

文章编号:1671-8879(2009)06-0069-05

混凝土超声 CT 层析成像算法的改进

宋焕生,戚秀真,李佳慧,赵祥模

(长安大学 信息工程学院,陕西 西安 710064)

摘要:为提高混凝土超声层析成像的速度和精度,提出一种改进的快速图像代数重建迭代算法(IART),算法根据投影数据初步判定每个成像单元为缺陷的概率大小,由此概率选取迭代初值,并在迭代过程中根据概率大小分配投影误差。试验结果表明:IART 算法有效控制了波速离散,提高了计算的精度和图像重建质量,实现了混凝土层析成像的实时性;对混凝土试件进行测试,IART 算法相比于常规迭代重建算法(ART)更能准确地反映混凝土内部结构。

关键词:结构工程;混凝土;无损检测;图像重建;层析成像;迭代算法

中图分类号:TP391.41; TU317.8 **文献标志码:**A

Improved iterative algorithm for ultrasonic computerized tomography of concrete

SONG Huan-sheng, QI Xiu-zhen, LI Jia-hui, ZHAO Xiang-mo

(School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to enhance the speed and to improve the accuracy of the ultrasonic computerized tomography of concrete, an improved algebraic reconstruction technique (IART) is presented. In IART algorithm, the defect probability of each unit is accounted based on the detected data. Then, the images of concrete structures are initialized, and the error of detected data is distributed depend on the probability. The results show that the IART algorithm is effective to control wave velocity dispersion and to improve the accuracy of computation and the quality of image reconstruction on concrete; the IART algorithm is more accurate for reflecting the internal structure of concrete. 2 tabs, 4 figs, 8 refs.

Key words: structure engineering; concrete; non-destructive testing (NDT); image reconstruction; computerized tomography; iterative algorithm

0 引言

CT 层析成像技术是指在不损伤研究“对象”内部结构的条件下,对某种射线源,根据从“对象”外部用检测设备所获得的投影数据,运用一定的数学模型对投影值进行处理,重建物体内部图像的一种反

演技术。声波层析成像将声波测试技术与 CT 技术相结合,可用于探测桥梁工程大体积混凝土以及钻孔灌注桩内部质量,为工程的验收提供信息。由于层析成像可以获得缺陷处质量下降程度,从而可以为工程的补强加固提供准确数据^[1-2]。

然而,混凝土 CT 成像与医学 CT 成像有很大

收稿日期:2008-12-20

基金项目:国家西部交通建设科技项目(2004 318 812 22)

作者简介:宋焕生(1963-),男,内蒙古凉城人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:hshsong@chd.edu.cn。

差异,医学 CT 成像可以得到比较完整的投影数据,根据 Fourier 切片定理,利用变换法成像技术即可快速地得到具有一定质量的重建图像;但是在混凝土 CT 中,由于被检测混凝土的结构及环境等客观条件的限制,无法得到完整的投影数据,得到的投影数据的数量及结构无法达到解析成像技术要求的条件。因此,在混凝土 CT 中,为得到比较清晰的图像,就射线理论而言,一般采用迭代重建的方法^[3-4]。常规混凝土超声 CT 反演算法包括 ART 算法、SIRT 算法和 LSQR 算法等^[5-6],尽管仿真结果和试验结果是有效的,但需要大量的迭代计算,花费时间较长,无法满足实时性的要求,算法的精度和快速性仍没有得到很好的解决。为此,本文提出利用概率的方法,对常规 ART 算法(algebraic reconstruction technique)进行了改进,进一步提高了图像重建的速度及精度。

1 混凝土超声透射层析图像重建模型

如图 1 所示,假设测区共有 n 条测线通过,划分成 $p \times q = m$ 个网格(成像单元)。 l_i 为第 i 条测线长度(发射换能器 T_i 到接收换能器 R_i 之间的直线距离); τ_i 为 l_i 从激发点到接收点的走时(声时),则由 Radon 公式有

$$\tau_i = \int_{l_i} \frac{1}{c_j(x,y)} dl = \int_{l_i} f_j(x,y) dl \quad (1)$$

式中: x, y 分别为像素点横、纵坐标; $c_j(x, y)$ 为第 j 个成像单元的波速; $f_j(x, y)$ 为第 j 个成像单元的波慢,即波速的倒数。

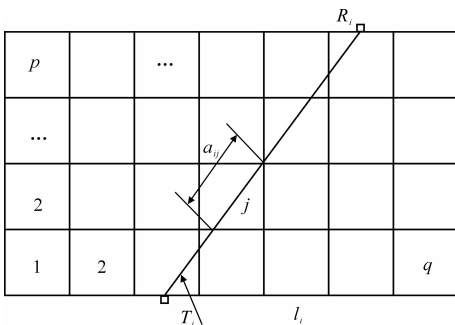


图 1 测区网格划分

假定成像单元足够小,可将每个单元的 $c_j(x, y)$ 视为常数,则式(1)可写成级数形式为

$$\tau_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} f_j(x,y) \quad (2)$$

式中: a_{ij} 为第 i 条射线在第 j 个成像单元内的长度。

从数学角度看,式(2)实际上是一个线性方程组,可表示为

$$\left. \begin{aligned} \tau_1 &= a_{11} f_1 + a_{12} f_2 + \cdots + a_{1m} f_m \\ \tau_2 &= a_{21} f_1 + a_{22} f_2 + \cdots + a_{2m} f_m \\ &\quad \cdots \\ \tau_n &= a_{n1} f_1 + a_{n2} f_2 + \cdots + a_{nm} f_m \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

或写成矩阵方程为

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{A} \mathbf{f} \quad (4)$$

式中: \mathbf{A} 为投影矩阵; $\boldsymbol{\tau}$ 为走时向量; \mathbf{f} 为波慢向量。

对于式(4):由于每一条射线仅仅穿过极少数的网格,是稀疏的,强超定的;因为缺乏信息,又是欠定的,且是不相容的,不存在通常意义的解。因此,通常采用对方程组建立一个优化判断或导出的某一组不等式作为实现优化的约束,根据射线走时,寻求使误差 $\|\boldsymbol{\tau} - \mathbf{A} \mathbf{f}\|^2$ 取得最小值的向量 \mathbf{f} 。常用方法为 ART 迭代重建算法^[7]。

2 ART 算法

ART(algebraic reconstruction technique) 算法^[8] 是基于物理上的考虑而发展起来的。它的基本思想是先给被重建的区域一个初始值,然后将所得到的投影值残差一个一个沿其射线方向均匀地反投影回去,同时不断地对重建图像进行校正,直到满足所要求为止。

ART 算法是按射线依次修改相关网格的波慢,在迭代过程中,将每一条射线的走时误差分配给射线经过的所有网格,也称逐线(ray-by-ray)重建法。

由式(2),忽略误差,令波慢修改增量为 Δf_j ,则

$$\sum_j \Delta f_j a_{ij} = \Delta \tau_i \quad (5)$$

ART 迭代算法要根据第 i 条射线的走时误差 $\Delta \tau_i$ 求出经过的所有网格的波慢修改增量 Δf_j 。由于式(5)是高度欠定的,因此可用此作为约束条件求 Δf_j 的 L^{2p} 模的极小解。由拉格朗日乘子法,令目标函数为

$$\min(Q) = \min\left(\left(\sum_{j=1}^m |\Delta f_j|^{2p}\right)^{1/2p} + \lambda(\Delta \tau_i - \sum_{j=1}^m a_{ij} \Delta f_j)\right) \quad (6)$$

式中: λ 为拉格朗日乘子; p 为模的阶数。

由 $\partial Q / \partial (\Delta x_j) = 0$ 及 $\partial Q / \partial \lambda = 0$, 可得

$$\Delta f_j = \frac{a_{ij}^{1/(2p-1)}}{\sum_{j=1}^m a_{ij}^{2p/(2p-1)}} \Delta \tau_i \quad (7)$$

令 $p = 1$ 或 $p \rightarrow \infty$, 可得 ART 算法中 2 种常用的波慢的修改增量计算式为

$$\Delta f_j = a_{ij} \Delta \tau_i / \sum_{j=1}^m a_{ij}^2 \quad (8)$$

$$\Delta f_j = \Delta \tau_i / \sum_{j=1}^m a_{ij} \quad (9)$$

式(8)和式(9)的区别在于:式(8)将走时误差加权分配到每一个单元;式(9)将走时误差均匀分配到每一个单元。前者反演精度高,计算速度稍慢,应用较普遍。

由于图像重建的不适定问题,为了增加计算的稳定性,将式(7)的波慢修改增量 Δf_j 乘以松弛因子 $\mu (0 < \mu \leq 1)$ 。

3 改进的 ART 算法——IART 算法

由于混凝土密实区(正常区域)波速较大,而不密实区及空洞地方(缺陷)的波速较小,因此投影(走时)差主要是由于缺陷单元造成的。所以,改进的 ART 算法——IART(improved algebraic reconstruction technique)算法的主要思想是:根据每条射线的投影值(走时),初步求出每条射线穿过缺陷单元的概率,进一步确定每个网格为缺陷单元的概率大小,利用此概率值,选取更加接近于真实图像向量的波慢迭代初始值,并在迭代过程中依据概率大小来合理的分配投影(走时)误差,缺陷概率越大分配越多的走时误差,因此提高了图像重建的速度及精度。

3.1 射线穿过缺陷单元概率的确定

$$v_i = \sum_j a_{ij} / \tau_i \quad (10)$$

$$\bar{v} = \sum_{i=1}^n v_i / n \quad (11)$$

$$s_v = \sqrt{\sum (v_i - \bar{v})^2 / (n - 1)} \quad (12)$$

式中: v_i 为第*i*条射线的波速; \bar{v} 为波速平均值; s_v 为波速标准差; n 为射线总数。

在同一测区内,各条射线波速服从正态分布,利用正态分布函数

$$\varphi(\lambda) = \int_{\lambda}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-u^2/2} du = P_t(Z \geq \lambda_t) \quad (13)$$

分别求出置信概率 P_t 为 100%、90%、...、10% 时的 $\lambda_t (t = 1, 2, \dots, 10)$ 值,进而求出置信概率 $P_t (t = 1, 2, \dots, 10)$ 在正常区域波速的下限值 V_t

$$V_t = \bar{v} + \lambda_t s_v / \sqrt{n} \quad t = 1, 2, \dots, 10 \quad (14)$$

若射线波速小于正常波速下限值,则该射线穿过缺陷单元的概率为 P_t ,即可求出每条射线穿过缺陷单元的概率为

$$p_i = P_t |_{v_i < V_t} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

式中: u 为积分变量; p_i 为第*i*条射线穿过缺陷单元

的概率。

3.2 网格为缺陷单元概率的确定

若某一条射线穿过缺陷单元的概率为 p_i ,则认为它所穿过的所有网格为缺陷单元的概率均为 p_i ,并将 p_i 赋值给它所通过的所有网格。由于每个网格里有不同的射线穿过,因此每个网格将得到一组概率数据,问题转化为如何根据一组不同的概率值来确定网格为缺陷单元的概率 q_j 。

p_i 较小时,说明第*i*条射线穿过的所有网格为缺陷单元的概率 $q_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 均较小;反之,若 p_i 较大,则只能说明它所穿过的个别网格为缺陷的概率 q_j 较大,因此网格为缺陷单元的概率 q_j 应选取 (p_1, p_2, \dots, p_l) 中相对较小的数据。但由于网格对不同射线的影响不同, q_j 的选取应考虑穿过第*j*个网格的每条射线在第*j*个网格里的线段长度 a_{ij} 与射线的总长的比值 $\bar{\omega}_i = a_{ij} / \sum_j a_{ij}$ 的大小。因此,以 $\bar{\omega}_i$ 为权系数,采用滤波的方法,选取概率数据中较小数值作为 q_j 。

对于每一个网格,将穿过它的每一条射线的 p_i 及它对每一条射线的 $\bar{\omega}_i$ 一一对应赋值,并按 p_i 的大小排序,得到一组数据 $\{(p_1, \bar{\omega}_1), (p_2, \bar{\omega}_2), \dots, (p_l, \bar{\omega}_l)\}$,其中, $p_1 \leq p_2 \leq \dots \leq p_l$, l_j 为穿过第*j*个网格的射线条数。 q_j 的选取公式为

$$q_j = p_{(r)} |_{\bar{\omega}_{r-1} < \bar{\omega}_a \leq \bar{\omega}_r} \quad 0 < \alpha \leq 1 \quad (16)$$

$$\bar{\omega} = \sum \bar{\omega}_i / l_j \quad (17)$$

式中: $\bar{\omega}$ 为 $\bar{\omega}_i$ 平均值; α 为参数因子; r 为序号。

3.3 迭代初始值的选取

网格为缺陷的概率确定后,根据概率大小选取每个网格的波速初始值 $v_j^{(0)}$ 为

$$v_j^{(0)} = V_1 q_j + V_{10} (1 - q_j) \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (18)$$

则波慢初始值 $\hat{f}^{(0)}$ 为

$$\hat{f}^{(0)} = 1 / v_j^{(0)} \quad (19)$$

3.4 波慢修改增量的确定

在 ART 算法中,将走时误差以射线在网格中线段的长度 a_{ij} 为权分配到所经过的网格中,将每个网格在相同距离情况下对走时影响看作是等同的。每个网格为缺陷单元的概率确定后,将该概率引入误差分配中,以 a_{ij} 与 q_j 的乘积为权进行分配走时误差,充分考虑了正常单元与缺陷单元对走时影响的不同,得到波慢的修改增量为

$$\Delta f_j = \mu b_{ij} q_j \Delta \tau_i / \sum_{j=1}^m b_{ij}^2 \quad (20)$$

$$b_{ij} = a_{ij}q_j \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$$

3.5 IART 算法的实现步骤

(1) 利用投影值(走时)确定每一条射线穿过缺陷单元的概率 $p_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 。

(2) 根据 p_i 求出每一网格为缺陷单元的概率 $q_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 。

(3) 根据 q_j 确定波慢迭代初始值 $\hat{f}^{(0)}$ 。

(4) 记第 q 轮迭代时第 i 条射线对第 j 个网格波慢的估算值为 $\hat{f}_j^{q,i}$, 应用式(21), 逐条射线 $i (i = 1, 2, \dots, n)$ 对波慢作修改($\hat{\tau}_i^q$ 为 τ_i 的估算值)。

$$\hat{f}_j^{q,i+1} = \hat{f}_j^{q,i} + \mu b_{ij} q_j (\tau_i - \hat{\tau}_i^q) / \sum_{j=1}^m b_{ij}^2 \quad (21)$$

表 1 模型波速与迭代波速

模型波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	4 500	4 500	4 500	4 500	4 500	4 500	4 500	4 500	4 500	4 500
	4 500	4 500	4 500	<u>4 050</u>	<u>4 050</u>	<u>4 050</u>	4 500	4 500	4 500	4 500
	4 500	4 500	4 500	<u>4 050</u>	<u>4 050</u>	<u>4 050</u>	4 500	4 500	4 500	4 500
	4 500	4 500	4 500	4 500	4 500	4 500	4 500	4 500	4 500	4 500
	4 500	4 500	4 500	4 500	4 500	4 500	4 500	4 500	4 500	4 500
	4 500	4 500	4 500	4 500	4 500	4 500	4 500	4 500	4 500	4 500
ART 迭代 100 次 后波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	4 441.5	4 440.3	4 440.4	4 442.1	4 444.5	4 447.4	4 452.0	4 456.8	4 465.5	4 475.2
	4 590.2	4 604.2	4 610.5	<u>4 143.0</u>	<u>4 144.5</u>	<u>4 144.2</u>	4 613.7	4 604.8	4 592.5	4 558.7
	4 622.5	4 609.6	4 605.0	<u>4 130.7</u>	<u>4 127.6</u>	<u>4 124.5</u>	4 590.9	4 591.3	4 595.7	4 619.9
	4 460.0	4 462.8	4 457.1	4 452.4	4 448.3	4 444.9	4 443.9	4 443.0	4 447.1	4 446.0
	4 457.3	4 450.5	4 448.6	4 451.3	4 452.4	4 455.1	4 451.3	4 453.9	4 444.8	4 440.3
4 435.7	4 440.7	4 444.7	4 446.9	4 448.2	4 452.2	4 451.7	4 459.9	4 459.9	4 465.7	
IART 迭代 50 次 后波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	4 487.2	4 488.2	4 489.6	4 490.1	4 490.9	4 490.7	4 489.8	4 488.8	4 487.7	4 486.7
	4 501.2	4 498.5	4 495.8	<u>4 044.4</u>	<u>4 042.9</u>	<u>4 043.0</u>	4 493.3	4 495.7	4 498.7	4 500.6
	4 510.1	4 512.2	4 513.9	<u>4 062.9</u>	<u>4 063.7</u>	<u>4 064.5</u>	4 517.1	4 515.5	4 513.5	4 512.7
	4 500.5	4 498.2	4 500.3	4 501.7	4 502.6	4 502.6	4 501.5	4 499.9	4 498.3	4 496.6
	4 504.4	4 505.2	4 501.5	4 498.2	4 496.0	4 495.0	4 496.0	4 499.1	4 502.1	4 504.7
4 496.9	4 497.9	4 499.0	4 500.9	4 502.3	4 503.0	4 502.3	4 501.3	4 498.7	4 498.8	

注:表中划线部分为缺陷单元格波速,其余部分为正常区域波速。

表 2 迭代结果的比较

算法	正常区域波速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$			缺陷区域波速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$			波速离差/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	波速最大误差/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值		
ART(100次)	4 622.46	4 435.67	4 489.47	4 144.54	4 124.50	4 135.77	69.56	122.46
IART(50次)	4 517.11	4 486.65	4 499.54	4 064.48	4 042.85	4 053.55	7.69	17.11

模型波速与分别经过 ART(100 次)、IART(50 次)迭代后波速的三维显示如下页图 2 所示。

分析表 1、表 2 及图 2 可知,IART 算法相对于 ART 算法,在迭代速度和精度(尤其是精度)上均得到了提高。

4.2 混凝土试件试验

试件断面测区长 44 cm、深 50 cm,划分为 11×10 个网格,其中,中心部分为缺陷(混凝土夹泥),大小为 $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ 。分别在长度方向的两侧布置

(5) 满足收敛标准时终止程序,否则,进行 $q+1$ 轮迭代。

4 试验结果

4.1 计算机模拟试验

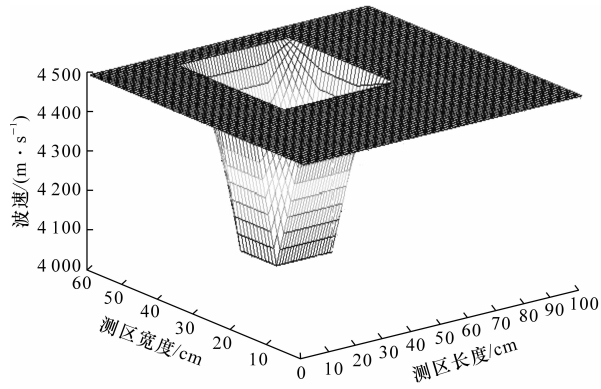
计算机模拟试验模型为 $100 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ 、划分成 10×6 个网格的测区,其中 22、23、28、29、34、35 号为缺陷单元格,缺陷波速为 $4 050 \text{ m/s}$,正常波速为 $4 500 \text{ m/s}$ 。

表 1 为模型波速与 ART(100 次)、IART(50 次)迭代后的波速;表 2 为 ART 与 IART 迭代结果的比较。

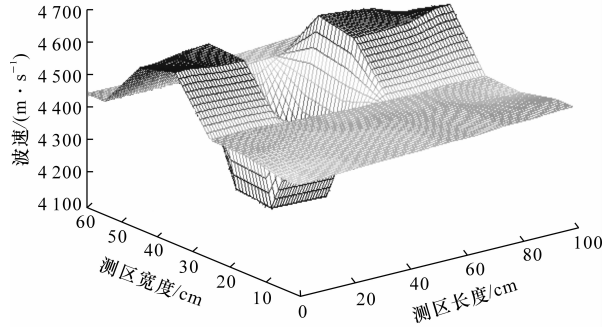
发射换能器和接收换能器,获得 11×11 个声时;分别利用 ART 及 IART 反演后,得到的断面波速分布如下页图 3、图 4 所示。从图 3、图 4 可知,IART 算法比 ART 算法更能准确地反映混凝土内部结构,重建效果较好。

5 结 语

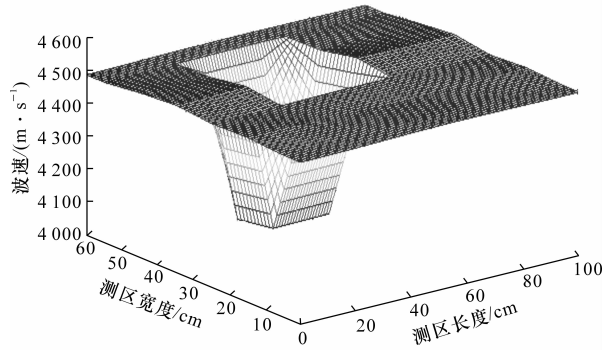
(1) 经过计算机仿真及混凝土试件的试验结果可知,提出的改进算法 IART 相比 ART 算法,迭代



(a) 模型波速



(b) ART迭代100次



(c) IART迭代50次

图2 波速三维显示

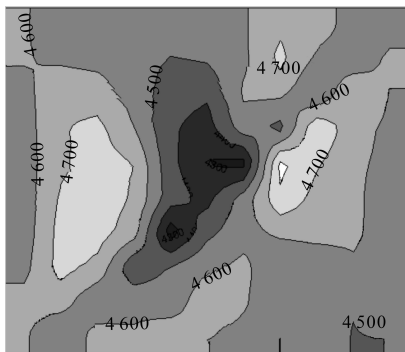


图3 断面波速分布(ART)

收敛速度及精度(尤其是精度)都得到了提高。

(2)将改进的层析成像算法 IART 应用于混凝土层析成像检测系统中,取得了良好的效果,实现了混凝土层析成像的实时性。

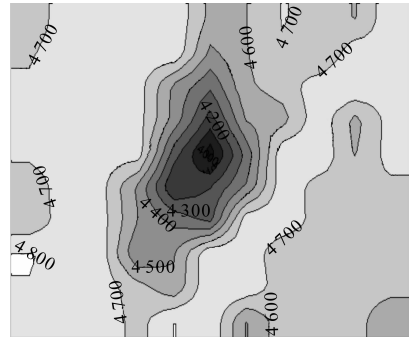


图4 断面波速分布(IART)

参考文献:

References:

- [1] Rosalie C, Chan A, Chiu W K, et al. Structural health monitoring of composite structures using stress wave methods [J]. Composite Structures, 2005, 67 (2): 157-166.
- [2] Kwon J, Choi S J, Song S M H. Implementation and evaluation of the ultrasonic TOF tomography for the NDT of concrete structures [C]//SPIE. Proceedings of SPIE; the International Society for Optical Engineering. San Tose; SPIE, 2005: 47-54.
- [3] Papoulis A. New algorithm in spectra analysis and band-limited signal extrapolation [J]. IEEE Transaction on Circuits and Systems, 1975, 22(9): 735-742.
- [4] Liu Z Q, Sun J P. Structured image retrieval [J]. Journal of Visual Languages and Computing, 1997, 8(3): 333-357.
- [5] 曹俊兴, 聂在平. 基于物理模型的成像算法评价与 SASART 成像算法 [J]. 成都理工学院学报, 1998, 25 (4): 473-479.
CAO Jun-xing, NIE Zai-ping. Model based evaluation method for the imaging inversion algorithms and SASART algorithm [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1998, 25(4): 473-479.
- [6] 吴律. 层析基础及其在井间地震中的应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- [7] 井西利, 杨长春, 李幼铭. 建立速度模型的层析成像方法研究 [J]. 石油物探, 2002, 41(1): 72-75.
JING Xi-li, YANG Chang-chun, LI You-ming. Study of tomographic inversion in the construction of velocity model [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2002, 41(1): 72-75.
- [8] 杨文采, 杜剑渊. 层析成像新算法及其在工程检测上的应用 [J]. 地球物理学报, 1994, 37(2): 239-244.
YANG Wen-cai, DU Jian-yuan. A new algorithm of seismic tomography with application to engineering detections [J]. ACTA Geophysica Sinica, 1994, 37(2): 239-244.