

基于双耳强度差的二维声源定位装置

崔皓晔¹ 黄河鸿¹ 纪子磊¹ 冯 赛¹ 林怡雯¹ 薄春卫²

(¹ 天津科技大学机械工程学院, 天津 300222; ² 天津科技大学理学院, 天津 300457)

摘 要 近年来, 声源定位装置在民用、工业与军事中得到了广泛应用。当前声源定位装置多为依靠程序算法实现, 技术复杂且实现成本高, 本文通过传统物理方法, 运用双耳强度差与三角测量原理设计了一种基于双耳强度差的声源定位装置, 主要由声音传感器、分光计与示波器组成。通过理论计算和实验测量分析给出该装置定位近场声源的相对误差在 6% 以内, 精度优良, 而且装置扩展性较好, 可搭载电机驱动系统, 具有成本低、可复制性强等优点。

关键词 双耳强度差; 三角测量; 声源定位; 分光计; 峰峰值

SOUND SOURCE LOCATION DEVICE BASED ON BINAURAL INTENSITY DIFFERENCE

CUI Haoye¹ HUANG Hehong¹ JI Zilei¹ FENG Sai¹ LIN Yiwen¹ BO Chunwei²

(¹ School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222;

² College of Science, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222)

Abstract In recent years, sound source location devices have been widely used in civil, industrial, and military applications. Currently, sound source positioning devices are realized mainly by program algorithm, which has complex technology and high cost. This paper uses traditional physical methods to design a sound source positioning device based on binaural intensity difference and triangulation, mainly composed of sound sensors, a spectrometer, and an oscilloscope. Through theoretical calculation and experimental measurement analysis, the relative error of the device is less than 6%, and the device has good accuracy. The device has good expansibility, can be equipped with a motor drive system, and has the advantages of low cost and robust reproducibility.

Key words auricular strength difference; triangulation; sound source localization; spectrometer; peak-to-peak value

声源定位技术主要是研究确定被接收信号相对于接收传感器来自什么方向和距离是多少的问题, 即方向估计 (Bearing Estimating) 和距离估计

(Range Estimating)。其中方向估计也叫方向识别 (Direction Finding) 或 DOA (Direction-of Arrival) 估计^[1]。在诸多军用和民用系统中具有极其

收稿日期: 2024-04-11

通信作者: 薄春卫, bochunwei@tust.edu.cn。

引文格式: 崔皓晔, 黄河鸿, 纪子磊, 等. 基于双耳强度差的二维声源定位装置[J]. 物理与工程, 2025, 35(6): 208-214.

Cite this article: CUI H Y, HUANG H H, JI Z L, et al. Sound source location device based on binaural intensity difference[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(6): 208-214. (in Chinese)

重要的意义^[2-4]。

目前常见的声源定位技术有多麦克风阵列定位技术^[5-7]、光纤声学传感器定位技术^[8]、超声波定位技术^[7-8]等。多麦克风阵列定位技术是将多个麦克风布置在不同位置,采集声波信号,利用信号相位差或幅度差的变化来确定声源的位置^[9-10]。此定位方法需要较多的麦克风数量,成本高,并且麦克风之间存在互相干扰,在处理多麦克风时,需要的运算量较大,所以实现起来较困难^[10]。光纤声学传感器定位技术是将光纤作为感知元件,采集声波信号,通过精巧的应力或温度分布测量方法,将光纤上感知到的声波信号转换为声源位置^[8]。其实现需要高精度的光纤传感器、数字信号处理器等,这些设备成本高,安装和调试都较困难,并且声波会受到空气阻尼和反射等多种物理现象的影响,因此受环境影响较大。超声波定位技术利用超声波在空气中传播速度快、衰减小的特点,通过测量超声波的发射和接收时间,确定目标距离,从而实现定位。但是超声波定位技术需要使用比较复杂的发射和接收设备,并需要进行高精度调整和校准,因此相对成本较高^[13]。

本文避开传统的算法模型,利用物理学中常见的双耳强度差^[14]与三角关系制作了一套二维声学定位装置,该装置由两个声音接收模块组成,每个声音接收模块模仿人的双耳产生强度差,通过示波器的峰峰值显示。声音接收模块搭载于分光计上,分光计模仿人的头部进行旋转找到峰峰值为0的角度,通过两套装置的中垂线交点即可进行二维平面内的声源定位。

1 定位原理

1.1 双耳强度差原理定向

双耳强度差(ILD)是指人体左右耳之间有一定的距离,当声源位于人头部正前方时,声源到双耳的距离相等,即声波在空气中传播距离相同能量损失相同,所以其声强差为0^[15-17]。当声源偏于正前方时,声音传播到左右耳时会产生距离差,距离的差异造成声音到双耳的强度差异,故可通过判断双耳接收声强差是否为0判断声源方位。

在近场声源中声波传送至双耳过程如图1所示,由于声强与距离的平方成反比,可设初始声强

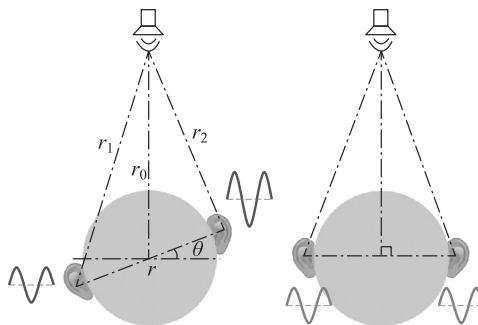


图1 不同角度下的双耳声强差示意图

为 I_0 ,比例系数为 k ,声源至左耳距离为 r_1 ,声源至右耳距离为 r_2 ,故左耳接收的声强为 $I_1 = kI_0/r_1^2$,右耳接收的声强为 $I_2 = kI_0/r_2^2$,同时根据余弦定理得左右耳声强差 ΔI 为

$$\begin{aligned} r_1^2 &= r_0^2 + \left(\frac{1}{2}r\right)^2 - 2r_0\left(\frac{1}{2}r\right)\cos(90^\circ + \theta) \\ &= r_0^2 + \frac{1}{4}r^2 + r_0r\sin\theta \\ r_2^2 &= r_0^2 + \left(\frac{1}{2}r\right)^2 - 2r_0\left(\frac{1}{2}r\right)\cos(90^\circ - \theta) \\ &= r_0^2 + \frac{1}{4}r^2 - r_0r\sin\theta \\ \Delta I &= |I_2 - I_1| \\ &= kI_0 \left| \frac{1}{r_0^2 + \frac{1}{4}r^2 - r_0r\sin\theta} - \frac{1}{r_0^2 + \frac{1}{4}r^2 + r_0r\sin\theta} \right| \end{aligned} \quad (1)$$

当 $\Delta I = 0$ 时声源在双耳中垂线上。

同时可根据左右耳强度差表达式绘制其与 θ 之间得理论曲线如图2所示。

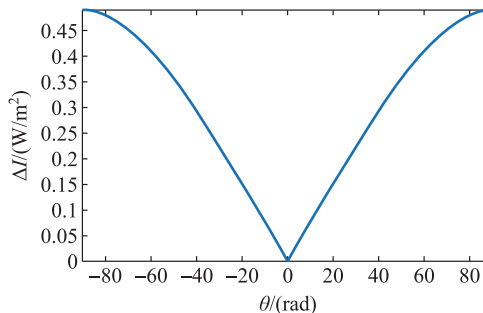


图2 双耳强度差理论曲线

1.2 三角测量原理测距

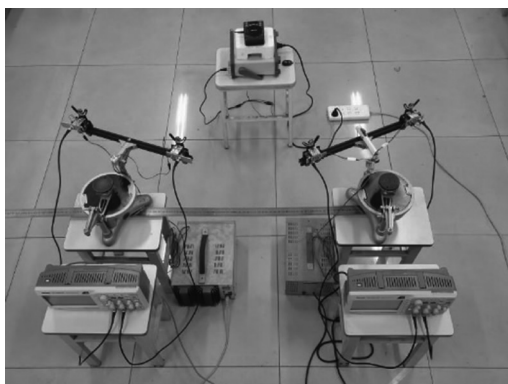
三角测量是工程测量中常用的几何学方法之

一,利用三角形的基本性质,如三角形的边长、角度、正弦、余弦等关系,结合已知基准线长度和角度来测量目标点位置^[18]。使用三角测量方法进行定位的优势在于不需要直接测量目标点到测量仪器之间的距离,只需要测量出测向角和基准线长度,避免了大多数情况下难以直接测量的问题。它是一种简单而又有效的定位方法,被广泛应用于各种领域^[19]。

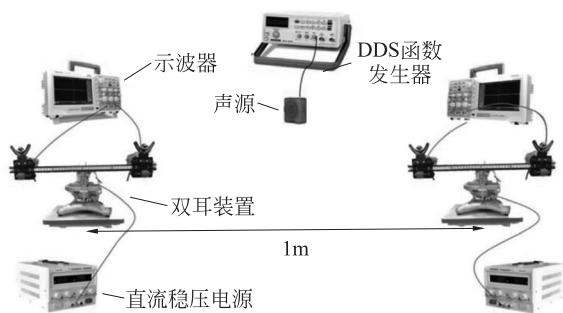
2 系统设计

2.1 硬件整体结构

声源定位系统由两套相同的声源定位装置组成,声源定位装置由声源模块、声音接收模块和测量模块组成。两套声源定位装置之间的距离为1m,如图3(a)(b)所示。



(a)



(b)

图3 声源定位系统总图
(a) 实物图; (b) 示意图

2.1.1 声源模块

声源模块由数字合成(DDS)函数发生器和高保真扩音器组成。为了确保声音信号的高质量输出,选用的扩音器具备以下特点:响应速度快、频响范围宽广且平坦、以及高灵敏度,这些特性使得扩音器能够精确地再现声音信号。声音的频率和

音量由 DDS 函数发生器控制,通过精确设置不同的频率(范围为 20~20000Hz)、相位(范围为 0~360 度)和幅度(范围为 60~100dB)等参数,使得扩音器能够产生多样化且精确的声音信号输出。研究表明,声源中心到预测点之间的距离超过声源最大几何尺寸 2 倍时,该声源即可近似为点声源^[20],在本实验中,扩音器口径约 5cm,声源频率为 6000Hz,实验测量距离控制在其 2 倍以上,故可看成点声源。

2.1.2 声音接收模块

声音接收模块由固定在改装的分光计横梁上的两个收音头、示波器和直流稳压源组成。其中,两个收音头呈直线阵列对称分布在横梁上,每个收音头由一个声音传感器(规格为 MAX9814)、悬架、O 型圈、滑车和接线端子组成。直流稳压源与声音传感器相连接,为声音传感器提供一个稳定的直流电源,使其正常工作。示波器与声音传感器相连接。当声音传感器采集到声音信号,将其转化为电信号送入示波器,通过示波器可以实时观察到声波信号的形态和特征。通过设置示波器以图形形式显示三组波形,以数值形式显示峰峰值,三组波形分别是两个声音传感器的电信号波形 CH1 和 CH2 以及差分信号 CH1-CH2。

2.1.3 测量模块

测量模块由改装的分光计组成。分光计是一种用来精密测量光线偏转角度的光学仪器^[21-22],通过对分光计进行改装,可以用来精确测量声源方位角信息。依据上文所述的双耳强度差定向原理,转动改装的分光计,示波器上显示的波形和峰峰值发生变化。当转动到某一方位,示波器上差分信号 CH1-CH2 的波形为一条直线且峰峰值为 0,此时分光计横梁中垂线正指向声源。当另一套声源定位系统中的横梁中垂线正指向声源,则两条中垂线的交点即为声源位置。通过读出分光计的两组数据取平均既分光计读数,重复操作记录两分光计上的角度,即可通过上文所述的三角测距原理计算出声源位置坐标。

3 实验分析

3.1 装置可行性验证

本声源定位装置运用双耳效应原理搭建实验

装置将声音强度差转化为波形峰峰值的差,以下验证该装置符合双耳效应的原理。

由于声源到达装置中的声音传感器的距离不同,则两个声音传感器接收到声源的声强不同,所以在示波器上的“数学”功能计算出两个波形峰峰值的差并显示出来,并且随着分光计的转动,声源到声音传感器的距离改变,其差值也会发生改变。当实验装置与声源距离为 1m 时,通过旋转分光计进行实验可绘制得到实验曲线,如图 4 所示,通过表示声强差与旋转角度的理论与实际曲线相比,声源位置到两耳的距离差值变化与波形差变化规律相同,与双耳效应理论曲线近似相同,故该装置能够利用双耳效应原理确定声源方向。

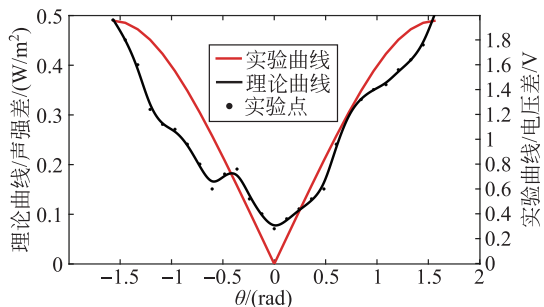


图 4 理论曲线与实验曲线对比

3.2 声源定位

利用声源定位系统对 6kHz 的声音信号进行一系列的声源定位测试实验,实验流程如图 5 所示。

具体实验操作步骤如下:

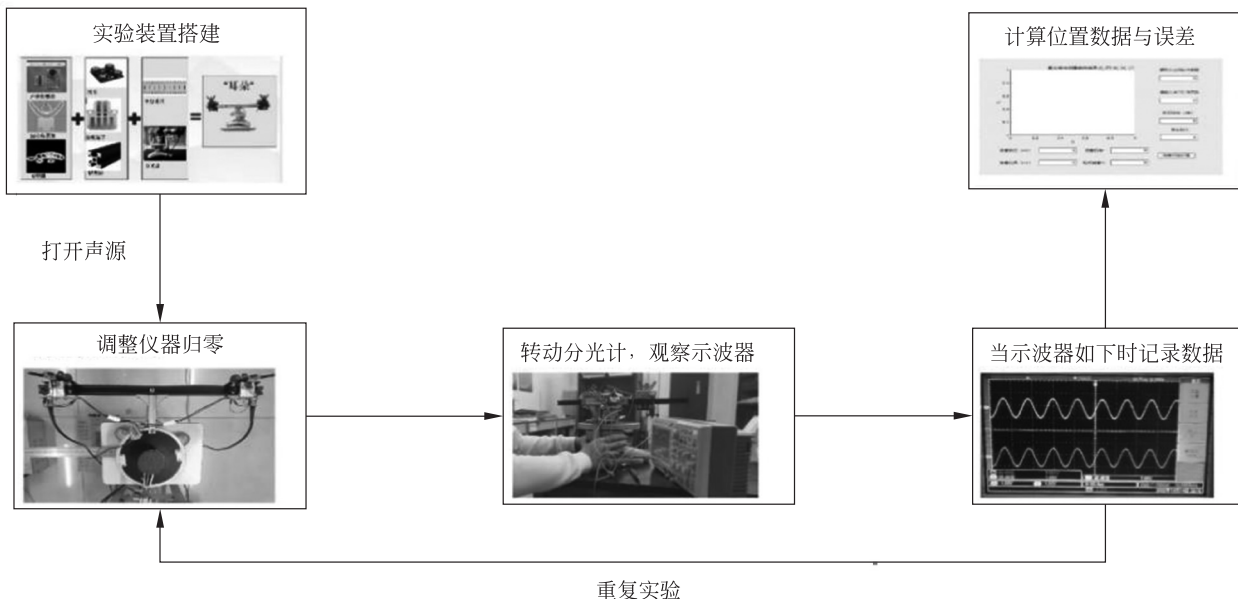


图 5 声源定位实验流程图

(1) 搭建实验装置;

(2) 调整仪器使其满足测量条件,左分光计接收器转轴中心(O_1)及零刻度线与右分光计接收器转轴中心(O_2)及零刻度线处于一条直线上, $O_1 \sim O_2$ 的距离为 D ;

(3) 转动左分光计,观察示波器波形及示数的变化,当差分信号 CH1-CH2 的峰峰值最小时,接收器正指向声源,读出左分光计的两组读数取平均后为 θ_1 ;同理,读出右分光计的两组读数取平均后 θ_2 ;

(4) 使用程序计算结果^[23-24]。

如图 6 所示,在 $\triangle O_1 O_2 P'$ 中,由三角形内角和为 180° ,则 $O_1 P$ 与 $O_2 P$ 夹角为 $\theta_3 = 180^\circ - \theta_1 - \theta_2$ 。设测量的声源极径 $O_1 P'$ 为 $r_{\text{测}}$,则有

$$\begin{cases} \frac{\sin \theta_3}{D} = \frac{\sin \theta_2}{r_{\text{测}}} \\ r_{\text{测}} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_3} \times D = \frac{\sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \end{cases} \quad (2)$$

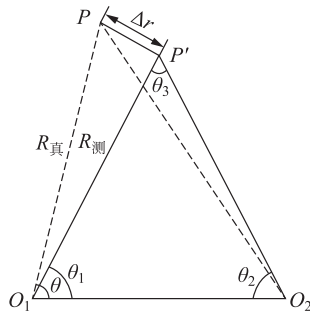


图 6 三角定位计算图

3.3 误差分析

通过上文可得到测量声源位置 P' 的极坐标为 $(r_{\text{测}}, \theta_1)$ 。利用分光计和激光测距仪测出声源位置 P 的极坐标 $(r_{\text{真}}, \theta)$ 为约定真值。如图 6 所示。则偏差距离 Δr 为

$$\Delta r = \sqrt{r_{\text{测}}^2 + r_{\text{真}}^2 - 2 \times r_{\text{测}} \times r_{\text{真}} \times \cos(\theta_1 - \theta)} \tag{3}$$

设其相对误差为 δ , 则 δ 为

$$\delta = \frac{\Delta r}{r_{\text{真}}} \tag{4}$$

通过本方法,可以得到声源的具体定位,通过改变 DDS 函数发生器及声源(P)的坐标,得出了三组数据,其实验测量结果如表 1 所示。由表 1 可知,其实验测量数据的相对误差均在 6% 以下,误差较小。

同时本实验将三组实验结果绘制于同一极坐标图下,如图 7 所示,可观察到在距离装置越近的位置真实坐标与实验坐标越接近,当测试距离超过 200cm 时,误差会增大,因此该装置近场声源内精度优良,本文误差超过 10% 视为无效结果,因为本装置定位极限在 300cm 左右。同时本文与相同学生实验的麦克风阵列声源定位系统进行了对比,对比文献^[5]装置其在 30cm 定位时,误差已达到 5.7%;对比文献^[25]装置,其采用麦克风阵列结合 BP 神经网络算法在 8m×8m×8m 的房间内测试时,均方误差在 3% 左右,证明不同算法对于声源定位准确性较大,相比之下虽然麦克风阵列定位可以凭借硬件和算法达到优秀的定位精度,但受算法影响较大,相比之下本文的设备对于学生进行实验较友好,对算法依赖较小,更有助于学生理解实验的物理原理。

在进行上述测试时,我们注意到随着测试距离的增加,测量误差也随之增大。通过分析可得这一现象主要由几个因素造成:首先声波在传播

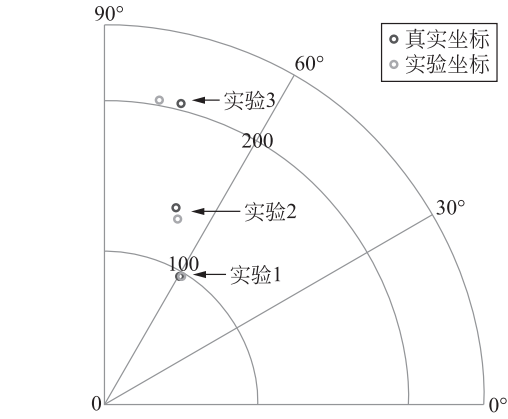


图 7 声源位置对比图

过程中会经历自然衰减,导致信号强度降低,影响测量精度;其次远距离测试更容易受到环境噪声的干扰,这些噪声可能掩盖或扭曲声音信号;此外声源的指向性在远距离上可能更加明显,导致声音信号在某些方向上强度减弱;测试设备的性能限制,如麦克风的灵敏度和频率响应,在远距离上也可能影响测量结果的准确性;多路径效应,即声波通过不同路径到达接收点,也可能导致干涉和反射,进一步影响测量结果。

这也为后续改进实验提供实验思路,后续可尝试使用特定的算法来补偿声波在传播过程中的衰减,同时选择在噪声较低的时间进行测试,并采用噪声消除技术来控制环境噪声的影响,希望通过这些改进措施,能够更准确地控制测试距离增大带来的误差,并确保实验结果的可靠性。

4 结语

本文介绍了双耳强度差与三角测量相结合的一种声源定位方法,具体阐述了该方法的实验原理与步骤,并搭建了一套实验设备进行了多次实验,得出在近场声源内该装置精度较好,可实现二

表 1 实验结果

	实验 1	实验 2	实验 3
A 分光计平均后数值/(°)	58°51′	68°19′	79°59′
B 分光计平均后数值/(°)	59°43′	66°57′	72°10′
极坐标约定真值/cm	(98, 59.52)	(138, 70.23)	(204, 75.77)
极坐标测量真值/cm	(98.33, 58.85)	(130.7, 68.32)	(203.8, 79.99)
偏差距离 Δr /cm	1.2	8.5	15
相对误差 δ /%	1.2	6.2	7.4

维平面内的精确定位。同时与传统的麦克风阵列声源定位等相比,物理原理比较明确,学生能更明确、方便的进行动手实验。

在未来的研究和实践中,将结合机械控制和计算机控制算法进一步对该系统进行优化升级,做到更好的集成化,实现硬件与软件的高度协同,通过引入模块化设计理念,不同功能单元之间将具备更强的兼容性和互换性,便于系统的扩展与维护,更方便学生的组装和进行实验操作。使用步进电动机控制分光计的转动,同时增加旋转角度测量元件,以实现可以自动进行声源定位的同时,提高系统的精度和准确性。

本实验装置突出物理原理,因此也适合应用在教学。通过实验装置,学生可以直观地观察到使用“分光计”模拟双耳进行声源定位的实际操作过程,从而加深对理论的理解。其涉及的实验内容可以让学生亲自操作装置,不仅锻炼了学生的实验技能,还激发了他们对物理学科的兴趣。

参 考 文 献

- [1] 赵大勇. 阵列信号处理中的 DOA 估计关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
ZHAO D Y. Research on key technologies of DOA estimation in array signal processing[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011. (in Chinese)
- [2] 柯昆. 声源定位技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
KE K. Research on sound source localization technology [D]. Xi'an: Xidian University, 2010. (in Chinese)
- [3] 张俊. 声音定位系统[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2014.
ZHANG J. Sound localization system[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [4] 郑辉, 王鹏, 张涛. 声源定位系统的算法分析研究[J]. 科技与创新, 2021, 182(14): 18-19.
ZHENG H, WANG P, ZHANG T. Algorithm analysis and research on sound source localization systems[J]. Science and Technology & Innovation, 2021, 182(14): 18-19. (in Chinese)
- [5] 李彦璐, 沈一, 潘欣裕, 等. 基于麦克风阵列的声源定位系统研究[J]. 物联网技术, 2021, 11(7): 26-28.
LI Y T, SHEN Y, PAN X Y, et al. Research on sound source localization system based on microphone array[J]. Internet of Things Technologies, 2021, 11(7): 26-28. (in Chinese)
- [6] 居太亮. 基于麦克风阵列的声源定位算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
JU T L. Research on sound source localization algorithms based on microphone array[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006. (in Chinese)
- [7] 崔玮玮. 基于麦克风阵列的声源定位与语音增强方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
CUI W W. Research on sound source localization and speech enhancement methods based on microphone array[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009. (in Chinese)
- [8] 陈程远. 基于光纤激光传感阵列的声学信号采集及定位技术研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2021.
CHEN C Y. Research on acoustic signal acquisition and localization technology based on fiber laser sensing array[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2021. (in Chinese)
- [9] 李昌禄, 苏寒松. 超声波定位系统的研究[J]. 实验室研究与探索, 2013, 32(2): 39-44.
LI C L, SU H S. Research on ultrasonic positioning system [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2013, 32(2): 39-44. (in Chinese)
- [10] 张宁, 付炜平, 孟荣, 等. 室内空间定位方法研究综述[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(3): 882-892.
ZHANG N, FU W P, MENG R, et al. Review of indoor space positioning methods[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(3): 882-892. (in Chinese)
- [11] 黄海军. 基于传声器阵列的声源定位系统的初步研究[D]. 上海: 东华大学, 2013.
HUANG H J. Preliminary research on sound source localization system based on microphone array[D]. Shanghai: Donghua University, 2013. (in Chinese)
- [12] 孙建红, 张涛, 焦琛. 麦克风数量与阵型对声源定位性能的影响[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(11): 14-21.
SUN J H, ZHANG T, JIAO C. Influence of microphone number and array configuration on sound source localization performance[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(11): 14-21. (in Chinese)
- [13] 苑洁. 基于 STM32 单片机的高精度超声波测距系统的设计[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
YUAN J. Design of high-precision ultrasonic ranging system based on STM32 microcontroller[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012. (in Chinese)
- [14] 王思. 双耳时间差和强度差在声源定位效果上的感知测试与研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2016.
WANG S. Perception test and research on binaural time difference and intensity difference in sound source localization effect[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2016. (in Chinese)
- [15] 甘宜超, 孙骞, 辛丽, 等. 机器人双耳声源定位[J]. 信息技术, 2017, 41(7): 9-13, 18.
GAN Y C, SUN Q, XIN L, et al. Binaural sound source localization for robots[J]. Information Technology, 2017, 41(7): 9-13, 18. (in Chinese)

- [16] 郭文静,王恒,张聪. 双耳强度差的空间水平方位角感知特性研究[J]. 软件导刊,2021,20(9):98-102.
GUO W J, WANG H, ZHANG C. Study on spatial horizontal azimuth perception characteristics of binaural intensity difference[J]. Software Guide, 2021, 20(9): 98-102. (in Chinese)
- [17] 李坤. 双耳强度差感知特性测量与分析[D]. 武汉. 武汉轻工大学,2015.
LI K. Measurement and analysis of binaural intensity difference perception characteristics[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2015. (in Chinese)
- [18] 万瑾,黄元庆. 激光三角法测量的研究[J]. 三明学院学报, 2006,23(4): 361-364.
WAN J, HUANG Y Q. Research on laser triangulation measurement[J]. Journal of Sanming University, 2006, 23(4): 361-364. (in Chinese)
- [19] 李锐. 提高三角工程测量精度的方法探析[J]. 冶金管理, 2019, 381(19): 10-11.
LI R. Exploration of methods to improve triangulation surveying accuracy [J]. Metallurgical Management, 2019, 381(19): 10-11. (in Chinese)
- [20] HJ 2.4—2009, 环境影响评价技术导则 声环境[S].
HJ 2.4—2009, Technical Guidelines for Environmental Impact Assessment-Acoustic Environment[S]. (in Chinese)
- [21] 刘安平, 孙子杰, 杨东侠, 等. 分光计实验中竖向偏角对测量结果的影响[J]. 物理与工程, 2022, 32(5): 127-132.
LIU A P, SUN Z J, YANG D X, et al. Influence of vertical deflection angle on measurement results in spectrometer experiments[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(5): 127-132. (in Chinese)
- [22] 赵欣. 分光计调节过程的改进[J]. 科学咨询(科技·管理), 2022, 797(12): 105-107.
ZHAO X. Improvement of spectrometer adjustment process[J]. Scientific Consulting (Technology & Management), 2022, 797(12): 105-107. (in Chinese)
- [23] 宗节保, 段柳云, 王莹 等. 基于 MATLAB GUI 软件制作方法的研究与实现[J]. 电子设计工程, 2010, 18(7): 54-56.
ZONG J B, DUAN L Y, WANG Y, et al. Research and implementation of MATLAB GUI software development method[J]. Electronic Design Engineering, 2010, 18(7): 54-56. (in Chinese)
- [24] 邱金蕙, 王裔辉, 李振全. 基于 Matlab/GUI 的新型界面开发方式[J]. 河北工业科技, 2008, 110(4): 233-235, 254.
QIU J H, WANG Y H, LI Z Q. A new interface development method based on Matlab/GUI[J]. Hebei Industrial Science and Technology, 2008, 110(4): 233-235, 254. (in Chinese)
- [25] 曾庆宁, 苏盼, 王红丽, 等. 基于互相关序列和 BP 网络的声源定位算法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(16): 6945-6951.
ZENG Q N, SU P, WANG H L, et al. Sound source localization algorithm based on cross-correlation sequence and BP network[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(16): 6945-6951. (in Chinese)