

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.06.06

声速法温度场重建接收信号幅值影响分析

陈鑫虎, 赵俭*

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 为研究声速法接收信号幅值的变化对温度场重建的影响,基于声学测温法开展了热校准风洞模拟试验,成功模拟了航空发动机燃烧室出口的温度场重建。首先从接收到的信号数据中提取特征,建立特征矩阵,用以反馈信号幅值的变化;然后,基于采集到的信号数据,通过最小二乘法进行温度场重建;最后,通过对比不同特征矩阵下温度场重建的实际效果,分析声速法采集的信号幅值的变化对温度场重建的影响。通过试验验证可知:接收信号幅值越大,重建温度场的均方根误差越大,当幅值大于理论值40%时,均方根误差大于理论值14.38%;接收信号幅值越小,重建温度场的最大相对误差越大,当幅值小于理论值40%时,最大相对误差大于理论值44.3762 K。本文的研究对推动声学测温技术在航空发动机燃烧室出口温度场测试领域的发展起到促进作用,具有重要技术借鉴价值。

关键词: 声学测温; 温度场重建; 峰值; 影响分析

中图分类号: TB9; TH811 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795(2022)06-0040-08

Analysis of the influence of received signal amplitude on acoustic temperature field reconstruction

CHEN Xinhu, ZHAO Jian*

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: In order to study the effect of the variation of the received signal amplitude of the acoustic velocity method on the temperature field reconstruction, a thermal calibration wind tunnel simulation test was conducted based on the acoustic thermometry method to successfully simulate the temperature field reconstruction at the exit of an aero-engine combustion chamber. Firstly, features are extracted from the received signal data and a feature matrix is established to feedback the change of signal amplitude. Then, based on the collected signal data, the temperature field reconstruction is carried out by the least squares method. Finally, the effect of the change of signal amplitude on the temperature field reconstruction by the acoustic velocity method is analyzed by comparing the actual effects of temperature field reconstruction under different feature matrices. Through experimental verification, it can be seen that: the larger the received signal amplitude is, the larger the root mean square error of the reconstructed temperature field is, when the amplitude is 40% greater than the theoretical value, the root mean square error is 14.38% greater than the theoretical value; the smaller the received signal amplitude is, the larger the maximum relative error of the reconstructed temperature field is, when the amplitude is 40% less than the theoretical value, the maximum relative error is 44.3762 K greater than the theoretical value. The research in this paper has an important technical reference value to promote the development of acoustic temperature measurement technology in the field of aero-engine combustion chamber outlet temperature field testing.

Key words: acoustic temperature measurement; temperature field reconstruction; peak value; impact analysis

收稿日期: 2022-09-13; 修回日期: 2022-10-24

基金项目: 国家“十三五”技术基础科研项目(JSJL2018205B005);航空工业计量所创新基金项目(CZ02201520)

引用格式: 陈鑫虎, 赵俭. 声速法温度场重建接收信号幅值影响分析[J]. 计测技术, 2022, 42(6): 40-47.

Citation: CHEN X H, ZHAO J. Analysis of the influence of received signal amplitude on acoustic temperature field reconstruction[J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42(6): 40-47.



0 引言

对于航空发动机来说,燃烧室出口温度是重要的测试参数,需要准确可靠测量。目前最常用的方法是使用热电偶,按照验收曲线,测量燃烧室的出口温度^[1],这种方法简单直接、数据可靠,但考虑到热电偶的测量特性,这种测量方式会干扰温度场、流场,破坏测试环境,并影响测量准确度^[2]。又因为热电偶测量是接触式测量,当温度过高时,热电偶的材料不耐温,测量性能会受影响,元件也容易损坏^[3]。为了满足航空发动机燃烧室出口高温、高流速、高振动环境下对测量应用技术的需求,急需一种可靠的航空发动机燃烧室气流温度实时监测的新方法^[4]。

声速测温是根据声波在介质中的传播速度来间接得到介质的温度。利用声速法测温技术对航空发动机燃烧室气流温度进行实时监测具有非接触、不对测量环境引入外来干扰的优势^[1-4]。目前,声速法在相对静态的温场下最大测量范围在0~1927 °C,温度分辨力6.7 °C;而在类似航空发动机燃烧室出口这种剧烈的动态温场的应用研究尚未有相关报道。

本文针对声速法接收信号幅值的变化对温度场重建的影响进行研究,搭建声速法测温装置,测量获得真实试验数据,并与同状态下的试验理想仿真数据进行对比分析。利用不同的特征矩阵具体计算接收信号幅值变化对于测量结果的影响,

得出相关特征和参数,为声速法测温试验状态反馈提供依据,并为后续试验的影响在线评估和误差修正打下基础。

1 试验装置

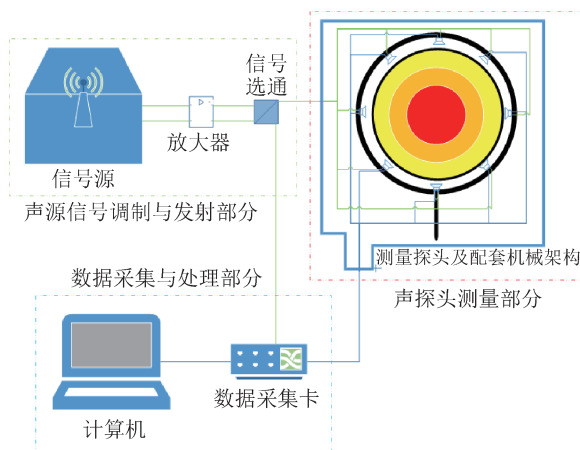
为了能够成功将声速法测温成功应用于航空发动机燃烧室出口温度测量,本文利用热校准风洞进行声速法测温试验。热校准风洞模拟了航空发动机燃烧室出口噪声强烈、气流马赫数较高、温度分布不均匀,且核心区域温度很高^[5]的恶劣环境。声波在经过热校准风洞的过程中会受到很大的干扰,导致接收信号幅值发生变化,该变化具有随机性,且较难有效识别^[6],会对测量准确性产生影响。因此搭建如图1所示的声速法测温实验装置。该试验装置由声源信号调制与发射部分、声探头测量部分以及数据采集与处理部分组成。

试验时,将40 kHz的高频正弦信号进行调制,波形发生器作为信号源输出调制后的波形,放大器将输出信号放大10~100倍,放大后的信号传递到矩阵开关上,矩阵开关将信号输入数据采集卡,并按照程序设定的相应时序,持续将信号波形传输到不同的声探头上。声探头在矩阵开关的控制下,实现多路声波信号的发射和接收。由一个声探头发出的声波信号在温度场中传播后被全部的声探头接收,接收得到的数据通过数据采集卡传输到计算机中,利用专业软件对所得到的数据进行处理和运算,得到还原后的温度场。



(a) 试验装置实物图

(a) Physical picture of testing apparatus



(b) 试验装置示意图

(b) Schematic diagram of testing apparatus

图1 试验装置图

Fig.1 Diagram of testing apparatus

2 建立特征矩阵

对采集到的数据质量进行评定,从数据品质影响因素出发,对问题进行建模,可描述为

$$X_0 = \begin{bmatrix} x_{01} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{0k} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ x_{0(n-k+1)} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{0n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$X = \begin{bmatrix} x_1 & \cdot & \cdot & \cdot & x_k \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ x_{(n-k+1)} & \cdot & \cdot & \cdot & x_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: X_0 为声源信号的数据构成的矩阵; X 为待处理的采集数据构成的矩阵; k 为按时序完成一次采集需要的数据量(即每组采集的数据量); n 为完成一次温度场重建所需数据的组数。

为了反应测量时,局部某点测量值与理想数值的偏差,进行了定量分析,建模得出矩阵 A 。

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & \cdot & \cdot & \cdot & a_k \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{(n-k+1)} & \cdot & \cdot & \cdot & a_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: A 为采集的数据 X_i 和声源信号 X_{0i} 的差值的绝对值组成的矩阵,它反映了声波在温度场中传播幅值的变化程度,直接体现了温度场对声波传递的影响; $a_i = |\Delta X_i| = |100X_i - X_{0i}|$, ($i=1,2,\dots,n$),经实验室和校准风洞试验得知,在本文的探头布局条件下,接收信号的衰减约为0.01,当接收信号放大100倍时,与声源信号的幅值差值小于2%。

为了反应测量时,局部较长一段数据与理想数值之间差值的正负,进行了定性分析,建模得出矩阵 B 。

$$B = \begin{bmatrix} b_1 & \cdot & \cdot & \cdot & b_k \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ b_{(n-k+1)} & \cdot & \cdot & \cdot & b_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: B 为采集到的数据和声源的幅值差值的正负,利用其研究不同幅值变化对温度场重建的影响;

$b_i = \begin{cases} 1 & (\Delta X_i > 0) \\ 0 & (\Delta X_i = 0) \\ -1 & (\Delta X_i < 0) \end{cases}$,为采集数据和省院幅值

差距,当 b_i 大于声源信号时记为1,当 b_i 等于声源信号时记为0,当 b_i 小于声源信号的记为-1。

进行热校准风洞试验时,利用最小二乘方法的19域圆形区域对温度场进行还原^[7],试验温度为573.1500 K。采用最小二乘法重建温度场的基本思想为:将整个待测平面划分为一定数量的像素(小区域),然后利用获得的声波传播时间求得声波传播速度,再根据声速与温度的关系求得每个像素的平均温度,并使用平均温度来代替该像素的几何中心点温度,最后采用插值法拟合整个平面的温度场^[8]。

在待考察的温度场中,每一条声波沿其传播路径走过的传播时间 t 可表示为

$$t = \int a ds \quad (5)$$

式中: a 为空间状态因子,即穿越气流温场的平均声速 c 的倒数; s 为声波传播路径长度^[9]。

假设每一个像素内部的温度相同且均匀,令 $\Delta S_{k,i}$ 表示第 k 条路径通过第 i 个像素的长度,则

$$t_k = \sum_{i=1}^{16} a_i \Delta S_{k,i} \quad (6)$$

式中: t_k 为声波在第 k 条路径的传播时间; a_i 为第 i 个像素的声波平均传播速度 c 的倒数^[10]。

故可得到

$$\varepsilon_k = t_c - t_k = t_c - \sum_{i=1}^{16} a_i \Delta S_{k,i} \quad (7)$$

式中: t_c 为测得的声波传播时间; ε_k 为声波传播时间的误差。

利用最小二乘法进行计算,使误差 ε_k 的平方和最小,之后利用极值求解方法可得到正则方程^[11]。当传感器的位置和数量固定、像素划分确定时,得到的矩阵为常数矩阵^[12]。若此常数矩阵可逆,则可得到空间状态因子矩阵 A 。由于空间状态因子是声波传播速度的倒数,可得到每个像素内的区域平均温度^[13]为

$$T(x,y) = \frac{1}{A^2 Z^2} \quad (8)$$

式中: Z 为参数,空气的 Z 值约为20.045,烟道混合气体的 Z 值约为19.08。利用式(8)得到的温度值作为每一个像素的中心温度,再利用适当的插值算法,就可以重建得出整个待测平面温度场的分布^[14]。

温度场重建完成后，对重建的结果进行分析评定。通过计算重建温度场中分布的多个随机点的温度数值与相应点位上热电偶测得的温度数值的差值，得到误差数据。采用最大绝对误差 E_{\max} 和均方根误差 E_{rms} 来评价温度场的重建准确度^[15]，即

$$E_{\max} = \max |T'(k) - T(k)| \quad (9)$$

$$E_{\text{rms}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [T'(k) - T(k)]^2}}{T_{\text{ave}}} \times 100\% \quad (10)$$

式中： $T'(k)$ 为试验中测得第 k 个区域的中心温度，K； $T(k)$ 为相同条件下第 k 个区域的理论中心温度，K； n 为区域划分数量， $n=19$ ； T_{ave} 为整个温度场的理论平均温度，K。

3 幅值影响分析

声波在温度场中传播时会受到高温和强振动的影响，导致接收到的信号幅值与声源信号幅值存在差异，下面讨论该差值的正负和绝对值的大小对反演温度场的影响，即矩阵 A 和矩阵 B 对温度场重建的影响。

在热校准风洞上进行声速法测量试验，得到一组数据重建的温度场等温线如图 2 所示。

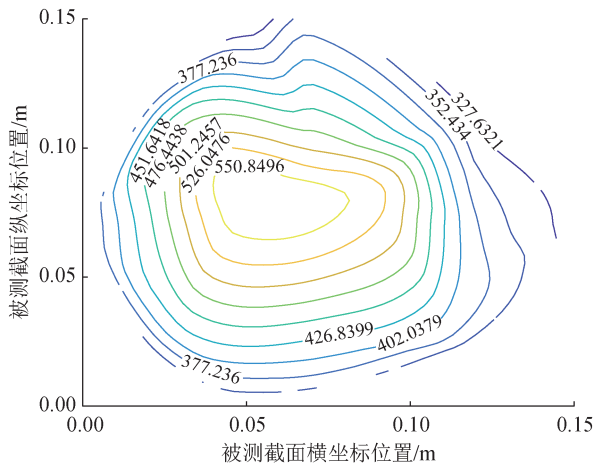
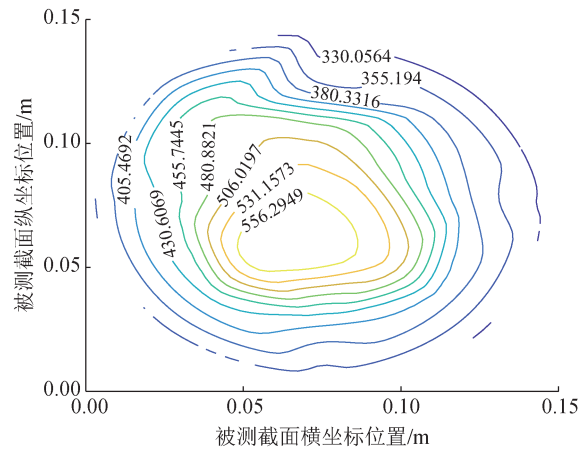


图2 重建温场等温线

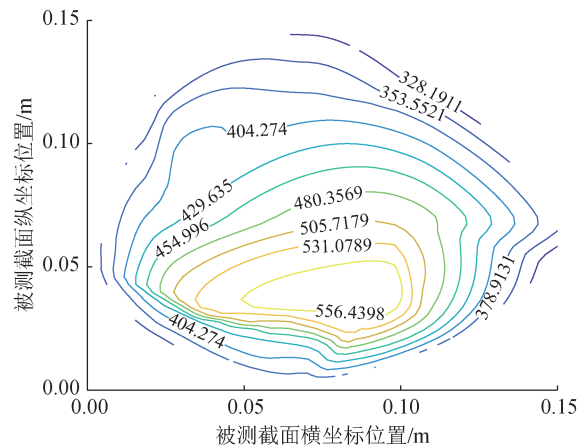
Fig.2 Isotherms of reconstructed temperature field

对接收幅信号值变小对温度场重建的影响进行仿真验证。设置两组矩阵中的数据分别为 $A_1=0.2X+A$ 和 $A_2=0.4X+A$ ，此时矩阵 B 中的数值全部为 -1。之后根据声源信号求解出矩阵 X_1 和矩阵 X_2 ，利用矩阵 X_1 和矩阵 X_2 进行温度场重建，得到的重建温度场等温线如图 3 所示。



(a) 矩阵 X_1 的重建温度场等温线

(a) Reconstructed temperature field isotherms of matrix X_1



(b) 矩阵 X_2 的重建温度场等温线

(b) Reconstructed temperature field isotherms of matrix X_2

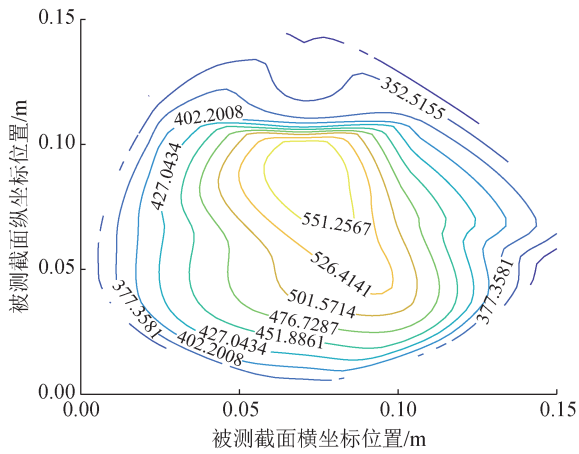
图3 接收小幅值波形的重建温场等温线

Fig.3 Reconstructed temperature field isotherms of receiving small amplitude waveform

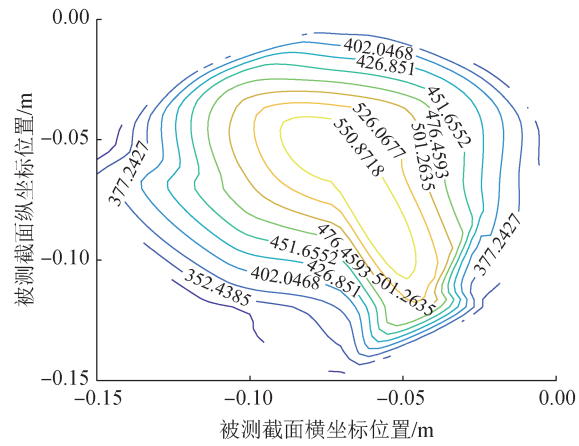
接收信号的幅值小于理想接收幅值时，重建温度场的单峰高温区域会向下偏移，上边缘的低温区域会向内收缩，核心区域的高温区等温线的分布情况与理论分布较为相似，随着幅值越来越小，核心区域等温线分布开始畸变。单峰温度场偏下区域等温线越来越密集，温度降低更急剧；另一侧等温线越来越疏松，核心区域边缘位置出现了一块温度变化很小，可以近似看作等温面的区域。

对接收到的幅值大于声源信号的波形进行仿真验证。设置 $A_3=0.2X+A$ ， $A_4=0.4X+A$ ，矩阵 B 中的数值全部为 1。求得矩阵 X_3 和矩阵 X_4 ，对其进行温度场重建，得到的信号波形图和温度场重建等温图如图 4 所示。

接收信号的幅值大于理想接收幅值时，重建



(a) 矩阵 X_3 的重建温度场等温线
(a) Reconstructed temperature field isotherms of matrix X_3



(b) 矩阵 X_4 的重建温度场等温线
(b) Reconstructed temperature field isotherms of matrix X_4

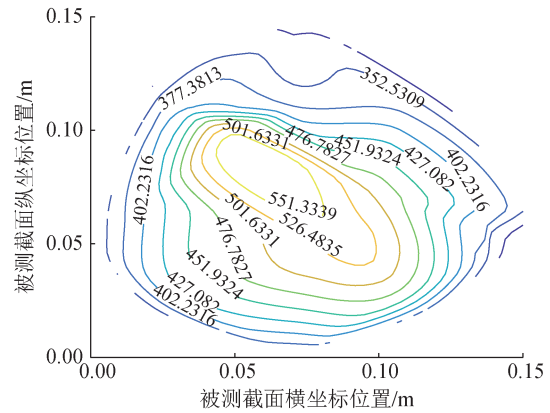
图4 接收大幅值波形的重建温场等温线

Fig.4 Reconstructed temperature field isotherms of receiving big amplitude waveform

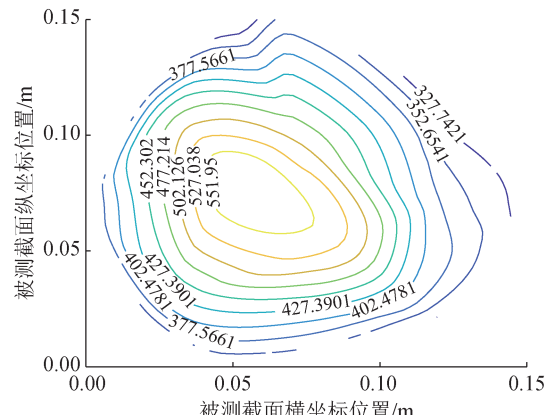
温度场的单峰高温区域的等温线分布和理论等温线分布有明显区别, 高温区域的等温线变得狭长且整体向左上偏移, 上边缘的低温区域向内收缩。随着振幅越来越大, 高温区域等温线分布的畸变越来越明显(变得更为狭长), 高温区域等温线向左上和右下两个方向延伸, 上方区域的等温线分布变得密集, 低温区域温度场下方区域的等温线向内收缩。

研究接收信号的不同幅值占比对温度场重建的影响。利用 MATLAB 软件截取矩阵 A_1 中的前 $k/2$ 行 $n/2$ 列的数据, 替换矩阵 A_3 中的相应数据, 得到矩阵 A_5 ; 截取矩阵 A_1 中的前 k 行 $n/2$ 列中的数据, 替换矩阵 A_3 中的相应数据, 得到矩阵 A_6 ; 截取矩阵 A_3 中的前 $k/2$ 行 $n/2$ 列中的数据, 替换矩阵 A_1 中

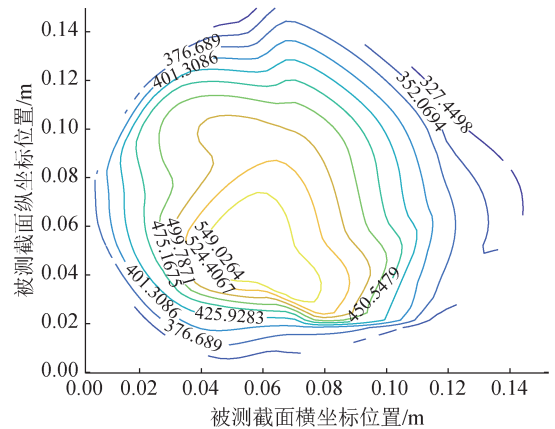
的相应数据, 得到矩阵 A_7 。矩阵 B 按照相应正负值填入。求得矩阵 X_5 , 矩阵 X_6 和矩阵 X_7 , 对其进行温度场重建, 得到的信号波形图和温度场重建等温图如图 5 所示。



(a) 矩阵 X_5 的重建温度场等温线
(a) Reconstructed temperature field isotherms of matrix X_5



(b) 矩阵 X_6 的重建温度场等温线
(b) Reconstructed temperature field isotherms of matrix X_6



(c) 矩阵 X_7 的重建温度场等温线
(c) Reconstructed temperature field isotherms of matrix X_7

图5 接收不同幅值占比波形的重建温场等温线

Fig.5 Reconstructed temperature field isotherms of receiving waveforms with different amplitude ratios

从原理上可简述造成上述温度场变形的原因为：接收信号波形的变化导致时延计算得到的传播时间 t 变得不准确，进而影响了温度场的反演重建。

不同的接收信号波形变化对重建温度场的影响可以总结如下：接收信号的大幅值占比较大时，重建温度场的等温线分布和接收信号的幅值大于理想接收幅值时的等温线分布相似；接收信号的大幅值与接收信号的小幅值占比相同时，高温区域的等温线分布与理论分布相比，仍具有等温线变得狭长且整体向左上偏移的特征；接收信号的小幅值占比较大时，温度场偏下区域等温线密集，与相同小幅值的重建等温线图相比，高温区域向左上拉伸。通过对比可知，重建温度场等温线分布受大幅值信号影响较大。当信号中含有大幅值的部分时，重建温度场等温线会产生畸变或畸变的趋势，核心高温区向右上偏移且被拉伸。

4 试验影响特性验证

将试验得到的数据与仿真数据进行对比，验证不同接收幅值对重建温度场的影响。接收小幅值波形的影响分析如表1所示。

表1 接收小幅值波形的影响分析

Tab.1 Influence analysis of receiving small amplitude waveform

幅值变化	最大相对误差/K		均方根误差/%	
	仿真结果	试验数据	仿真数据	试验数据
X_1	27.0632		4.63	
X_2	63.5484	19.1722	11.78	2.81

通过仿真数据与试验数据对比可知，当接收信号幅值减小20%时，最大相对误差增加了7.891 K，核心区温场重建的相对准确度降低了1.38%；均方根误差上涨了1.82%，温度场核心区出现较小的偏移；当接收幅值减小40%时，最大相对误差增加了44.3762 K，核心区温场重建的相对准确度降低了7.74%；均方根误差上涨了9.06%。对接收大幅值波形的影响进行分析，数据如表2所示。

通过仿真数据与试验数据对比可知，当接收信号幅值增大20%时，最大相对误差增加了2.4754 K，核心区温场重建的相对准确度降低了

表2 接收大幅值波形的影响分析

Tab.2 Influence analysis of receiving big amplitude waveform

幅值变化	最大相对误差/K		均方根误差/%	
	仿真结果	试验数据	仿真数据	试验数据
X_3	21.6476		8.41	
X_4	42.3215	19.1722	17.19	2.81

0.43%；均方根误差上涨了5.60%；当接收幅值增大40%时，最大相对误差增加了23.1493 K，核心区温场重建的相对准确度降低了4.04%；均方根误差上涨了14.38%。对接收不同幅值占比波形的影响进行分析，数据如表3所示。

表3 接收不同幅值占比波形的影响分析

Tab.3 Analysis of influence of receiving waveforms with different amplitude ratios

幅值变化	最大相对误差/K		均方根误差/%	
	仿真结果	试验数据	仿真数据	试验数据
X_5	22.1340		7.97	
X_6	23.1119	19.1722	7.03	2.81
X_7	24.8662		5.88	

将不同幅值占比的数据和接收小幅值与接收大幅值波形的数据进行比较可知，当大幅值信号占75%，小幅值信号占25%时，最大相对误差增加了2.9618 K，核心区温场重建的相对准确度降低了0.52%；均方根误差上涨了5.16%；当大幅值信号与小幅值信号各占50%时，最大相对误差增加了3.9397 K，核心区温场重建的相对准确度降低了0.69%，均方根误差上涨了4.22%；当大幅值信号占25%，小幅值信号占75%时，最大相对误差增加了5.6940 K，核心区温场重建的相对准确度降低了0.99%；均方根误差上涨了3.07%。

剔除粗大误差，对单参数分析讨论可得：接收大幅值信号对重建温度场影响严重时，与理论值相比，均方根误差大于等于14.38%，此时最大相对误差为23.1493 ~ 44.3762 K；接收小幅值信号对重建温度场影响严重时，与理论值相比，最大相对误差大于等于44.3762 K，此时均方根误差为9.06% ~ 14.38%；对两参数同时作用分析讨论可得：大幅值信号占比越多时均方根误差越大，

小幅值信号占比越多时最大相对误差越大；与理论值相比，当均方根误差大于等于5.16%时，可认为大幅值信号占比超过75%；当最大相对误差大于等于5.6940 K时，可认为小幅值信号占比超过75%。

对同一次试验中的另一组重建后温场畸变明显的数据进行分析，其重建温场等温线如图6所示，接收波形的影响分析如表4所示。

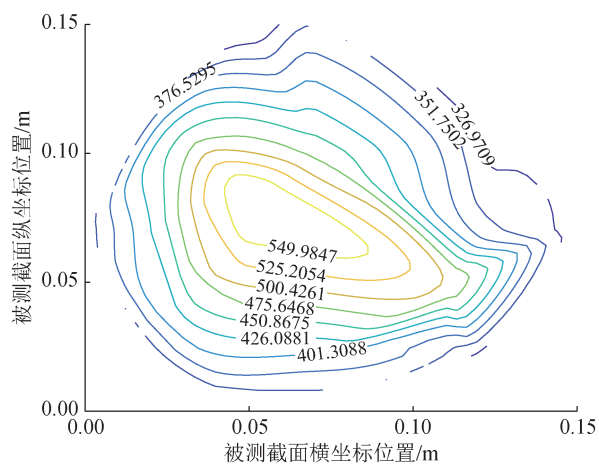


图6 重建温场等温线

Fig.6 Isotherms of reconstructed temperature field

表4 接收波形的影响分析

Tab.4 Influence analysis of received waveform

试验数据	最大相对误差/K	均方根误差/%
1组	19.1722	2.81
2组	21.0629	4.77

对重建温度场的分布特性和影响分析的评定参数进行比较。将温度场还原后有明显畸变的试验数据2与相对标准的试验数据1相比可知：最大相对误差增加了1.8907 K，核心区温场重建的相对准确度降低了0.33%；均方根误差上涨了1.96%。由计算所得的参数可知试验数据2中均方根误差相对较大，受大幅值影响较大，且无异常幅值占比超过75%。

对这组数据进行筛分，接收幅值超过理论值10%~20%的数据占11.6%，超过理论值20%~40%的数据占5.3%，超过理论值40%的数据占1.2%；接收幅值小于理论值10%~20%的数据占4.6%，小于20%~40%的数据占1.3%，小于40%的数据占

0.7%。经对数据的筛选验证，试验数据2中大幅值信号占比18.1%，小幅值信号占比6.6%，受大幅值影响较大，且两种异常幅值占比均未超过75%。

5 结论

针对利用热校准风洞进行声速法测温试验时，接收信号受环境影响产生的不同幅值变化对重建温度场造成不同影响的问题进行了分析和验证。建立了特征矩阵，并进行了仿真和实际试验，结果表明：受环境影响导致接收信号幅值变大数据较多时，重建后的温度场等温线被斜向拉伸，温度分布变化明显，与理论值相比，均方根误差大于等于14.38%，此时最大相对误差为23.1493~44.3762 K；受环境影响导致接收信号幅值变小数据较多时，重建后的温度场等温线向一侧聚集，温度场梯度变化明显，与理论值相比，最大相对误差大于等于44.3762 K，此时均方根误差为9.06%~14.38%。

本文的研究成果为声速法测温试验期间的声波采集效果提供了评判依据，有助于减少温度场重建所需的数据量，减少试验时长，有利于在试验期间及时发现问题并做出调整，同时为提升声波测温系统的稳定性提供了数据基础。针对接收信号受环境影响幅值变化的定量分析和误差修正，将在后续工作中继续进行探索。

参考文献

[1] GREEN S F. An acoustic technique for rapid temperature distribution measurement[J]. Journal of the acoustical society, 1985, 1(2): 759-763.

[2] KLEPPE J, SANCHES J, FRALICK G. The application of acoustic pyrometry to gas turbines and jet engines[C] // 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. 1998, 3611: 1-10.

[3] 许琳, 王高, 吕国义, 等. 超声测温技术在模拟航空发动机燃烧室温度测量中的应用[J]. 测试技术学报, 2019, 33(2): 178-184.

XU L, WANG G, LYU G Y, et al. Ultrasonic temperature measurement technology for simulated aero-engine combustion chambers[J]. Journal of test and measurement technology, 2019, 33(2): 178-184. (in Chinese)

[4] 赵义鋈, 赵俭. 声学测温研究现状及发展总结[J]. 计

- 测技术, 2021, 41(6): 7-16.
- ZHAO Y J, ZHAO J. Current studying status and developing review of acoustic thermometry [J]. Metrology and measurement technology, 2021, 41(6): 7-16. (in Chinese)
- [5] 赵俭, 杨永军. 气流温度测量技术[M]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- ZHAO J, YANG Y J. Airflow temperature measurement technology [M]. Beijing: China Standards Press, 2017. (in Chinese)
- [6] HSUANCA, CHENR S. Intelligent control of exit temperature in a gas-fuel can-type combustor[J]. Engineering applications of artificial intelligence, 2002, 15(9): 391-400.
- [7] MICHAILOVICH O, ADAM D. Robust estimation of ultrasound pulses using outlier-resistant de-noising [C]. IEEE transactions on medical imaging, 2003, 22(3): 368-381
- [8] 吴莉. 基于声波理论的炉膛温度场重建技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- WU L. Research on furnace temperature field reconstruction technique based on acoustic theory [D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese)
- [9] 陈克安, 曾向阳, 李海英. 声学测量[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- CHEN K A, ZENG X Y, LI H Y. Acoustic measurement [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [10] 颜华, 崔柯鑫, 续颖. 基于少量声波飞行时间数据的温度场重建[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(2): 470-475.
- YAN H, CUI K X, XU Y. Temperature field reconstruction based on a few sound travel-time data [J]. Chinese journal of scientific instrument, 2010, 31(2): 470-475. (in Chinese)
- [11] MARCHEVSKY M, HERSHKOVITZ E, WANG X R, et al. Quench detection for high-temperature superconductor conductors using acoustic thermometry [J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2018, 28(4): 1-5.
- [12] KLEPPE J. High temperature gas measurements using acoustic pyrometry[J]. Sens, 1996, 13(1): 17-22.
- [13] MASAHIRO S, SHOGO T. Measurement of time-of-flight for measurement of temperature distribution in boilers[C]. SICE, 2001, 37(3): 185-192.
- [14] ITO F, SAKAI M. Fundamental studies of acoustic measurement and reconstruction combustion temperature in large boiler[J]. Transactions of the Japan society of mechanical engineers, part B, 1987, 53(489): 1610-1614.
- [15] SCHMIDT P L, GREG W D, YUHAS D J, et al. Thermal measurements using ultrasonic acoustical pyrometry [J]. Ultrasonics, 2014, 54(4): 1029-1036.

(本文编辑:刘圣晨)



第一作者: 陈鑫虎(1998—), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要研究方向为声学测温。



通讯作者: 赵俭(1973—), 男, 河北秦皇岛人, 研究员, 研究方向为高温气流温度测量校准、动态温度测量校准、特殊环境下温度测量。