Vol. 43, No. 6 November, 2024

◊ 研究报告 ◊

基于回声感知技术的介质温度监测*

余思琦 张世平 沈国清

(华北电力大学能源动力与机械工程学院 北京 102206)

摘要: 声学温度感知技术具有测温范围广、精度高、速度快等特点,在空冷系统和仓储室测温领域应用前景广阔。针对空冷系统和仓储室现有测温技术的问题,该文研究了回声法测温的可行性及稳定性,利用改进后的互相关法测得时延估计,进一步计算得到介质温度。分别用扫频脉冲信号和高斯脉冲信号作为激励声源信号进行仿真,得到高斯脉冲信号测温效果更好。在常温下进行大空间回声测温实验,并在管道内进行不同温度下的回声测温实验。结果表明,上述工况均能得到准确稳定的待测温度,最大绝对误差为 ± 0.85 °C,有望应用在空冷系统测温和粮温测量中。

关键词:回声感知技术;声学测温;空冷系统;仓储室

中图法分类号: TK31 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2024)06-1397-09

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2024.06.024

The medium temperature monitoring based on echo sensing technology

YU Siqi ZHANG Shiping SHEN Guoqing

(School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Acoustic temperature sensing technology has a wide range of temperature measurement, high precision, speed and other characteristics. It has a very broad application prospect in the air cooling system and storage room temperature measurement field. Aiming at the problems of the existing temperature measurement technology in air-cooling system and storage room, this paper investigates the feasibility and stability of the echo method for temperature measurement. The time delay estimation is measured by using the improved mutual shut-off method in order to calculate the medium temperature. The swept pulse signal and the Gaussian pulse signal are used as incentive signals in the simulation, and the Gaussian pulse signal was obtained to be more effective in temperature measurement. The large space echo temperature measurement experiment at normal temperature and the echo temperature measurement experiment at different temperatures in the pipeline all prove that they can measure accurate and stable temperature, and the maximum absolute error of ± 0.85 °C. So, the above results are expected to be applied in air cooling system temperature measurement and grain temperature measurement.

Keywords: Echo-sensing technique measurement; Acoustic temperature measurement; Air cooling system; Storage room

0 引言

声学温度感知作为一种非接触式的无损测温 方法,不会对原温度场产生较大的影响,因此相互作 用带来的测温误差较小,温度场还原的准确性也较 高。此外,声学温度感知探头的抗震性和防尘性能 也较好,具有测温范围广、精度高、速度快的特点,在 空冷系统和仓储室测温领域有广阔的前景[1]。

我国以火力发电为主,空冷系统作为火力发电系统中不可或缺的组成部分,其能否正常运行是关键。直接空冷系统在冬季低温情况下容易出现冻结现象,导致机组不能正常运行甚至停机,因此,要加强对系统空气侧温度的监测。由于空冷系统规模庞大,热电偶、热电阻测温、电缆测温^[2]、无线通信测温^[3]等这些接触式测温技术在空冷系统现场安装困难、成本较高,且会对原有温度场产生干扰,无法实现对空冷系统的整体测温。

在粮仓中,储粮温度是判断储粮状态的重要标准^[4]。接触式粮温测量技术如液体温度计、热电偶温度计^[5]、热敏电阻^[6]、数字式温度传感器^[7]、光纤和光栅测温技术^[8]等测温范围小,且对原有温度场会产生影响。非接触式红外线测温法通过测量物体表面的红外线来间接测量温度^[9],受到粮食表面灰尘的影响,只能作为粮温测量的辅助手段^[10];声层析成像法^[11]和声表面波法^[12]均处于粮温测量的实验研究阶段,且设备布置复杂、成本较高。此外,粮仓存在测温设备的噪声、粮仓结构层的各种反射波、人为因素的干扰和其他噪声^[13],极大程度上影响了声学温度感知的准确性。

针对上述应用领域中测温技术上的不足,本文研究了回声感知测温技术。该技术精简了现有声学测温法的设备,提高了设备布置的灵活性和系统的经济性。此外,利用管道回声感知技术能测量粮仓内部温度,且具有良好的抗噪性能。回声感知测温技术的关键在于声源信号的选取和时延估计的准确性^[14],因此,本文基于回声法测温法,研究了扫频脉冲信号和高斯脉冲信号测温的准确性与稳定性,对此进行实验验证。所得结论对回声测温法应用在空冷系统测温和粮仓测温中有一定的参考意义。

1 介质温度回声感知技术原理

当声波在介质中传播时,遇到反射壁面会出现 反射现象,产生回波。假设声波在某一介质中传播 的速度为c(m/s),路径长度为L(m),经过反射后回到声源处,声波传播的总路径长度为2L。若声波在这一传播路径上的飞渡时间G(s),那么声速就可表示为

$$c = 2L/G. (1)$$

从本质上来说,声速是介质中微弱压强的扰动, 其表达式为

$$c = \sqrt{\left(\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}\rho}\right)},\tag{2}$$

式 (2) 中, P(Pa) 为介质压强, $\rho(kg/m^3)$ 为介质密度。 声波传播过程可看作绝热过程, 依照克拉伯龙 方程得声速与气体温度的关系式如下:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma R}{M}}T = Z\sqrt{T}, \tag{3}$$

式(3)中, γ 为气体的绝热状态指数,即比热容比,P(Pa)和T(K)为气体的压强和绝对温度,M(kg/mol)为气体摩尔量, $R(J/mol\cdot K)$ 为气体常数,Z就待测气体而言是一个常数。

因此,回声测温的表达式为

$$T = \left(\frac{c}{Z}\right)^2 = \left(\frac{2L}{ZG}\right)^2 = \frac{M}{\gamma R} \left(\frac{2L}{G}\right)^2. \tag{4}$$

由式(4)得到,当传声介质的比热比变化非常小时,利用回声可以得到介质中的声速与介质温度确定的函数关系,这就是介质温度回声感知技术的基本原理。

2 回声感知时间延迟估计方法

2.1 回声法互相关时延估计

以单路径回声法测温为研究对象,利用互相关算法计算激励信号与回波信号之间的时延值,其示意图见图1。基本思想是先把激励信号从传感器接收到的信号中分离出来,将激励信号以采样间隔沿着时间轴向后平移,然后将平移的信号与接收信号进行互相关运算,从而得到二者随采样时间变化的互相关函数关系^[15]。当相关系数达到最大值时的激励信号所对应的平移量就是其与回波信号之间的时延估计值。

假设平移信号 $x_i(t)$ 、传感器接收信号y(t)均包含纯净信号X(t)、Y(t)和噪声信号 $n_1(t)$ 、 $n_2(t)$,其表达式为

$$x_i(t) = X(t) + n_1(t),$$
 (5)

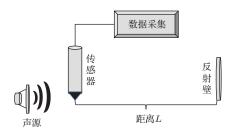


图1 回声法时延估计模型

Fig. 1 Echo method time-delay estimation model

$$y(t) = Y(t) + n_2(t),$$
 (6)

则 $x_i(t)$ 、y(t)两个信号的互相关函数表达式为

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t-\tau) dt$$

$$= \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t)Y(t-\tau) dt$$

$$+ \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t)n_2(t-\tau) dt$$

$$+ \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_0^T n_1(t)n_2(t-\tau) dt$$

$$+ \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_0^T n_1(t)Y(t-\tau) dt.$$
 (7)

若加性噪声信号是理想的高斯白噪声信号,那么信号与噪声、噪声与噪声之间互不相关,则式 (7) 中仅第一项 X(t) 和 Y(t) 的互相关函数存在非零项的结果,其离散相关函数表达式为

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x(i\Delta t) y(i\Delta t - \tau), \qquad (8)$$

其中,au 为时间延迟, Δt 为采样间隔,N 为采样点数。

将信号 $x_i(t)$ 沿采样间隔向后平移,每平移一个单位得到一个最大互相关系数,当 $\tau = D$ 时,取得最大互相关系数中的最大值,利用采集卡得到的峰值d为时延估计的点数,d除以采样频率之后所得即为时延估计D。

假设两个离散信号偏移1点数为 Δn ,由采样率 f_s 可得信号时延为

$$\tau_n = \frac{\Delta n}{f_s}.\tag{9}$$

当声线长度为 N_l 、温度为T时,由式(4)可得,时延可表示为

$$\tau_n = \frac{2N_l}{Z\sqrt{T}}. (10)$$

当温度变化 Δn 时, 气体温度变化为 $T+\Delta T$, 则时延为

$$\tau_{n+1} = \frac{2N_{l}}{Z\sqrt{T + \Delta T}}. (11)$$

可知,当温度变化 $\Delta T(\Delta T>0)$ 时,声波飞渡时间变化为 $\Delta \tau$,其中 $\Delta \tau$ 为采样率 f_s 的倒数。因此,采样率可表示为

$$f_s = \frac{1}{\Delta \tau} = \frac{1}{\tau_n - \tau_{n+1}} = \frac{Z\sqrt{(T + \Delta T)}}{2N_l\sqrt{T} + \Delta T} - 2N_l\sqrt{T}.$$
(12)

由式(12)可知,采集信号的采样率取决于采声线长度、气体温度和温度分辨率,在实际工程应用中,声线长度已经确定,因此采样率的确定只需要考虑实际温度和温度分辨率。

2.2 改进后的互相关时延估计

2.1节所述互相关法需要将分离出来的激励信号不断沿着时间轴向后平移,与接收信号做互相关计算,相当于多次循环计算互相关系数的最大值。该方法(后述简称循环互相关法)计算量大,运行时间较长。因此,本文提出一种改进后的回声测时延的方法:分离出激励信号 x(t),将其与传感器接收到的剩余信号 y(t) 进行一次互相关计算,其互相关函数表达式为

$$R_{xy}(\tau) = E\left[x(t)y(t+\tau)\right]. \tag{13}$$

当 $\tau = D$ 时,相关系数达到最大值,此时相关函数所对应的点数就是时延值。与循环互相关法相比,本文所用的方法只需要进行一次互相关计算,极大地减少了计算量和运行时间。

仿真以中心频率为1200 Hz、脉宽为50%、脉冲周期为5 ms的高斯脉冲信号为激励信号,设定时延估计值为1200,信噪比为-12 dB,在确定的采样频率和采样长度下分别用循环互相关算法和一次互相关算法进行时延估计,并计算两种算法的绝对误差与相对误差,如此运算50次后,计算各均方根误差和平均相对误差。用上述方法分别在采样频率为25.6 kHz、38.4 kHz、51.2 kHz、64.0 kHz和102.4 kHz的条件下进行时延估计,结果如表1所示。由表1可得,两种算法的时延估计误差均随着采样频率的增加而减小,且一次互相关算法的误差均小于循环互相关算法的误差。图2~3是采样频率为102.4 kHz时的时延估计与相对误差图。由图2可见,改进后的互相关法计算得到的时延估计值为

1200±5,而循环互相关法的波动值能达到 –50;由图3可见,改进后的互相关法计算时延,相对误差平均在0.5%以内;而循环互相关法在相同工况下,相对误差高达13%。进一步计算平均相对误差,改进后的互相关法平均误差仅为0.17%;而循环互相关法为3.3%。

表 1 不同采样频率下两种算法的时延估计误差 Table 1 Time delay estimation error of the two algorithms at different sampling frequencies

采样	循环互相关算法		一次互相关算法	
频率/kHz	均方根	平均相对	均方根	平均相对
	误差	误差/%	误差	误差/%
25.6	197.21	4.95	4.27	0.34
38.4	103.09	3.40	3.06	0.22
51.2	80.92	3.65	2.84	0.21
64.0	67.52	3.43	2.79	0.20
102.4	66.20	3.30	2.59	0.17

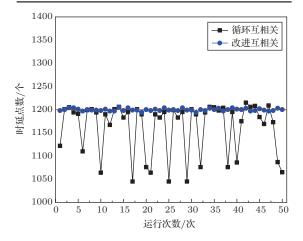


图 2 时延估计结果图

Fig. 2 Delay estimation result graph

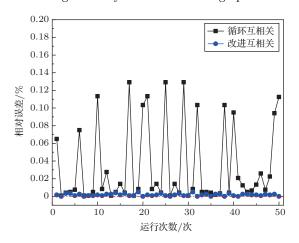


图 3 相对误差对比图

Fig. 3 Relative error comparison graph

综上所述,经改进后的互相关法优于循环互相 关法,不仅运算量少,而且能更准确、稳定地测得时 延估计值,因此,本文用该方法进行仿真模拟进行时 延估计是准确可行的。

2.3 声信号选择

以单路径回声法测温为研究对象,鉴于前人在 双传感器测温实验的经验,线性扫频信号在测温中 有较好的效果^[16],其表达式为

$$f(\tau) = f_0 + \frac{f(\tau_g) - f_0}{\tau_g} \tau, \quad \tau \in [0, \tau_g],$$
 (14)

式 (14) 中, f_0 为 0 时刻扫频信号的瞬时频率; $f(\tau_g)$ 为 τ_g 时刻点扫频信号的瞬时频率; $[0,\tau_g]$ 为信号的持续时间。因此,本文用 $500\sim8000$ Hz 的扫频信号作为激励信号,设定时延值为 1200,声衰减系数为 0.2。在声源信号中加入高斯白噪声,信噪比从 15 dB 不断降低,研究扫频信号计算时延的稳定性。结果表明,扫频脉冲信号的临界信噪比为 -10 dB,其互相关函数关系见图 4。由图 4 可知,互相关峰值 尖锐,不存在伪峰,能得到准确的时延估计值。

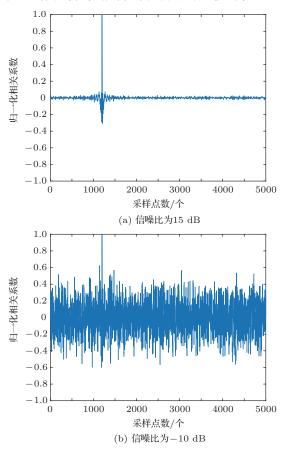


图 4 不同信噪比下扫频脉冲信号互相关图

Fig. 4 Cross-correlation diagrams of swept pulse signals with different signal-to-noise ratios

此外,对500~8000 Hz中脉宽为50%的高斯脉冲信号进行筛选,高斯脉冲信号的表达式为

$$f(\tau) = A \cdot e^{-(\tau - \tau_0)^2/(2\sigma^2)},$$
 (15)

式 (15) 中,A为振幅, τ_0 为高斯脉冲信号的中心时间, σ 为标准差。仿真设定时延值为 1200,声衰减系数为 0.2。由图 5 可知,1200 Hz 的高斯脉冲信号临界信噪比最小,为 -15 dB;由图 6 可知,1200 Hz 的高斯脉冲信号在最低信噪比下模拟 50 次得到的平均时延估计值最准确为 1200,标准差为 1.63。因此,选取频率为 1200 Hz、脉宽为 50% 的高斯脉冲信号作为激励信号。

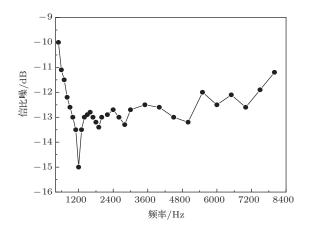


图 5 不同频率高斯脉冲信号的最低信噪比 Fig. 5 Minimum signal-to-noise ratio of Gaussian pulse signals with different frequencies

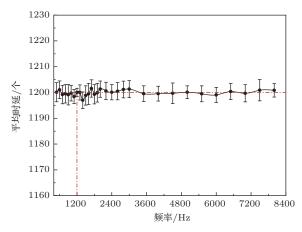


图 6 各频率高斯脉冲信号在最低信噪比下的时延 均值和标准差

Fig. 6 The delay mean and standard deviation of Gaussian pulse signal at the lowest signal-to-noise ratio

图7为1200 Hz的高斯脉冲信号在信噪比为15 dB和-15 dB时的互相关函数图。由图7可

见,互相关峰值尖锐,能够得到准确的时延估 计值。

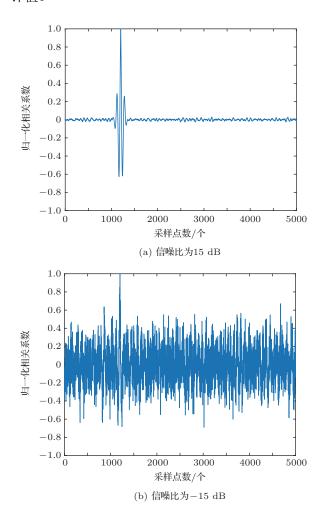
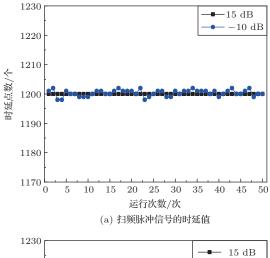


图 7 不同信噪比下高斯脉冲信号互相关图 Fig. 7 Cross-correlation diagram of Gaussian pulse signals with different signal-to-noise ratios

进一步对扫频脉冲信号和高斯脉冲信号进行 互相关计算,分别在15 dB和对应的临界信噪比下 进行50次时延估计,结果如图8所示。

可见,在信噪比较高时,两种信号均能得到1200的时延值;在对应的临界信噪比工况下,时延估计也较为准确,值为1200±3。进一步对时延数据进行处理,得到在临界信噪比下,扫频脉冲信号的平均时延值为1200.45,标准差为1.85。同时,在考虑相同带宽的情况下,经过仿真模拟得到平均时延值为1200.15,标准差为1.851,可见带宽对仿真结果没有太大影响;高斯脉冲信号的平均时延值为1200,标准差为1.63。由此可得,高斯脉冲信号计算时延值的准确性更高且更稳定。此外,高斯脉冲信号的临界信噪比更低,因此其抗噪性能更强。



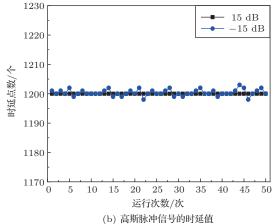


图 8 不同信号时延图

Fig. 8 Time delay diagram of different signals

3 实验研究

实验流程如图9所示。首先用Labview发声程序选择所需声源信号,经功率放大器放大并由扬声器向待测介质中发声;声波在路径上传播,遇反射壁面产生回波,布置在发声端的传感器接收激励信号和回波信号;采集卡将声信号数据传入处理器,由处理器计算实际时延值,从而得到待测介质的温度;最后将该测温系统测得的温度与温度计测得的实际环境温度进行比较,分析该测温系统的准确度与稳定性。

由2.3节可知,用高斯脉冲信号作为声源信号来进行时延估计的效果更好。因此,实验选用中心频率为1200 Hz、脉宽为50%的高斯脉冲信号作为激励信号,用采样频率为102400 Hz的NI-4431 采集卡采集声源信号。针对空冷系统测温和堆积物测温的实际情况,实验分为大空间回声测温和管道内回声测温,设定测温距离均为4 m。图10为实验台实物图。

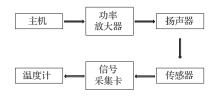


图 9 实验流程图

Fig. 9 Experimental flow chart





(a) 大空间实验台

(b) 小管道实验台

图 10 回声测温实验台

Fig. 10 Echo temperature measurement laboratory

在环境温度为26.5 %的大空间内进行回声测温实验,分10组进行重复测量,每组测量10次。

由图11可知,激励信号与回波信号的互相关峰值明显,能得到准确的时延估计。图12为每组实验测得温度的平均值和标准差,可见,每组温度误差很小,绝对误差均在 $\pm 0.35 \, ^{\circ} \,$

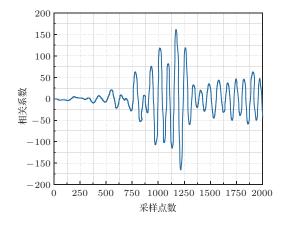


图 11 大空间回声测温互相关函数图

Fig. 11 Plot of large-space echo-thermometry cross-correlation function

在内径为5 cm 且设有加热棒的小管道内进行回声测温准确性和稳定性的实验,管道内环境温度分别为23.3 \mathbb{C} 、35.5 \mathbb{C} 和46.3 \mathbb{C} ,同样分为10 组进行重复测量,每组测量10 次。

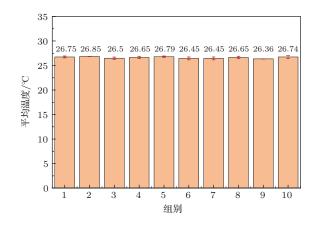


图 12 大空间不同组别测得的平均温度和标准差 Fig. 12 Average temperatures and standard deviation measured in different groups in large spaces

管道内环境温度为23.3 \mathbb{C} 的工况下的实验结果见图13~14。由图13可见,在小管道测温中,二者互相关性很强,同样可以得到尖锐的互相关峰值。由图14可知,测温误差很小,绝对误差在 $\pm 0.75 \mathbb{C}$ 以内,且标准差也很小,最大值为 $0.57 \mathbb{C}$ 。

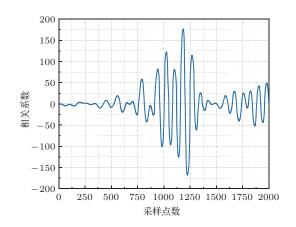


图 13 管道回声测温互相关函数图 $(23.3 \, ^{\circ}\text{C})$ Fig. 13 Plot of pipe echo temperature measurement correlation function $(23.3 \, ^{\circ}\text{C})$

管道内环境温度为35.5 \mathbb{C} 的工况下的实验结果见图 $15\sim16$ 。从图15可以看出,激励信号与回波信号互相关峰值尖锐,能测得准确的介质温度;从图16可以看到,测得的温度均在实际环境温度值附近波动,绝对误差在 ±0.85 \mathbb{C} 以内,且最大的标准差为0.57 \mathbb{C} 。

管道内环境温度为46.3 \mathbb{C} 的工况下的实验结果见图 $17\sim18$ 。由图可知,激励信号与回波信号互相关强度高,最大绝对误差是0.66 \mathbb{C} ,且1组结果中最大的标准差是0.68 \mathbb{C} 。

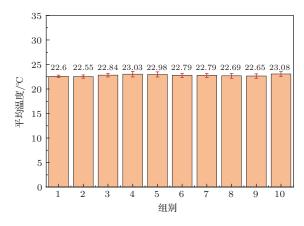


Fig. 14 Average temperatures and standard deviation measured of different groups in the pipeline (23.3 $^{\circ}{\rm C})$

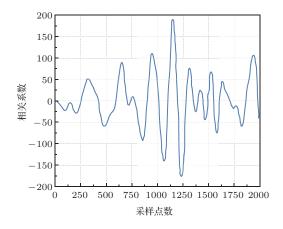


图 15 管道回声测温互相关函数图 (35.5 ℃)

Fig. 15 Plot of pipe echo temperature measurement correlation function (35.5 $^{\circ}\mathrm{C})$

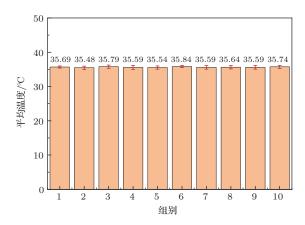


图 16 管道内不同组别测得的平均温度和标准差 $(35.5 \, ^{\circ}\mathrm{C})$

Fig. 16 Average temperatures and standard deviation measured of different groups in the pipeline (35.5 °C)

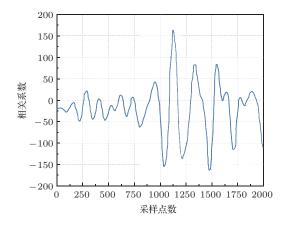


图 17 管道回声测温互相关函数图 (46.3 ℃)

Fig. 17 Plot of pipe echo temperature measurement correlation function (46.3 °C)

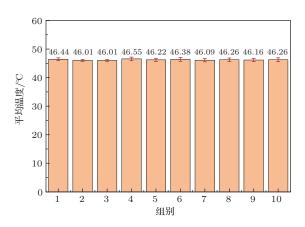


图 18 管道内不同组别测得的平均温度和标准差 $(46.3 \, ^{\circ}\text{C})$

Fig. 18 Average temperatures and standard deviation measured of different groups in the pipeline(46.3 °C)

由于上述3种工况的实验均在小管道内进行, 而声源在管道内传播时存在混响问题,因此,会在一 定程度上影响测量结果,导致测温准确性和稳定性 比大空间测温差,但实验误差在可取范围内,因此, 小管道内的回声测温数据也是稳定可靠的。由于管 道内的回声测温法主要受到混响问题的影响,而受 到外界因素的干扰很小,对粮仓测量来说,这大大减 少了测量粮温的干扰因素,进一步提高了粮仓测温 的准确性。

4 结论与展望

在回声感知技术中,相较于500~8000 Hz的扫 频信号,选用1200 Hz、脉宽为50%的高斯脉冲信 号作为激励信号时得到的时延估计值更为准确和

稳定,并且有更好的抗噪性能,在未经滤波的情况 下,能在-15 dB的信噪比下得到准确的时延值。由 实验可知,在26.5 ℃ 的大空间中以及管道温度为 23.3 ℃、35.5 ℃和 46.3 ℃的工况下,回声测温系统 均能得到准确的待测温度,且误差很小,验证了该测 温系统在不同环境、不同温度下均有较好的准确性 和稳定性。

应用声学

在实际应用中,空冷系统所处环境会出现低温 情况,此外,不论是在空冷系统中还是在粮仓中,信 噪比有可能低于实验中的-15 dB, 这就会造成测 量不准确。因此,未来还需要进行低温工况下和低 信噪比工况下的验证实验,同时提高测温系统的抗 噪性, 让该系统能够在更复杂的工况下得到准确的 待测温度。如此回声测温系统就能够有效地弥补空 冷系统和粮温测量技术的缺陷,提供更为优化的测 温方案。此外,回声测温系统设备成本低,且结构简 便,能够根据实际需要灵活安装,因此,回声法测温 具有非常良好的应用前景。

文

- [1] Green S F. An acoustic technique for rapid temperature distribution measurement[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1985, 77(2): 759-763.
- [2] 国建刚, 贾杰, 田振宇. 发电厂直接空冷凝汽器的新型防冻监 测系统设计 [J]. 浙江电力, 2014, 33(7): 41-44. Guo Jiangang, Jia Jie, Tian Zhenyu. Design of novel antifreezing monitoring system for direct air cooled condenser in power plant[J]. Zhejiang Electric Power, 2014, 33(7): 41-44.
- [3] 米路, 翟永杰, 韩超, 等. 基于无线通信的空冷岛温度场监测 系统 [J]. 仪器仪表用户, 2015, 22(4): 33-36. Mi Lu, Zhai Yongjie, Han Chao, et al. Air cooling island temperature field monitoring system based on wireless $communication [J].\ Instrumentation,\ 2015,\ 22(4){:}\ 33{-}36.$
- [4] 颜华, 陈冠男, 刘丽钧, 等. 声层析成像仓储粮食温度监测方 法 [J]. 沈阳工业大学学报, 2013, 35(5): 541-547. Yan Hua, Chen Guannan, Liu Lijun, et al. Temperature monitoring method for stored grain based on acoustic tomography[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2013, 35(5): 541-547.
- [5] 汪洋, 汪雪婷. 热敏电阻行业发展与创新的思考 [J]. 电子元件 与材料, 2016, 35(11): 95-97. Wang Yang, Wang Xueting. Thoughts on development and innovation of NTC thermistor industry[J]. Electric Components and Materials, 2016, 35(11): 95-97.
- [6] 李小龙. 热敏电阻的分类、特性与应用研究[J]. 科技展望, 2016, 26(24): 104-105.
- [7] 张钊源, 李文永. 基于 DS18B20 的节能型可遥控智能温控系 统 [J]. 电子世界, 2019(7): 152-153.

- [8] 左婧, 李忠虎, 闫俊红, 等. 分布式光纤测温系统温度检测与 处理算法研究 [J]. 高技术通讯, 2018, 28(Z2): 991–996. Zuo Jing, Li Zhonghu, Yan Junhong, et al. Algorithm research of signal processing in distributed optical fiber temperature measurement system[J]. Chinese High Technology Letters, 2018, 28(Z2): 991–996.
- [9] 符菲菲, 张润. 浅谈仓储粮温度检测技术应用及发展趋势 [J]. 广东化工, 2021, 48(11): 162-163. Fu Feifei, Zhang Run. Discussion on the application and development trend of storage grain temperature detection technology[J]. Guangdong Chemical Industry, 2021, 48(11): 162-163.
- [10] 张志强, 王萍, 于旭东, 等. 高精度红外热成像测温技术研究 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(5): 10-18.

 Zhang Zhiqiang, Wang Ping, Yu Xudong, et al. Study on high accuracy temperature measurement technology of infrared thermal imager [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(5): 10-18.
- [11] Holstein P, Raabe A, Müller R, et al. Acoustic tomography on the basis of travel-time measurement[J]. Measurement Science and Technology, 2004, 15(7): 1420–1428.
- [12] 齐仁龙, 张庆辉, 金广锋. 基于声表面波技术的粮食仓储环境无源测温系统 [J]. 河南工业大学学报 (自然科学版), 2017, 38(4): 91-95.

- Qi Renlong, Zhang Qinghui, Jin Guangfeng. Passive temperature measurement system based on surface acoustic wave (SAW) technology for grain storage environment[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 38(4): 91–95.
- [13] 万果果. 粮仓异物电磁波探测后处理技术研究[D]. 郑州:河南工业大学, 2011.
- [14] Bramanti M, Salerno E A, Tonazzini A, et al. An acoustic pyrometer system for tomographic thermal imaging in power plant boilers[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1996, 45(1): 159–167.
- [15] 张易农, 张克, 宋振华, 等. 相关函数算法在超声导波计量管 道内液体流速中的应用 [J]. 声学技术, 2017, 36(4): 353–356. Zhang Yinong, Zhang Ke, Song Zhenhua, et al. Application of correlation function method to ultrasonic guided wave measurement of liquid flow rate in cylindrical pipeline[J]. Technical Acoustics, 2017, 36(4): 353–356.
- [16] 沈国清, 安连锁, 张波, 等. 电站锅炉声学测温中的声源选择 及其声信号互相关特性分析 [J]. 现代电力, 2006(3): 41–46. Shen Guoqing, An Liansuo, Zhang Bo, et al. Selection of sound sources and cross-correlation characteristic analysis of acoustic signal in acoustic pyrometry in boilers[J]. Modem Electric Power, 2006(3): 41–46.