

超声波在空气温度场重建中的应用

张华宇¹, 谢凤芹¹, 李 强²

(1. 山东科技大学 机械电子工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 兖州矿业集团公司 济宁三号煤矿, 山东 济宁 273500)

摘 要: 超声波在空气中的传播速度会随着空气温度的变化而变化, 利用超声波穿越被测温度场区域的平均速度场, 可以重建对应区域的平均温度场。提出了一种易于实现的超声波重建二维温度场的方法, 在被测温度场周围布置 8 个收发一体的超声波传感器, 并将被测温度场划分为 24 个小区间, 由超声波通过每个小区间的平均速度值获得各小区间的平均温度, 以该温度值作为小区间中心点的温度并进行插值, 从而重建整个被测区域的温度场。

关键词: 超声波; 温度场; 飞行时间; 重建

中图分类号: TB551

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2012)01-0094-05

Application of Ultrasonic Wave Technique in Reconstruction of Air Temperature Field

ZHANG Huayu¹, XIE Fengqin¹, LI Qiang²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. Jining No. 3 Coalmine, Yanzhou Mining Group Co. Ltd, Jining, Shandong 273500, China)

Abstract: The propagation velocity of ultrasonic wave in the air will change with air temperature. Utilizing the average velocity field that the ultrasonic wave goes across the measured temperature field can reconstruct the average temperature field in corresponding region. In the paper, an easy implementing method of reconstructing the two-dimensional temperature field using ultrasonic wave was proposed. The 8 ultrasonic wave sensors with integrated sending and receiving functions were uniformly allocated around the measured temperature field and the measured temperature field is divided into 24 small blocks, so as to get the average speed in each block through which the ultrasonic wave goes, and the average temperature can be obtained based on the average speed. Then, this value is taken as the center temperature of the block and the interpolation work was made, thus, the temperature field of the whole measured region can be reconstructed.

Key words: ultrasonic wave; temperature field; time of flight; reconstruction

超声波测温是一种非接触温度测量方式^[1], 可用于火箭排气、熔融液等的测温。在传统方法中, 获得温度场内部温度时需借助于内置的温度传感器, 这样不仅影响温度场内部的流动状态, 也使得传感器易于受环境的干扰而影响测量数据的准确性^[2-4]。本研究基于声波传播理论和计算机测试技术, 搭建了一套空气温度场的测量系统, 该系统具有温度测量范围广、测量精度高、非接触、实时测量和维护方便等优点。

1 声波测温理论基础

声波在气体中的传播速度会随着温度的变化而变化, 理想气体下, 声速^[3,5-6]

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (1)$$

其中: R — 摩尔气体常数, $8.31451 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T — 热力学温度, K ; M — 气体相对分子质量; c — 声波在气

收稿日期: 2011-11-28

基金项目: 山东科技大学科学研究“春蕾计划”项目(2009dwz008, 2010AZZ023)

作者简介: 张华宇(1978—), 男, 山东青岛人, 博士研究生, 主要从事测试技术及仪表方面的研究. E-mail: skdmcu@163.com

体介质中的传播速度, m/s ; γ — 气体介质比定压热容 c_p 与比定压热容 c_v 之比值, 对于单原子分子 γ 取值 1.67, 对于双原子分子 γ 取值 1.40, 对于三原子分子 γ 取值 1.33^[5,7-8]。

由于空气主要由双原子分子组成, 所以空气中计算声速时, γ 取值为 1.40。并将(1)式中的热力学温度用摄氏温度代替可得:

$$T_c = 273.15 \times \left[\left(\frac{c}{331.45} \right)^2 - 1 \right]. \quad (2)$$

式(2)描述了声波在空气中的传播速度与该路径上的平均温度之间的关系, 为温度场的重建提供了理论依据。

2 温度场重建

在温度测量过程中, 超声波发射和接收装置之间的距离 L 是固定的, 声波传播路径的平均速度可表示成声波飞行时间 τ 的函数 $c_{mean} = L/\tau$ 。

通过测量超声波发射和接收路径上的飞行时间 (time of flight, TOF) 就可以计算出散布在温度场内多条路径上的平均声速值, 又由式(2)可得到各路径上的平均温度值, 从而为温度场的重建及相应的插值计算提供理论数据。

选取被测温度场为边长是 1 m 的正方形区域。如图 1 所示, \circ 代表收发一体的超声波传感器, 在被测区域周围非对称地布置了 8 个收发一体超声波传感器, 在温度场内部形成了 24 条传播路径 $A_1 - A_{24}$ 。这里把超声波传感器设计为不对称, 目的是: ① 使路径更多地通过被测区域的四个角, 避免过于集中; ② 得到非奇异矩阵。本研究在划分区域时取区域个数与路径数相等, 是为了使未知数的个数与方程数相等。每条路径的理论传播时间为

$$\tau = \int a ds. \quad (3)$$

其中, a 为声速的倒数, ds 为路径的微分。假设每个区域内的温度是未知的并且是连续的, 则存在 24 个未知数 a_1, a_2, \dots, a_{24} 。第 i 条路径在第 j 个区域内的长度为 l_{ij} , 则声波在第 i 条路径上的传播时间可表示为

$$\tau_i = \sum_{j=1}^{24} a_j l_{ij}. \quad (4)$$

设第 i 条路径实测超声波传播时间为 f_i , 令 $\tau_i = f_i$, 写成矩阵的形式可表示为

$$\mathbf{F}_{24 \times 1} = \mathbf{L}_{24 \times 24} \cdot \mathbf{A}_{24 \times 1}. \quad (5)$$

若矩阵 \mathbf{L} 为非奇异矩阵方程组必有解。因而可得由声速的倒数组成的矩阵:

$$\mathbf{A} = \mathbf{L}^{-1} \mathbf{F}. \quad (6)$$

各区域的平均温度可表示为

$$T_j = 273.15 \left[\left(\frac{1}{331.45 \cdot a_j} \right)^2 - 1 \right]. \quad (7)$$

将温度值 T_j 作为区域 j 的几何中心点温度, 再利用三次 Hermite 分段插值算法计算出整个二维温度场。

3 基于超声波飞行时间的温度场测量实验研究

在理论分析的基础上搭建基于超声波 TOF 的温度场测量系统, 系统组成如图 2 所示, 主要包括 4 个热

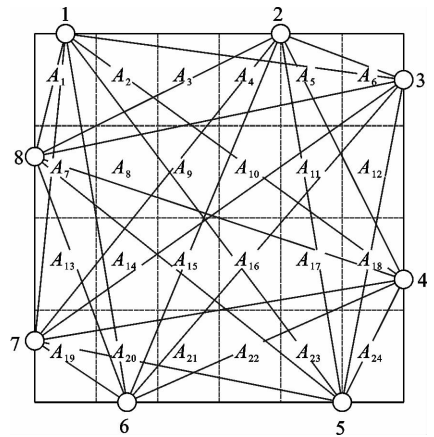


图 1 温度场测量系统在被测区域的安装布置及网格划分图

Fig. 1 Schematic view of the arrangement of ultrasonic transmitters and receivers and grid division

电偶、8 个收发一体的超声波传感器、调理电路、微控制器、转换电路、计算机。

超声波传感器采用收发一体的超声波探头,为保证从 1 个传感器到另外 6 个传感器声速测量的精度是一致的,需要在空气温度场中对各探头的 TOF 值进行补偿。TOF 值的补偿策略在微处理器中完成。补偿方法为:将 8 个超声波换能器分别放在同一个恒温箱内,在不同温度下(20、30、40、50、60、70℃)测量 8 个超声波换能器的 TOF 值,并根据这些 TOF 值进行数值的拟合补偿。超声波传感器的工作顺序是由计算机通过微控制器来控制的。传感器某一特定时刻,只有一个处于发射状态。如图 1 所示,当探头 1 发射时,探头 4、5、6、7、8 依次接受探头 1 发出的超声波信号并通过微处理器中的定时器测量对应路径上的 TOF。在下一时刻,探头 2 发射,探头 5、6、7、8 接收,探头 2 发出的超声波信号并检测对应路径上的 TOF,依次进行采集,直到温度场内所有路径上的 TOF 值全部采集完毕。微处理器将采集到的 TOF 值通过串口通信协议上传至计算机,在计算机中按前文所述原理重建温度场,同时在测温区域放置 4 个热电偶来校核运算结果。

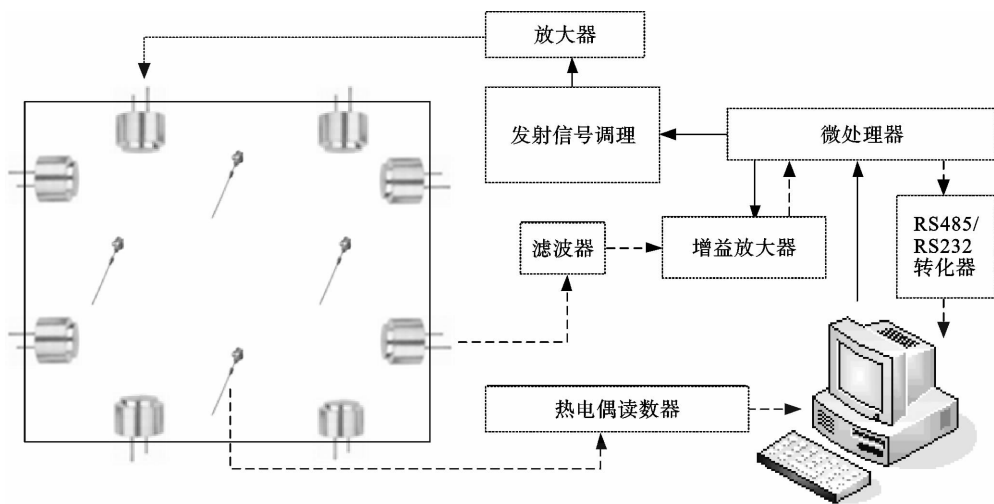


图 2 温度场测量系统框图

Fig. 2 The measuring system of temperature field

分别对单热源和双热源两种情况进行测量,热源的位置如图 3(a)和 3(b)所示。图 3(a)为单热源温度场,在温度场中心位置布置了一个热源。图 3(b)为双热源温度场,热源采用非对称布置,在温度场左上角布置一个低温热源,距温度场边缘的距离 a 、 b 分别为 250 和 350 mm;在温度场右下角布置一个高温热源,距温度场边缘的距离 c 、 d 分别为 250 和 400 mm。

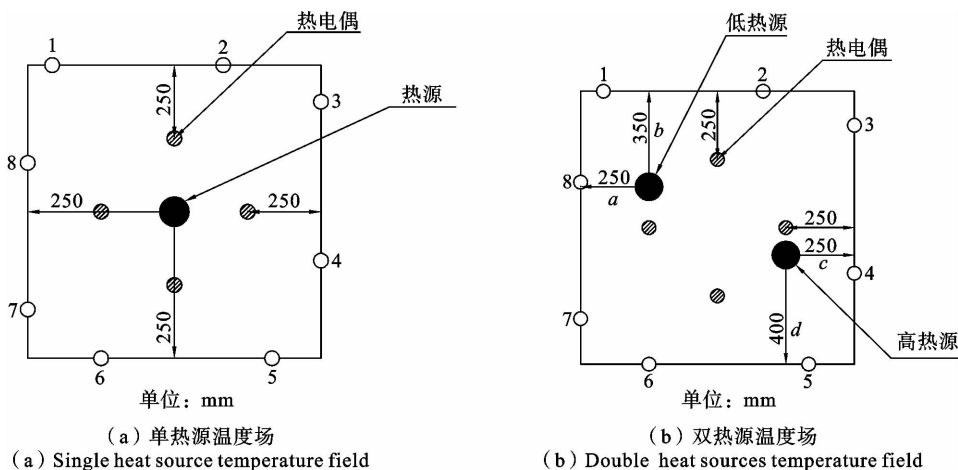


图 3 具有加热温度场的热源分布图

Fig. 3 The distribution diagram of heat source placed at the temperature field

利用图 2 所示的温度场测量系统测得单热源和双热源温度场中各超声波传播路径的飞行时间如表 1 和表 2 所示。在插值计算时取每个区域的平均温度为中心点的温度值。单、双热源重建温度场三维图如图 4 (a)和 4(b)所示。实验中布置的热电偶测量值与重建温度场模拟值对比数据如表 1 和表 2 所示。

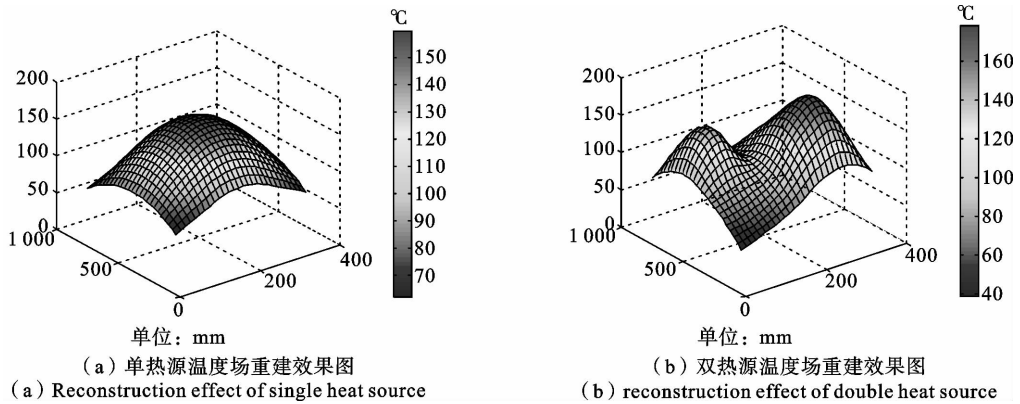


图 4 具有加热温度场的三维温度分布图

Fig. 4 Three-dimensional distribution diagram in temperature field with heat source

表 1 单热源温度场重建结果误差分析表

Tab.1 The error analysis of single heat source temperature field

测温点	测量温度/°C	重建温度/°C	相对误差/%
1	130.0	128.0	1.53
2	130.0	129.8	0.70
3	130.0	132.0	1.53
4	130.0	129.4	0.46

表 2 双热源温度场重建结果误差分析表

Tab.2 The error analysis of double heat source temperature field

测温点	测量温度/°C	重建温度/°C	相对误差/%
1	98.1	128.0	3.0
2	160.2	163.4	2.0
3	111.8	113.6	1.6
4	128.5	125.8	2.0

从表 1 和表 2 中可以看出,重建温度场精度误差控制在 0.5%~3.0%。在温度场测量时,图 2 所示的温度场测量系统所使用的超声波传感器在测量区域中的非对称布置法,可以较好地解决温度检测不均匀的问题。

4 结论

基于超声波飞行时间的温度场测量系统,在对被测量区域进行网格划分时采用设计路径与区域划分选取不对称的方法,并在假设每个网格的温度平均分布的基础上对温度场模型进行插值。实验结果显示,对于单热源的温 度场,测量系统相对误差小于 2%;对于双热源的温 度场,测量系统相对误差最大为 3%。重建结果较精确地反映了被测温度场的特性。本研究所采用的测量系统容易搭建,测量方法和重要参数的求解也比较简单。

参考文献:

[1]范洪辉,朱洪锦,柳田裕隆,等.超声波信号渡越时间参数法测量空气中温度分布[J].应用声学,2010,29(1):53-57.
FAN Honghui, ZHU Hongjin, HIROTAKA Yanagida, et al. Measurement of air temperature distribution based on ultrasonic time of flight[J]. Applied Acoustics, 2010, 29(1): 53-57.

[2]张伟志,刚铁,王军.超声波检测计算机模拟和仿真的研究及应用现状[J].应用声学,2003,22(3):39-44.
ZHANG Weizhi, GANG Tie, WANG Jun. A survey of the simulation and its application in ultrasonic testing[J]. Applied Acoustics, 2003, 22(3): 39-44.

- [3]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): 253-256.
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): 253-256.
- [4]杨惠连,徐苓安. 超声相关流量计测量精度的探讨[J]. 仪器仪表学报, 1993, 14(1): 90-95.
YANG Huilian, XU Lingan. Discussions on the precision of ultrasonic correlation estimation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1993, 14(1): 90-95.
- [5] TSAI W Y, HUANG C F, LIAO T. New implementation of high-precision and instant-response air thermometer by ultrasonic sensors[J]. Sensors and Actuators, 2005, 117(4): 88-94.
- [6] OHYAMA S, OHSHIMA K, TAKAYAMA J. Temperature distribution and wind vector measurement using ultrasonic CT based on the time of flight detection[J]. Sensors and Actuators, 2009, 151(6): 159-167.
- [7] WONG G S K. Speed of sound in standard air[J]. Acoust, 1986, 79(3): 1359-1366.
- [8] STONES R H, WEBB P J. The application of acoustic pyrometry to gas temperature measurement and mapping[J]. Ultrasound in the Process Industry, 1993, 13(1): 91-92.

(上接第 93 页)

- [7] TRELOAR L R G. The elasticity of a network of long chain molecules[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1943, 16(4): 746-751.
- [8] RIVLIN R S. Large elastic deformation of isotropic materials; I. Fundamental concepts, II. Some uniqueness theories for pure homogeneous deformations[J]. Philos Trans Roy Soc Lond Ser A, 1948, 240: 459-508.
- [9] 詹特. 橡胶工程—如何设计橡胶配件[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [10] 于建华, 魏泳涛. 不可压缩超弹性材料的有限元应力分析[J]. 西南交通大学学报, 1998, 33(1): 41-45.
YU Jianhua, WEI Yongtao. Stress analysis of incompressible hyperelasticity with FEM[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1998, 33(1): 41-45.
- [11] 范成业, 庄茁, 黄克智. 超弹性材料过盈配合的解析解和数值解[J]. 工程力学, 2003, 20(4): 15-18.
FAN Chengye, ZHUANG Zhuo, HUANG Kezhi. The theoretical and finite element solutions of an interference problem of hyperelastic materials[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(4): 15-18.
- [12] 王村. 国内外合成橡胶工业发展述评[J]. 中国石油和化工, 2005(12): 24-37.
WANG Cun. Commentary the development of synthetic rubber industry home and abroad[J]. Journal of China Petroleum and Chemical Industries, 2005(12): 24-37.
- [13] 汤文成, 易红, 唐寅. 橡胶材料制品的有限元分析[J]. 润滑与密封, 1996(5): 60-61.
TANG Wencheng, YI Hong, TANG Yin. FEM analysis for rubber[J]. Journal of Lubrication Engineering, 1996(5): 60-61.
- [14] 高剑虹. 减震橡胶支座的非线性有限元分析[D]. 福州: 福州大学, 2006.