



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110161460 A

(43)申请公布日 2019.08.23

(21)申请号 201910575683.6

(22)申请日 2019.06.28

(71)申请人 河南理工大学

地址 454000 河南省焦作市高新区世纪大道2001号

(72)发明人 苏发强 周海丰 袁瑞甫 李化敏
肖亚宁 于光磊 乔洋 范伟涛
张文艳

(74)专利代理机构 郑州豫开专利代理事务所
(普通合伙) 41131

代理人 朱俊峰

(51)Int.Cl.

G01S 5/22(2006.01)

G01N 29/14(2006.01)

G01N 29/44(2006.01)

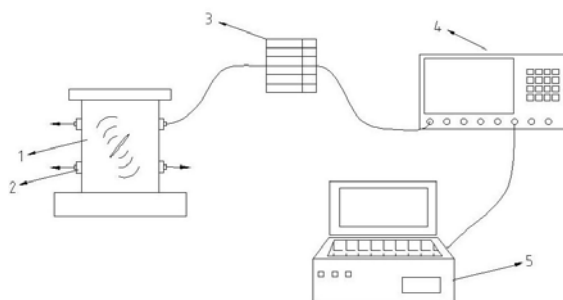
权利要求书3页 说明书7页 附图1页

(54)发明名称

基于微震空间组网的震源精确定位方法

(57)摘要

基于微震空间组网的震源精确定位方法,包括以下步骤:将多个声发射传感器用粘结剂粘贴到待测物体表面上;对待测物体施加外力使其产生声发射信号,声发射传感器将微弱的声发射信号传输到声发射前置放大器;声发射前置放大器继而将信号通过同轴电缆传输到声发射示波器;声发射示波器的文件形式记录到内置存储器;后续数据解析器运行自写的震源标定程序对获得的声发射波形数据信息进行处理分析,计算出震源坐标(X,Y,Z)、声波爆发时间点T、声波相对能量 A_e 和精度误差r。本发明通过数值分析相应的线性优化不断逼近真实的声发射事件的震源位置,并且可以获取所得结果的精度。并且将此方法编辑为程序,具有极好的实用价值。



1. 基于微震空间组网的震源精确定位方法, 其特征在于: 包括以下步骤,

步骤一, 将多个声发射传感器用粘结剂粘贴到待测物体表面上, 然后将声发射传感器、声发射前置放大器、声发射示波器和后续数据解析器依次采用同轴电缆连通;

步骤二, 对待测物体施加外力使其产生声发射信号, 声发射传感器接收到声发射信号, 继而将微弱的声发射信号通过同轴电缆传输到声发射前置放大器;

步骤三, 声发射前置放大器对从声发射传感器侦测到的微弱的声发射信号进行放大处理, 同时把不需要的信号滤掉, 提高信噪比, 继而将信号通过同轴电缆传输到声发射示波器;

步骤四, 声发射示波器根据现场的环境噪音及其他影响因素, 通过调节信号触发条件来得到理想的稳定波形; 并将声发射信号以A@~.wdt的文件形式记录到内置存储器;

步骤五, 后续数据解析器将声发射示波器传来的A@~.wdt文件转换为A@~.csv, 获得声发射波形数据, 声发射波形数据包括信号初动时间、信号振幅; 然后运行自写的震源标定程序对获得的声发射波形数据信息进行处理分析, 计算出震源坐标(X, Y, Z)、声波爆发时间点T、声波相对能量 A_e 和精度误差r。

2. 根据权利要求1所述的基于微震空间组网的震源精确定位方法, 其特征在于: 步骤五中自写的震源标定程序, 其运算过程为:

(1) 在自写的震源标定程序中分别输入: 文件读取和输入路径; 待测物体的形状信息; 标定维度: 2维或3维; 声发射传感器的数目及坐标;

(2) 对待测物体的不同位置进行敲击, 敲击位置坐标输入到震源标定程序中, 然后通过后续数据解析器分析计算出P波在待测物体中的平均传播速度 C_p ;

(3) 假设 (X', Y', Z') 为震源坐标 (X, Y, Z) 的近似值, 将待测物体分成N个等体积的块, 第一次取 $N=8$, 假设第i个块坐标为 $(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$; 假设有K个声发射传感器, 第j个声发射传感器坐标为 (X_j, Y_j, Z_j) 接收到信号的时间点为 t_j 则 δ_{ij} 为以第i个块第j个声发射传感器推算出来的声波爆发时间点:

$$\delta_{ij} = t_j - \frac{\sqrt{(\alpha_i - X_j)^2 + (\beta_i - Y_j)^2 + (\gamma_i - Z_j)^2}}{C_p} \quad \begin{matrix} (i = 1, 2, 3, \dots, N) \\ (j = 1, 2, 3, \dots, K) \end{matrix} \quad (1)$$

由所有声发射传感器推算出来的平均声波爆发时间点 T_i 由方程(2)表示; 那么, 方程(3)是假设声波发生在第i个块, 第i个块声波爆发时间点的标准偏差 S_i ,

$$T_i = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \delta_{ij} \quad (2)$$

$$S_i = \sqrt{\sum_{j=1}^k (\delta_{ij} - T_i)^2} \quad (3)$$

当 S_i 取最小的值时, 声发射源在第i个分块内; 计算精度是否达标, 精度达标则第i个分块的坐标 $(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$ 即为 (X', Y', Z') 的初始值; 精度不达标则继续将第i个分块分割成N个等体积的块重复上述计算过程, 直到符合精度要求;

(4) X', Y', Z', T' 是 X, Y, Z, T 的近似值; dx, dy, dz, dt 分别代表它们的差值;

$$\begin{aligned}
 f_i(X, Y, Z, T) &= f_i(X' + dX, Y' + dY, Z' + dZ, T' + dT) \\
 &= f_i(X', Y', Z', T') + \left(\frac{\partial f_i}{\partial X}\right)dx + \left(\frac{\partial f_i}{\partial Y}\right)dy + \left(\frac{\partial f_i}{\partial Z}\right)dz + \left(\frac{\partial f_i}{\partial T}\right)dt \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$(5) \text{ 令 } a_i = \frac{\partial f_i}{\partial X}, b_i = \frac{\partial f_i}{\partial Y}, c_i = \frac{\partial f_i}{\partial Z}, d_i = \frac{\partial f_i}{\partial T}, m_i = f_i(X, Y, Z, T) - f_i(X', Y', Z', T')$$

$$\text{则 } a_i \cdot dx + b_i \cdot dy + c_i \cdot dz + d_i \cdot dt = m_i \quad (5)$$

(6) 假定 X_0, Y_0, Z_0, T_0 为 dx, dy, dz, dt 的精确值, 并使用最小二乘法进行处理, 如下所示; 残差 v_i 可以写成如下形式:

$$v_i \equiv m_i - (a_i \cdot dx + b_i \cdot dy + c_i \cdot dz + d_i \cdot dt) \quad (6)$$

$$S \equiv \sum v_i^2 \quad (7)$$

最小残差平方和 S 需要满足以下条件:

$$\frac{\partial S}{\partial dx} = 0, \frac{\partial S}{\partial dy} = 0, \frac{\partial S}{\partial dz} = 0, \frac{\partial S}{\partial dt} = 0 \quad (8)$$

等式 (8) 的残差平方和 S 可以用内积表示如下:

$$\frac{\partial [vv]}{\partial dx} = 0, \frac{\partial [vv]}{\partial dy} = 0, \frac{\partial [vv]}{\partial dz} = 0, \frac{\partial [vv]}{\partial dt} = 0 \quad (9)$$

然后通过求解方程 (6), 获得以下等式:

$$[av] = 0, [bv] = 0, [cv] = 0, [dv] = 0 \quad (10)$$

将方程 (10) 代入方程 (6) 并表示为决定因素, 然后:

$$\begin{bmatrix} [aa] & [ab] & [ac] & [ad] \\ [ba] & [bb] & [bc] & [bd] \\ [ca] & [cb] & [cc] & [cd] \\ [da] & [db] & [dc] & [dd] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [am] \\ [bm] \\ [cm] \\ [dm] \end{bmatrix} \quad (11)$$

dx, dy, dz, dt 微分可以通过求解方程 (11) 得到记为 X_0, Y_0, Z_0, T_0 ; 同时可计算出震源坐标 (X, Y, Z) 和声波爆发时间点 T ; 计算得到的精确值 X_0, Y_0, Z_0, T_0 是迭代计算的近似值;

(7) 声发射震源能量 A_0 的范围可以从声发射波形的最大幅度获得:

$$A_0 = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K (A_j \times L_j) \quad (12)$$

L_j : 声发射震源与第j个声发射传感器之间的距离

K : 声发射传感器的数量

A_j : 从第j个声发射传感器获得的波形的最大幅度

声发射震源能量使用公式(12)计算,相对能量 A_e 由方程(13)给出:

$$A_e = (A_0)^2 \quad (13).$$

(8)步骤(6)中计算 dx, dy, dz, dt 的精确值 X_0, Y_0, Z_0, T_0 ,它们的标准方差分别表示为 $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2, \sigma_t^2$,它们的测量值可以表示为权重 P_x, P_y, P_z, P_t ;权重与标准方差的关系由方程(14)给出:

$$P_x \sigma_x^2 = P_y \sigma_y^2 = P_z \sigma_z^2 = P_t \sigma_t^2 = \sigma^2 \quad (14)$$

精确值 dx, dy, dz, dt 的准确度可由以下两个误差表示:标准偏差 σ ,精度误差 r ;标准偏差 σ 可以通过处理(14)方程中的标准方差 $\sigma^2, \sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2, \sigma_t^2$ 来获得;精度误差使用最小二乘法来计算,精度误差($r > 0$)与标准偏差 σ 的关系由以下表达式给出:

$$r = 0.6745\sigma \quad (15)$$

标准方差 σ^2 的平均值表示为 $\hat{\sigma}^2$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{v^T v}{n-4} \quad (16)$$

其中, v 是方程(6)中测量值和计算值的残差 v_i ;分母是自由度;

X, Y, Z, T 的精度误差为 $\hat{\gamma}_x, \hat{\gamma}_y, \hat{\gamma}_z, \hat{\gamma}_t$ 如下所示:

$$\begin{aligned} \hat{r}_x &= 0.6745 \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{P_x}} \quad , \quad \hat{r}_y = 0.6745 \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{P_y}} \\ \hat{r}_z &= 0.6745 \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{P_z}} \quad , \quad \hat{r}_t = 0.6745 \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{P_t}} \end{aligned} \quad (17) .$$

基于微震空间组网的震源精确定位方法

技术领域

[0001] 本发明属于声发射测试技术领域,具体涉及一种基于微震空间组网的震源精确定位方法。

背景技术

[0002] 采用声发射时差的定位方法被广泛应用于航空、海洋、结构检测、导航、工业过程、人或动物声音源定位、机械检测、核爆、地下隧道、采矿及地震等领域。很多研究者对这一问题进行了研究与讨论,发展了诸多相关的定位方法,利用时差迭代定位的方法是目前最广泛使用的方法之一。许多方法通常把波速作为已知数处理的,难以考虑随时间与空间变化的波速对定位精度的影响。在声发射源类型众多或声发射信号复杂的检测中,如果声发射的特征信号处于频散段,而且特征频率不确定且变化频繁,此时便无法采用事先确定的速度来进行定位计算。在假设速度同一(或采用平均速度)的前提条件下,根据信号频率和速度的理论公式推导出速度是一种选择,但是由于实测频率、速度的对应关系与理论公式偏差较大,该方法的实用性并不强。

发明内容

[0003] 本发明为了解决现有技术中的不足之处,提供一种基于微震空间组网的震源精确定位方法,该方法将震源坐标(X,Y,Z)以及声波爆发时间点(T)作为未知数,通过数值分析相应的线性优化不断逼近真实的声发射事件的震源位置,并且可以获取所得结果的精度。

[0004] 为解决上述技术问题,本发明采用如下技术方案:基于微震空间组网的震源精确定位方法,包括以下步骤,

步骤一,将多个声发射传感器用粘结剂粘贴到待测物体表面上,然后将声发射传感器、声发射前置放大器、声发射示波器和后续数据解析器依次采用同轴电缆连通;

步骤二,对待测物体施加外力使其产生声发射信号,声发射传感器接收到声发射信号,继而将微弱的声发射信号通过同轴电缆传输到声发射前置放大器;

步骤三,声发射前置放大器对从声发射传感器侦测到的微弱的声发射信号进行放大处理,同时把不需要的信号滤掉,提高信噪比,继而将信号通过同轴电缆传输到声发射示波器;

步骤四,声发射示波器根据现场的环境噪音及其他影响因素,通过调节信号触发条件来得到理想的稳定波形;并将声发射信号以A@~.wdt的文件形式记录到内置存储器;

步骤五,后续数据解析器将声发射示波器传来的A@~.wdt文件转换为A@~.csv,获得声发射波形数据,声发射波形数据包括信号初动时间、信号振幅;然后运行自写的震源标定程序对获得的声发射波形数据信息进行处理分析,计算出震源坐标(X,Y,Z)、声波爆发时间点T、声波相对能量 A_e 和精度误差 r 。

[0005] 其特征在于:步骤五中自写的震源标定程序,其运算过程为:

(1) 在自写的震源标定程序中分别输入:文件读取和输入路径;待测物体的形状信息;

标定维度:2维或3维;声发射传感器的数目及坐标;

(2)对待测物体的不同位置进行敲击,敲击位置坐标输入到震源标定程序中,然后通过后续数据解析器分析计算出P波在待测物体中的平均传播速度 C_p ;

(3)假设 (X', Y', Z') 为震源坐标 (X, Y, Z) 的近似值,将待测物体分成N个等体积的块;第一次取 $N=8$,假设第i个块坐标为 $(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$,假设有K个声发射传感器,第j个声发射传感器坐标为 (X_j, Y_j, Z_j) 接收到信号的时间点为 t_j ,则 δ_{ij} 为以第i个块第j个声发射传感器推算出来的声波爆发时间点:

$$\delta_{ij} = t_j - \frac{\sqrt{(\alpha_i - X_j)^2 + (\beta_i - Y_j)^2 + (\gamma_i - Z_j)^2}}{C_p} \quad \begin{matrix} (i = 1, 2, 3, \dots, K & N) \\ (j = 1, 2, 3, \dots, K & K) \end{matrix} \quad (1)$$

由所有声发射传感器推算出来的平均声波爆发时间点 T_i 由方程(2)表示;那么,方程(3)是假设声波发生在第i个块,第i个块声波爆发时间点的标准偏差 S_i ,

$$T_i = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \delta_{ij} \quad (2)$$

$$S_i = \sum_{j=1}^k (\delta_{ij} - T_i)^2 \quad (3)$$

当 S_i 取最小的值时,声发射源在第i个分块内;计算精度是否达标,精度达标则第i个分块的坐标 $(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$ 即为 (X', Y', Z') 的初始值;精度不达标则继续将第i个分块分割成N个等体积的块重复上述计算过程,直到符合精度要求;

(4) X', Y', Z', T' 是 X, Y, Z, T 的近似值; dx, dy, dz, dt 分别代表它们的差值;

$$\begin{aligned} f_i(X, Y, Z, T) &= f_i(X' + dX, Y' + dY, Z' + dZ, T' + dT) \\ &= f_i(X', Y', Z', T') + \left(\frac{\partial f_i}{\partial X}\right) dx + \left(\frac{\partial f_i}{\partial Y}\right) dy + \left(\frac{\partial f_i}{\partial Z}\right) dz + \left(\frac{\partial f_i}{\partial T}\right) dt \end{aligned} \quad (4)$$

$$(5) \text{ 令 } a_i = \frac{\partial f_i}{\partial X}, b_i = \frac{\partial f_i}{\partial Y}, c_i = \frac{\partial f_i}{\partial Z}, d_i = \frac{\partial f_i}{\partial T}, m_i = f_i(X, Y, Z, T) - f_i(X', Y', Z', T')$$

$$\text{则 } a_i \cdot dx + b_i \cdot dy + c_i \cdot dz + d_i \cdot dt = m_i \quad (5)$$

(6)假定 X_0, Y_0, Z_0, T_0 为 dx, dy, dz, dt 的精确值,并使用最小二乘法进行处理,如下所示;残差 v_i 可以写成如下形式:

$$v_i \equiv m_i - (a_i \cdot dx + b_i \cdot dy + c_i \cdot dz + d_i \cdot dt) \quad (6)$$

$$S \equiv \sum v_i^2 \quad (7)$$

最小残差平方和S需要满足以下条件:

$$\frac{\partial S}{\partial dx} = 0, \frac{\partial S}{\partial dy} = 0, \frac{\partial S}{\partial dz} = 0, \frac{\partial S}{\partial dt} = 0 \quad (8)$$

等式(8)的残差平方和S可以用内积表示如下:

$$\frac{\partial[vv]}{\partial dx} = 0, \frac{\partial[vv]}{\partial dy} = 0, \frac{\partial[vv]}{\partial dz} = 0, \frac{\partial[vv]}{\partial dt} = 0 \quad (9)$$

然后通过求解方程(6),获得以下等式:

$$[av] = 0, [bv] = 0, [cv] = 0, [dv] = 0 \quad (10)$$

将方程(10)代入方程(6)并表示为决定因素,然后:

$$\begin{bmatrix} [aa][ab][ac][ad] \\ [ba][bb][bc][bd] \\ [ca][cb][cc][cd] \\ [da][db][dc][dd] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [am] \\ [bm] \\ [cm] \\ [dm] \end{bmatrix} \quad (11)$$

dx, dy, dz, dt 微分可以通过求解方程(11)得到记为 X_0, Y_0, Z_0, T_0 ;同时可计算出震源坐标(X, Y, Z)和声波爆发时间点 T ;计算得到的精确值 X_0, Y_0, Z_0, T_0 是迭代计算的近似值;

(7)声发射震源能量 A_0 的范围可以从声发射波形的最大幅度获得:

$$A_0 = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K (A_j \times L_j) \quad (12)$$

L_j : 声发射震源与第 j 个声发射传感器之间的距离

K : 声发射传感器的数量

A_j : 从第 j 个声发射传感器获得的波形的最大幅度

声发射震源能量使用公式(12)计算,相对能量 A_e 由方程(13)给出:

$$A_e = (A_0)^2 \quad (13)$$

(8)步骤(6)中计算 dx, dy, dz, dt 的精确值 X_0, Y_0, Z_0, T_0 ,它们的标准方差分别表示为 $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2, \sigma_t^2$,它们的测量值可以表示为权重 P_x, P_y, P_z, P_t ;权重与标准方差的关系由方程(14)给出:

$$P_x \sigma_x^2 = P_y \sigma_y^2 = P_z \sigma_z^2 = P_t \sigma_t^2 = \sigma^2 \quad (14)$$

精确值 X_0, Y_0, Z_0, T_0 的准确度可由以下两个误差表示:标准偏差 σ , 精度误差 r ;

标准偏差 σ 可以通过处理(14)方程中的标准方差 $\sigma^2, \sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2, \sigma_t^2$ 来获得;

精度误差使用最小二乘法来计算,精度误差($r > 0$)与标准偏差 σ 的关系由以下表达式给出:

$$r = 0.6745\sigma \quad (15)$$

标准方差 σ^2 的平均值表示为 $\hat{\sigma}^2$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{v^T v}{n-4} \quad (16)$$

其中, v 是方程(6)中测量值和计算值的残差 v_i ;分母是自由度;

X、Y、Z、T的精度误差为 $\hat{\gamma}_x$ 、 $\hat{\gamma}_y$ 、 $\hat{\gamma}_z$ 、 $\hat{\gamma}_t$ 如下所示:

$$\begin{aligned} \hat{r}_x &= 0.6745 \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{P_x}}, & \hat{r}_y &= 0.6745 \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{P_y}} \\ \hat{r}_z &= 0.6745 \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{P_z}}, & \hat{r}_t &= 0.6745 \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{P_t}} \end{aligned} \quad (17)$$

[0006] 采用上述技术方案,本发明与常规技术相比有如下特点及优势:

1. 声发射传感器的作用是接收试样材料内部因发生破坏破裂而产生的声发射信号;
2. 声发射前置放大器的功能是对从传感器侦测到的微弱的声发射信号进行放大处理,同时把不需要的信号滤掉,这样提高了信噪比,继而将信号通过同轴电缆传输到声发射示波器;

3. 声发射示波器的内置存储器可以获得(A@~.wdt)文件用于记录声发射信号。可以根据每次试验的环境噪音等影响因素,通过调节信号触发条件来得到理想的稳定波形;

4. 后续数据解析器可以将声发射示波器传来的(A@~.wdt)文件转换为(A@~.csv),从示波器获得的声发射波形数据,包括信号初动时间、信号振幅等,然后运行自写的震源标定程序(Location.sln),计算出震源坐标(X,Y,Z)、声波爆发时间点T、声波相对能量 A_e 和精度误差 r 。

[0007] 综上所述,本发明提出一种基于微震空间组网的震源精确定位方法,将震源坐标(X,Y,Z)以及声波爆发时间点(T)作为未知数,通过数值分析相应的线性优化不断逼近真实的声发射事件的震源位置,并且可以获取所得结果的精度。并且将此方法编辑为程序,具有极好的实用价值。

附图说明

[0008] 图1是本发明的结构示意图。

具体实施方式

[0009] 如图1所示,本发明的基于微震空间组网的震源精确定位方法,包括以下步骤,

步骤一,将多个声发射传感器2用粘结剂粘贴到待测物体1表面上,然后将声发射传感器2、声发射前置放大器3、声发射示波器4和后续数据解析器5依次采用同轴电缆连通;

步骤二,对待测物体1施加外力使其产生声发射信号,声发射传感器2接收到声发射信号,继而将微弱的声发射信号通过同轴电缆传输到声发射前置放大器3;

步骤三,声发射前置放大器3对从声发射传感器2侦测到的微弱的声发射信号进行放大

处理,同时把不需要的信号滤掉,提高信噪比,继而将信号通过同轴电缆传输到声发射示波器4;

步骤四,声发射示波器4根据现场的环境噪音及其他影响因素,通过调节信号触发条件来得到理想的稳定波形;并将声发射信号以A@~.wdt的文件形式记录到内置存储器;

步骤五,后续数据解析器5将声发射示波器4传来的A@~.wdt文件转换为A@~.csv,获得声发射波形数据,声发射波形数据包括信号初动时间、信号振幅;然后运行自写的震源标定程序对获得的声发射波形数据信息进行处理分析,计算出震源坐标(X,Y,Z)、声波爆发时间点T、声波相对能量A_e和精度误差r。

[0010] 其特征于:步骤五中自写的震源标定程序,其运算过程为:

(1) 在自写的震源标定程序中分别输入:文件读取和输入路径;待测物体1的形状信息;标定维度:2维或3维;声发射传感器2的数目及坐标;

(2) 对待测物体1的不同位置进行敲击,敲击位置坐标输入到震源标定程序中,然后通过后续数据解析器5分析计算出P波在待测物体1中的平均传播速度C_p;

(3) 假设(X',Y',Z')为震源坐标(X,Y,Z)的近似值,将待测物体1分成N个等体积的块;第一次取N=8,假设第i个块坐标为(α_i,β_i,γ_i),假设有K个声发射传感器2,第j个声发射传感器2坐标为(X_j,Y_j,Z_j)接收到信号的时间点为t_j,则δ_{ij}为以第i个块第j个声发射传感器2推算出来的声波爆发时间点:

$$\delta_{ij} = t_j - \frac{\sqrt{(\alpha_i - X_j)^2 + (\beta_i - Y_j)^2 + (\gamma_i - Z_j)^2}}{C_p} \quad \begin{matrix} (i = 1, 2, 3, \dots, N) \\ (j = 1, 2, 3, \dots, K) \end{matrix} \quad (1)$$

由所有声发射传感器2推算出来的平均声波爆发时间点T_i由方程(2)表示;那么,方程(3)是假设声波发生在第i个块,第i个块声波爆发时间点的标准偏差S_i,

$$T_i = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \delta_{ij} \quad (2)$$

$$S_i = \sqrt{\sum_{j=1}^k (\delta_{ij} - T_i)^2} \quad (3)$$

当S_i取最小的值时,声发射源在第i个分块内;计算精度是否达标,精度达标则第i个分块的坐标(α_i,β_i,γ_i)即为(X',Y',Z')的初始值;精度不达标则继续将第i个分块分割成N个等体积的块重复上述计算过程,直到符合精度要求;

(4) X',Y',Z',T'是X,Y,Z,T的近似值;dx,dy,dz,dt分别代表它们的差值;

$$\begin{aligned} f_i(X,Y,Z,T) &= f_i(X' + dX, Y' + dY, Z' + dZ, T' + dT) \\ &= f_i(X', Y', Z', T') + \left(\frac{\partial f_i}{\partial X} \right) dx + \left(\frac{\partial f_i}{\partial Y} \right) dy + \left(\frac{\partial f_i}{\partial Z} \right) dz + \left(\frac{\partial f_i}{\partial T} \right) dt \end{aligned} \quad (4)$$

(5) 令a_i = ∂f_i/∂X, b_i = ∂f_i/∂Y, c_i = ∂f_i/∂Z, d_i = ∂f_i/∂T, m_i = f_i(X,Y,Z,T) - f_i(X',Y',Z',T')

$$\text{则 } a_i \cdot dx + b_i \cdot dy + c_i \cdot dz + d_i \cdot dt = m_i \quad (5)$$

(6) 假定 X_0, Y_0, Z_0, T_0 为 dx, dy, dz, dt 的精确值, 并使用最小二乘法进行处理, 如下所示; 残差 v_i 可以写成如下形式:

$$v_i \equiv m_i - (a_i \cdot dx + b_i \cdot dy + c_i \cdot dz + d_i \cdot dt) \quad (6)$$

$$S \equiv \sum v_i^2 \quad (7)$$

最小残差平方和 S 需要满足以下条件:

$$\frac{\partial S}{\partial dx} = 0, \frac{\partial S}{\partial dy} = 0, \frac{\partial S}{\partial dz} = 0, \frac{\partial S}{\partial dt} = 0 \quad (8)$$

等式 (8) 的残差平方和 S 可以用内积表示如下:

$$\frac{\partial [vv]}{\partial dx} = 0, \frac{\partial [vv]}{\partial dy} = 0, \frac{\partial [vv]}{\partial dz} = 0, \frac{\partial [vv]}{\partial dt} = 0 \quad (9)$$

然后通过求解方程 (6), 获得以下等式:

$$[av] = 0, [bv] = 0, [cv] = 0, [dv] = 0 \quad (10)$$

将方程 (10) 代入方程 (6) 并表示为决定因素, 然后:

$$\begin{bmatrix} [aa][ab][ac][ad] \\ [ba][bb][bc][bd] \\ [ca][cb][cc][cd] \\ [da][db][dc][dd] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [am] \\ [bm] \\ [cm] \\ [dm] \end{bmatrix} \quad (11)$$

dx, dy, dz, dt 微分可以通过求解方程 (11) 得到记为 X_0, Y_0, Z_0, T_0 ; 同时可计算出震源坐标 (X, Y, Z) 和声波爆发时间点 T ; 计算得到的精确值 X_0, Y_0, Z_0, T_0 是迭代计算的近似值;

(7) 声发射震源能量 A_0 的范围可以从声发射波形的最大幅度获得:

$$A_0 = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K (A_j \times L_j) \quad (12)$$

L_j : 声发射震源与第 j 个声发射传感器 2 之间的距离

K : 声发射传感器 2 的数量

A_j : 从第 j 个声发射传感器 2 获得的波形的最大幅度

声发射震源能量使用公式 (12) 计算, 相对能量 A_e 由方程 (13) 给出:

$$A_e = (A_0)^2 \quad (13)$$

(8) 步骤(6)中计算 dx, dy, dz, dt 的精确值 X_0, Y_0, Z_0, T_0 , 它们的标准方差分别表示为 $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2, \sigma_t^2$, 它们的测量值可以表示为权重 P_x, P_y, P_z, P_t ; 权重与标准方差的关系由方程(14)给出:

$$P_x \sigma_x^2 = P_y \sigma_y^2 = P_z \sigma_z^2 = P_t \sigma_t^2 = \sigma^2 \quad (14)$$

精确值的准确度可由以下两个误差表示: 标准偏差 σ , 精度误差 r ; 准确度可以通过处理(14)方程中的标准方差 $\sigma^2, \sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2, \sigma_t^2$ 来获得; 精度误差使用最小二乘法来计算, 精度误差 ($r > 0$) 与标准偏差 σ 的关系由以下表达式给出:

$$r = 0.6745\sigma \quad (15)$$

标准方差 σ^2 的平均值表示为 $\hat{\sigma}^2$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{v^T v}{n-4} \quad (16)$$

其中, v 是方程(6)中测量值和计算值的残差 v_i ; 分母是自由度;

X、Y、Z、T 的精度误差为 $\hat{\gamma}_x, \hat{\gamma}_y, \hat{\gamma}_z, \hat{\gamma}_t$ 如下所示:

$$\begin{aligned} \hat{r}_x &= 0.6745 \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{P_x}}, & \hat{r}_y &= 0.6745 \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{P_y}} \\ \hat{r}_z &= 0.6745 \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{P_z}}, & \hat{r}_t &= 0.6745 \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{P_t}} \end{aligned} \quad (17)$$

[0011] 本实施例并非对本发明的形状、材料、结构等作任何形式上的限制, 凡是依据本发明的技术实质对以上实施例所作的任何简单修改、等同变化与修饰, 均属于本发明技术方案的保护范围。

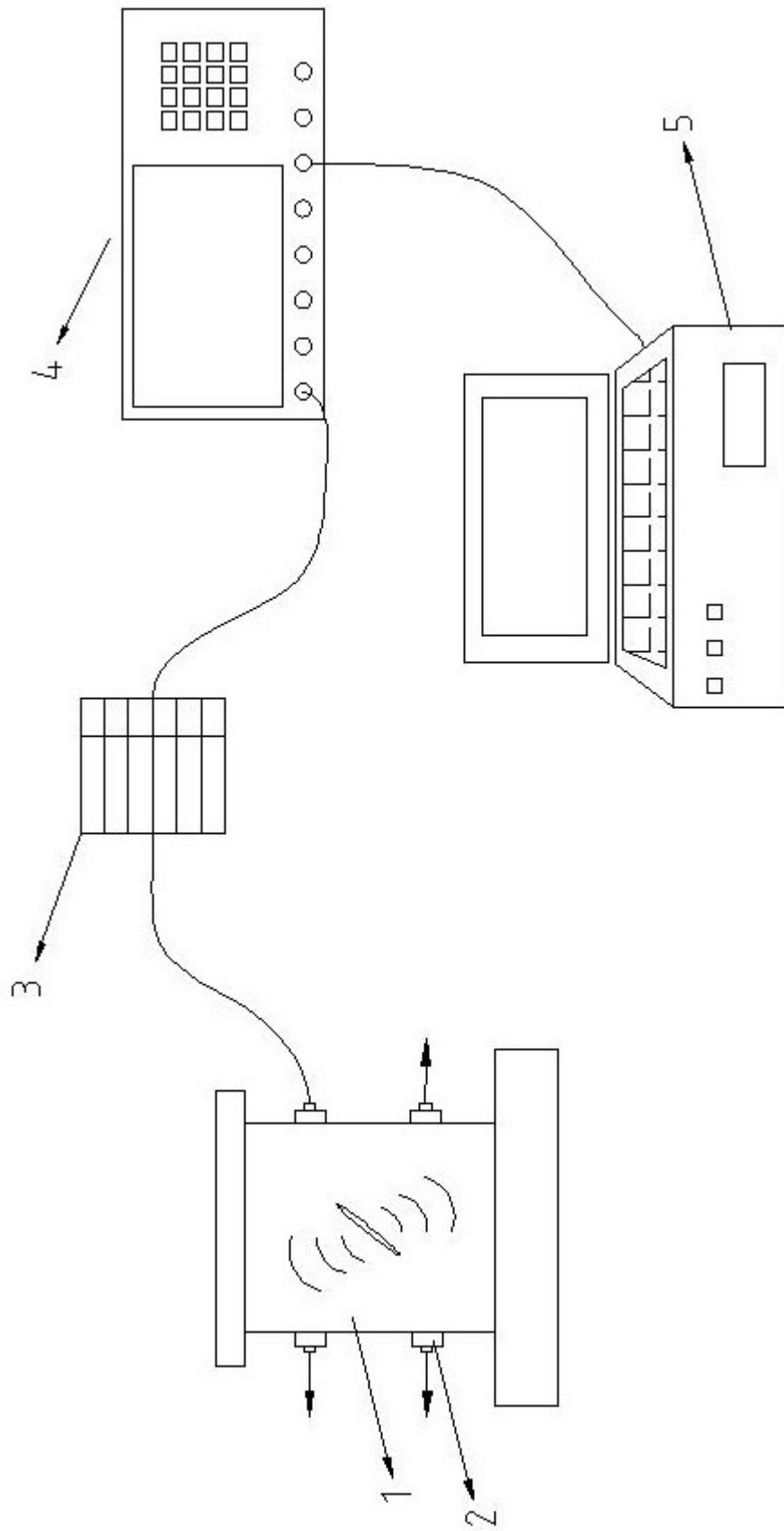


图1