

声发射源辅助定位算法的研究及应用

李赫, 刘时风, 董屹彪

北京声华兴业科技有限公司, 北京 100012

摘要: 在实际的检测应用中, 由于声发射技术具有可以对缺陷进行定位这一特点, 经常配合超声、磁粉等检测技术共同完成检测。常见的时差定位方法由于其算法复杂, 同时又受许多易变量的影响, 经常出现假点、错点的情况, 实际应用中常常受到限制。当声发射只需用来配合完成定位任务时, 针对上述缺陷, 通过引入标准声发射信号发生源辅助定位, 并提出了更加简单可靠的定位算法, 从而实现储罐液面、罐底等环境下的精确定位。

关键词: 声发射; 定位; 算法; 储罐

Research and Application of Acoustic Emission Source Assisted Location Algorithm

Li He, Liu Shifeng, Dong Yibiao

Beijing Soundwel Technology Co.,Ltd. Beijing 100012, China

Abstract: In the actual inspection applications, since acoustic emission technique can locate defects during detection, it is often be used in conjunction with ultrasound, magnetic and other detection technology. The common time difference locating method have complex algorithms and is always affected by multiple variables, which leads false-points interference. When the acoustic emission is used only to determine the location, we can introduce standard acoustic emission signal source to assist locating. We have achieved precise location by our simple and reliable location algorithm successfully.

Keywords: Acoustic Emission, Location, Algorithm, Tank

0 引言

声发射检测作为无损检测的一种主要用于确定声发射源的部位; 评定声发射源的活性和强度; 分析声发射源的性质; 确定声发射发生的时间或载荷。对声发射源的定位是通过多通道声发射检测仪来实现, 根据采集信号种类不同分为突发信号定位与连续信号定位, 连续声发射信号源定位主要用于带压力的气液介质泄漏源的定位。突发信号中又分为时差定位与区域定位, 区域定位是一种处理速度快, 简单而又粗略的定位方式。时差定位是经过对各个声发射通道信号到达时间差、波速和探头间距等参数的测量及一定算法的运算来确定声源的位置或坐标, 包括平面定位、柱面定位与球面定位等。时差定位是一种精确而又复杂的定位方式, 广泛用于试样和构件的检测。但它易丢失大量的低幅度信号, 其定位精度又受波速、衰减、波形和构件形状等许多易变量的影响, 因而在实际应用中也受到种种限制^[1]。

当声发射只需用来配合完成定位任务时, 针对上述各种声发射定位方法所受到的限制, 通过引入标准声发射信号发生源辅助定位, 标准声发射信号发生器可提供声发射信号的发出时间, 各通道传感器只需接收到信号的到达时间, 通过计算即可唯一确定声发射源的位置, 避免了时差定位中出现的假点、错点等情况。

1 声发射源辅助定位算法的研究

1.1 定位算法基本原理

平面定位，设定声发射探头均匀布置在圆形储罐周围，探头以黄色五边形表示；声发射源位置以红色中心圆表示，如图 1 所示。实验时作为声发射源的信号发生器每秒发出标准声发射信号，可连接至终端得到信号起始时间，各传感器可以得到标准声发射信号的到达时间，通过得到时间差 Δt 与声速 V 相乘得出各探头与声发射源之间的距离 L ，理论上已知任意三个探头与声发射源之间的距离即可唯一确定声发射源的位置。

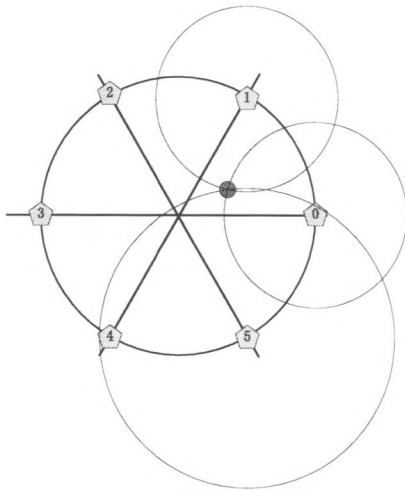


图 1 声源定位原理示意图

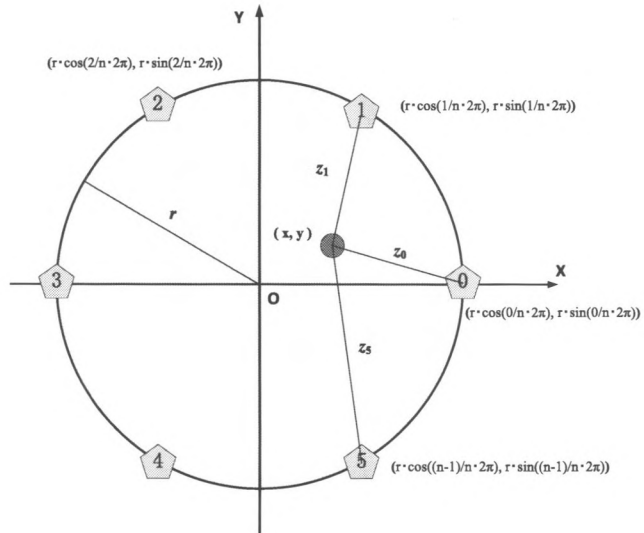


图 2 声源定位算法示意图

1.2 定位算法计算过程：

在圆形储罐罐底或液面实现声发射源定位，设储罐半径为 r ，所用传感器总数量为 n ，传感器均匀布置在储罐四周，并按逆时针依次编号为 $0, 1, 2, 3, \dots, n-1$ 。以圆形中心为原点，原点与 0 号探头的连线为 x 轴，建立 xy 直角坐标系，通过极坐标方式对各传感器位置定位，第 i 个传感器的坐标位置为 $(\cos(\frac{i}{n} \cdot 2\pi) \cdot r, \sin(\frac{i}{n} \cdot 2\pi) \cdot r)$ ，如图 2 所示。

假设选取的三个用于定位的传感器编号分别为 a, b, c ；对应的传感器与声发射源之间的距离分别为 z_a, z_b, z_c ；声发射源的坐标为 (x, y) ，可得到下列方程组：

$$(x - r \cos(\frac{a}{n} \times 2\pi))^2 + (y - r \sin(\frac{a}{n} \times 2\pi))^2 = z_a^2 \quad \text{.....①}$$

$$(x - r \cos(\frac{b}{n} \times 2\pi))^2 + (y - r \sin(\frac{b}{n} \times 2\pi))^2 = z_b^2 \quad \text{.....②}$$

$$(x - r \cos(\frac{c}{n} \times 2\pi))^2 + (y - r \sin(\frac{c}{n} \times 2\pi))^2 = z_c^2 \quad \text{.....③}$$

设液体中的声速为 v ，声发射源发出标准声发射信号的时间为 t_0 ，到达 a, b, c 三个传感器的时间分别为 t_a, t_b, t_c ，由 $s=vt$ 可得：

$$z_a = v(t_a - t_0) \quad \text{.....④}$$

$$z_b = v(t_b - t_0) \quad \text{.....⑤}$$

$$z_c = v(t_c - t_0) \quad \text{.....⑥}$$

上述参数 t_0, t_a, t_b, t_c 可以通过声发射仪采集得到， v 可以通过采集数据并计算得出，故 z_a, z_b, z_c 可以通过计算得出。

对上述方程组分别进行 ①式-②式, ②式-③式处理, 消除二次方项并进行归类处理后得到⑦式与⑧式, 此时转化为 x 与 y 的二元一次方程, 方程内部除 x, y 外均为已知项。

$$(\cos(\frac{b}{n} \times 2\pi) - \cos(\frac{a}{n} \times 2\pi))x + (\sin(\frac{b}{n} \times 2\pi) - \sin(\frac{a}{n} \times 2\pi))y = \frac{z_a^2 - z_b^2}{2r} \dots\dots\dots ⑦$$

$$(\cos(\frac{c}{n} \times 2\pi) - \cos(\frac{b}{n} \times 2\pi))x + (\sin(\frac{c}{n} \times 2\pi) - \sin(\frac{b}{n} \times 2\pi))y = \frac{z_b^2 - z_c^2}{2r} \dots\dots\dots ⑧$$

对⑦与⑧方程组进行简化处理得到⑨与⑩, 求解可得到 x 与 y 的值, 即得到声发射源的坐标位置。

$$Ax + By = E \dots\dots\dots ⑨$$

$$Cx + Dy = F \dots\dots\dots ⑩$$

$$x = \frac{DE - BF}{AD - BC}$$

$$y = \frac{AF - CE}{AD - BC}$$

2 声发射源辅助定位算法的应用

2.1 声发射信号源

所用信号发生器(声发射源)以声华公司生产的 TSG40 型液位计为基础并进行了相应的改造, 具有防水特性, 结构示意图 3 如下所示, 声发射信号源在黑实心点位置处以 1s/次的频率发出标准声发射信号, 信号穿过底端半球形的 PVC 保护层后向四周扩散, 信号方向具有各向同性。侧壁接线端子连接电缆可对信号发生器进行供电并采集信号发生器的信号发出时间 t₀, 传感器接收到的时间取声发射仪生成的到达时间。

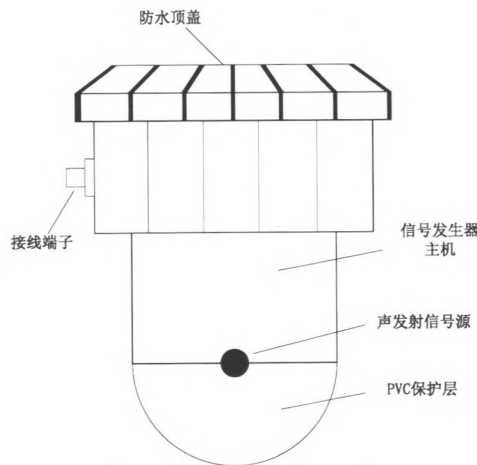


图 3 声发射源结构示意图

其中 PVC 保护层半径为 31mm, 查表得到 PVC 材料声速 2388m/s=2.388mm/us, 水中声速为 1482.9m/s=1.483mm/us, 实际计算中需要补偿声速在 PVC 保护层中的时间差

$$\left(\frac{31\text{mm}}{2.388\text{mm/us}} - \frac{31\text{mm}}{1.483\text{mm/us}} \right) = 7.686\mu\text{s}$$

2.2 声发射源随距离信号衰减测试

2.2.1 实验条件

以液位计改装的声发射信号发生器(40KHz)为信号源, 声发射传感器 BF40(内置 40dB 放大器)

为接收传感器，声华公司 SAEU2S 型声发射仪为接收主机，声发射系统工作参数设置与所使用传感器参数见下表。

表 1 声发射系统工作参数设置

门限值 (dB)	采样率 (KHz)	采样点数	参数间隔 (μ s)	锁闭时间 (μ s)	峰值间隔 (μ s)	模拟滤波 器 (KHz)	数字滤波 器 (KHz)
40	2000	28256	2000	200000	1000	20-100	直通

表 2 使用传感器 BF40 参数

型号	尺寸 (mm)	使用温 度 ($^{\circ}$ C)	接口 类型	接口位 置	频率范围	谐振 频率	灵敏度 峰值	防护 等级	备注
BF40	Φ 41x92	-20~+50	BNC	电缆另 一端	15kHz~70 kHz	40kHz	>(70+40) dB	IP68	内置 40dB 前 放, 防水

2.2.2 数据分析

为了能够了解仪器可以检测到的距离范围，首先进行了声发射源信号距离衰减测试，声发射传感器在水中固定，声发射源选取不同距离分别进行测试，同时对环境噪声进行测试，测试现场如下图所示，所得数据见下参数表 3。

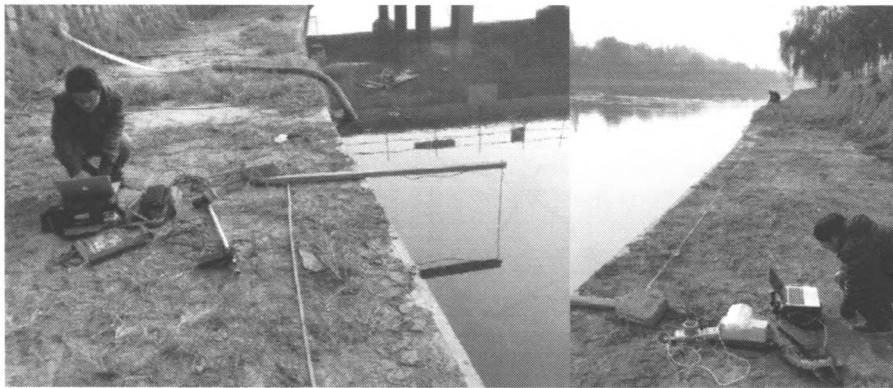


图 4 声发射信号衰减测试现场布置

表 3 声发射信号—距离参数表

距离/m	幅度/dB	振铃计数/个	持续时间/ μ s	能量/mv* μ s
噪声	42.9	5	730.4	26.8414
10	100	6135	190186	604215
15	100	6210	187530	579230
20	100	6037	186469	537622
25	98.8	5904	189210	417553
30	100	5529	174137	346110
35	85.9	4859	160953	241157
40	86.4	4332	141826	167675
45	80.7	3913	130790	116498
50	74.4	1403	74542	19656
55	54.4	20	7767	781

从表中分析得出，环境噪声的幅度约为 42.9dB，且其他参数如振铃计数、持续时间、能量等均与接收到的声发射信号有着明显差别，当声发射源距离 30m 远时信号强度仍可以达到 100dB，距离远至

50m 时对应的幅度、振铃计数、持续时间、能量仍然可以与噪声信号明显区分，分别选用持续时间-距离、能量-距离数据作图，如下图 5 所示，可以看出持续时间与距离间呈对数关系，能量与距离间呈线性关系。

因此在后续的实验中我们选取 60dB 作为门限值，在保证可以正常接收到声发射源信号的同时剔除掉环境噪声信号的干扰。由于声源可以向周围传播，声发射的信号强度不会随信号发生器的摆放而改变，检测距离可达到 50m。

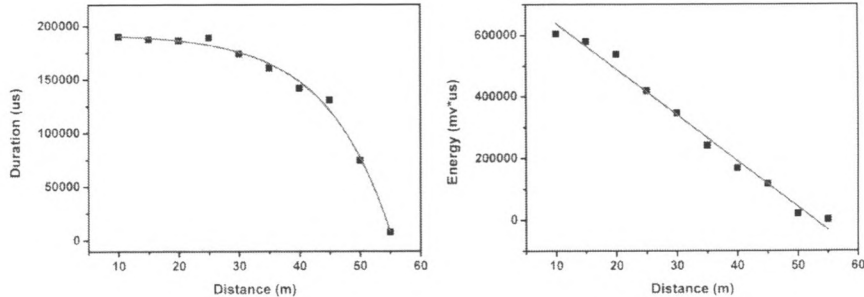


图 5 持续时间-距离、能量-距离关系图

由之前的定位算法分析，我们只需已知声源到三个传感器之间的距离即可通过计算得出位置，实际软件实现时我们取到达时间最早三个传感器通道，如果最远的检测距离可至 50m，则理论上我们可以对直径 100m 的储罐进行定位检测，如图 6 所示，传感器数量选择 12 个，均匀分布在圆形储罐的侧壁，定位点只需满足蓝色区域即可覆盖整个储罐，而定位点为中心距离时最远，与传感器距离正好为 50m。

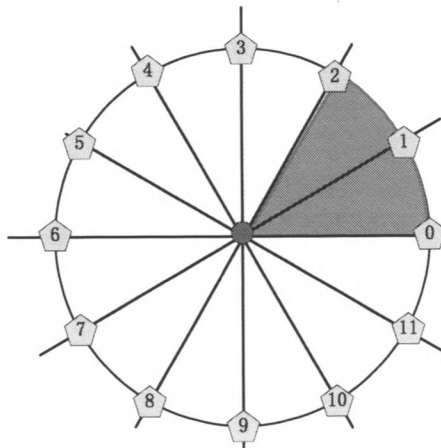


图 6 检测 100m 直径储罐传感器布置图

2.2.3 水中实际声速的确定

为了提高实验精度，在定位实验前我们对实际环境中水的声速进行了标定，选取 2 个传感器间隔一定距离，分别测试声发射源与传感器之间的距离与信号达到时间，得到实际水中声速。

表 4 计算实际水中声速所需参数

	声发射源与传感器距离(mm)	信号达到时间 hh:mm:ss:mmm:uuu
传感器 1	100	15:05:30:637189
传感器 2	9800	15:05:30:643626

$$V = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{(9800 - 100)\text{mm}}{(643626 - 637189)\mu\text{s}} = 1.50\text{mm}/\mu\text{s} = 1.5\text{km}/\text{s}$$

2.2.4 波形分析

将定位实验中门限值设置在 60dB，分别采集声发射源信号与噪声信号波形，如图 7 所示，通过放

大对比可以看出，60dB 门限可以完全屏蔽掉噪声信号，同时可以保证在声发射信号出现第一个波峰时就能及时监测到。

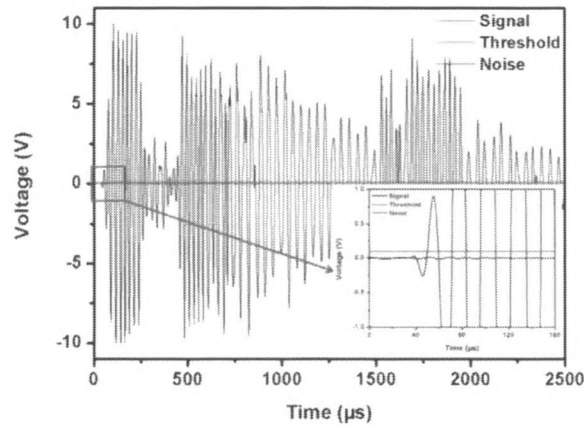


图 7 信号、噪声波形图对比

2.3 声发射源水缸定位分析

2.3.1 实验条件

根据上述介绍的声发射源辅助定位算法我们编写了专用的软件模块与显示界面，如图 8 所示，其中 1 通道与 2 通道连接声发射源，负责信号传输与供电。量程与直径可以根据实际情况设置，传感器布置可根据设置个数均匀分布在圆形四周。声发射系统工作参数设置见表 5，采样门限设置为 60dB 用来屏蔽环境噪声信号，锁闭时间设定为 200ms 用来屏蔽反射信号。

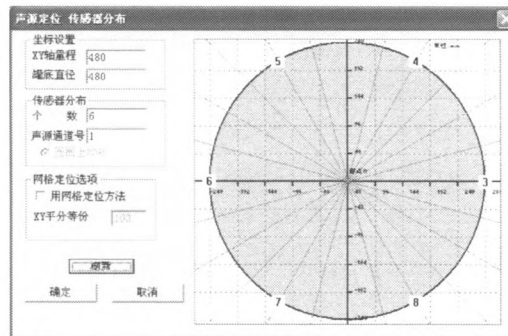


图 8 声源定位设置界面

表 5 声发射系统工作参数设置

门限值 (dB)	采样率 (KHz)	采样点数	参数间隔 (μ s)	锁闭时间 (μ s)	峰值间隔 (μ s)	模拟滤波 器 (KHz)	数字滤波 器 (KHz)
60	2000	28256	2000	200000	1000	20-100	直通

在对软件进行测试阶段时，选用了比较容易操作的水缸进行了模拟，水缸内直径约 480mm，6 个 BF40 声发射探头均匀分布在水缸侧壁并浸入水中，传感器布置与声发射设备如下图 9 所示。

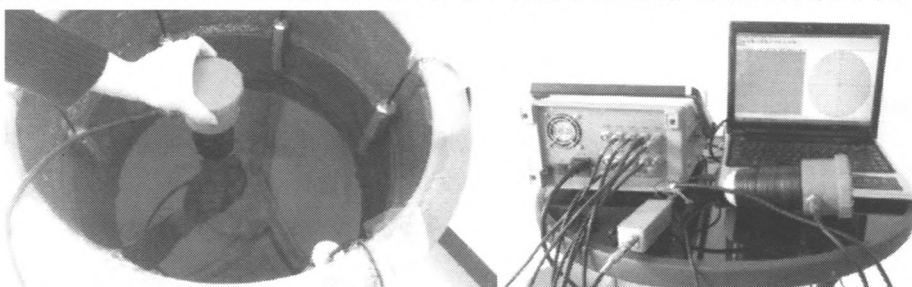


图 9 水缸定位测试布置示意图

2.3.2 数据分析

实验中我们进行了两组定位实验，第一组实验将声发射源浸入水中并分别在各个声发射探头附近放置，第二组实验将声发射源在水中缓慢移动一周，声发射系统检测所得到的定位点如图 10 所示。

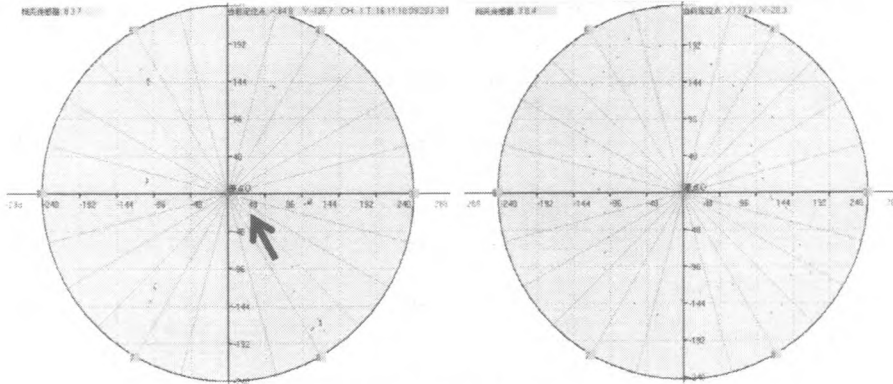


图 10 水缸测试声源定位图

由定位图中可以看出定位点位置基本与实际位置相符，产生误差的一个原因可能是实验时对声发射源放置并没有精确定位，第二个原因可能是水缸尺寸较小使误差相应放大。我们结合参数表分析，下表为图 10 箭头处定位点对应的参数，表中到达时间的通道号顺序依次为 384756，与实际声发射源与传感器距离顺序相同（由近到远），符合之前的算法设定。

通道 1 的到达时间表示声源时间，由于其信号幅度较小，对通道 1 的门限值单独设定为 40dB，声发射源固定以每秒 1 次的频率向四周发出标准声发射信号。

序号	到达时间(dd:hh:mm:ss:mmm:uuuunnn)	通道号	幅度	振铃计数	持续时间(us)	能量	上升计数	上升时间(us)
1	16:11:09:19:204 684700	1	54.0	8	128.00	26.1810	3	37.00
2	16:11:09:19:204 705400	3	99.3	967	35112.10	458238.7685	4	76.00
3	16:11:09:19:204 769100	8	97.9	1198	46485.00	561375.4547	2	24.00
4	16:11:09:19:204 784900	4	98.0	1130	44871.20	549551.6113	2	18.00
5	16:11:09:19:204 866500	7	97.5	1137	47861.00	546825.0397	2	20.00
6	16:11:09:19:204 871400	5	96.4	975	36410.10	516132.8125	2	17.00
7	16:11:09:19:204 898900	6	97.2	905	36206.10	521730.3528	3	43.00
8	16:11:09:20:204 636700	1	53.8	6	128.00	26.1627	3	37.00
9	16:11:09:20:204 677700	3	99.5	956	34764.20	458371.1121	2	29.00
10	16:11:09:20:204 739200	8	97.8	1225	49653.00	551873.4497	2	24.00
11	16:11:09:20:204 757300	4	96.0	1105	44858.20	549720.8909	2	19.00
12	16:11:09:20:204 836600	7	97.3	1095	45655.00	547791.9769	2	21.00
13	16:11:09:20:204 842300	5	98.2	973	37338.10	516566.3330	2	18.00
14	16:11:09:20:204 868900	6	97.3	894	38061.10	526106.3680	3	44.00
15	16:11:09:21:204 608700	1	53.7	6	128.00	26.1292	3	36.00
16	16:11:09:21:204 650000	3	99.5	964	34765.20	458891.7664	2	27.00
17	16:11:09:21:204 712300	8	97.8	1194	46499.00	549396.8278	2	24.00
18	16:11:09:21:204 728600	4	97.9	1086	43045.20	544778.2349	2	18.00
19	16:11:09:21:204 808700	7	97.3	1067	42470.00	537874.9878	2	21.00
20	16:11:09:21:204 814200	5	98.1	971	38281.10	513060.0690	2	18.00
21	16:11:09:21:204 840800	6	97.2	885	37998.10	521812.4542	3	44.00

图 11 水缸测试声源定位参数表

2.4 声发射源圆形水池定位分析

2.4.1 实验条件

实验中选用的圆形水池直径约为 9.9m，周围布置 4 个 BF40 声发射传感器探头并浸入水中，如图 12 所示。以其中一个探头与中心之间的连线为准，分别取 0o, 22.5o, 45o 方向，每个方向取 10 点均匀分布进行定位测试，如图 13 所示。这样可以保证检测范围可以覆盖整个水池。声发射系统工作参数设置与之前水缸定位分析相同。

三个方向的定位图如图 14 所示，可以看出在声源位置能够较精确放置且被测水池尺寸放大的情况下，通过声源定位算法计算得到的定位点准确，精确度高，且由于该算法较时差定位算法更为简单，通过设置合理锁闭时间即可排除假点，错误点的干扰。适用于声源信号已知、只是采用声发射技术作为辅助定位手段的条件下。



图 12 水池定位现场测试

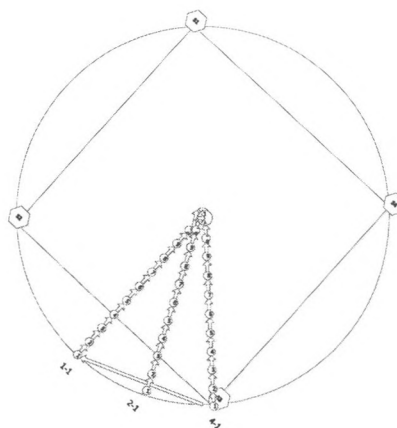


图 13 实验示意图

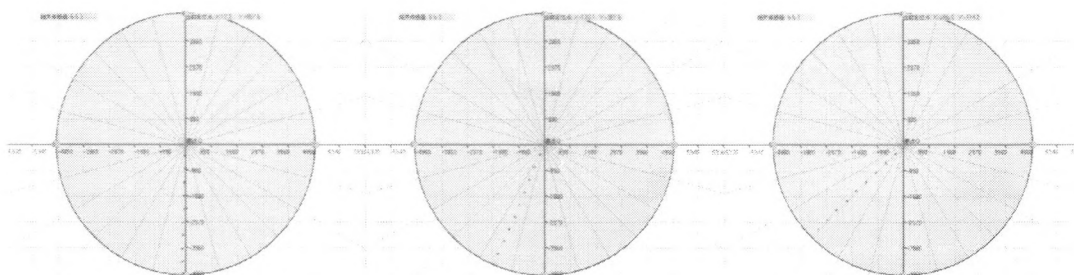


图 14 不同角度声发射源定位图

表 6 列出了不同定位点与理论位置的偏差距离，其中图 14 中从左到右代表角度分别为 0^o、22.5^o、45^o，位置从 0 到 10 分别表示从圆的边缘起始依次向中心靠近的点，相邻点之间的距离为 0.5m。可以看出从三个不同角度所测量的位置平均偏差距离分别为 71.8mm、40.4mm、51.0mm，总的平均偏差距离为 54.4mm，具有较高的精确度。

表 6 不同定位点与理论位置偏差距离 (单位: mm)

位置	角度		
	0°	22.5°	45°
0	105.1004	11.82619	/
1	128.0341	64.00353	43.60451
2	129.1897	34.86273	30.45195
3	90.17293	24.36411	39.95856
4	73.52069	20.36335	21.59719
5	42.19867	94.25405	28.64556
6	43.7316	23.11537	42.6645
7	50.07489	28.34109	62.61862
8	43.21261	48.82156	69.80627
9	39.32694	43.0906	78.16776
10	45.08919	51.54298	92.83468
平均偏差距离	71.78652	40.41687	51.03496

3 结论

本文通过引入声发射标准信号源辅助定位，提出了更加简单可靠的定位算法，并通过软件实现功能：

(1) 实验数据表明该算法可以实现精确定位，在直径为 10m 的水池（储罐）条件下，平均偏差距离为 54.4mm，偏差率为 0.544%，且不会出现误报点；

(2) 可辅助其他检测设备用于储罐罐底或液面的平面定位，理论可检测的储罐直径最大可至 100m。

参考文献：

[1] 沈功田，耿荣生，刘时风. 声发射源定位技术[J]. 无损检测, 2002(3): 114-117.