

观众厅、空调机房等处的背景噪声较低,远优于技术要求。这是通过空调机房机座加用减振器、特殊设计消声管道、进排气消声器等减振、降噪处理而获得。此外,为保证银幕放映影像的清晰度,在 S_1 和 S_2 吸声材料表面加上黑纱绸,以减少一切反光。

全周影院放映影片时,画面清晰、声音真实悦耳,立体声效果显著。经日本专家测试验收,

认为具有国际先进水平。

参 考 文 献

[1] 马大猷,沈燮编著. 声学手册, 科学出版社, 1983: 462—477
[2] 项端祈编著. 实用建筑声学, 中国建筑工业出版社, 1992: 41—51
[3] 中华人民共和国国家标准“电影院观众厅建筑声学”的技术要求”

空气中被动声定位系统定位精度分析

栗 苹 施 聚 生

(北京理工大学力学工程系, 北京 100081)

1994 年 6 月 29 日收到

摘要 本文对影响被动声定位系统定位精度的几种因素进行了比较全面及深入的分析。推导出了测时差定位系统在均匀媒质和非均匀媒质中一些因素对定位精度影响的公式;给出了误差曲线;得出了一些有益的结论并提出了提高定位精度的几种方法。

关键词 声定位,精度

Accuracy analysis of passive acoustic locating system in air

Li Ping, Shi Jusheng

(Mechanical and engineering department, Beijing institute of technology Beijing 100080)

Abstract In this paper, the error sources of a passive acoustic locating system are analyzed. Formulae for the location errors are deduced for the locating system which is based on the principle of measuring the time difference between homogeneous and non-homogeneous media. Some useful conclusions and ways of improving the accuracy are proposed.

Key words Acoustic locating system, Accuracy analysis

被动声定位系统,作为战场传感监视系统的重要组成部分越来越受到重视。由于战场等环境干扰及测量误差的存在,定位精度经常不能满足要求。如三个沿直线均匀放置的传声器组成接收基阵,两传声器间距为 10m,声源距基准传声器 5000m,时延估计精度为 10 μ s,则

测距相对误差将接近 24%^[1]。由此可以看出,对影响被动声定位系统定位精度的因素进行分析,从而找出提高定位精度的途径,是被动声定位技术必须要解决的关键问题之一。本文从两个方面对地面被动声定位系统的定位精度进行了比较深入的分析,并得出了一些有益的结论。

1 均匀媒质中定位精度分析

被动声定位系统传声器布置如图 1 所示。令传声器位置为 $X = [x_i, y_i]^T, i = 1, 2, 3$; 声

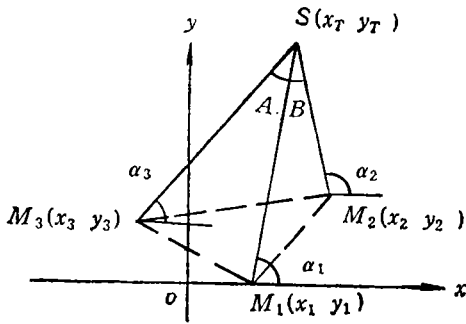


图 1 被动声定位系统原理图

源 S 位置为 $X_T = [x_T, y_T]^T$, 则第 i 个传声器与第 j 个传声器距声源的距离差为

$$\delta_{ij} = R_{iT} - R_{jT} \quad (1)$$

式中,

$$R_{iT} = \sqrt{(x_T - x_i)^2 + (y_T - y_i)^2} \quad (2)$$

因为 $\delta_{ij} = \delta_{ik} + \delta_{kj}$, 且在均匀媒质中, 声波在空气中的传播速度 c 为常数, $\delta_{ij} = c \cdot \tau_{ij}$, τ_{ij} 为声源所辐射的声波到达传声器 M_i 与 M_j 的时间差, 则任何一个 $\delta_{12}, \delta_{13}, \delta_{23}$ 都可以作为时延定位的参数。

由公式 (2) 可得

$$dR_{ij} = a_{iix}(dx_i - dx_j) + a_{iij}(dy_i - dy_j)$$

其中, $a_{iix} = \frac{x_i - x_j}{R_{ij}}, a_{iij} = \frac{y_i - y_j}{R_{ij}}$, 分别为 R_{ij} 与 x, y 轴间夹角的余弦。

对 (1) 式求微分, 得

$$\begin{aligned} d\delta_{ij} &= dR_{iT} - dR_{jT} = (a_{iT_x} - a_{jT_x})dx_T \\ &+ (a_{iT_y} - a_{jT_y})dy_T + a_{iT_x}dx_i \\ &- a_{jT_x}dx_j + a_{iT_y}dy_i - a_{jT_y}dy_j \end{aligned} \quad (3)$$

这就是分析被动声定位系统定位精度的基本公式^[2]。

1.1 仅由时延误差引起的定位精度的变化

假设传声器位置不存在误差, 即

$$dx_i = dy_i = 0, i = 1, 2, 3$$

且

$$\delta_1 = \delta_{12} = c\tau_{12}$$

$$\delta_2 = \delta_{13} = c\tau_{13}$$

因为 τ_{12}, τ_{13} 误差有相关性, 所以 δ_1, δ_2 误差也有相关性。令 δ_1, δ_2 方差为 σ_1^2, σ_2^2 , 相关系数为 ρ 。

由 (3) 式,

$$\begin{aligned} d\delta_1 &= (a_{1T_x} - a_{1T_x})dx_T + (a_{1T_y} - a_{1T_y})dy_T \\ &= (\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1)dx_T \\ &+ (\sin\alpha_2 - \sin\alpha_1)dy_T \end{aligned}$$

α_1, α_2 如图 1 所示。类似地,

$$\begin{aligned} d\delta_2 &= (\cos\alpha_3 - \cos\alpha_1)dx_T \\ &+ (\sin\alpha_3 - \sin\alpha_1)dy_T \end{aligned}$$

则

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} d\delta_1 \\ d\delta_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos\alpha_2 - \cos\alpha_1 & \sin\alpha_2 - \sin\alpha_1 \\ \cos\alpha_3 - \cos\alpha_1 & \sin\alpha_3 - \sin\alpha_1 \end{bmatrix} \\ &\cdot \begin{bmatrix} dx_T \\ dy_T \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

令 $\alpha_1 - \alpha_3 = A, \alpha_2 - \alpha_1 = B$, 由 (4) 式可得

$$\begin{aligned} \sigma_{x_T}^2 + \sigma_{y_T}^2 &= \frac{\sigma_1^2}{(1 - \cos B)[1 - \cos(A + B)]} \\ &+ \frac{\sigma_2^2}{(1 - \cos A)[1 - \cos(A + B)]} \\ &+ \left\{ 2\rho\sigma_1\sigma_2\cos\frac{A+B}{2} \right\} / \left\{ \left[\cos\frac{B-A}{2} \right. \right. \\ &\left. \left. - \cos\frac{A+B}{2} \right] [1 - \cos(A + B)] \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

当 $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2, \rho = 0.5$ 时

$$\begin{aligned} \sigma_{x_T}^2 + \sigma_{y_T}^2 &= \frac{2\sigma^2}{1 - \cos(A + B)} \left(\frac{1}{1 - \cos B} \right. \\ &\left. + \frac{1}{1 - \cos A} + \frac{\cos\frac{A+B}{2}}{\cos\frac{B-A}{2} - \cos\frac{A+B}{2}} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

这就是在上述条件下由时延误差引起的定位误差的计算公式。

1.2 仅由传声器位置误差引起的定位精度的变化

不考虑时延误差的影响, 即

$$d\delta_1 = d\delta_2 = 0,$$

由 (3) 式,

$$\left\{ \begin{array}{l} (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) dx_T + (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1) dy_T = \cos \alpha_2 dx_2 - \cos \alpha_1 dx_1 + \sin \alpha_2 dy_2 - \sin \alpha_1 dy_1 \\ (\cos \alpha_3 - \cos \alpha_1) dx_T + (\sin \alpha_3 - \sin \alpha_1) dy_T = \cos \alpha_3 dx_3 - \cos \alpha_1 dx_1 + \sin \alpha_3 dy_3 - \sin \alpha_1 dy_1 \end{array} \right. \quad (7)$$

令

$$G = [e_1 \ e_2]^T$$

$$= \begin{bmatrix} -\cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 & \cos \alpha_2 & \sin \alpha_2 \\ -\cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \alpha_3 & \sin \alpha_3 \end{bmatrix} \cdot [dx_1 \ dy_1 \ dx_2 \ dy_2 \ dx_3 \ dy_3]^T$$

$$= F \cdot dX$$

则方程组 (7) 可写成

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha_2 - \cos \alpha_1 & \sin \alpha_2 - \sin \alpha_1 \\ \cos \alpha_3 - \cos \alpha_1 & \sin \alpha_3 - \sin \alpha_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx_T \\ dy_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

(8) 形式同方程组 (4)。

因为 $E[e_1 \ e_2] = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \sigma_p^2$,

$$\sigma_p^2 = E[dx_i^2] = E[dy_i^2], \quad i = 1, 2, 3,$$

所以, 由传声器位置误差引起的定位精度的变化与仅考虑时延误差的情况相似, 只是将 (6) 式中的 σ 变为 σ_p 。

1.3 由时延及传声器误差引起的定位精度的变化

如果时延误差与传声器位置误差是相互独立的, 则由时延及传声器误差引起的定位误差为

$$\begin{aligned} \sigma_{x_T}^2 + \sigma_{y_T}^2 &= \frac{2(\sigma^2 + \sigma_p^2)}{1 - \cos(A + B)} \left(\frac{1}{1 - \cos A} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{1 - \cos B} + \frac{\cos \frac{A+B}{2}}{\cos \frac{B-A}{2} - \cos \frac{A+B}{2}} \right) \\ &= K(A, B)(\sigma^2 + \sigma_p^2) \end{aligned} \quad (9)$$

考察 A, B 的取值范围: 如果声源不处于传声器阵列内, 且目标与传声器距离 $\geq$ 传声器间距时, $|A|_{\max} = |B|_{\max} = 60^\circ$, A, B 取值的正负视声源相对传声器的位置而定。

将 A, B 的所有可能取值代入 (6) 式, 得出误差随 A, B 变化的曲线, 如图 2 所示。为了更清楚地表明误差曲线的变化趋势, 将 A, B 取值区间定为 $[-60^\circ, -10^\circ]$, 其误差曲线示于图 3 中。

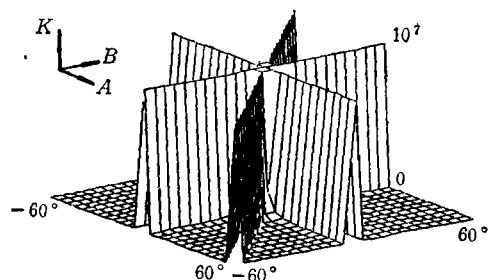


图 2 误差曲线

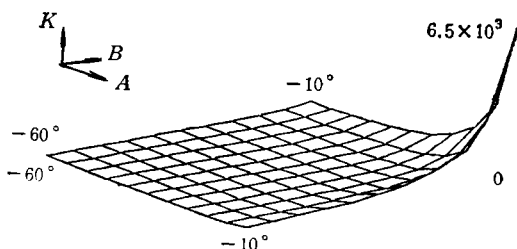


图 3 误差曲线

从误差曲线可以看出:

(1) 当 $A = 0^\circ$ 或 $B = 0^\circ$ 或 $A = B = 0^\circ$, 即目标位于任意两传声器连线的延长线上或三个传声器的连线延长线上时 (三传声器沿直线布置), 误差为无穷大。

(2) A, B 同时取正值与 A, B 同时取负值时的曲线对称, A 取正、 B 取负与 A 取负、 B 取正的曲线对称。

(3) $A = -B \approx 0^\circ$ 时, 即声源位于两传声器连线的延长线上, 误差为无穷大。

(4) $A = B = 60^\circ$ 或 $A = B = -60^\circ$ 时, 误差取最小值。

若目标可能位于三传声器阵列之内, A, B

取值区间为 $[-180^\circ, 180^\circ]$, 此时 $\sigma_{x_T}^2 + \sigma_{y_T}^2$ 曲线如图 4 所示。

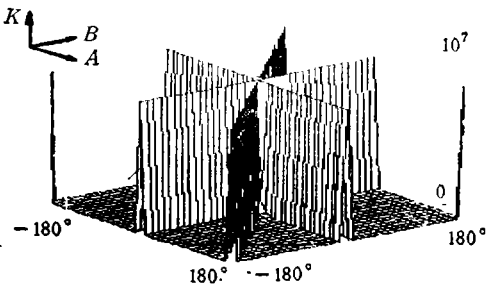


图 4 误差曲线

1.4 提高定位精度的几种方法

根据上述的分析, 在时延估计的被动声定位系统中, 可以采取如下措施提高定位精度:

- (1) 采用直线阵时, 尽量只利用法线方向附近的扇面进行定位。
- (2) 采用多传声器阵列及合理的布阵方式, 以减少误差。如采用圆阵等。
- (3) 减小时延估计误差及传声器位置误差, 使用较高精度的设备及适宜的信号处理手段。

2 非均匀媒质中定位精度分析

当被动声定位系统的工作空间 (传声器阵列与目标间的空间) 内有风存在时, 风将对其定位精度产生影响。这种影响主要表现在: (1) 由于风速梯度的存在, 引起了大气中的声速梯度, 导致声线的弯曲^[3], 如图 5 所示。(2) 风对

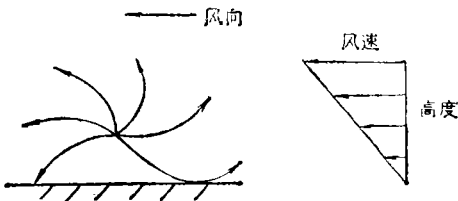


图 5 大气中声线的弯曲

传声器敏感元件的直接作用, 使传声器输入端叠加较大噪声。(3) 风速对声速的影响。

第二种影响可以通过加防风罩及滤波的应用声学

法予以消除或消减, 这里不予讨论。当传声器阵列与目标处于同一水平面上时, 第三种影响占主要地位, 如图 6 所示。其中, w 代表风速

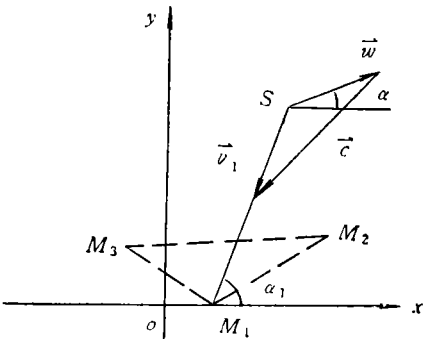


图 6 风速对声速的影响

矢量, c 为声源 S 至传声器 M_1 的声速矢量, v_1 为在风速 w 存在时 S 至 M_1 的实际声速矢量。分析由 w, c, v_1 组成的矢量三角形, 可以得出

$$v_1 = \frac{c}{\sin(\alpha_1 - \alpha)} \sin \left\{ \alpha_1 - \alpha - \arcsin \left[\frac{w}{c} \sin(\alpha_1 - \alpha) \right] \right\} \quad (10)$$

式中, w, c, v_1 分别为 w, c, v_1 的模, α, α_1 为 w, v_1 与 x 轴夹角。

化简 (10) 式, 得

$$v_1 = \sqrt{c^2 - w^2 \sin^2(\alpha_1 - \alpha)} - w \cos(\alpha_1 - \alpha)$$

通常情况下, $w \ll c$, 则

$$\sqrt{c^2 - w^2 \sin^2(\alpha_1 - \alpha)} \approx c, \quad v_1 = c - w \cos(\alpha_1 - \alpha) \quad (11)$$

类似地,

$$v_i = c - w \cos(\alpha_i - \alpha) \quad i = 1, 2, 3 \quad (12)$$

令 $d\delta'_1 = v_2 t_2 - v_1 t_1, d\delta'_2 = v_3 t_3 - v_1 t_1$, 则

$$\begin{bmatrix} d\delta'_1 \\ d\delta'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_2 - \cos \alpha_1 & \sin \alpha_2 - \sin \alpha_1 \\ \cos \alpha_3 - \cos \alpha_1 & \sin \alpha_3 - \sin \alpha_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} dx_T \\ dy_T \end{bmatrix} \quad (13)$$

(13) 式与 (4) 式相似, 只是将 (4) 式中的 $d\delta_1, d\delta_2$ 变成 $d\delta'_1, d\delta'_2$ 。将方程 (5) 中 σ_1^2, σ_2^2 分别代之以 $\sigma_1'^2, \sigma_2'^2$ 即为有风存在情况下定位精度的变化, 其中 $\sigma_1'^2 = E[d\delta_1'^2], \sigma_2'^2 = E[d\delta_2'^2]$ 。

因为

$$d\delta'_1 = d\delta_1 - w[t_2 \cos(\alpha_2 - \alpha) - t_1 \cos(\alpha_1 - \alpha)]$$

且当 $R_{iT} \gg d$ 时, d 为两传声器间距,

$$\alpha_1 \approx \alpha_2 \approx \alpha_3 = \alpha_M$$

故

$$\begin{aligned} d\delta'_1 &= d\delta_1 - w \cos(\alpha_M - \alpha) \tau_{12} \\ \sigma'^2_1 &= \sigma^2_1 \left[1 + \frac{w^2}{c^2} \cos^2(\alpha_M - \alpha) - 2\rho' \frac{w}{c} \cos(\alpha_M - \alpha) \right] = k' \cdot \sigma^2_1 \end{aligned}$$

类似地,

$$\sigma'^2_2 = k' \cdot \sigma^2_2$$

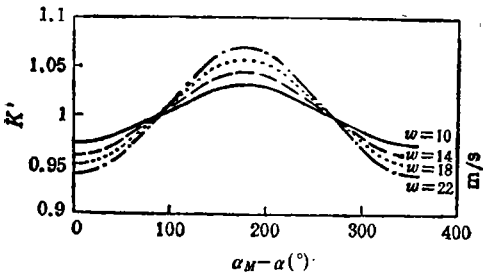


图 7 σ'^2_i 与 σ^2_i 的关系曲线

取 $\rho' = 0.5$, 则 σ'^2_i 与 $\sigma^2_i (i = 1, 2)$ 的关系曲线, 即 $k' = f(\alpha_M - \alpha)$ 曲线如图 7 所示。

从曲线中可以看出, 当 $\alpha_M - \alpha \leq 90^\circ$ 时, $k' \leq 1$, 即声波从声源传至传声器为逆风传播时, σ'^2_i 比 σ^2_i 小; 反之, 顺风传播时, σ'^2_i 比 σ^2_i 大。

3 结论

本文比较系统地分析了被动声定位系统的误差来源及其各误差因素对定位精度的影响。导出了误差公式, 相应的误差曲线较清晰表明了定位精度受各因素的影响情况。这些分析及其结论对提高定位系统的定位精度及其如何计算不均匀媒质中误差大小有一定的指导意义和实用价值。

参 考 文 献

[1] 李启虎. 声呐信号处理引论, 海洋出版社 1985: 374—375.
[2] 孙仲康 陈辉煌. 定位导航与制导, 国防工业出版社, 1987: 310—320.
[3] 刘元享 葛世炯 相敬林等. 近感检测原理, 西北工业大学出版社, 1988: 460—461.

'95 全国桩与地基动测仪器与应用技术交流会在京召开

中国声学学会检测声学分会与中国振动工程学会土动力学专业委员会于 1995 年 5 月 31 日至 6 月 4 日在京联合举办了“'95 全国桩与地基动测仪器与应用技术交流会”。

参加会议的有 16 个国内外生产及研制动测仪器、传感器的单位及厂商、研究、应用桩与地基动测技术的代表。计 45 个单位近 70 人, 以及建设部、地矿部、国家科委、国家建筑工程质检中心的特邀代表 10 人。

大会交流论文 16 篇, 现场表演观摩的动测仪器 12 种, 传感器三大类数十种, 大口径灌注桩钻孔孔径测试仪二种, 以及美国劳雷工业公司由加拿大专程运来的, 在荷兰、美、日、韩、新加坡等国使用的准静态 (Statnamic) 承载力测试系统, 并在建设部原型桩考核基地的已知桩上演示了从安装到测试的全过程。

与会代表一致认为: 本次会议专门对动测仪器进行全面技术交流, 尚属国内首次; 也是第一次将国内多家生产的动测仪器与国外 90 年代同类产品在同 一个原型桩基地十二条桩上进行实测性能对比交流, 从而取得了十分珍贵的对比资料。其结论是, 在桩的完整

性检测方面, 国产仪器已达到甚至超过国外产品水平。

会议专门组织了桩基动测仪器标准化专题座谈会, 12 个厂家研制单位及从事桩基检测应用研究的高等院校、科研单位 20 余人参加了讨论, 对动测仪器的标准化取得共识, 并提出了技术指标的最低标准建议。

在进行上述交流的同时, 会议在学术空气十分浓厚的气氛下, 除对研制仪器的关键技术问题进行交流, 不同学术观点的学者, 还就动测承载力, 土的动力学性能, 桩土体系的共振特性, 数据的后处理技术等广泛而坦诚地进行了讨论, 促进了技术进步。

会议还专门对 Statnamic 在建设部原型桩考核基地已知桩的实测结果与静载荷试验结果进行了对比分析, 中外学者就此展开了讨论, 从而对 Statnamic 的测试机理、特点有了进一步的了解。

与会者认为, 会议是成功的, 达到预期目的。担任会务的是全国桩地基信息网及地矿部桩基无损检测协会的工作人员, 与会者对他们表示衷心的感谢。

(地矿部桩基无损检测学会 吴庆曾)