

# 结构扫描雷达对钢筋混凝土构件的三维切片成像

冯温雅, 施兴华, 费翔宇, 王元新

(中国电波传播研究所, 山东 青岛 266107)

**摘要:** 基于结构扫描雷达网格测线的数据采集方式, 提出了一种用于钢筋混凝土构件的三维切片成像算法。先用克希霍夫偏移进行聚焦处理, 使反射波自动归位到其真实空间位置; 再进行三维插值, 从少量的测量数据获得重建目标空间的足够信息; 最后对两方向的数据信息融合, 增强目标反应, 减小噪声干扰, 提高检测效率。对实验台和实际建筑的检测验证了该算法的有效性和可行性。结果表明, 通过对结构扫描雷达数据的三维切片成像, 能更加全面而细致地了解钢筋混凝土构件的内部准确信息, 使用的算法能清晰分离出点目标和横、纵方向的线性目标, 为雷达图谱的解释提供了可靠的方法和依据, 对相关检测工程和质量鉴定具有重要意义。

**关键词:** 结构扫描雷达; 钢筋混凝土; 三维切片成像; 无损检测

**中图分类号:** P631      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2013)04-0692-04

结构扫描雷达是专用于钢筋混凝土构件无损检测的手持式探地雷达。钢筋混凝土构件的无损检测, 要求在不破坏结构构件的前提下, 直接从结构物表面测试及推定钢筋位置及保护层厚度、内部缺陷、PVC 管的分布等<sup>[1]</sup>。目前常用的钢筋混凝土构件无损检测方法包括超声波法、电磁感应法和探地雷达法等<sup>[2]</sup>。超声波法常用于检测混凝土内部缺陷, 其穿透性强但准确性较差, 对金属不太敏感; 电磁感应法常用于测定钢筋直径、位置和保护层厚度, 但其探测深度较浅, 受钢筋直径和相邻钢筋距离制约。相比之下, 探地雷达法能同时检测钢筋混凝土结构中的金属和非金属目标, 具有探测深度深、空间分辨率高等优点, 近年来得到广泛应用的同时也对其数据解释提出了更高的要求。

目前, 结构扫描雷达进行钢筋混凝土构件无损检测多是应用二维技术, 雷达图像是目标体对电磁波的反射和散射响应。当目标体为面反射体时, 雷达图像上显示的是与反射界面相一致的一条曲线; 当目标体为点反射体时, 雷达图像上显示的是一条抛物线<sup>[3]</sup>。实际检测中, 由于干扰信号和多次波等影响, 目标特征并不规律, 识别需要结合经验。若采用三维切片成像就能直观地从目标空间形态上来理解, 降低对判读员的要求。同时三维切片成像采用一次性显示整个区域检测结果的工作方式, 因此可大大提高工作效率。

对结构扫描雷达的三维切片成像研究已取得了一些成果<sup>[4-5]</sup>。但多是对单一方向平行测线的数据组进行三维切片成像, 只是给出了点目标的成像结果。而实际检测时经常遇到的是钢筋网和不明走向的管线, 单方向平行测线扫描显然不能进行完整成像。为此, 介绍一种适用于结构扫描雷达网格测线扫描的三维切片成像算法, 先对二维数据进行克希霍夫偏移处理使绕射波归位, 再分别对横、纵平行测线数据三维插值, 使两方向数据与探测区域的空间坐标点一一对应, 然后通过数据融合得到三维成像结果数据模块, 即可随意抽取其中的垂直或水平切片查看钢筋混凝土构件的内部情况。切片图像直观易懂, 且不受构件内目标体形态和走向的限制。

## 1 数据采集

要实现三维切片成像, 在数据采集环节需采用 C-scan 扫描方式, 如图 1。在  $xOy$  平面内, 沿多条平行或网格状的测线, 完成对某一块区域的测量。

C-scan 数据是由多条沿某一方向移动扫描的二维测线数据所构成, 可对媒质内部形成立体式全方位的扫描<sup>[6]</sup>。采集某个二维测线数据时, 探地雷达一般是以一定的距离间隔, 周期性地发射与接收信号, 每道数据都对应不同的采集位置  $(x_i, y_j)$ 。若天线在  $y$  轴位置  $y'$  处, 沿  $x$  轴方向移动, 采集的二维测线信号表示为  $\omega_B(x, z) = \omega(x_i, y_j, z_k) |_{y=y'}, k = 1,$

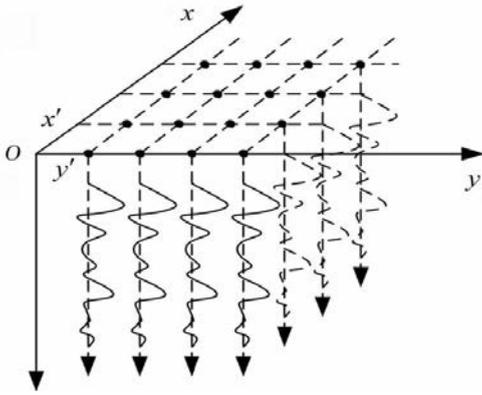


图 1 三维切片成像数据采集

2, …, N; i = 1, 2, …, P。

同理, 天线在 x 轴位置 x' 处, 沿 y 轴方向移动, 采集的二维测线信号表示为  $\omega_B(y, z) = \omega(x_i, y_j, z_k) |_{x=x'}$ ,  $k = 1, 2, \dots, N; i = 1, 2, \dots, P$ 。

测量线一般采用固定间隔, 其疏密程度主要取决于用户的测量目的。多条扫描线合成后的 C-scan 信号可表示为  $\omega_C(x, y, z) = \omega(x_i, y_j, z_k)$ ,  $k = 1, 2, \dots, N; i = 1, 2, \dots, P; j = 1, 2, \dots, M$ 。

## 2 算法

三维切片成像算法的处理流程就是由一组  $\omega_B(x, z)$  和一组  $\omega_B(y, z)$  得到一个能量大小与实际坐标点反射信号相对应的  $\omega_C(x, y, z)$ , 从而抽取其中任意位置、深度的切片并以图像形式显示的过程, 实现框图见图 2。

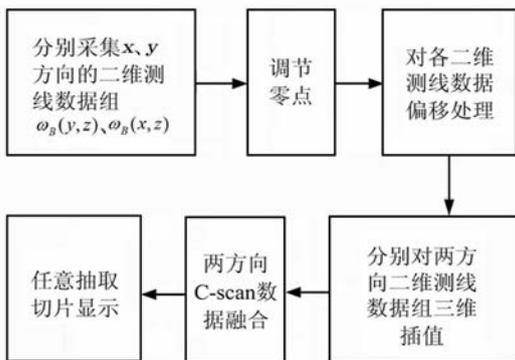


图 2 三维切片成像算法框

### 2.1 调节零点

调节零点就是要将时间零点 (即深度零点) 设定在二维测线数据中的地面反射波位置。调节零点之后, 所有测线数据都是以地面为参考深度面, 三维切片成像结果中各层切片在 z 轴所处的位置即为该切片相对于地面的深度。

### 2.2 克希霍夫积分偏移处理

偏移就是对记录数据进行聚焦处理, 使处理后的数据能够反映目标的真实位置和物理形状。克希霍夫积分偏移的原理是波动方程的克希霍夫分解<sup>[7]</sup>, 即

$$u(x, y, z, t) = -\frac{1}{4\pi} \iint_Q \left\{ [u] \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{1}{r} \right) - \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial u}{\partial n} \right] - \frac{1}{Vr} \frac{\partial}{\partial n} \left[ \frac{\partial u}{\partial n} \right] \right\} dQ,$$

式中,  $Q$  为包围点  $(x, y, z)$  的闭曲面;  $n$  为  $Q$  的外法线;  $r$  为由  $(x, y, z)$  点至  $Q$  面上各点的距离;  $[ ]$  表示延迟位,  $[u] = u(t - r/V)$ 。

此分解的实质是由已知的闭曲面  $Q$  上各点波场值计算面内任一点处的波场值。选择  $Q$  由一个无限大的平地面  $Q_0$  和一个无限大的半球面  $Q_1$  所组成,  $Q_1$  面上各点波场值的面积分对面内一点波场函数的贡献为零, 因此,

$$u(x, y, z, t) = \frac{1}{2\pi} \iint_{Q_0} \left\{ [u] \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{r} \right) - \frac{1}{Vr} \frac{\partial r}{\partial z} \left[ \frac{\partial u}{\partial t} \right] \right\} dQ。$$

偏移处理的是反问题, 将反射界面的各点作为同时激发上行波的源点, 将地面接收点作为二次震源, 将时间“倒退”到  $t = 0$  时刻, 寻找反射界面的源波场函数, 从而确定反射界面。反问题用上式求解时, 不再是延迟位而是超前位,  $[u] = u(t + r/V)$ 。根据这种理解, 克希霍夫积分延拓公式为

$$u(x, y, z, t) = \frac{1}{2\pi} \iint_{Q_0} \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{r} \right) - \frac{1}{Vr} \frac{\partial r}{\partial z} \frac{\partial}{\partial \tau} \right] \cdot u \left( x_i, y_i, 0, \tau = t + \frac{r}{V} \right) dQ。$$

$t = 0$  时刻的波场值即为偏移结果。只考虑二维偏移, 忽略  $y$  坐标, 将空间深度  $z$  转换为时间深度为  $t_0 = 2z/V$ , 得到克希霍夫积分偏移公式

$$u(x, t_0, t = 0) = \frac{1}{2\pi} \int_x \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{r} \right) - \frac{1}{Vr} \frac{\partial r}{\partial z} \frac{\partial}{\partial \tau} \right\} u(x_i, 0, \tau) dx。$$

式中,  $\tau = \sqrt{t_0^2 + \frac{4(x - x_i)^2}{V^2}}$ ,  $x_i$  为地面记录道横坐标;  $x$  为偏移后剖面道横坐标;  $r = \sqrt{z^2 + (x - x_i)^2}$ 。由于  $\partial r / \partial z = -\cos\theta$ , 得

$$u(x, t_0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{\cos\theta}{r^2} u(x_i, 0, \tau) + \frac{\cos\theta}{Vr} \frac{\partial}{\partial \tau} u(x_i, 0, \tau) \right\} dx。$$

### 2.3 三维插值

偏移处理后,  $x$  和  $y$  方向的二维测线数据组构成了两个三维数据场, 由于扫描过程中测线间距往

往大于数据道间距,使得两个方向的采样密度不同,因此需要通过插值运算还原估计三维场中未采样的点,同时使两个三维数据场中的点坐标相互对应。

要对三维数据场某一体元内部的点  $P$  插值,需要三方面信息:体元每个顶点的值、 $P$  在体元中的坐标和体元类型。插值函数就是体元顶点值的线形组合:  $d = \sum_i^{n-1} W_i d_i$ , 其中,  $d$  在体元内参考坐标为  $(r, s, t)$ ,  $d_i$  是体元第  $i$  个顶点的值,  $W_i$  是第  $i$  个顶点的权重。插值权重是参数坐标  $(r, s, t)$  的函数,  $W_i = W(r, s, t)$ 。

三立方插值是基于三次多项式方程的,一维情况下,其表达式为

$$d_u = \sum_{-1}^2 d_i B_i(u) ;$$

$$B_{-1}(u) = \frac{1}{2}(-u^3 + 2u^2 - u) ,$$

$$B_0(u) = \frac{1}{2}(3u^3 - 5u^2 + 2) ,$$

$$B_1(u) = \frac{1}{2}(-3u^3 + 4u^2 + u) ,$$

$$B_2(u) = \frac{1}{2}(u^3 - u^2) .$$

而三元立方插值函数就是在三维空间应用上式,得

$$d(r, s, t) = \sum_{k=-1}^2 \sum_{j=-1}^2 \sum_{i=-1}^2 d_{i,j,k} B_i(r) B_j(s) B_k(t) ,$$

其中,  $r$  是在插值点  $x$  轴上的坐标与  $x$  轴上两顶点之间距离的比值。同理可得  $s$  与  $t$  的值。

### 2.4 数据融合

经过偏移和插值处理,两方向测线上的每点数据都映射到统一的参考坐标系中。可采用传统的求和、求均、求极大值等方法进行数据融合。

### 3 数据处理结果

图 3 是实验用钢筋混凝土构件的内、外部照片。构件尺寸为  $400 \text{ cm} \times 200 \text{ cm} \times 85 \text{ cm}$ , 在  $7 \text{ cm}$  深度埋设有  $\text{Ø}10$  钢筋网, 钢筋网格尺寸为  $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ 。钢筋网下预埋一大大小为  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 75 \text{ cm}$  的非金属目标, 目标上表面距构件顶部  $10 \text{ cm}$ 。采用结构扫描雷达在构件表面对目标周围  $100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$  的区域进行 C-scan 扫描。  $x, y$  方向各 21 条

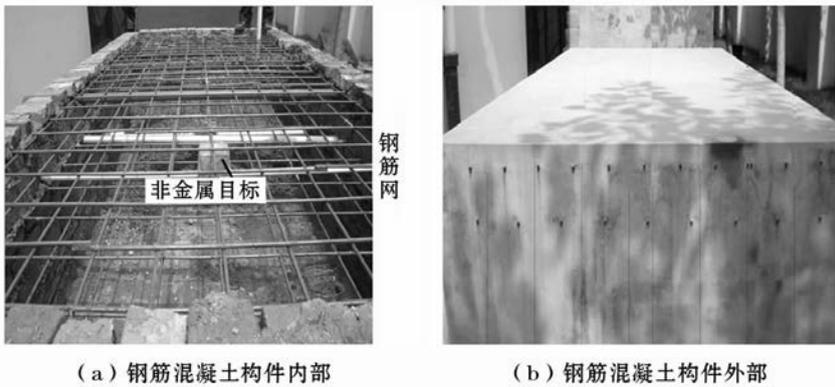


图 3 钢筋混凝土试验台照片

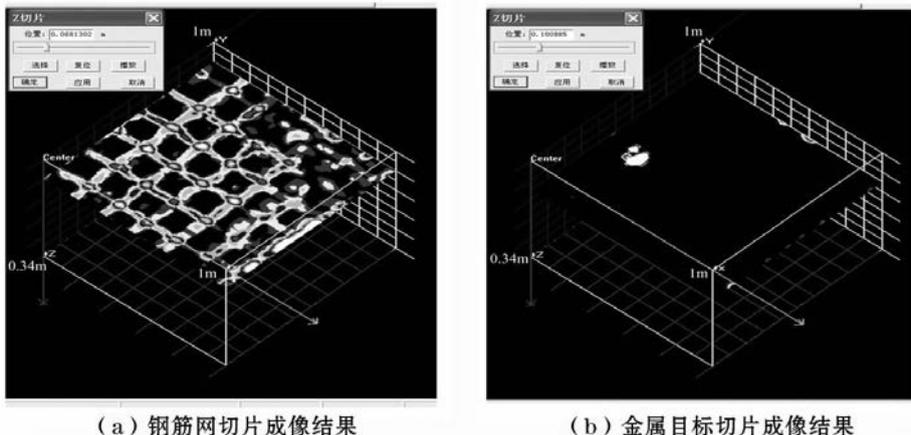
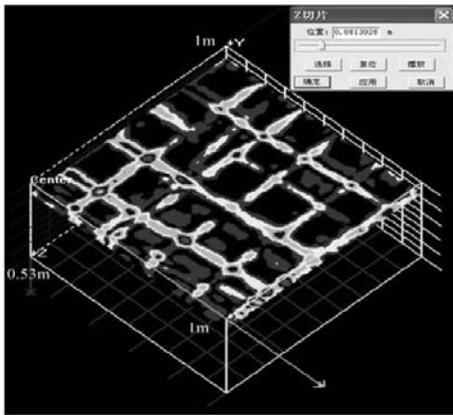
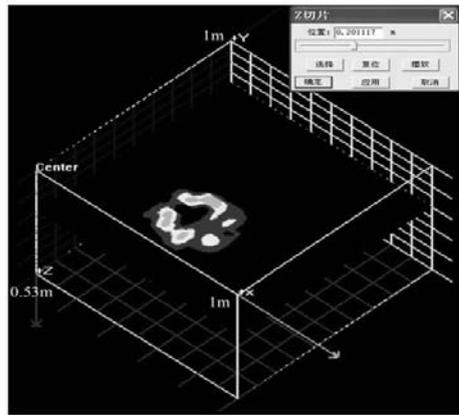


图 4 钢筋混凝土构件切片成像结果



(a) 钢筋网切片成像结果



(b) 吸顶灯切片成像结果

图5 楼梯间楼板切片成像结果

测线,测线间距 5 cm,每条测线数据采样间隔 0.54 cm,其三维切片成像结果见图 4,其中, $x$ 、 $y$  方向表明钢筋网和目标的水平位置、间距和大小, $z$  方向反应钢筋网和目标距离探测表面的深度。

图 5 是结构扫描雷达对实际钢筋混凝土建筑进行检测的结果,检测位置是楼梯间楼板 100 cm × 100 cm 的区域,C-scan 扫描参数与图 4 中使用的相同。切片成像结果表明楼板下 8 cm 处有钢筋网,间距约 20 cm,中间还有箍筋,此结果与设计值相吻合。此外,20 cm 深度处还有一环形目标,大小约 50 cm × 50 cm,经验证是楼板下的吸顶灯。通过  $x$ 、 $y$  轴的坐标和刻度能轻松获得钢筋网的水平位置、间距和大小, $z$  切片所在位置即为该层切片距离地面的深度。

## 4 结论

结构扫描雷达对钢筋混凝土构件的三维切片成像直观地反映了构件内部埋设物或异常体的大小、形态和位置,使用者能够更加全面而细致地了解钢筋混凝土结构的准确信息,极大地克服了二维检测技术通常只能探测目标物存在与否及仅能提供深度信息的局限性。三维切片技术提高了结构扫描雷达探测图谱解释的可靠性和准确性,降低了对操作人员的技术和经验要求。

提出了先克希霍夫偏移后三维插值再结合数据

融合的三维切片成像算法,并编制了相应的处理程序。该算法能用于网格测线的 C-scan 数据,同时实现两个方向线性目标的切片成像,极大地提高了工作效率,并且还能使两个方向的数据相互校验和增强,提高了切片图像的准确度和信噪比。实验和实践表明,笔者采用的结构扫描雷达三维切片成像算法能有效地使目标反射波归位,绕射波收敛,目标旁瓣小,成像结果的分辨率高,更有利于钢筋混凝土构件的检测。

## 参考文献:

- [1] Daniels D J. Surface penetrating radar[M]. London UK: The Institution of Electrical Engineers, 1996, 402.
- [2] 夏才初,潘国荣. 土木工程监测技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [3] 吴宝杰,杨桦. 探地雷达速度参数的求取方法[J]. 工程勘察, 2009, 6: 81.
- [4] 黄玲,曾昭发. 钢筋混凝土缺陷的探地雷达检测模拟与成像效果[J]. 物探与化探, 2007, 31(2): 181.
- [5] 刘新荣,舒志乐. 隧道衬砌空洞探地雷达三维探测正演研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(11): 2226.
- [6] Egil S Eide. Radar imaging of small objects closely below the earth surface[D]. Norway: Department of Telecommunications Norwegian University of Science and Technology. 2000, 108.
- [7] Ketil Hokstad. Multicomponent Kirchhoff migration[J]. Geophysics, 2000, 65(3): 861.
- [8] Schroeder W, Martin K. The visualization toolkit[M]. NJ: Kitware Inc. 2002: 257.

## THE APPLICATION OF GROUND PENETRATING RADAR TO THE DETECTION OF THE DUCT GROUTING EFFECT OF BRIDGE PRESTRESSED STEEL STRAND

LI Hong-jun, LI Dong-lin, HUA De-jun, ZHU Jian, WEI Xing

(Sichuan Institute of Coal Field Geological Engineering Exploration and Designing, Chengdu 610072, China)

**Abstract:** The ground penetrating radar has such merits as high-resolution, nondestructive operation, rapidness and intuitiveness, and these merits play an important role in the quality of grouting testing of prestressed duct. Using the generalized completely Matched Layer (GPML) as absorbing boundary and based on the Maxwell Finite Difference Time Domain methods (FDTD) and Yee grid, the authors made two-dimensional GPR simulation of the water and gas saturated grouting holes with the same depth and different shapes in the steel strand and, in combination with engineering window verification, summarized the characteristics and regularity of duct grouting defects of radar image. The method provides essential foundation for the grouting fullness degree of corrugated pipe tested by ground penetrating radar.

**Key words:** Ground Penetrating Radar (GPR); pre-stressing duct; water and gas saturated hole; Finite Difference Time Domain methods (FDTD); interference signal subduction; detection of engineering quality

作者简介: 李鸿军(1981-),男,研究方向为矿产资源调查与工程地质。

上接 695 页

## 3D SLICE IMAGING OF REBAR CONCRETE COMPONENT BY MEANS OF STRUCTURE SCAN RADAR

FENG Wen-ya, SHI Xing-hua, FEI Xiang-yu, WANG Yuan-xin

(China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China)

**Abstract:** Based on the grid data collection, this paper proposes a 3D slice imaging algorithm for rebar concrete component detection by structure scan radar. First, Kirchhoff migration is used to focus so that the reflection wave is returned to its real space position automatically. Then 3D interpolation is carried out to obtain the enough space information of targets for reconstructing with only a few measured data. At last, two direction profiles are fused together to enhance targets response, reduce noise influence, and improve detection efficiency. The detection of experiment platform and true architecture validate the availability and feasibility of the algorithm. The results indicate that exact inner information of rebar concrete component is known comprehensively and meticulously via 3D slice imaging of structure scan radar data. The algorithm can separate dot targets as well as horizontal and vertical linearity targets clearly and supply a credible method and basis for the explanation of radar profile, thus having great significance for relevant detection project and quality identification.

**Key words:** structure scan radar; rebar concrete; 3D slice imaging; non-destructive detection

作者简介: 冯温雅(1983-),女,工程师,毕业于桂林电子科技大学,研究方向为探地雷达信号处理。