

# Kirchhoff 深度偏移在隧道超前预报反射波提取中的应用

杜立志<sup>1</sup>, 殷琨<sup>1</sup>, 牛建军<sup>1</sup>, 张晓培<sup>1</sup>, 巩向博<sup>2</sup>

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026)

**摘要:**地震波法隧道超前预报受其施工条件的限制, 具有调查对象与测线近似垂直的施工特点, 构建该种条件下的偏移成像方法对于准确预报隧道开挖面前方的不良地质体是十分重要的。为了充分利用地震波场信息, 采用三分量传感器进行地震波法隧道超前探测的地震数据采集, 经过滤波、能量补偿、波场分离等处理步骤后, 利用 Kirchhoff 积分深度偏移技术对  $P$ 、 $SH$ 、 $SV$  三个分量的地震数据进行计算成像, 对隧道开挖面前方的地质构造等反射目标体在空间域成像, 从而达到超前预报的目的。通过模型分析及工程实验表明, Kirchhoff 深度偏移技术在隧道超前预报数据中效果明显, 对不良地质体定位准确, 取得了较好的应用效果。

**关键词:** Kirchhoff; 深度偏移; 隧道; 超前预报

中图分类号: U45 文献标识码: A 文章编号: 1672-7428(2008)02-0068-04

**Application of Kirchhoff Depth Migration in Tunnel Prediction by Reflecting Wave/** DU Li-zhi, YIN Kun, NIU Jian-jun, ZHAHG Xiao-pei, GONG Xiang-bo (Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

**Abstract:** The tunnel seismic wave prediction method is deferent from the conventional seismic exploration, with its own characteristic of the recording geometry almost perpendicular to targets. Therefore the suitable migration technology is very important for successful prediction. This paper introduced a kind of tunnel seismic prediction technology, which used three-component sensor. Kirchhoff integral depth migration was used to get reflectors' distribution images in space after filtering, energy balance,  $P$  wave and  $S$  wave separation etc. to predict geological hazards.

**Key words:** Kirchhoff; depth migration; tunnel; prediction

## 0 前言

隧道施工地质超前预报就是利用一定的技术和手段, 收集隧道所在岩土体的有关资料, 并运用相应的理论和规律对这些资料进行分析、研究, 从而对施工掌子面前方岩体情况、不良地质体的空间位置及成灾可能性做出预报和解释。通过施工地质超前预报, 查明掌子面前方的地质构造、围岩性状、结构面发育特征, 特别是溶洞、断层、各类破碎带等情况, 以便及时、合理地提前安排施工进度, 修正施工方案, 采取有效的对策和施工方法, 极大地避免塌方、涌(突)水(泥)、岩爆等灾害确保施工安全, 加快施工进度, 保证工程质量, 降低建设成本, 提高经济效益。目前国际上常用的地质超前预报方法除采用工程地质推断之外主要依据定量化程度高的地球物理技术, 而其中应用较多的是基于地震波原理上的预报系统, 该技术预测距离比较远, 预报隧道掘进方向上的地质构造、结构面发育准确, 其中具有代表性、应用广泛的是 20 世纪 90 年代初, 瑞士 AMT(Ameberg Measuring Technique) 公司开发的基于反射地震原

理的 TSP(Tunnel Seismic Prediction) 技术, 该技术利用不同震源在同一地震道上的反射波走时预测不连续介质的存在<sup>[1]</sup>。但是由于采用加速度传感器, 其安装条件和耦合要求较高, 因此其施工成本很高。本文采用便于安置的三分量速度型传感器, 利用 Kirchhoff 深度偏移技术进行异常体的解译, 在实践中取得了较好的应用效果。

地震波法超前探测系统主要依据地震波传播的时距关系, 利用地震成像原理实现地下构造预测, 而地震成像主要以地震偏移为主。地震偏移方法在石油地震勘探中已经是非常成熟的方法。其主流的方法主要有有限差分偏移算法对地下结构成像<sup>[2]</sup>, Stolt、Gazdag、Stoffa 和 Ristow 分别提出频率和波数域 Fourier 变换及有限差分波动方程偏移<sup>[3~6]</sup>, 以及从麦克斯韦方程出发的频率-空间域叠前偏移<sup>[7]</sup>等。上述方法都是针对测线与调查对象基本平行的观测条件, 对于调查对象与测线近似垂直的隧道观测条件不适用<sup>[8]</sup>, 因此对隧道前方地质结构的偏移成像需要开拓新的方法。本文提出利用 Kirchhoff

收稿日期: 2007-09-17

基金项目: 隧道超前预报处理系统开发(编号: 3R106224424)

作者简介: 杜立志(1979-), 男(汉族), 内蒙古宁城人, 吉林大学博士研究生, 地质工程专业, 从事岩土工程测试技术及工程物探方法的研究工作, 吉林省长春市西民主大街 6 号, dulizhi98@yahoo.com.cn。

积分深度偏移技术对隧道开挖前方的地质构造在空间域成像,从而达到超前预报的目的。

## 1 Kirchhoff 积分深度偏移的工作原理

Kirchhoff 积分偏移是建立在波动方程式积分分解的基础之上。用它处理地震勘探资料的归位问题时,不受地层倾角的影响且具有对高频成份的补偿作用和较好的保振幅特征,是目前生产上广泛应用的主要偏移方法之一,同时 Kirchhoff 深度积分偏移也是较适合于隧道超前预报的偏移方法。

Kirchhoff 积分深度偏移首先根据速度模型实现真正的射线追踪,求出每个成像点到激发点和接收点的传播时间,然后用下式对反射波实现偏移归位。

$$I(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \iint w(x, y, z, \bar{x}) u(\bar{x}, t_s + t_R) \bar{e} d\bar{x}$$

式中: $I(x, y, z)$ ——在地下 $(x, y, z)$ 处反射面的积分偏移结果; $\bar{x}$ ——震源和检波点的空间位置; $t_s + t_R$ ——波射线旅行时间,地震波从震源经过反射点回到接收点用的传播时间; $w(x, y, z, \bar{x})$ ——权函数,用于修正上行波的幅值; $\bar{e}$ ——单位向量,其作用是将采集时的三分量检波器的位置映射到设定的坐标系空间; $u(\bar{x}, t_s + t_R)$ ——地震记录的波场值。

深度偏移的简单实现步骤:任取记录上某道的一个样值 $a$ ,它是记录时间 $t_j$ 以及激发点到接收点之间距离 $x_i$ 的函数,记为 $a(x_i, t_j)$ 。由于 $a$ 的偏移脉冲响应为一个椭圆,因此按绕射波时距曲线公式在输出剖面上确定炮点 $S$ 和接收点 $R_i$ 的位置,以 $S$ 和 $R_i$ 为焦点,以 $vt_j$ 为定长计算椭圆轨迹,将振幅值 $a(x_i, t_j)$ 沿椭圆轨迹布放,即完成了一个样值的偏移处理。对记录上所有的样值,重复上述步骤,并将落在同一网点上的振幅值叠加,最终便形成了深度偏移剖面。

偏移处理的关键是建立非常精确的速度模型,建立速度模型是一个典型的迭代过程,需要进行多次偏移试算<sup>[9]</sup>。采用积分法偏移速度扫描,可以比较方便地由浅至深逐层进行,并且可以根据炮检距一致性来检验偏移结果,如果速度模型正确,不同炮检距上的成像是相同的。也就是说,正确的速度模型应当是共反射点道集中同向轴经过深度偏移后是平的;当速度不正确时,共反射点集的同向轴是拉不平的,因此,可以根据同向轴的时差曲率确定新的速度,速度的改变反射点位置也要改变,用新速度和新速度边界修改原来的速度模型,用新的速度模型进行深度偏移,自上而下逐层进行模型的修改和炮检

距一致性检查直至所有的反射层都具有炮检距一致性为止。

## 2 隧道超前预报的观测方法

地震隧道超前预报的施工方法与在地表地震勘探施工方法不同,在隧道内施工采用多点放炮单点接收的工作方式。如图 1 所示,将三分量速度传感器放置在远离掌子面的一侧,钻孔深 2 m。在检波点和掌子面之间的连线上设置一系列的震源孔,即沿洞室侧壁布设 24 个震源孔(为了满足一定的计算和解译精度,一般放炮孔不少于 18 个),炮点钻孔沿隧道侧壁布设且平行隧道底板与检波器钻孔成直线排列,孔深 1.5 m,钻孔间距 1.5 m,检波点与最近炮点的距离 $\leq 15$  m,所有钻孔的倾角在 $\pm 5^\circ$ 范围内,钻孔距隧道底板一般在 1.5 m 左右以便于施工。

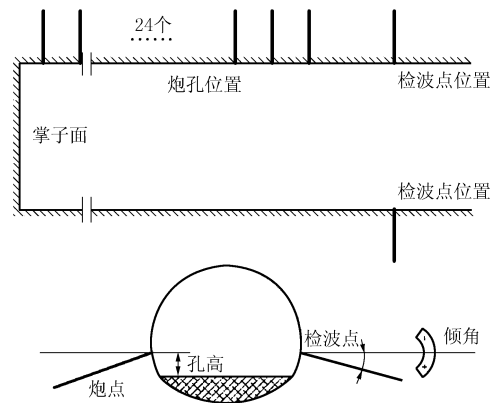


图 1 炮孔及检波孔布置图

设备就位后在震源孔内放入一定量的炸药,炸药爆炸产生弹性波并向各个方向传播,在传播过程中弹性波在地层层面、节理面,特别是断层破碎带界面和溶洞、暗河、岩溶陷落柱,淤泥带等不良地质界面将会产生反射波、绕射波(见图 2),这些信息被高精度地震数据记录仪记录并存盘,以便进行下一步数据处理分析。

数据采集完成后,利用隧道超前预报后处理系统需要经过滤波以消除干扰波突出有效波形;接下来进行首波拾取用于构建和优化初始速度模型;为了提取深部信息,提高预报深度和精度需要进行能量平衡和 $Q$ 估计计算;利用 Radon 变换进行波场分析将采集的 $X, Y, Z$  3 个分量的地震数据进行 $P$ 波 $S$ 波分离,最终给出 $P$ 波、 $SH$ 波和 $SV$ 波 3 个分量的地震波形;对波场分离后的数据利用偏移速度分析<sup>[10]</sup>和 Kirchhoff 深度偏移技术对不同的波阻抗界面进行空间定位成图,得出 $P, S$ 波的波场分布规律,经

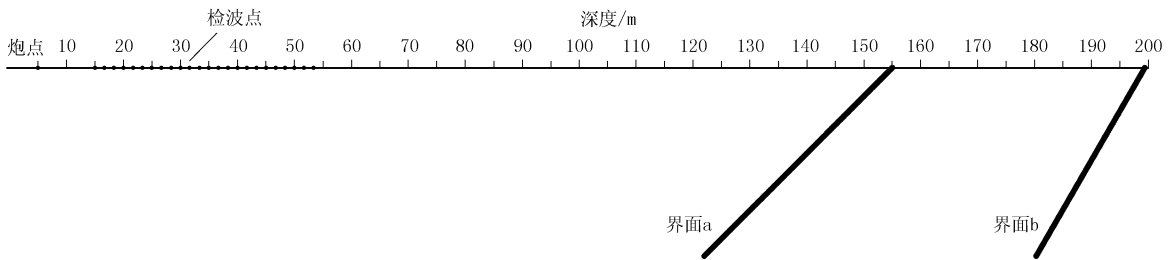


图2 模型观测系统

反射波提取后,最终结合偏移速度分析所得的速度分布规律绘制成综合地质解译图,进而根据偏移结果和 $P$ 、 $S$ 波速度分布规律推断掌子面前方一定范围内是否存在不良地质体及其规模,完成超前地质预报任务。

### 3 应用实例

#### 3.1 正演模拟

为了验证该偏移方法的有效性和准确性,根据隧道超前预报的施工特点设计一组正演模拟数据:如图2所示,炮点到第一个检波点的距离为10 m,检波点间距1.5 m,炮点到界面a与轴线交点的距离为154.9 m,炮点到界面b与轴线交点的距离为198.4 m,界面a与轴线的夹角为 $45^\circ$ ,界面b与轴线的夹角为 $60^\circ$ ,假设测区内岩体的速度为4500 m/s。图3为模型的理论地震波形图,40 ms处的同相轴为界面a的反射波,80 ms处的同相轴为界面b的反射波,模拟子波频率为250 Hz。

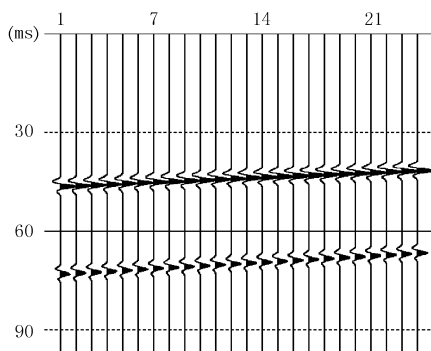


图3 模型理论波形图

由图4偏移图像可知,2个模型界面的偏移图像非常明显,能量最强弧段的切线与轴线的交点分别为159、200 m,其误差 $<5$  m。通过模型分析认为该偏移方法适合在隧道超前预报数据处理中使用,具有较好的应用效果。

#### 3.2 工程实例

为了检验该方法有可行性和准确性,对其进行了多次生产实验。其中某测试隧道所在区域地貌属

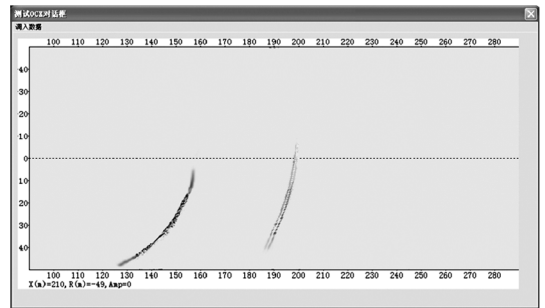


图4 模型偏移图像

于褶断侵蚀低山,山势较缓,地表植被发育;隧道轴线与山脊走向大角度相交,隧道穿过山脊高程最大为238.9 m。上部主要为第四系全新统残积层( $Q_4^{e1+d1}$ ),少量为冲积层( $Q_4^{a1}$ );下伏基岩主要为中生界侏罗系上统毛坦厂组(J3m)凝灰岩,局部基岩裸露,受区域断裂影响,该区升降运动剧烈且不均匀。

本次隧道超前探测所在的掌子面所在里程桩号为ZK55+488,隧道高7 m,跨度约10 m。布置24个激发点和一个接收点,激发点距掌子面最近距离为5 m,接收点距最近激发点的距离为15.54 m。利用TSD隧道超前地质预报数据处理系统进行反射波提取后经过深度偏移,得到各波阻抗界面的空间分布规律(图5),从图中不难发现有3个区域(I、II、III)的偏移图像中的反射波能量明显增强。对偏移结果中的数据根据能量大小进行反射波的提取(见图6),做反射能量较强“反射弧段”的切线,该切线与洞轴线的交点即为构造面在隧道开挖前方的位置,从其延展情况可推断构造面的展布情况,最后结合偏移速度分析的结果便可绘制出综合解译结果剖面(图7),为工程施工提供有效的参考依据。

综合分析偏移剖面及解译图,推断在ZK55+508、ZK55+520和ZK55+558位置处存在3处异常带,对应位置的偏移图像出现较强的反射轴,同时纵横波速度也发生了明显变化,其中ZK55+558位置处围岩的速度变化比较剧烈,深度偏移图像中反射波的能量比较强、延展范围大,表明该处的断层规模

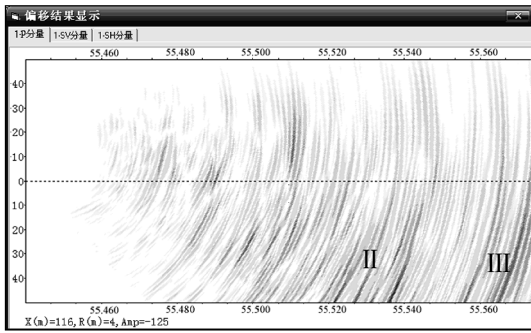


图 5 深度偏移剖面(P波)

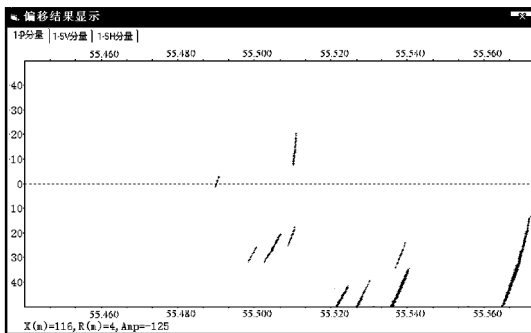


图 6 反射层分布图(P波)

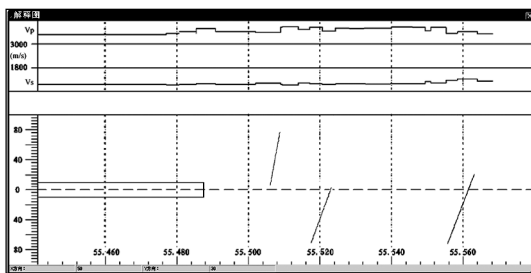


图 7 综合解译俯视图

比较大,其影响带比较宽。

经过开挖验证,ZK55 + 520 ~ 540 整个施工段内岩体完整性稍差,并且 ZK55 + 558 为 F3 断层,断层

(上接第 76 页)

要根据出砂量的变化来调整,防止出现超挖和欠挖。如果开挖方量超过盾构机掘进过程中实际应开挖量,就会出现超挖,引起地层沉降;相反,如果开挖方量少于盾构机掘进过程中实际应开挖的量,就会出现欠挖,将会引起刀盘堵塞或地层隆起。因此,只有控制好出砂量,才能避免超挖和欠挖。

(5)当发现刀盘扭矩和推力增加、掘进速度下降明显时,应停止掘进用泥浆或高压水清洗刀盘。采取以上措施仍无法解决问题时,立即停止掘进,进舱检查刀盘的情况,如堵塞十分严重时,应采取人工

带宽度约 20 m,与预报结果十分吻合。

### 4 结论

由于隧道超预报施工特点和超前探测施工环境的不同,利用 Kirchhoff 深度偏移可以解译出结构面在洞轴线的出现位置,对于延续性好的不良地质体的预报精度较高,是一种较好的处理技术。但是受反射波法超前探测施工方法和环境的限制,同时由于地质体本身的复杂性,要准确确定地质体类型还需要配以其他物探方法相互印证,以进一步提高地质预报的预报精度。

### 参考文献:

- [1] 牛建军. 地震波隧道施工地质超前探查系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- [2] Bleistein N. On the imaging of reflectors in the earth[J]. Geophysics 1987, 52: 931 - 942.
- [3] Stolt RH. Migration by Fourier transform[J]. Geophysics, 1978, 43(1): 23 - 48
- [4] Gazdag J. Wave equation migration with the phase - shift method [J]. Geophysics, 1978, 43: 1342 - 1351.
- [5] Stoffa P L, Fokkema J T, De Luna Freire R M, Kessinger WP. Split - step Fourier migration [J]. Geophysics, 1990, 55(4): 410 - 421.
- [6] Ristow D, Ruhl T. Fourier finite - difference migration [J]. Geophysics, 1994, 59(12): 1882 - 1893.
- [7] 邱东玲, 杨桂朋, 周辉. 补偿吸收衰减的地质雷达数据叠前偏移方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(1): 154 - 163.
- [8] Gilles Bellefleur, Christof Muller, David Snyder, and Larry Matthews. Downhole seismic imaging of a massive sulfide orebody with mode - converted waves, Halfmile Lake, New Brunswick, Canada [J]. Geophysics, 2004, 69(2): 318 - 329.
- [9] 柳楣, 马国东, 王文常. 叠前深度偏移技术[J]. 中国煤田地质, 1998, 10(1): 53 - 55.
- [10] 周辉, 韩波, 邱东玲, 裴建新, 王兆磊. 地质雷达资料的偏移速度分析和叠前偏移[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2005, 35(2): 249 - 256.

方式进行清理,之后才能继续掘进。

### 6 结语

通过对盾构机进行改造并在掘进中采取相应的技术措施之后,掘进速率有了明显提升,最终平稳渡过了粘土层和砂层与粘土层的复合地层,目前广东 LNG 珠江盾构隧道已经完成管路安装并投入使用。

### 参考文献:

- [1] 张凤祥, 傅德明, 杨国祥, 等. 盾构隧道施工手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.