文章编号: 1001-8360(2008)06-0075-07

隧道反射地震法超前探测研究

沈鸿雁[1,2], 李庆春[1], 冯 宏[1,3], 张 鹏[3], 邵广周[1]
(1. 长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安石油大学 油气资源学院, 陕西 西安 710065;
3. 煤炭科学总院 西安分院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 隧道施工地质超前预报是在地下工程施工过程中,采用一些方法或手段预测掌子面前方一定范围内存在的不良地质体或地质界面的位置、性质和规模,为安全、快捷、持续施工采取防范措施提供可靠的依据。本文在详述隧道反射地震法超前探测原理的基础上,分析地下全空间情况下,震源与接收点之间的地震波场运动关系,讨论观测系统的优化设计方案,较全面地总结隧道反射地震法超前预报时距曲线规律。同时开发一套隧道反射地震法超前探测数据处理系统(TRSP1.0),该系统涵盖波形处理、正演模拟、成像处理和岩石动力学参数提取等功能模块,给出合理的处理流程。通过理论模型和实际数据测试验证,取得较理想的效果。

关键词: 反射地震法; 隧道; 地震超前预报; 数据处理系统
中图分类号: P631.425; U452.11 文献标志码: A

Study on Leading Tunnel Reflection Seismic Prediction

SHEN Hong-yan[1,2], LI Qing-chun[1], FENG Hong[1,3], ZHANG Peng[3], SHAO Guang-zhou[1]
(1. Shool of Geologic Engineering and Geometics, Chang'An University, Xi'an 710054, China;
2. School of Petroleum Resources, Xi'an Shi You University, Xi'an 710065, China;
3. Xi'an Branch of China Coal Research Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: The leading seismic predication for tunnels is to predict by some means or methods the locations, characters and scales of unfavorable geological bodies or their boundaries in underground engineering construction and so to previde reliable basis for countermeasures to guarantee safe, quick and continous construction. This paper discusses the basic principles of the leading tunnel reflection seismic predication (TRSP), analyzes the characters of wave propagation, studies the optimum geometry system and summarizes the time-distance relations law of TRSP. A special data processing system named TRSP1.0 was developed, which includes function modules for waveform processing, forward numerical modeling targets imaging and extracting of lithologic parameters. Synthetic and real data have testified that good results may be acquired with this TRSP1.0.

Key words: reflection seismic; tunnel; leading seismic prediction; data processing system

由于掘进面(掌子面)前方地质情况不明,潜在隐患较多,常出现各种地质险情,严重影响隧道(或井巷)施工进度,甚至带来灾难性的地质灾害,造成人员伤亡和经济损失。另外,由于隧道的全空间(地面为半空间)工作环境,决定地震波的复杂性,这为反射波地震超前预报带来困难。因此,要想准确对隧道地质进行超前预报,设计合理且行之有效的观测系统是超前预报的前提和基础;同时数据处理方法是准确预报的关键和保障,直接影响预报的可靠性和精确程度。

在隧道反射波地震探测方面,曾兆璜[1]于1991年提出"地震负视速度法"。认为当反射面与测线直立正交时,所接收到的反射波呈负视速度的特征,其延长线与直达波延长线的交点即为反射面的空间位置,其主要思想是借用VSP技术指导隧道地质超前预报。2000年何振起、白恒恒等又完善这套方法,并用于山西长梁山隧道和福州飞鸾岭隧道,取得预期的效果和效益[2,3]。虽然地震负视速度法是在较成熟的垂直地震剖面方法上发展起来的,但在隧道这一高精度、高分

收稿日期: 2007-01-09; 修回日期: 2007-11-07
基金项目: 交通部科技项目(200731881262);
陕西省自然科学基础研究计划项目(2007D04)
作者简介: 沈鸿雁(1979—), 男, 云南石林人, 讲师, 博士研究生。
E-mail: s_hongyan@sohu.com

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

辨率、高标准技术要求下, 其数据处理方法仍比较粗糙, 尚无专门的配套软件, 局限性是不言而喻的。首先是分辨率低, 精度达不到目前隧道地质预报的技术要求和标准; 二是与隧道中轴线有一定角度的地质构造, 数据处理时反应不够灵敏; 三是地质解释不够直观、形象。TSP 是瑞士 Amberg 测量技术公司于 20 世纪 90 年代初期研制开发的一套集硬件、软件于一体的隧道施工地震超前预报系统[4,5], 但它也存在诸多缺陷: ①设备售价偏高(17 万~ 18 万美元/台), 耗材中的传感器套管约 300~ 350 美元/支, 每采集一个排列数据的费用近 1.5 万元人民币; ②固化的一炮一收观测系统及一些参数, 使野外施工不灵活, 工作效率低, 另外由于 TSP 观测方式的限制, 不可能对断层的产状、位置和岩体波速等参量同时给出准确的结果, 特别是对于与隧道走向近乎平行的断裂带、饱水带; ③数据处理软件没有功能扩展接口, 所有处理数据集合到一个文件内, 使数据文件庞大, 影响软件处理速度, 另外格式不能转换, 取出的数据不便用其他更优秀的软件模块配合处理数据。

本文在已有研究成果的基础上, 研究 TRSP 技术, 提出观测系统的优化设计思路, 总结 TRSP 时距曲线规律, 同时研发出一套 TRSP 数据处理系统, 给出模型和实际资料处理的结果。

1 方法原理

隧道反射波地震超前探测(tunnel reflected-wave seismic prediction ahead, TRSP) 国外称 TSP[6~9], 也称隧道 VSP, 国内称“地震负视速度法”[1~3], 是一种测试面与被探测面互为垂直的观测系统, 它利用地震波在不均匀地层中产生的反射波特征, 预报隧道施工掘进面前方及周围邻近区域的地质情况。本方法在掌子面后方侧壁、底板或以隧道中轴线为任意角度的一定范围内布置测线, 进行微弱爆破, 爆破产生的地震波信号以球面波的形式在隧道周围岩体内传播, 当岩性发生变化时, 信号的一部分就会反射回来被检波器接收, 其工作原理见图 1[2]。如果从地下全空间角度考虑, 该原理决定了爆破点发出的信号经反射点回到接收点遵从椭球轨迹关系, 即反射点是动点, 该动点的轨迹是以爆破点和接收点为椭球的两个焦点, 且入射线长度和反射线长度之和等于 vt 的椭球, 这个椭球面上的地质信息同时被同一检波器记录(不同的炮点和接收点确定不同的椭球), 如果过震源和接收点, 对该椭球作一个切面, 就可得一椭圆, 即反射点是动点, 该动点的轨迹是以爆破点和接收点为椭圆的两个焦点, 且入射线长度和反射线长度之和等于 vt 的椭圆, 见式(1)。

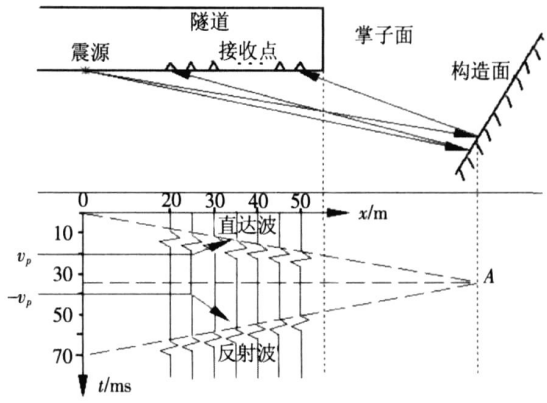


图 1 TRSP 工作原理示意图[2]

$$t = (x_2 + x_3)/v = (2x_2 + x_1)/v \qquad (1)$$

式中, t 为反射波传播的时间; x_1 为震源到接收点的距离; x_2 为震源到反射点的距离; x_3 为接收点到反射点的距离; v 为地震波速度。

通过一种简化思路研究地下全空间情况下的地震波场特征和规律, 同时借助绕射扫描叠加成像技术, 寻找该椭圆的长轴切点, 亦即椭球长轴的切点, 可得反射点的真实位置(图 2), 通过对接收信号的运动学和动力学特征进行分析, 可推断出断层、岩石破碎等不良地质体的位置、规模、产状, 同时获取岩石动力学参数, 辅助隧道工程施工。

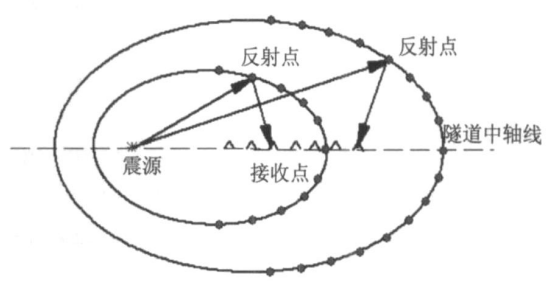


图 2 等时面扫描示意图

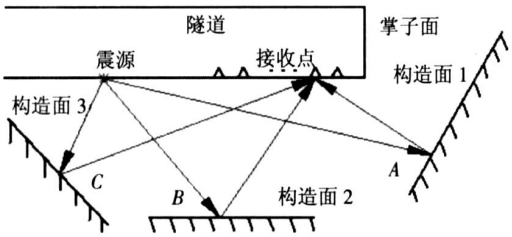
2 观测系统优化设计

隧道施工超前探测的地质体性质完全体现在反射波信号中, 但 TRSP 波场非常复杂, 它不仅包含掌子面前方的反射波, 还包含直达波, 掌子面后方和隧道上下层、侧壁的反射波, 以及其他性质的信号。因此, 要想准确预报隧道施工前方的地质构造情况、岩体特征, 就必须设计一套观测系统, 使采集到的数据能突出有效反射信号, 或者把有效反射信号从含有其他干扰信号的波场中分离出来, 即把全空间波场转化到半空间波场(掌子面前方半空间) 进行研究, 从而有效突出研究对象, 而且尽可能兼顾数据采集的方便、高效, 甚至达到节能、省力等功效。因此, TRSP 观测系统是保证

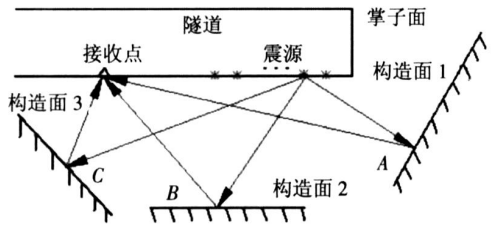
© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

隧道有效超前探测的前提和基础。

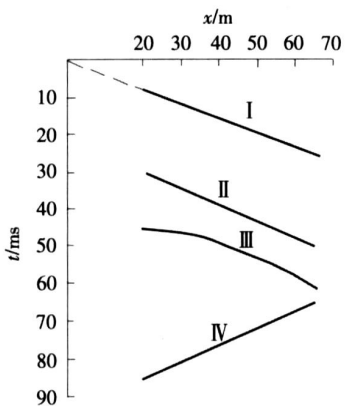
就隧道工作环境而言, TRSP 观测系统可有两种基本布设方式: ①炮点置于掌子面远端, 一炮多收系统, 见图 3(a); ②检波点置于掌子面远端, 一炮一收系统, 见图 3(b)。



(a) 炮点置于掌子面远端, 一炮多收系统



(b) 接收点置于掌子面远端, 一炮一收系统



(c) TRSP 主要波动时距曲线

图 3　TRSP 观测系统优化设计

此二种布设方式都在于有效反射信号(掌子面前方反射波Ⅳ)与干扰信号(直达波Ⅰ、隧道侧面反射波Ⅲ和掌子面后方反射波Ⅱ)之间视速度性质完全不同, 见图 3(c)。掌子面前方反射波为负视速度特性, 其他信号视速度为正, 由此可通过一种视速度滤波(*F-K* 滤波, τ-p 滤波等)把有效信号与干扰信号分离。但是, 一炮多收系统相对于一炮一收系统, 有诸多优点: ①可使各接收记录道在同一震源子波激发下接收和同一能量级上接收地震信号, 表现出的反射特征一样, 这对高分辨率地震勘探很有意义。②可提高施工效率。如果一炮出现过多坏道, 可在不移动检波器的条件下, 继续另一炮激发同一排列接收; 当地质条件非常复杂时, 甚至可用多炮记录(不同炮点, 即不同偏移距或不同震源类型, 同一排列)对同一地质体从多种角度进行预报验证, 提高预报精度; 如果噪声干扰严重, 对多炮数据进行叠加处理, 可以提高资料的信噪比。③可节省耗材、人力和施工时间, 提高野外数据采集效率。其不足之处是仪器配件(检波器、大线等)较多, 装备较笨重, 当地下环境狭小时会受到限制。

当然, 在以上两种基本观测系统的基础上, 还可以设计出横波勘探观测系统。常规地面横波勘探的困难之处是理想的横波震源难以实现, 因此, 也就限制了此方法的推广与运用, 但在隧道工作环境下, 实现横波震源的自然条件却简单和理想。如果采用横波勘探, 可在侧壁上布置接收点、底板布置爆破点, 或在底板上布置接收点、侧壁上布置爆破点, 实现 SH 波或 SV 波勘探, 如果与 P 波勘探配合使用, 预测效果会更有效。检波器可以是单分量, 也可以是多分量, 如果是后者, 得到的信息会更多。对于目标体比较复杂、一条测线难以控制的情况下, 还可以设计出同一观测面、甚至不同观测面(两个侧壁, 一个底板)布设多条测线进行观测, 实现三维勘探。当然, 观测系统的设计要依据具体地质问题而定。

3　时距曲线规律分析

地震波的传播遵从“沿所需时间最短的路径”, 即费马原理, 在均匀介质中, 所需时间最短的路径是直线。设在 O 点激发, 在测线上离开 O 点距离为 x 的某点 S 接收, 见图 4(a)。根据反射定律和虚震源原理, 可得水平界面反射波时距曲线方程

$$t = \frac{O^* S}{v} = \frac{\sqrt{(2h)^2 + x^2}}{v} = \frac{\sqrt{4h^2 + x^2}}{v} \quad (2)$$

设界面倾角为 α, 激发点 O 到界面的法线深度为 h, 界面上下的介质均匀, 上部介质波速为 v, 坐标系的原点在激发点 O, 轴正方向与界面的上倾方向一致, 见图 4(b)。同理可得倾斜界面反射波时距曲线方程

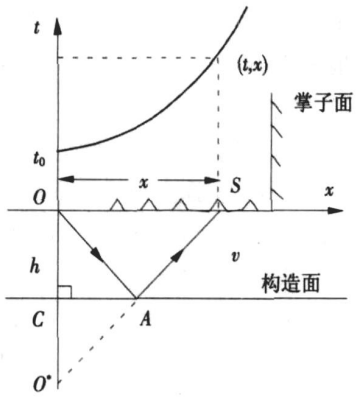
$$t = \frac{\sqrt{4h^2 + x^2 - 4xh\sin\alpha}}{v} \quad (3)$$

式(3)表明, 平滑界面、上覆介质均匀情况下 TRSP 的反射波时距曲线是一条双曲线。根据双曲线特性可知, 极小点是时距曲线极小点的横坐标, 极小点总是相对激发点偏向界面上倾一侧。在极小点上, 反射波返回地面所需的时间最短, 此极小时间为

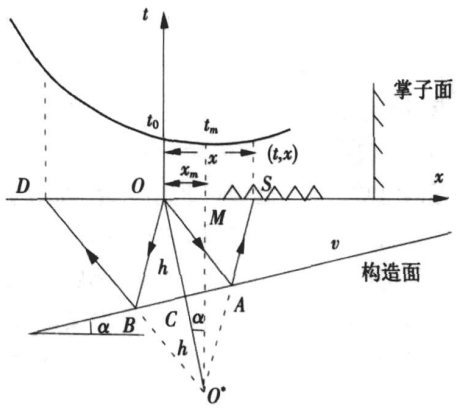
$$t_m = \frac{2h\cos\alpha}{v} \quad (4)$$

由图 4(b)可见, x_m 点即虚震源在测线上的投影, 由 O 到 x_m 的反射波射线是射线中最短的一条, 并且

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) 水平界面时距曲线



(b) 倾斜界面时距曲线

图 4 TRSP 时距曲线

反射波时距曲线是以过 x_m 点的 t 轴为对称的。

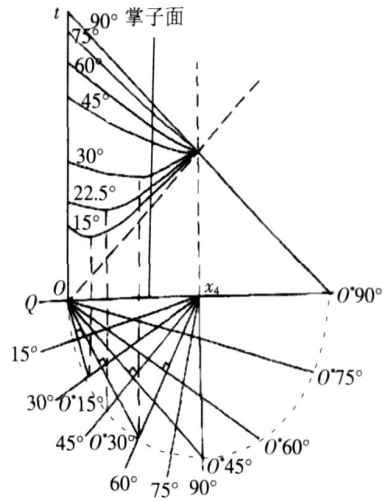
由图 3、图 4 和式(3), TRSP 时距曲线有以下规律和特点。

(1) 当 α= 0°时, 即构造面与隧道中轴线平行, 此时式(3)与式(2)等价, 时距曲线为极小值过 x= 0 的双曲线, 它以直达波时距曲线为渐近线。

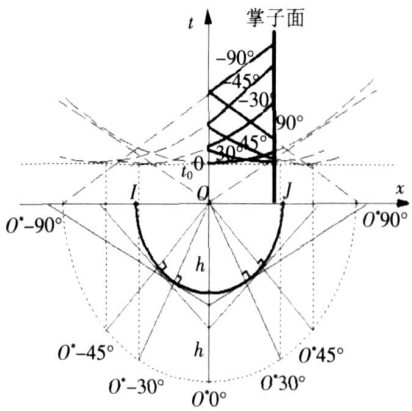
(2) 当 α= 90°时, 即构造面与掌子面平行, 且位于掌子面正前方, 此时式(3)可表示为式(5), 时距曲线为一条直线, 其斜率为- 1/v, 截距为 2h/v, 与 x 轴交点于虚震源处。

$$t = \frac{\sqrt{x^2 + 4h^2 - 4xh}}{v} = -\frac{x}{v} + \frac{2h}{v} \qquad (5)$$

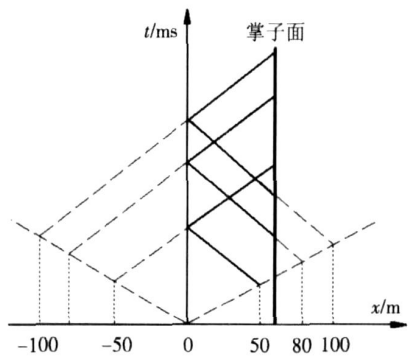
(3) 当 0°< α< 90°时, 反射波时距曲线为双曲线。对于界面倾角不同、出露点相同时, 极小点相对激发点偏向界面上倾一侧如图 5(a), 其极小点将随界面视倾角的增大而不断地往界面的上倾方向偏移; 对于界面倾角不同, 界面到激发点距离相同时, 极小点相对激发点偏向界面上倾一侧如图 5(b), 其位置随倾角的增大而不断地往界面的上倾方向偏移, 极小值(t_m)不断减小。两者都使极小点的左半支相对震源 O 而言(仪器接收范围), 具有负向时距曲线(负视速度)特征, 其极小值见式(4)。



(a) 界面倾角不同, 出露点相同[2]



(b) 界面倾角不同, 界面到原点距离相等



(c) 距坐标原点不同距离, 直立界面

图 5 TRSP 不同地质情况反射波时距曲线

(4) 当 α= - 90°时, 即构造面与掌子面平行, 且位于掌子面后方, 此时式(3)演变为

$$t = \frac{\sqrt{x^2 + 4h^2 + 4xh}}{v} = \frac{x}{v} + \frac{2h}{v} \qquad (6)$$

时距曲线为一条直线, 其斜率为 1/v, 截距为 2h/v, 与 x 轴交点于虚震源处, 是主要干扰信号之一。

(5) 当- 90°< α< 0°时, 反射波时距曲线为双曲

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

线。对于界面倾角不同、出露点相同时，极小点相对激发点偏向界面上倾一侧(掌子面后方一侧)，其极小点将随界面视倾角的增大而不断地往界面的上倾方向偏移；对于界面倾角不同、界面到激发点距离相同时，极小点相对激发点偏向界面上倾一侧如图 5(b)，但其位置随倾角的增大而不断地往界面的上倾方向偏移，极小值(t_m)不断减小。两者都使极小点的右半支相对震源 O 而言(在仪器接收范围)，具有正向时距曲线(正视速度)特征，是主要干扰信号之一。

(6) 反射界面不管是倾斜(图 5(b))还是直立(图 5(c))，即不同产状的地质构造体，其有效信号(掌子面前方及周围反射信号)均具有负视速度特征(主要干扰信号为正视速度特征)，能充分反映掌子面前方的地质构造体，通过视速度滤波，便可提取这些有效信号进行处理和分析，从而达到超前预测的目的。

4　数据处理系统的研制与开发

TRSP 系统数据处理是隧道地质超前预报的重要环节。观测数据中既包含有用信息，也包含各种相干和随机噪声，此外，有用信息也是互相交织、相互干涉，分散和隐藏在观测数据中。因此，TRSP 资料必须经过处理，获得一张地质上十分合理的剖面，才能提供有用信息，并且资料处理的效果直接影响超前预报的准确程度。此外，要想较精确地进行岩性分类、了解地层的岩性和流体等特征，还必须运用多种参数、多种资料和手段，研究岩性时就必须运用地震波的动力学特征，用它们的差异分辨、识别、预测岩性，从而更精细地解决地质问题。当然，提取这些地震信息，必须在高信噪比、高分辨率、高保真度的基础上实现。因此，TRSP 资料处理的目的可归结为 4 点[10~16]：①增强信号，压制噪声，提高信噪比；②数据正确归位(深度偏移)；③从测量数据中提取各种岩石弹性参数信息(速度、密度、泊松比、弹性模量等)；④使成果资料便于解释，以容易理解的方式进行显示。

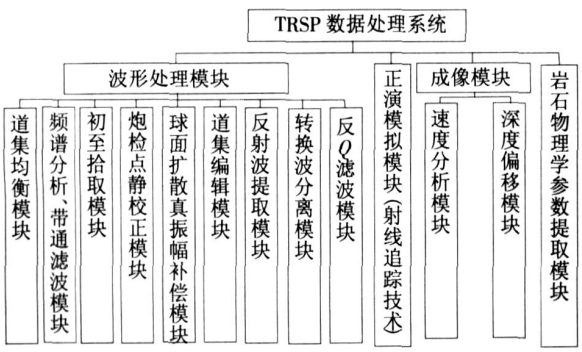


图 6　TRSP 数据处理系统

其主要任务是信息增强与处理和信息分析与提取。本文数据处理系统(TRSP1.0)的开发从地震资料处理的目的和任务要求出发，涵盖了波形处理、正演模拟、成像处理和岩石动力学参数提取等一系列功能，具体分为 13 个子功能模块(图 6)。图 7 为数据处理流程。

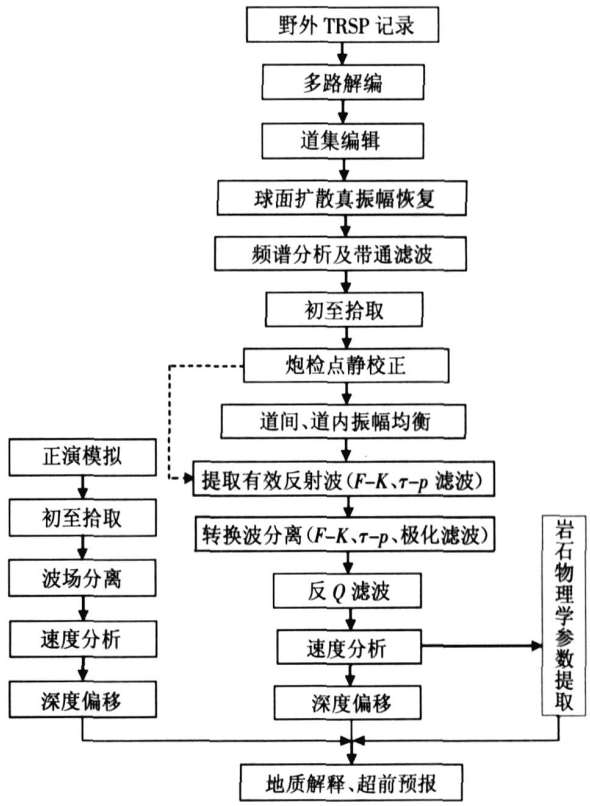


图 7　TRSP 数据处理流程图

5　理论模型和实际数据测试与分析

(1) 正演模型测试

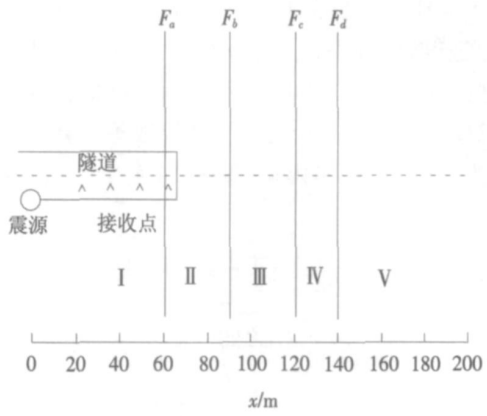
为检验此数据处理系统的正确性，设计由 4 个直立断层(F_a, F_b, F_c, F_d)组成的 5 层地质模型，第一层位于隧道内，其余都位于掌子面前方，见图 8(a)，地质模型参数见表 1，设炮点坐标为(0, 0)。借助井中射线

表 1　地质模型参数

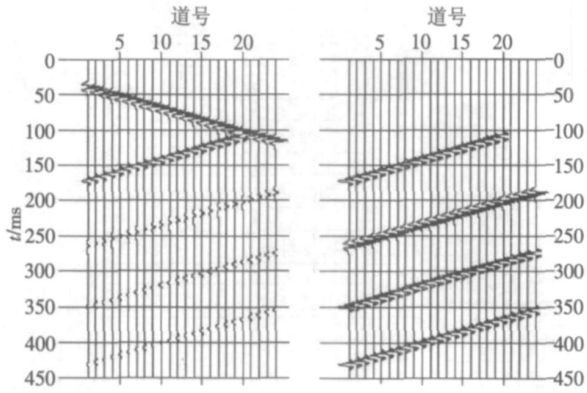
层序号	层速度/(m·s^{-1})	密度/(g·cm^{-3})	深度/m
Ⅰ	600	2.0	60
Ⅱ	750	2.5	90
Ⅲ	700	2.3	120
Ⅳ	750	2.5	140
Ⅴ	800	2.7	

追踪合成地震记录技术[12]，采用一炮多收系统，最小偏移距 20.0 m，道间距为 2.0 m，采样率 100.0 μs，共 24 道。图 8(b)为模型合成地震记录，图 8(c)为有效

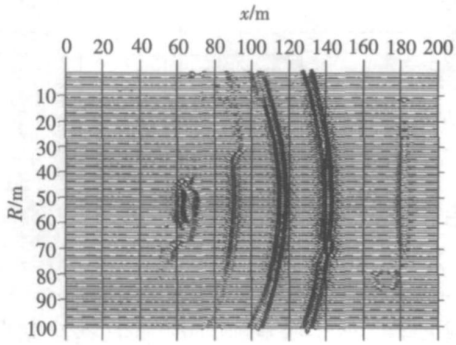
© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) 地质模型



(b) TRSP 模型地震记录 (c) 有效反射波地震记录



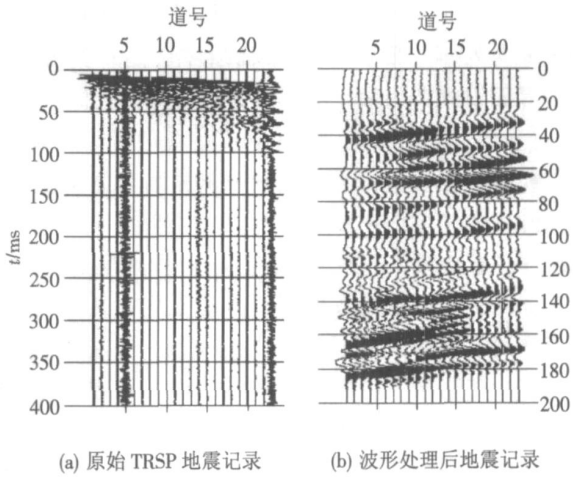
(d) 深度偏移成像剖面

图 8 模型处理

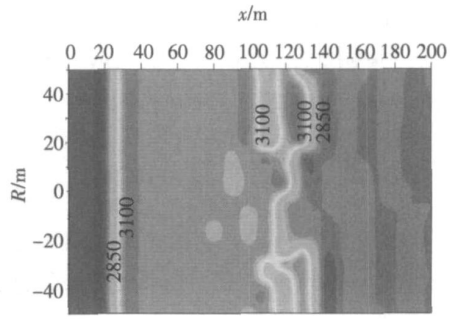
反射波记录, 图 8(d) 为深度偏移成像剖面。由深度偏移成像剖面可见, 椭圆弧的切点就是地质构造体的位置, 层位对应较准确, 而且波形无极性反转现象, 说明此数据处理系统是可靠的, 而且精度和分辨率都较高。

(2) 实际数据处理

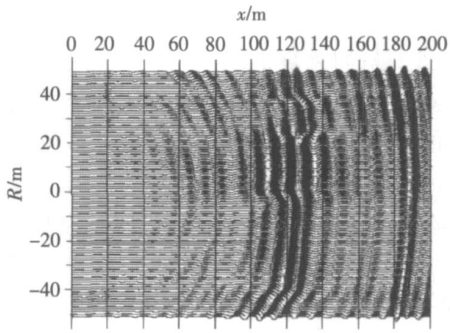
为了检验实际效果, 处理某隧道一套 TRSP 数据, 进行试算验证(超前预报掌子面前方 150. 0 m)。采用一炮一收系统, 最小偏移距 20. 0 m, 道间距为 1. 5 ~ 2. 0 m, 采样率 62. 5 μs, 共 23 道。图 9(a) 为原始 TRSP 地震记录, 信噪比较低, 含有 50. 0 Hz 噪声坏道, 几乎看不出有效反射信号; 图 9(b) 为经波形处理



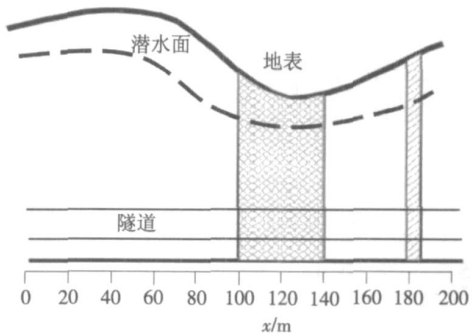
(a) 原始 TRSP 地震记录 (b) 波形处理后地震记录



(c) 速度模型



(d) 深度偏移剖面



(e) 开挖地质验证模型

图 9 实际数据处理

后地震记录, 已经把有效反射信号提取, 同相轴连续性较好, 分辨率和信噪比都得到提高; 图 9(c) 为经分析后的速度模型, 在 100. 0~ 140. 0 m(掌子面前方 40. 0

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

~ 80.0 m)间有一明显速度异常带;图 9(d)为深度偏移剖面,在 100.0~ 140.0 m(掌子面前方 40.0~ 80.0 m)间有一强波阻抗异常带,在 190.0 m(掌子面前方 140.0 m)附近还有一微弱波阻抗界面,通过开挖,此两处异常带都得以验证(图 9(e)),超前预报结果与其吻合较好。

6　结论

(1)针对隧道的特殊工作环境,总结 TRSP 工作原理,得到以下结论:震源发出的地震信号被同一检波器记录下来的地质信息反映的是以震源和接收点为两个焦点的椭球面上的地质信息;不同震源和接收点确定的椭球不一样;同一震源和接收点,不同时刻确定的椭球也不同;而同一震源、不同接收点之间的波场关系仍然遵从球面扩散规律。

(2)深入探讨 TRSP 观测系统设计的有效性、合理性及实用性,提出隧道纵波、横波、多波以及复杂地质体超前探测观测系统优化设计方案思路。

(3)针对 TRSP 地震波场球面扩散原理和观测系统布设方式,推导 TRSP 地震波场时距曲线,深入分析时距曲线规律,总结了在全空间情况下,不同地质情况对应的反射波时距曲线特征,探讨全空间这一特殊工作环境下,隧道地震波场的传播规律。

(4)研发出一套 TRSP 数据处理系统,设计处理流程,同时给出理论模型和实际资料处理的结果。

TRSP 技术是系统工程,各部分技术都是彼此相互联系、相互渗透的,只有各方面技术都做好,才能发挥系统的最大潜能,为隧道施工提供快捷、直观、低成本、高效率、高精度的地质灾害超前预报,理论模型和实际资料初步处理分析表明,此系统基本具备隧道施工超前预报的能力。

参考文献:

[1] 曾兆璜. 隧道地震反射法超前预报[J]. 地球物理学报, 1994, 37(2): 268-271.
ZENG Zhao-huang. Prediction Ahead of the Tunnel Face by the Seismic Reelection Methods[J]. Chinese J. Geophysics, 1994, 37(2): 268-271.

[2] 何振起, 李海, 等. 利用地震反射法进行隧道施工地质超前预报[J]. 铁道工程学报, 2000, (4): 81-85.
HE Zhen-qi, LI Hai, et al. Geological Super-leading Forecast during Tunnel Construction by Utilizing Seismic Response Analysis Method[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2000, (4): 81-85.

[3] 白恒恒, 辛民高. 浅谈长梁山隧道 F5 断层的地质超前预报[J]. 铁道工程学报, 2000, (1): 87-90.
BAI Heng-heng, XIN Min-gao. Preliminary Talking about Geologic advance Forecast on F_5 Fault in Changliangshan Tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2000, (1): 87-90.

[4] Amberg Measuring Technique Ltd. Operation Manual 19.61[M]. Kunming: Kunming Shape Regale Science and Technology Ltd, 2003.

[5] Amberg Measuring Technique Ltd. Software Manual 19.62[M]. Kunming: Kunming Shape Regale Science and Technology Ltd, 2003.

[6] 刘志刚, 刘秀峰. TSP(隧道地震勘探)在隧道隧洞超前预报中的应用与发展[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1399-1402.
LIU Zhi-gang, LIU Xiu-feng. TSP Application and Development in tunnel lead Forecast[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1399-1402.

[7] 沈鸿雁, 冯宏, 等. 井巷掘进超前地震探测资料处理方法系统研制与开发[C]//地下工程中的地球物理探测技术研究. 西安: 西安地图出版社, 2005: 127-134.

[8] Yu Z R, Ashida, et al. Seismic Imaging Ahead of Tunnel Face with Three Component Geophones[C]// SEG. Expanded Abstract of the 72nd SEG Annual Meeting. Salt Lake City: SEG, 2002: 5-2.

[9] Paul A. Hydrophone VSP Imaging as A Shallow Sit[J]. Geophysics, 1997, 62(3): 842.

[10] 沈鸿雁, 李庆春, 等. 反射波法隧道地震超前探测中波场分离与成像技术研究[C]//中国地球物理年会 2006. 成都: 四川科学技术出版社, 2006: 672-673.

[11] 沈鸿雁. 反射波法隧道地震超前预报研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.

[12] 朱光明. 垂直地震剖面方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1988.

[13] 王庆海, 徐明才. 抗干扰高分辨率浅层地震勘探[M]. 北京: 地质出版社, 1991.

[14] Richard O, Edward B, Helfried B, et al. The Application of TRT-True Reflection Tomography at the Unterwald Tunnel[J]. Geophysics, 2002, 77(2): 51-56.

[15] Gerd S, Bernbbard S, Felix A, et al. Predicting ahead of the face[J]. Tunnels & Tunnelling, 1996, 28(4): 24-30.

[16] Borm G, Giese R. Integrated Seismic Imaging System for Geological Prediction Ahead in Underground Construction[C]//Proceedings-Rapid Excavation and Tunnelling Conference. San Diego, 2001: 263-271.

(责任编辑　安鸿逵　张武美)

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net