2] 沈子文,徐科军,方敏,等.基于能量变化率的气体超声波流量计信号处理方法[J].仪器仪表学报,2015,36(9):2138-2144.
Shen Ziwen, Xu Kejun, Fang Min, et al. Rate of energy based signal processing method for ultrasonic gas flowmeter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(9): 2138-2144.
- [3] 贾佳,谷立臣.基于超声流量计的包络互相关时延理论及仿真[J].自动化仪表,2012,33(7):53-55.
Jia Jia, Gu Lichen. Envelope correlation delay theory and simulation for ultrasonic flowmeter [J]. Process Automation Instrumentation, 2012, 33(7): 53-55.
- [4] 汪伟,徐科军,方敏,等.一种气体超声波流量计信号处理方法研究[J].电子测量与仪器学报,2015,29(9):1365-1373.
Wang Wei, Xu Kejun, Fang Min, et al. Study of a signal processing method for gas ultrasonic flowmeter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(9): 1365-1373.
- [5] 王飞.数字式时差法超声流量计的设计与实现[D].北京:中国科学院大学,2014.
- [6] 潘中明,简盈,王跃科.基于两步相关法的大量程超声波测距技术[J].电子测量与仪器学报,2006,20(5):73-78.
Pan Zhongming, Jian Ying, Wang Yueke. Ultrasonic distance measurement with large sensing range by two step correlation algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2006, 20(5): 73-78.
- [7] 葛万成,吴凤萍.两步相关法高抗干扰超声波距离测量技术的研究[J].仪器仪表学报,2002,23(3):253-258.
Ge Wancheng, Wu Fengping. Research on the robust ultrasonic distance measurements based on two step correlation approaches [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002, 23(3): 253-258.
- [8] 陆敏恂,朱列铭,周爱国.超声波流量计中相关时差法的应用[J].仪表技术与传感器,2011(12):13-19.
Lu Minxun, Zhu Lieming, Zhou Aiguo. Application of time-different algorithm based on cross correlation theory in ultrasonic flowmeter [J]. Instrument Technique and Sensor, 2011(12): 13-19.
- [9] 李跃忠.多声道超声波气体流量测量关键技术研究[D].武汉:华中科技大学,2009.
- [10] 王益艳.离散序列线性卷积和循环卷积的关系[J].四川文理学院学报,2015,25(5):32-35.
Wang Yiyang. The relation between discrete linear convolution and circular convolution [J]. Sichuan University of Arts and Science Journal, 2015, 25(5): 32-35.
- [11] 汪洋.相关法超声流量计设计及实验测试研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2013.
- [12] 王雪峰.基于时差法气体超声波流量计的关键技术研究[D].大连:大连理工大学,2011.

(下转第51页)

降低煤壁的瓦斯涌出量。

参考文献(References):

- [1] 梁冰,刘蓓南,孙维吉,等.掘进工作面瓦斯流动数值模拟分析[J].中国地质灾害与防治学报,2011,22(4):47-52.
Liang Bing,Liu Jí'nan,Sun Weiji,et al. Numerical simulation of flowing gas on heading face during coal mining[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2011,22(4):47-52.
- [2] 高建良,侯三中.掘进工作面动态瓦斯压力分布及涌出规律研究[J].煤炭学报,2007,32(11):1127-1131.
Gao Jianliang,Hou Sanzhong. Dynamic distribution of gas pressure and emission around a diving roadway[J]. Journal of China Coal Society,2007,32(11):1127-1131.
- [3] 夏永军,武文宾.不同掘进工艺煤巷瓦斯渗流演化对突出发动的作用分析[J].煤炭学报,2010(S1):91-94.
Xia Yongjun,Wu Wenbin. Evolution of gas seepage field and the function analysis for the outburst launch in different digging process[J]. Journal of China Coal Society,2010(S1):91-94.
- [4] 盛金昌,刘继山,赵坚.基于图像数字化技术的裂隙岩体非稳态渗流分析[J].岩石力学与工程学报,2006,25(7):1402-1407.
Sheng Jinchang,Liu Jishan,Zhao Jian. Analysis of transient fluid flow in fractured rock masses with digital image-based method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006,25(7):1402-1407.
- [5] 王宏图,江记记,王再清,等.本煤层单一顺层瓦斯抽采钻孔的渗流场数值模拟[J].重庆大学学报,2011,34(4):24-29.
Wang Hongtu,Jiang Jiji,Wang Zaiqing,et al. Numerical simulation of seepage field of gas extraction drilling of single bedding of mining coal bed[J]. Journal of Chongqing University,2011,34(4):24-29.
- [6] 司鸽,郭涛,李晓红.钻孔抽放瓦斯流固耦合分析及数值模拟[J].重庆大学学报,2011,34(11):105-110.
Si Hu,Guo Tao,Li Xiaohong. Analysis and numerical simulation of fluid-structure coupling of gas drainage from boreholes[J]. Journal of Chongqing University,2011,34(11):105-110.
- [7] 李东印,许灿荣,熊祖强.采煤工作面瓦斯流动模型及 COM-SOL 数值解算[J].煤炭学报,2012,37(6):967-971.
Li Dongyin,Xu Canrong,Xiong Zuqiang. Gas flowing model of mining face and solve it using COMSOL[J]. Journal of China Coal Society,2012,37(6):967-971.
- [8] 刘清泉,程远平,王海峰,等.顺层钻孔有效瓦斯抽采半径数值解算方法研究[J].煤矿开采,2012,17(2):4-8.
Liu Qingquan,Cheng Yuanping,Wang Haifeng,et al. Numerical resolving of effective methane drainage radius in drill hole along seam[J]. Coal Mining Technology,2012,17(2):4-8.
- [9] 刘军,孙东玲,林府进,等.含瓦斯煤固气耦合动力学模型及其应用研究[J].中国矿业,2013,22(11):126-130.
Liu Jun,Sun Dongling,Lin Fujin,et al. Solid-gas coupling dynamics model and applied research of coal containing gas[J]. China Mining Magazine,2013,22(11):126-130.
- [10] 刘清泉,程远平,李伟,等.深部低透气性首采层煤与瓦斯气固耦合模型[J].岩石力学与工程学报,2015,34(Sup1):2749-2758.
Liu Qingquan,Cheng Yuanping,Li Wei,et al. Mathematical model of coupled gas flow and coal deformation process in low-permeability and first mined coal seam[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(S1):2749-2758.
- [11] 梁冰,袁欣鹏,孙维吉.本煤层瓦斯抽采渗流模型及数值模拟[J].安全与环境学报,2015,15(5):95-99.
Liang Bing,Yuan Xinpeng,Sun Weiji. Seepage model and numerical simulation of in-seam gas extraction[J]. Journal of Safety and Environment,2015,15(5):95-99.
- [12] 胡国忠,王宏图,范晓刚,等.低渗透突出煤的瓦斯渗流规律研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(12):2527-2534.
Hu Guozhong,Wang Hongtu,Fan Xiaogang,et al. Investigation on law of methane gas flow in coal with coal-gas outburst hazard and low permeability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(12):2527-2534.
- [13] 周世宁,林柏泉.煤层瓦斯赋存与流动理论[M].北京:煤炭工业出版社,1990.
- [14] 杨其奎,王佑安.煤屑瓦斯扩散理论及其应用[J].煤炭学报,1986(3):87-93.
Yang Qiluan,Wang Youan. Coal gas diffusion theory and its application[J]. Journal of China Coal Society,1986(3):87-93.
- [15] 陶云奇,许江,程明俊.含瓦斯煤渗透率理论分析与试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(Sup2):3363-3370.
Tao Yunqi,Xu Jiang,Cheng Mingjun. Theoretical analysis and experimental study on permeability of gas-bearing coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(S2):3363-3370.

(上接第45页)

- [13] 苏满红,吴志敏,叶玮渊.一种时差式超声波流量计及其简化算法[J].现代电子技术,2009(4):53-55.
Su Manhong,Wu Zhimin,Ye Weiyuan. Time difference ultrasonic flowmeter and its simple arithmetic[J]. Modern Electronics Technique,2009(4):53-55.
- [14] 林春丽,丁然,王克成.小波分析在超声波流量计中的应用[J].中南工业大学学报:自然科学版,2003,34(2):218-220.
Lin Chunli,Ding Ran,Wang Kecheng. Application of wavelet analysis in ultrasonic flowmeter[J]. Journal of Central South University: Science and Technology,2003,34(2):218-220.
- [15] 陈建,孙晓颖,林琳,等.一种高精度超声波到达时刻的检测方法[J].仪器仪表学报,2012,33(11):2422-2428.
Chen Jian,Sun Xiaoying,Lin Lin,et al. Method to precisely measure arrival time of ultrasonic[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2012,33(11):2422-2428.
- [16] 柏思忠.一种λ型互相关时差法超声波流量检测方法[J].自动化仪表,2016,37(2):82-85.
Bai Sizhong. Ultrasonic flow detection using lambda type cross-correlation time difference method[J]. Process Automation Instrumentation,2016,37(2):82-85.