

改革开放以来，特别是近十年，国家基本建设规模不断加大，加强工程建设全面质量管理正在加强，工程验收前的工程质量检测评价亦在加强，此乃编辑出版本书之初衷。

土木工程无损检测技术具有简单、快速、易行等特点，是工程质量检测有效方法，是提高土木工程质量的保证，也是构建节约型社会和建设和谐社会的重要环节。因此其在土木工程中的应用，一贯受到国家和我国科研工作者的重视。在此情况，我们把土木工程无损检测技术现状、发展全面系统总结编撰此书，希望为广大工程建设人员提供参考。

**CIVIL
ENGINEERING**

土木工程
质量无损检测技术

□林维正 主编

土木工程
质量无损检测技术

□林维正 主编

中国电力出版社

中国电力出版社
www.cepp.com.cn

**CIVIL
ENGINEERING**
土木工程
质量无损检测技术

目 录

第十一章 弹性波CT技术.....	1
§11.1 CT技术概述	1
§11.2 CT成像基本原理	2
11.2.1 射线CT数学原理	2
11.2.2 变换重建法	3
11.2.3 级数展开法	3
11.2.4 衍射及散射CT简介	4
§11.3 弹性波CT方法技术	5
11.3.1 射线追踪技术	5
11.3.2 射线波速CT	7
11.3.3 衰减系数CT	8
§11.4 软件设计与应用实例.....	10
11.4.1 软件设计与系统结构	10
11.4.2 观测系统与成像精度	11
11.4.3 应用实例	12

第十一章 弹性波 CT 技术

王运生（郑州大学环境与水利学院，郑州 450001，Email:wys001@sina.com）

§ 11.1 CT 技术概述

早在 1917 年，奥地利数学家 J.Radon 发表的著名论文《关于由函数沿某些流形的积分确定该函数》（即 Radon 变换），为层析成像（Computerized Tomography, CT）技术的形成和发展起到了指导性的作用。CT 技术是指在不损伤研究“对象”内部结构的条件下，利用某种射线源，根据物体外部检测设备所获得的投影数据，依据一定的物理和数学关系，利用计算机反演物体内部未知的某种物理量的分布函数，生成二维、三维图像，重现物体内部特征。所谓 CT 技术就是根据投影数据反演物体内部图像，因此，又可称为图像重建。

CT 技术是一门涉及数学、物理、计算机等知识的边缘性学科，同遗传工程、新粒子发现和宇航技术一起被称为七十年代国际四大科技成果。CT 技术最初应用于医学领域，并获得巨大成功，它能够提供人体内部高清晰度、高分辨率的三维图像，为医学诊断带来了极大的方便。1979 年，第一台 CT 发明者 G.N.Housefield 和 A.M.Cormack 获得了诺贝尔医学奖。受医学领域所取得成功的鼓励，近年来，CT 技术的应用已经拓展到科学和工程等诸多领域，特别在地球物理学和土木工程无损检测等方面得到了广泛的应用。80 年代开展的国际地球岩石圈计划中，美国哈佛大学和加州理工学院应用 CT 技术取得了揭示地球内部精细结构的层析图像，为板块对流学说提供了依据。Bergman 等介绍了以二维射线追踪为基础的迭代方法应用于野外实测数据处理，表明人工地震 CT 开始从实验室模拟走向实际应用。1986 年，Gustavsson 等在瑞典北部铁矿将人工地震 CT 应用于矿产探测，T.Inazzhi 等人则用 CT 方法评价岩体的质量。近几年来，声波 CT 技术在土木工程无损检测领域得到了快速发展，取得了良好的应用效果。其结果形象直观、准确全面，给最终的定量评价带来了极大的方便。1992 年第 62 届美国勘探地球物理学会年会上开始设专题讨论高分辨率 CT 在工程与探矿方面的应用问题。

根据应用领域，CT 技术可分为医学 CT、工业 CT 和工程 CT 等。工程 CT 根据所使用的射线源不同，又可分为弹性波 CT、电磁波 CT 和电阻率 CT 等。其中弹性波 CT 精度最高，应用范围最广，根据振源及信号频率又可分为声波 CT 和地震波 CT；根据投影数据类型可分为走时层析、振幅层析和波形层析等；根据反演的物性参数，可分为波速层析和衰减系数层析等；根据反演的理论基础，可分为以射线理论为基础的射线层析和以波动理论为基础的衍射层析和散射层析。

§ 11.2 CT 成像基本原理

目前,在地质构造探测和土木工程质量检测方面,基于射线理论的弹性波 CT 是应用效果最好成像精度最高的方法之一。以波动理论为基础的弹性波成像方法具有明显的发展前景,但在具体应用中,仍然有许多技术问题需要研究解决。

11.2.1 射线 CT 数学原理

CT技术的数学基础是Radon变换及其逆变换。Radon变换是一种泛函算子,当它作用在一个函数上时,产生另外一个实数,是一种积分投影变换。函数 $f(x,y)$ 的Radon变换被定义为沿某一直线的积分值 $P_\theta(t)$,也称为投影值,如图 11-1 所示。

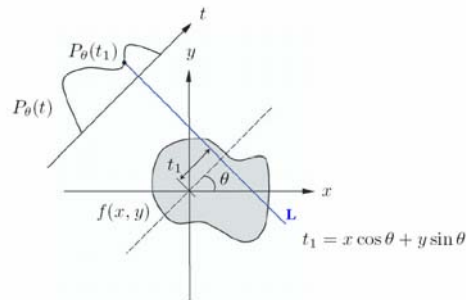


图 11-1 Radon 变换示意图

在极坐标系下, Radon 变换公式如下:

$$P_\theta(t) = \int_L f(x, y) \cdot d_s = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - t) \cdot d_x d_y \quad (11-1)$$

$$f(x, y) = \hat{f}(r, \varphi) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\pi \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{r \cdot \cos(\varphi - \theta) - t} \frac{\partial P}{\partial t} d_t d_\theta \quad (11-2)$$

根据 Radon 逆变换公式 (11-2) 可知,如果已知所有投影角度的数据,则可以唯一的重建函数 $f(x,y)$ 。层析成像 (CT) 过程,就是根据实测投影数据重建物体内部某种物理量的分布图像,是 Radon 逆变换公式的具体实现过程,是从观察到的一组曲线或曲面数据反演物理模型。目前,基于射线理论的层析成像方法被分为两类:一类为变换重建法,另一类为级数展开法。

11.2.2 变换重建法

变换重建法也叫解析法，是以准确的 Radon 逆变换公式或其等价变换的形式为依据，根据实测的投影数据来计算物体内部某种物性函数 $f(x,y)$ 分布图像。变换法中有两类典型的重建方法：傅立叶变换法和卷积一反投影法。在投影数据完全（即投影射线足够多且分布均匀）、足够精确且射线路径为直线的前提下，变换法可以高分辨、准确地重建物体内部图像，医学 X 射线 CT 因基本符合上述前提，故常用变换法重建图像，取得了良好的效果。但是变换法抗噪音干扰的能力差；另外，如果投影数据不是沿直线的简单积分，那么可能就得不到解析反演公式的闭合形式，在这样的情况下，变换法就会无效。弹性波 CT 中难以满足这些要求，所以一般不宜采用变换法。

11.2.3 级数展开法

如果说变换重建法是数学变换的解析方法，那么级数展开法则是离散化的数值方法。级数展开法首先将问题离散化，即将图像重建区域离散成若干被编号的规则的网格（一般是正方形）单元，每一个网格单元又可称为像素或像元。在每一个单元内，函数 $f(x,y)$ 的值为一常数，这样函数就被转化为一个有限数据集。如图 11-2 所示，在重建区域离散后，对于第 i 条射线 L_i （由源点 S 到接收点 R 的投影路径）的投影值 Radon 变换公式如下。

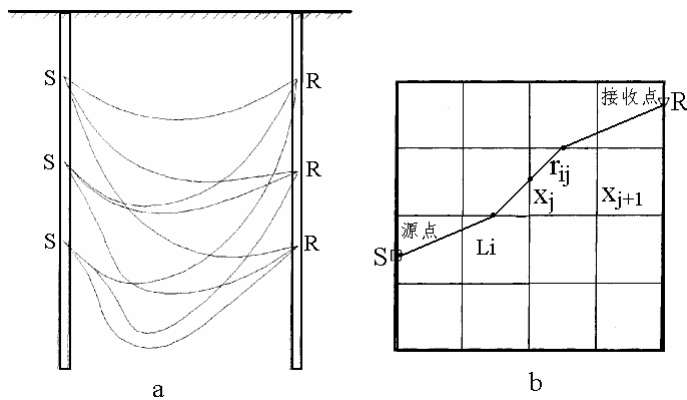


图 11-2 射线 CT 示意图

a. 孔中 CT 观测系统 b. 射线路径示意图

$$P_i(t) = \int_L f(x, y) \cdot d_s \cong \sum_{j=1}^M r_{ij} \cdot x_j \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (11-3)$$

在上式 (11-3) 中， r_{ij} 为第 i 条射线穿过第 j 个单元的距离， x_j 为 $f(x,y)$ 在第 j 个单元内的平均值， M 为单元总数。对于全部 N 条射线而言，上式可写成矩阵形式：

$$\mathbf{Y}=\mathbf{R}\mathbf{X} \quad (11-4)$$

其中, \mathbf{Y} 为投影向量, \mathbf{R} 为射线路径矩阵或射线距离矩阵, \mathbf{X} 为图像向量。于是, 级数展开法通过离散重建区域, 将 Radon 变换及其逆变换的非线性问题线性化, 归结为求解线性方程组 (11-4) 式。若已知图像向量 \mathbf{X} , 对射线进行追踪, 计算投影向量 \mathbf{Y} , 称为正演过程 (即 Radon 正变换过程)。若已知投影向量 \mathbf{Y} , 求解图像向量 \mathbf{X} , 称为反演过程 (即 Radon 逆变换过程)。显而易见, 正演和反演过程均涉及到射线追踪技术, 即对射线路径进行追踪, 确定射线路径矩阵 \mathbf{R} 。因为每一条射线所穿过的单元数有限, 所以 \mathbf{R} 是一个庞大的稀疏矩阵。由于级数展开法通过离散重建区域, 降低原有问题的非线性, 适合投影数据不够精确、不够完全且射线路径为曲线的层析成像, 因此, 是弹性波 CT 最常用的成像方法。

成像过程涉及到求解大型稀疏线性方程组, 通常采用迭代法求解 (11-4) 式, 其过程归纳如下:

- (1) 定义一个初始参数模型。
- (2) 使用某种射线追踪方法计算理论投影值。
- (3) 对比理论投影值和观察投影值, 如果残差大于给定的误差级别且未达到给定的迭代次数, 则修改参数模型。
- (4) 重复以上 (2) (3) 步骤, 直到残差满足所给定的收敛条件或达到给定的迭代次数为止。

在上述迭代过程中, 根据步骤 (3) 中修改模型参数的不同思路, 又产生了两类方法: 一类是投影迭代法, 以代数重建法 ART (Algebraic Reconstruction Techniques) 和联合迭代重建法 SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Techniques) 最具代表; 另一类是根据特定成像模式的某些先验信息, 将求解问题表达为在一定准则下的最优化问题, 寻找相应的优化解, 如最小二乘法。

ART 算法的基本思想是先给被重建区域一个初始值, 然后将所达到的投影值残差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, 直到满足所需要求为止。ART 算法对计算机内存和性能要求较低, 但抗干扰能力差, 有时不收敛。SIRT 与 ART 的主要区别是: ART 每一次修正只考虑一条射线, 成像结果与射线次序有关。SIRT 是利用一个单元内通过的所有射线的修正值来确定对这一单元的平均修正值, 即 SIRT 中的一次迭代相当于 ART 中的一轮迭代, 成像结果与射线次序无关。SIRT 采用平均修正值算法可以有效压制干扰信号, 具有良好的收敛性, 是目前普遍采用的成像方法。

11.2.4 衍射及散射 CT 简介

射线追踪法只考虑了波的折射问题, 当物体内部异常与入射波波长相当或小于入射波的波长时, 就会发生波的衍射现象。因此, 为了精确地反演波场, 必须同时考虑折射和衍射 (统称为散射) 情况, 透射式衍射 CT 就是这样一种技术, 其数学基础是傅里叶衍射投影定理, 与射线 CT 中的傅里叶投影切片定理非常相似。区别在于, 在傅里叶投影切片定理中, 投影数据的傅里叶变换对应于物体傅里叶变换在频域上的一条直线; 而在傅里叶衍射投影定理中, 投影数据的傅里叶变换对应于物体傅里叶变换在频域上的一条半圆弧。反

射式衍射 CT 与透射式衍射 CT 原理相同, 反射数据的傅里叶变换对应于物体傅里叶变换在频域上半圆弧的另一半。由于衍射 CT 采用了一阶 Born 或 Rytov 近似, 只能适用于弱散射情况。

上世纪 60 年代, Richmond 和 Harrington 给出了微波通过二维物体时散射场的精确描述方法—矩量法。随后, 人们将这一方法运用于超声散射场的精确描述问题中, 1983 年, Johnson 和 Tracy 等人利用超声散射 CT 技术反演物体内部结构。散射 CT 在反演物体内部结构时, 是基于散射场的精确描述, 不再利用某种近似假设, 因此, 大大拓宽了应用范围。散射 CT 不仅适用于较强的散射物体, 而且对于弱散射体的成像质量也有了很大的提高。散射 CT 具有明显的发展优势, 但是由于其检测设备和成像算法的复杂性, 仍然有许多技术问题急待解决。

§ 11.3 弹性波 CT 方法技术

根据检测设备和信号频率, 弹性波 CT 又可分为声波 CT 和地震波 CT。两者的成像方法原理完全一样, 所不同的是前者具有精度高、测试快速简单等优点, 但是能量较小适用于短距透射, 主要应用于砼质量检测以及岩石分类; 后者读时精度较低, 但是信号能量很大可以进行长距离透射, 一般使用孔间透射法对大型地质构造进行探测。

根据反演物性参数, 弹性波 CT 又可分为波速 CT 和吸收系数 CT, 最常用的成像方法是基于射线理论的级数展开法。在级数展法中, 正演、反演过程都需要确定射线路径矩阵。确定射线路径矩阵的关键是如何快速计算每条射线通过每个单元的距离, 追踪首波传播路径及走时。最简单的方法是把波传播路径近似为直线, 其特点是计算简单, 当观测系统确定后, 射线路径矩阵也就随之固定不变了。然而, 由于成像剖面上各点的波速并不相等, 特别是当各点之间波速 (即异常体界面波阻抗) 变化差异较大时, 首波传播路径会发生明显的弯曲。因此, 弯曲射线快速追踪, 是提高 CT 成像精度, 实现弯曲射线层析成像的关键技术之一。

11.3.1 射线追踪技术

最短路径算法是计算数学“图论”中的一个基本内容, 其实质是若已知某些离散点及各点之间的路程 (权值), 用最优计算方法及计算技术, 求出从始点到终点最短路程。显然, 如果各点之间的权值是所需要旅行时间, 求出的结果是最小走时路径。为了与最短路径有所区别, 称之为最佳路径。针对具体问题有不同的计算最短路径方法, 其中 Dijkstra 提出的按长度不减次序产生最短路径的算法特别适用于快速弯曲射线追踪, 是弯曲射线 CT 最常用最有效的方法之一, 这种方法具有编程简单、计算效率高和应用范围广等优点, 基本原理方法介绍如下。

最佳路径算法简介

如图 11-3 所示, 设有 5 个离散点 P_1, P_2, \dots, P_5 , 已知通过任意两点所需要的时间 t_{ij} , 求从始点 P_1 到终点 P_5 的最佳路径 (即最小走时路径)。用排列组合算法可知, 从 P_1 到 P_5 之间

共有 M ($M = P_3^0 + P_3^1 + P_3^2 + P_3^3 > 3!$) 条路径, 如果用最简单的比较方法计算最佳路径, 则需要比较 $O(N!)$ 次, N 为始点与终点之间离散点个数。若用Dijkstra最佳路径算法, 比较次数仅为 $O(N^2)$, 计算方法如下。

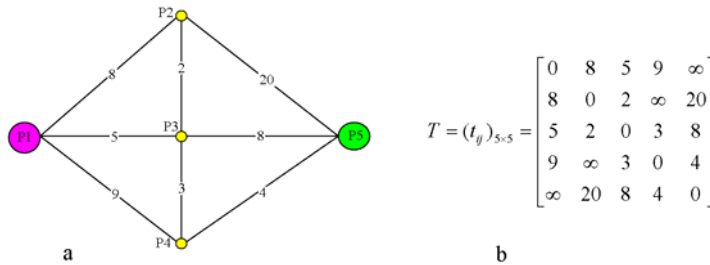


图 11-3 图径及邻接矩阵

(1) 首先设置两个一维数组 $A=[a_1, a_2, \dots, a_5]$, $B=[b_1, b_2, \dots, b_5]$ 和一个集合 $S=\{P_1, P_2, \dots, P_5\}$, 其中 a_i 、 b_i 与 P_i 相对应 ($i=1, 2, 3, 4, 5$)。

(2) 从集合 S 中去掉起始点 P_1 , 则 $S=\{P_2, P_3, P_4, P_5\}$ 。数组 A 、 B 中的元素 $a_i=t_{i1}$, $b_i=1$ ($i=2, 3, 4, 5$)。即 $A=[0, 8, 5, 9, \infty]$, $B=[1, 1, 1, 1, 1]$ 。

(3) 从数组 A 中找出数值最小, 且对应点号属于集合 S 的元素 (目前为 a_3), 然后从集合 S 中去掉 a_3 对应的点号 P_3 , 则 $S=\{P_2, P_4, P_5\}$ 。与集合 S 中元素相对应的 a_i , b_i ($i=2, 4, 5$) 作下述变换。如果 $a_i > t_{i3} + a_3$ 则 $a_i = t_{i3} + a_3$, $b_i = 3$, 否则 a_i 、 b_i 不变, 据此求出 $A=[0, 7, 5, 8, 13]$, $B=[1, 3, 1, 3, 3]$ 。

(4) 重复过程 (3), $S=\{P_4, P_5\}$, $A=[0, 7, 5, 8, 13]$, $B=[1, 3, 1, 3, 3]$ 。

(5) 再次重复过程 (3), $S=\{P_5\}$, $A=[0, 7, 5, 8, 12]$, $B=[1, 3, 1, 3, 4]$ 。

当集合 S 中剩下一个元素 (循环 3 次) 时停止计算, 数组 A 、 B 中元素即为计算结果。其中 a_i 是 P_1 到 P_i 最佳路径走时值。 b_i 是 P_1 到 P_i 最佳路径的下一个点号, 用数组 B 即可求出任意一点 P_i 到 P_1 的最佳路径。因为 $b_5=4$, $b_4=3$, $b_3=1$, 所以 P_5 到 P_1 的最佳路径是 $P_5-P_4-P_3-P_1$ 。通过算例可以看出, 对于离散点间的最佳路径追踪, 通过一次计算即可得到全部网格点上的最佳路径和走时, 具有计算效率高, 占用内存少等优点。

弹性波射线追踪

由费马原理可知, 从激发点到接收点的首波是沿费时最少的路径传播, 首波射线追踪是一个连续的最佳路径问题。因此, 只要把连续的射线追踪问题转换为离散问题, 应用最佳路径算法即可实现首波射线路径快速追踪。对于 CT 成像过程而言, 成像剖面是由若干规则 (正方形) 网格组成, 且假设每个网格中的介质波速为常数。首波射线追踪算法如下。

(1) 首选把单元边界离散成许多点 $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n$, 如图 11-4 所示。点的多少视精度要求而定, 一般来说点越密集, 计算精度越高, 但计算时间也随之增加。

(2) 计算 $S, P_1, P_2, \dots, P_n, R$ 中任意两点间弹性波走时, 计算规则是: ①若两点间连线在均匀介质中, 射线走时是两点间距离除以介质波速。②若两点间的连线在分界面上, 界面两侧最大波速为 V_m , 则射线走时为两点间距离除以最大波速。③若两点连线通过

不同单元，不在均匀介质中，可以用直线路径近似计算射线走时。

(3) 把S点作为起始点，用最佳路径算法计算其它各点 (P_1, P_2, \dots, P_n, R) 到S点的最佳路径和走时，然后从中分离出R点到S点的最佳路径及走时，即可得到计算结果。

“椭圆约束”快速射线追踪方法

虽然应用最佳路径算法进行弹性波射线追踪具有很高的计算效率，但是如果在整个CT剖面内进行射线追踪，由于离散点数N很大，射线计算速度仍然受到限制。应用“椭圆约束”方法可以实现更快速射线追踪，并且程序设计和计算方法十分简单。具体方法是首先以源点和接收点为焦点作一个椭圆，根据椭圆方程性质，如果首波射线路径任意一点弯曲到椭圆之外，射线路径将会大于 $2a$ (a 为椭圆长轴)。由于首波走时必须最小，即弯曲射线路径较直射线路径不可能偏离太大，所以只要适当选择椭圆长轴 a 值，则射线路径必然在椭圆范围内。因此，程序实现时首先根据椭圆内任意一点到两焦点（源点和接收点）距离之和小于 $2a$ ，找出椭圆区域内所有离散点然后进行射线追踪。由于椭圆内的离散点数 n 与整个CT剖面内离散点数N相比会减少很多，计算比较次数会从 $O(N^2)$ 降低到 $O(n^2)$ ，因此，射线追踪速度会提高更多。

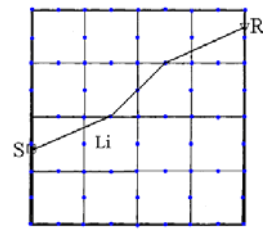


图 11-4 单元网格点示意图

11.3.2 射线波速 CT

基于射线理论的弹性波波速 CT，又可分为直射 CT 和弯曲射线 CT，两者唯一的区别是射线追踪方法不同。由于直射 CT 是用直线近似计算波路，所以成像精度较弯曲射线 CT 要低，但成像速度很快。所以常用的成像方法是：首先用直射 CT 对剖面进行快速成像；然后以此结果为基础，用弯曲射线 CT 对被测物体进行高精度成像。

设定 $V(x,y)$ 是二维模型速度分布函数，根据现场测试条件和精度要求，设在成像剖面内共测得 N 条射线。根据射线 CT 成像理论 (11-3)、(11-4) 式，首先把成像区域剖分为 M 个单元，以首波射线理论为基础的成像方法可归结为求解下述方程：

$$\begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1M} \\ l_{21} & l_{22} & \dots & l_{2M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_{N1} & l_{N2} & \dots & l_{NM} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_N \end{bmatrix} \quad (11-5)$$

上式 (11-5) 是一个大型稀疏线性方程组，式中 l_{ij} 是第 i 条射线在第 j 个单元内的路径长度； $S_j = 1/V_j$ 是第 j 个单元的平均慢度值； T_i 是第 i 条射线的实测走时值。

应用快速射线追踪技术和 SIRT 算法求解上述方程，可以实现高精度弯曲射线 CT，这一技术具有很强的适用性，在实际生产中得到广泛应用并取得了很好的效果。具体方法步骤如下：

(1) 用反投影技术 BPT (Back Projection Technique) 计算各单元平均慢度初值 S 。设

某一单元内有 n 条射线通过， l_m 是其中第 m 条射线通过该单元的射线长度，且其射线总长为 L_m ，走时为 T_m ，则通过单元所用的时间分配 $t_m = T_m \cdot l_m / L_m$ 。通过单元内的 n 条射线总时

间分配为 $t_n = \sum_{m=1}^n t_m$ ，总长度分配为 $l_n = \sum_{m=1}^n l_m$ ，则该单元的平均慢度值 $S = \frac{t_n}{l_n}$ 。

(2) 用射线追踪技术计算射线在各单元内的长度 l_{ij} 和射线走时 T^c 。根据各单元平均慢度初值或者迭代结果，应用弯曲射线追踪技术即可精确求出射线路径矩阵。然而，在具体应用时，由于直射近似计算较弯曲射线追踪要快很多，所以迭代初期一般先用直射近似计算射线路径矩阵。然后，再用弯曲射线追踪技术计算射线路径矩阵，进行高精度迭代成像。

(3) 用SIRT算法校正各单元慢度值 S 。设某一单元内共有 n 条射线通过，射线 m 是其中的任意一条，实测走时是 T_m 。用直射或者弯曲射线追踪算法，可以求出射线 m 通过该单元内的长度 l_m ，以及射线总长度 L_m 和射线走时 T_m^c 。则分配给该单元的走时误差

$\varepsilon_m = (T_m - T_m^c) \cdot l_m / L_m$ ， n 条射线通过单元内总走时误差为 $\sum_{m=1}^n \varepsilon_m$ ，总射线长度为 $\sum_{m=1}^n l_m$ ，

单元慢度 S 用下式校正：

$$S^{(k+1)} = S^k + \frac{\sum_{m=1}^n \varepsilon_m}{\sum_{m=1}^n l_m} \quad (11-6)$$

如果已知测区内波速变化范围，可使用 $S_{\min} < S^{(k+1)} < S_{\max}$ 作为约束条件。计算时使用约束条件以及选择加入合适的阻尼因子，可以提高收敛效果和成像精度。

(4) 重复过程(2)、(3)，也即重复执行软件成像反演功能。用平均相对误差

$\sigma = [\sum_{m=1}^n |T_m - T_m^c| / T_m] / n \times 100\%$ 来判断其收敛程度，当 σ 很小或不在减小时或者迭代次数大于一定次数时，可停止计算，这时所得图像即为剖面CT成像结果。

数大于一定次数时，可停止计算，这时所得图像即为剖面CT成像结果。

鉴于工程中的应用需要，最终结果常常提供剖面速度($V_j=1/S_j$)分布图像；也可以根据波速与材料强度之间的相关关系，转换成剖面强度分布图像。

11.3.3 衰减系数 CT

现在人们逐渐认识到，在弹性波波速成像的基础上，还可以利用波形反映出的衰减信息，重建被测物体衰减特性的分布情况。在很多条件下，弹性波的衰减对于缺陷性质的反映比波速要敏感的多，因此衰减层析成像同样是全面认识物体内部结构的重要手段。弹性波衰减机理是一个极为复杂的过程，弹性波衰减特性可用衰减系数（即吸收系数）或者品

质因子来描述。弹性波衰减成像可以在时间域进行,也可以在频率域进行,目前常用的成像方法有振幅衰减法、上升时间法、频谱比法和频谱质心偏移法。频谱质心偏移法是一种较新的方法,与其它方法相比,在一般情况下表现得更稳定,具有良好的应用前景,其基本原理如下。

弹性波在传播过程中会产生波前散发、吸收、散射和透射等变化。设 $S(f)$ 是从源点发出的弹性波信号频谱,则接收到的信号频谱 $R(f)$ 可用下式表示:

$$R(f) = G \cdot H(f) \cdot S(f) \quad (11-7)$$

$$H(f) = \exp(-f \int_L \alpha_0 d_s) = \exp(-f \int_L \frac{\pi}{Q \cdot V} d_s) \quad (11-8)$$

式中 $H(f)$ 是信号衰减频率响应函数, L 是波传播路径, Q 是材料的品质因子。设信号 $S(f)$ 符合高斯分布可得:

$$S(f) = \exp\left[-\frac{(f - f_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] \quad (11-9)$$

根据公式 (11-7)、(11-8)、(11-9),可以推出衰减系数投影公式如下:

$$\int_L \alpha_0 d_s = (f_s - f_R) / \sigma_s^2 = P \quad (11-10)$$

设定 $\alpha_0(x, y)$ 是二维模型吸收系数分布函数,成像区域被剖分为 M 个单元,根据上式

(11-10) 和射线 CT 基本公式 (11-3)、(11-4),对于测区内的 N 条射线,可以得到衰减系数射线 CT 方程组。

$$\begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1M} \\ l_{21} & l_{22} & \dots & l_{2M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_{N1} & l_{N2} & \dots & l_{NM} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_{01} \\ \alpha_{02} \\ \vdots \\ \alpha_{0M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_N \end{bmatrix} \quad (11-11)$$

式中 l_{ij} 是第 i 条射线在第 j 个单元内的路径长度; α_0 是第 j 个单元的平均吸收系数; P_i 是第 i 条射线的实测投影。上式 (11-5) 与射线波速 CT 方程组表达形式完全相同,因此,在求出射线路径矩阵和投影向量之后,可以使用波速成像方法进行衰减系数成像。射线路径矩阵可以用直射方法近似求出,也可以使用最佳路径算法进行弯曲射线追踪。因此,计算投影向量是衰减系数成像过程中的重要内容。

根据公式 (11-10) 可知,计算投影 P 需要首先求出源点信号和接收点信号频谱质心 f_s 和 f_R ,以及源点信号对应的平均方差 σ_s 。在使用 FFT 算法对接收到的信号进行傅里叶变换之后,接收点信号的频谱质心和平均方差计算公式如下:

$$f_R = \frac{\int_0^{\infty} f \cdot R(f) \cdot d_f}{\int_0^{\infty} R(f) \cdot d_f} \quad (11-12)$$

$$\sigma_R^2 = \frac{\int_0^{\infty} (f - f_R)^2 \cdot R(f) \cdot d_f}{\int_0^{\infty} R(f) \cdot d_f} \quad (11-13)$$

由于源点信号一般无法得到,在具体成像过程中,可以使用接收点的平均方差 σ_R 近似代替 σ_S 。当接收点到源点射线距离为零时,接收点信号频谱质心等于源点频谱质心。因此,可以根据N个接收点信号频谱质心与射线距离曲线(f_R -L),使曲线拟合分析方法求解源点频谱质心 f_S 。

频谱质心偏移衰减系数成像是一种比较新的方法,在对接收信号进行FFT变换计算之后,应用射线波速成像方法,可以直接对物体衰减系数 α_0 进行成像,如果已知波速分布还可以对品质因子Q进行成像,是一种应用广泛非常具有推广前景的方法。

§ 11.4 软件设计与应用实例

基于射线理论的弹性波 CT 与常规的透射波测定方法相比,具有成果直观、分辨率高和定位精确等优点。然而,另一方面,弹性波 CT 成像精度容易受到观测系统和测试精度、成像方法和误差控制等许多因素影响,因此,弹性波 CT 软件设计和使用方法技术,对于提高成像精度具有决定性作用。

11.4.1 软件设计与系统结构

目前,基于射线理论的弹性波层析成像技术已经十分成熟,WYS-CT 弹性波层析成像系统是结合多年的生产实践和科学研究千锤百炼而来,在工程建设中得到了普遍应用并发挥着重要作用。系统采用模块化设计方式,通过数据库信息管理技术,各种功能被有机地结合在一起,使用非常方便。WYS-CT 成像系统主要包括数据库信息管理系统、信号预处理和弹性波层析成像三个部分。

(1) 数据库信息管理系统,是整个系统的主控部分,所有的计算分析在其控制下完成,同时对资料实现快速查询和高效率管理。

(2) 信号分析和数据校正对弹性波 CT 成果质量起着重要作用。根据所选择的 CT 成像方法(即波速 CT 或者衰减系数 CT),数据预处理软件可以快速读取信号首波走时,或者计算频谱质心和衰减系数投影向量。然后绘制观测系统图和实测数据曲线,检查测点坐标和成像数据是否正确。

(3) 弹性波波速 CT 和吸收系数 CT,采用先进的设计建模技术和快速射线追踪算法,使得直射 CT 和弯曲射线 CT 两种方法均可以快速高精度实现;通过优化 SIRT 成像方法

和图像处理技术，进一步提高成像精度，保证 CT 成像系统的实用性和先进性。

11.4.2 观测系统与成像精度

弹性波 CT 分辨率的大小，一方面受到反演算法、目标体的形态及性质(高速体还是低速体)等技术与客观条件限制，另一方面与观测系统和信号频率等因素密切相关。在理想条件下弹性波 CT 分辨率不小于第一菲涅尔带，因此如果探测的异常体尺寸越小，所需要的信号频率就越高。由于射线追踪必须已知源点和接收点的坐标位置，因此需要根据测试剖面建立标准直角坐标系。坐标原点可根据需要或者习惯任意确定，剖面内任意一个源点或者接收点位置使用二维坐标来表示。

基于射线理论的弹性波 CT 是根据 Radon 变换原理而来，测试时要求尽可能全方位对被测剖面进行透射测量，才能提高成像精度。不同的射线密度和射线视角直接影响着成像质量，这好像看一个物体，只有从物体的各个方位观察，才能了解物体的全部。然而在具体测试时，由于受客观条件的限制很难做到，一般常用的方法有两侧透射、三侧透射以及最为理想的四侧透射。为了保证成像精度，要尽可能加大扇形角度($\alpha > \pi/2$)和保证射线密度，设 d 为异常体尺寸， Δx 为激发点距离和接收点距离，观测系统激发点和接收点布置应该尽可能满足 $\Delta x \leq d/3$ 。即异常体尺寸越小，需要的射线密度越大。

由于弹性波 CT 成像方程一般是不适定的或者病态的，所以要充分利用已知的边界条件和约束条件，提高解的唯一性和成像精度。例如声波测井数据具有更高的精度可以充分利用。根据所了解的测区物性条件，设置成像剖面波速变化范围对成像过程进行约束。在对数据进行校正和加入适当的已知约束条件之后，即可进行成像计算。在迭代计算一定次数之后，可根据每条射线实测走时与计算走时之相对误差值绘制误差曲线，如果某条射线相对误差绝对

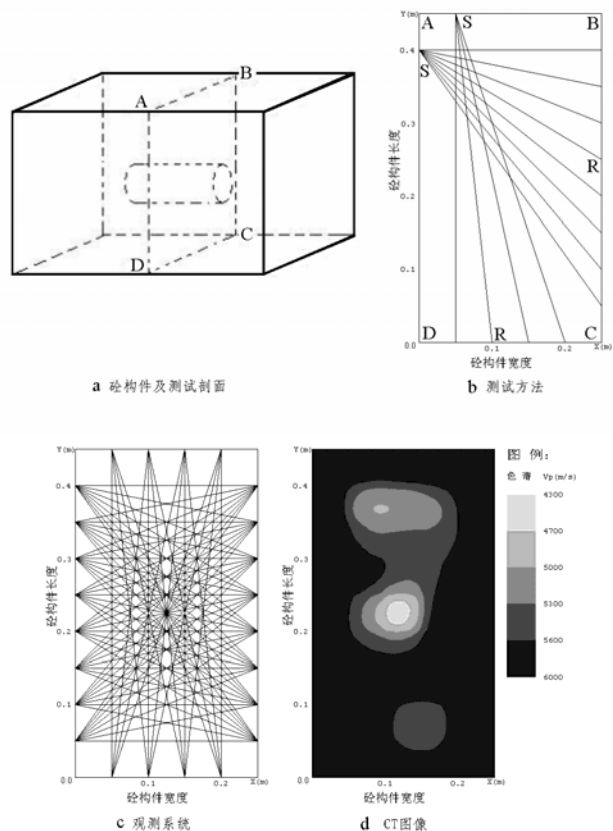


图 11-5 声波 CT 混凝土构件质量检测

值较大，需要重新对其进行检查、校正或者删除掉，然后再次进行计算，提高成像精度。

11.4.3 应用实例

在工程地质条件勘探，混凝土构件和堤坝防渗墙质量检测，地基处理或加固效果评价，铁路和高速公路路基病害探测等方面，基于射线理论的弹性波 CT 技术取得了良好的应用效果。应用声波 CT 技术可以准确检测混凝土构件内部的波速分布和吸收系数分布，通过波速（或者吸收系数）与强度的对应关系，可以定量地确定构件的质量以及缺陷的分布形态。因此，声波 CT 在岩石力学研究和混凝土构件的无损质量检测中具有广阔的应用前景。应用地震波 CT 技术可以详细地绘制出深部地质构造，在工程地质勘察中有着不可替代的独特作用，已成为工程地质工作中一种重要的勘测手段。

砼质量检测

已知混凝土构件某一截面(ABCD)内部存在有低速隐患如图 11-5.a 所示，其中截面积为 $0.25\text{m} \times 0.45\text{m}$ ，使用声波检测仪进行测试，测点间距选定为 5cm，测试方法和观测系统如图 11-5.b.c 所示。首先对 AD 与 BC 两测进行扇形透射测试，为了提高成像精度然后对 AB 与 CD 两侧进行透射测试。应用 CT 成像技术对所测数据进行成像，结果如图 11-5.d 所示。从图中可以明显看出中部有一个圆形低速区，表明在混凝土构件中部存在低强度隐患，这一结果与实际情况非常一致。

地质构造探测

某隧道工程需要通过二叠系灰岩地区，为了查明其裂隙发育分布情况，采用地震波 CT 技术对下部介质进行波速成像，成像剖面为 $86\text{m} \times 280\text{m}$ ，采用井中电火花震源激发，使用浅层地震仪和 CT 专用串珠式水听器进行测试，震源和水听器间距均为 2m。CT 成像结果如图 11-6 所示，从图中可以明显分析得出，岩体裂隙呈条带状分布与地层产状一致，同时局部有小溶洞发育，与地质钻探验证资料十分吻合。

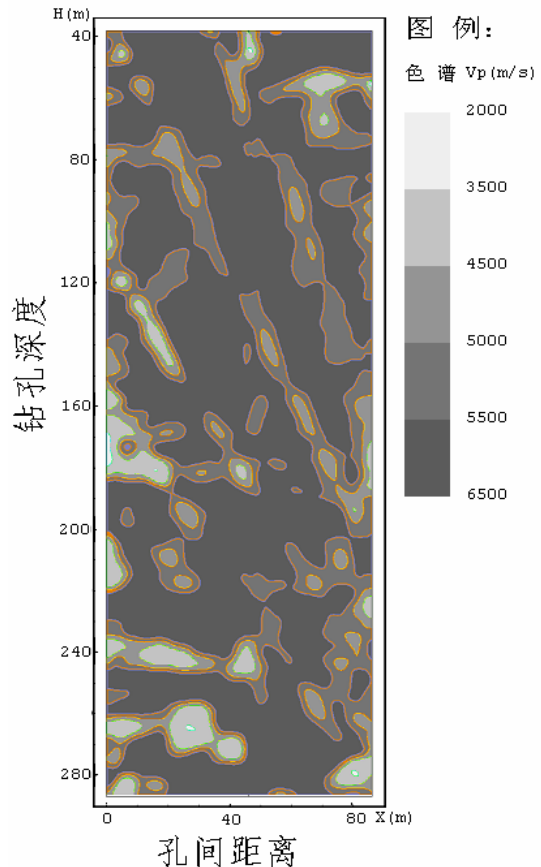


图 11-6 地震波 CT 地质构造探测

主要参考文献

- [1] 王运生, 最佳路径算法在计算波路中的应用, 物探化探计算技术, 1992, 14 (1): 32~36
- [2] 王运生, 弯曲射线地震波透射层析成像的一种实现方法, 河海大学学报, 1993, 21 (4): 21~28
- [3] 王运生, 弹性波 CT 关键技术与应用实例, 工程勘察, 2005, (3): 66~68
- [4] Youli Quan, Jerry M Harris, Seismic attenuation tomography using the frequency shift method, Geophysics, 1997, 66 (3): 895~905
- [5] 黄 靓, 混凝土超声 CT 的数值模拟与试验研究, 湖南大学土木工程学院 (硕士学位论文), 2003, 1~63
- [6] 刘 超, 超声层析成像的理论与实现, 浙江大学生物医学工程学院 (博士学位论文), 2003, 1~145
- [7] Avinash C Kak, Malcolm Slaney, Principles of computerized tomographic imaging, IEEE PRESS, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 1999, 1~321

作者简介: 王运生(1963—), 男, 河南安阳人, 博士, 高级工程师, 主要从事工程物探方法技术研究和软件开发。

Tel: 13703920884; Email: wys001@sina.com