

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.05.09

# 声源定位系统动态校准方法研究

张炳毅, 付强, 徐佳, 张宁宁

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

**摘要:** 基于空间移动的标准点声源设计, 建立声源定位系统动态校准装置。提出空气声声源定位系统动态校准方法, 获得声源定位系统动态定位实验测量结果, 分析影响动态定位结果的主要因素, 并进行测量结果不确定度的评定。为车辆通过噪声源定位、飞行器飞行中噪声源定位的实验室动态校准提供了计量技术支撑。

**关键词:** 声源定位; 动态特性; 方法研究

**中图分类号:** TB9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5795(2019)05-0051-04

## Research on Calibration Method for Dynamic Characteristics of Sound Source Location System

ZHANG Bingyi, FU Qiang, XU Jia, ZHANG Ningning

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

**Abstract:** Based on the design of standard point sound source which can be moved in space, a dynamic calibration device for sound source localization system was established. Dynamic characteristics evaluated methods of the airborne sound source location system were put forward, experiment results were acquired and main influences were analyzed. Uncertainties of calibration results were evaluated. It provides metrological technical support for the lab calibration of dynamic characteristics of sound source localization system using in automobile and aero vehicle movement noise identification.

**Key words:** sound source location; dynamic characteristics; lab calibration

## 0 引言

声源定位识别系统主要用于噪声源的定位和识别, 进而用于减振和降噪设计。常见的商用装置由多个传声器组成阵列, 采用波束形成或声全息的方法获得声源的位置和大小等特性<sup>[1]</sup>。2014 年国家质检总局制定了 JJF1496-2014《声源识别定位系统(波束形成法)校准规范》, 这对保障声源定位识别系统的准确可靠具有重要意义。

但是 JJF1496-2014 只针对声源识别定位系统的静态特性<sup>[2]</sup>进行了校准说明, 在实际应用中, 声源往往都是移动的, 例如飞机的飞越噪声、汽车的通过噪声等<sup>[3]</sup>。因此单一的静态校准无法满足实际应用需求。为解决此问题, 本文研究了声源定位系统动态校准方法, 对于车辆通过噪声源定位、飞行器飞行中的噪声源定位的实验室动态校准提供了计量技术支撑。

## 1 声源定位系统动态校准装置

如图 1 所示, 声源定位系统动态校准装置主要包括空间动态位移机构、标准声源和可任意组装的消声箱。

空间动态位移机构采用二维设计, 通过步进电机带动同步带实现 XY 方向的二维运动, 最高速度可以达到 0.5 m/s, 采用光栅编码盘和计算机反馈控制系统技术, 位移的最大允许误差小于 0.2 mm。标准声源安装在 Y 方向上, X 轴带动 Y 轴整体做水平运动、Y 轴带动声源做竖直运动, 使声源可停留在二维平面内的任意位置。未来还可以对该系统进行升级, 增加 Z 向运动轴实现空间三维动态运动。声源定位系统动态校准装置如图 1 所示。

本文设计锥口声源作为移动标准声源, 即采用截面积连续减小的管来收缩整体系统的发声面积, 利用出口端较小的锥口声源近似点声源。采用的发声单元为全频扬声器, 锥管长度 40 mm, 锥角  $\theta = 17^\circ$ 。1, 2, 4, 8 kHz 标准声源测试结果如图 2 所示。

可任意组装的消声室采用 1 m × 1 m 的双层中空钢化玻璃模组作为消音箱壁面, 90 欧版加厚铝型材作为消音箱框架, 巴斯夫聚氨酯泡沫作为吸声尖劈, 具有可任意组装大小的优点, 实际装配的为 3 m × 3 m 的消声箱, 隔声结构的隔声量大于 20 dB, 具有较好的实用性。

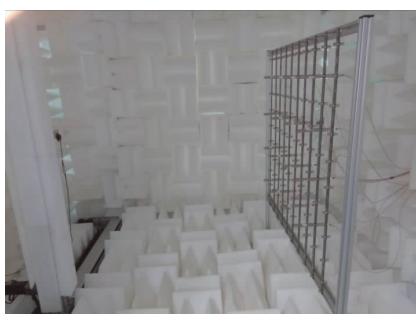


图 1 声源定位系统动态校准装置

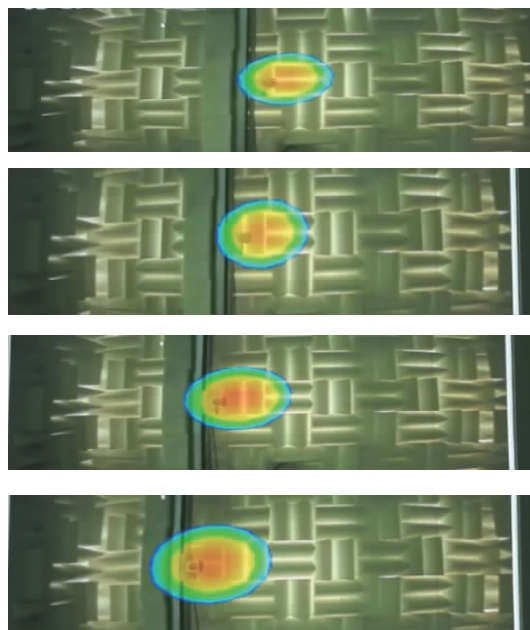


图 3 动态校准结果

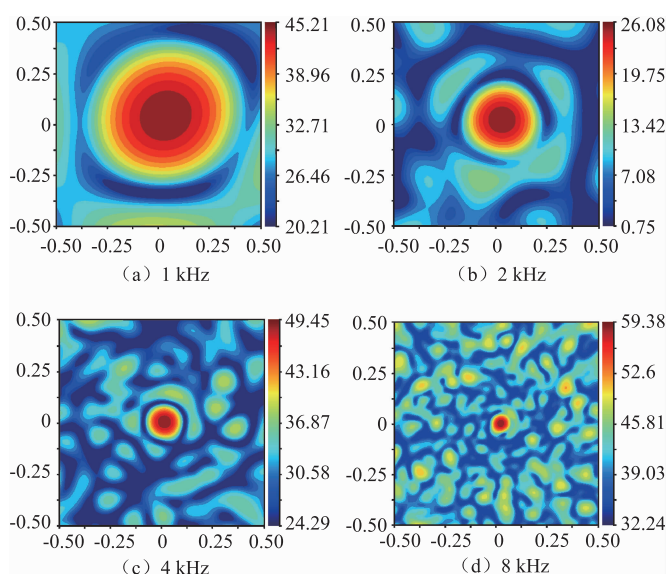


图 2 1, 2, 4, 8 kHz 标准声源测试结果

## 2 实验研究

动态系统对于连续输入的主要反馈特性包括幅频特性、相频特性等,对于阶跃或者脉冲输入的主要反馈特性包括上升时间、持续时间、幅值等<sup>[4]</sup>。参照以上动态参数,定位系统的动态特性可包括响应时间和动态定位误差,二者分别反映了定位系统响应的快慢和定位准确度随时间的变化。根据声源定位系统的特性,采用  $10 \times 10$  的矩形传声器阵列,在 1000 Hz 下对其响应时间和动态定位误差进行了实验室校准。声源由右向左移动,每间隔 2 s 的定位结果图如图 3 所示。

对动态校准结果进行分析:

### 1) 响应时间

定义响应时间为:连续两次猝发音时间间隔和声源定位系统两次定位结果时间差之间的差值。

实验中声源发出间隔 10 ms 的 1000 Hz 猝发声信号,在距离 1 m 远的位置,声源定位系统对其进行测量获得响应时间。通过 10 次测量,响应时间校准结果为:频率为 1000 Hz;平均响应时间为 6.4 ms;测量不确定度  $U = 0.07 \text{ ms}$  ( $k = 2$ )。

### 2) 动态定位误差

定义动态定位误差为:动态移动过程中标准声源实际位置和声源定位系统显示位置之间的差值中的最大值。

实验中标准声源以 0.1 m/s 的速度水平移动并发出单频持续声信号,在距离 1 m 远的位置,对声源定位系统的动态误差进行记录。定位误差校准结果为:频率为 1000 Hz;动态定位误差为 225.2 mm;静态定位误差为 24.1 mm;测量不确定度  $U = 2.5 \text{ mm}$  ( $k = 2$ )。

## 3 不确定度分析

### 1) 响应时间的不确定度

由响应时间的定义可建立以下数学模型

$$t_r = (t_{2c} - t_{1c}) - (t_{2s} - t_{1s}) + \varepsilon_2 + \varepsilon_1 \quad (1)$$

式中:  $t_r$  为响应时间;  $t_{2c}$  为第二次给出定位结果的时刻;  $t_{1c}$  为第一次给出定位结果的时刻;  $t_{2s}$  为发出第二次猝发音信号的时刻;  $t_{1s}$  为发出第一次猝发音信号的时刻;  $\varepsilon_2$  为声源定位系统的计时 MPE;  $\varepsilon_1$  为猝发音的计时 MPE。以上物理量的单位均为 ms。

由于机动车鸣喇叭抓拍系统中  $t_{2c}$  和  $t_{1c}$  的测量采用同样的测量系统, 因此  $t_{2c}$  和  $t_{1c}$  呈正相关, 相关系数为 1; 公式(1)中由于猝发音时间采用同样的测量系统, 因此  $t_{2s}$  和  $t_{1s}$  呈正相关, 相关系数为 1。因此根据不确定度传播率<sup>[5]</sup>, 有

$$u_{tr} = \sqrt{(u_{t_{2c}} + u_{t_{1c}})^2 + (u_{t_{2s}} + u_{t_{1s}})^2 + u_{\varepsilon_2}^2 + u_{\varepsilon_1}^2} \quad (2)$$

式(1)中的  $t_{2c}$ ,  $t_{1c}$ ,  $t_{2s}$ ,  $t_{1s}$  均由测量获得, 所以其不确定度可采用 A 类方法评定,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_1$  的不确定度采用 B 类方法评定。由于采用 51.2 kHz 采样率, 采样间隔为 0.0195 ms, 因此 MPE 均按照 0.02 ms 作为估算值。响应时间的各不确定度分量结果如表 1 所示。

表 1 响应时间不确定度分量汇总表

| 输入量 $X_i$       | 估计值 $x_i/\text{ms}$ | 标准不确定度 $u_{x_i}/\text{ms}$ | 分布 | 灵敏系数 $c_i$ | 不确定度分量 $u_{y_i}/\text{ms}$ |
|-----------------|---------------------|----------------------------|----|------------|----------------------------|
| $t_{2c}$        | 16.41               | 0.01                       | 正态 | 1.0        | 0.01                       |
| $t_{1c}$        | 0.00                | 0.01                       | 正态 | 1.0        | 0.01                       |
| $t_{2s}$        | 10.00               | 0.01                       | 正态 | 1.0        | 0.01                       |
| $t_{1s}$        | 0.00                | 0.01                       | 正态 | 1.0        | 0.01                       |
| $\varepsilon_2$ | 0                   | 0.012                      | 矩形 | 1.0        | 0.012                      |
| $\varepsilon_1$ | 0                   | 0.012                      | 矩形 | 1.0        | 0.012                      |

$$u_{tr} = \sqrt{(u_{t_{2c}} + u_{t_{1c}})^2 + (u_{t_{2s}} + u_{t_{1s}})^2 + u_{\varepsilon_2}^2 + u_{\varepsilon_1}^2} = \sqrt{(0.01 + 0.01)^2 + (0.01 + 0.01)^2 + 0.012^2 + 0.012^2} = 0.033 \text{ ms}$$

由不确定度分量可以看出, 起到主要作用的是被校准的系统引入的。取  $k=2$ , 则扩展不确定度  $U=0.07 \text{ ms}$  ( $k=2$ ), 校准结果表示为:  $t_r = 6.4 \text{ ms} \pm 0.07 \text{ ms}$ 。

## 2) 动态定位误差的不确定度

根据动态定位误差的定义, 其数学模型为

$$\Delta x = \max \{X(t) - X_s(t) + \varepsilon(t)\} \quad (3)$$

式中:  $X(t)$  为声源定位系统测量获得的随时间变化的位置;  $X_s(t)$  为标准声源声中心随时间变化的位置;  $\varepsilon(t)$  为位移机构随时间变化的允差。以上物理量单位都为 mm。

显然, 公式(3)中各项互不相关, 因此根据不确定度传播率<sup>[5]</sup>, 可以获得以下公式

$$u_{\Delta x} = \sqrt{u_X^2 + u_{X_s}^2 + u_{\varepsilon}^2} \quad (4)$$

动态定位误差的各不确定度分量值如表 2 所示。其中,  $X$  由测量获得, 其不确定度采用 A 类方法评定;  $X_s$  与  $\varepsilon$  采用 B 类方法评定, 取其最大值。则

$$u_{\Delta x} = \sqrt{u_X^2 + u_{X_s}^2 + u_{\varepsilon}^2} = \sqrt{1.12^2 + 0.5^2 + 0.12^2} = 1.232 \text{ mm}$$

由不确定度分量可以看出, 起到主要作用的是被校准的系统引入的。取  $k=2$ , 则扩展不确定度  $U=2.5 \text{ mm}$  ( $k=2$ ), 校准结果表示为:  $\Delta x = 255.2 \text{ mm} \pm 2.5 \text{ mm}$ 。

表 2 动态定位误差各不确定度分量汇总表

| 输入量 $X_i$     | 估计值 $x_i/\text{mm}$ | 标准不确定度 $u_{x_i}/\text{mm}$ | 分布 | 灵敏系数 $c_i$ | 不确定度分量 $u_{y_i}/\text{mm}$ |
|---------------|---------------------|----------------------------|----|------------|----------------------------|
| $X$           | 225.2               | 1.12                       | 正态 | 1.0        | 1.12                       |
| $X_s$         | 1.0                 | 0.5                        | 正态 | 1.0        | 0.5                        |
| $\varepsilon$ | 0                   | 0.12                       | 矩形 | 1.0        | 0.12                       |

## 4 结论与展望

为保证基于常用的波束建立的声源定位识别系统准确可靠, 本文建立了声源定位系统动态校准装置, 研究了空气中声源定位系统动态校准方法, 获得了声源定位系统动态定位实验结果, 并进行了实验验证和不确定度评定。

通过以上校准装置设计和实验结果, 以及不确定度分析, 可以得到以下结论:

1) 可以通过空间可移动锥口声源的方式实现声源定位系统动态特性的实验室校准;

2) 文中提出的响应时间和动态定位误差等计量特性参数, 可以对声源定位系统动态特性进行描述。

3) 校准结果显示, 动态声源条件下, 动态定位误差明显大于静态定位误差, 这主要是由于动态定位误差受到静态定位误差(24 mm)、主旁瓣抑制比(约为 25 dB)、分辨力(约为 150 mm)、响应时间(6.4 ms)、扫描速度(0.1 m/s)、声源定位算法等多个因素综合影响。其中的主要不确定度来源是被校准声源定位系统引入的<sup>[6-10]</sup>。

4) 实验中距离 1 m, 移动速度为 0.1 m/s, 则在 50 m 处的等效速度为 5 m/s(18 km/h), 该速度远远小于实际的车辆速度和飞机飞行速度, 未来将研究高速下声源定位系统动态特性校准装置。

## 参 考 文 献

- [1] 噪声源识别[EB/OL]. <https://www.bksv.com/zh-HK/Applications/product-noise/Noise-source-identification>.
- [2] JJF 1496-2014 声源识别定位系统(波束形成法)校准规范[S]. 2014.
- [3] 飞跃移动声源波束形成[EB/OL]. <https://www.bksv.com/zh-HK/products/Analysis-software/acoustic-application-software/noise-source-location/flyover-beamforming-bz-5940>.
- [4] GB/T 2298-2010 机械振动、冲击与状态监测[S]. 2010.
- [5] 国家质量监督检验检疫总局. JJF1059.1-2012 测量不确定度评定与表示[S]. 北京:中国质检出版社, 2012.
- [6] 陈杭升, 姚磊, 王斌锐, 等. 声源定位系统校准研究与不确定度分析[J]. 中国测试, 2016, 42(8): 17-22.
- [7] 王舒文. 分布式麦克风阵列定位方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [8] 孙放, 李四超, 来金梅. 迭代优化算法的自校准麦克风阵

列声源定位系统[J]. 微电子学与计算机, 2016, 33(1): 6-9.

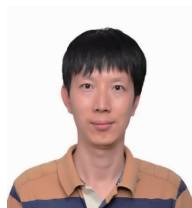
- [9] 陆灏铭, 陈玮, 刘寿宝. 基于麦克风阵列的声源定位系统设计[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(4): 79-81.
- [10] 刘哲, 陈日林, 滕鹏晓, 等. 基于平面传声器阵列的声源定位系统[J]. 声学技术, 2011, 30(2): 123-128.

收稿日期: 2019-04-20; 修回日期: 2019-06-20

基金项目: 国家计量技术基础科研项目(MJJ201332)

## 作 者 简 介

张炳毅(1984-), 男, 高级工程师, 主要从事振动及声学计量测试研究工作。



## 西北国家计量测试中心与新疆生产建设兵团市场监督管理局在西安举行签约仪式

近日, 西北国家计量测试中心和新疆生产建设兵团市场监督管理局在西安举行了《西北区域计量战略合作框架协议(补充)》签约仪式, 并就双方今后进一步加强合作的有关意向进行了广泛的探讨和交流。

西北国家计量测试中心主任、陕西省市场监管局党组书记、局长张小宁对新疆生产建设兵团局来陕西考察调研表示欢迎。他表示双方有良好的合作基础, 要进一步发挥好合作机制和平台作用, 立足监管工作实际, 加强双方交流, 充分发挥陕西局人才、技术等方面的优势, 做好对口援助工作, 共同推动两地市场监管工作更上一层楼。

新疆生产建设兵团市场监督管理局党组书记、局长段建国感谢西北国家计量测试中心对兵团局的关心和支持, 他表示, 陕西在市场监管方面积累了许多经验, 希望双方进一步加强联系沟通, 深化合作, 在项目和资金援助的同时, 通过多种形式加大对兵团局战略援助, 提升兵团局市场监管能力。

依据市场监管总局将兵团局计量工作部门作为独立建制的省级计量管理单位纳入西北大区计量管理体系的明确要求, 按照兵团局申请加入西北区域计量战略合作框架协议的申请, 经西北国家计量测试中心第30次工作会议暨第35届西北计量协作年会议表决, 各成员单位全票通过了兵团局的提请。按照大会的决定, 10月12日上午, 西北国家计量测试中心主任张小宁与兵团局党组书记、局长段建国签署《西北区域计量战略合作框架协议(补充)》。

签约仪式及座谈会上, 双方还就许多合作的具体问题交换了意见, 达成了共识, 一致认为签约双方要以此次协议的签约为契机, 开展更细致有效的帮扶工作, 帮助兵团快速提升计量综合实力, 更好的发挥保卫边疆、建设边疆兵团的使命。同时, 通过计量战略合作框架协议不断推进, 推动兵地市场监管局全方位合作发展, 进一步激活西北地区计量技术在“一带一路”国家战略中的服务助推作用, 为促进区域计量工作协同发展, 推动西北地区经济社会发展提供坚实的计量技术服务和保障。

(摘自 计量测控)