

# The Research of 3D Tunnel Geological Prediction Technology in Wireless Distributed System

Oulong Huang<sup>1</sup>, Guohou Cao<sup>1</sup>, Yunsheng Wang<sup>2</sup>, Luming Cheng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The Second Engineering Institute of Scientific Research and Engineering Design of Ground Force in South Military Area, Kunming Yunnan

<sup>2</sup>Yunnan Geophysical Exploration of Aerospace Engineering Co. Ltd., Kunming Yunnan  
Email: karonhol@163.com

Received: Aug. 7<sup>th</sup>, 2016; accepted: Aug. 21<sup>st</sup>, 2016; published: Aug. 30<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

This paper first briefly describes the basic principle and importance of tunnel geological prediction, and then introduces the key technology of wireless distributed 3D tunnel geological prediction (3D geometry design, wave field separation and reflected wave extraction, wave velocity scanning analysis) in detail. Through the analysis of examples, this paper further validates advantages and practicality of wireless distributed 3D tunnel geological prediction method and instrument system.

## Keywords

Wireless Distribution, Wave Velocity Scanning, 3D Geometry, Prediction

---

# 无线分布式三维隧道地质超前预报技术研究

黄欧龙<sup>1</sup>, 曹国侯<sup>1</sup>, 王运生<sup>2</sup>, 程路明<sup>2</sup>

<sup>1</sup>南部战区陆军第二工程科研设计院, 云南 昆明

<sup>2</sup>云南航天工程物探检测股份有限公司, 云南 昆明

Email: karonhol@163.com

收稿日期: 2016年8月7日; 录用日期: 2016年8月21日; 发布日期: 2016年8月30日

文章引用: 黄欧龙, 曹国侯, 王运生, 程路明. 无线分布式三维隧道地质超前预报技术研究[J]. 地球科学前沿, 2016, 6(4): 331-337. <http://dx.doi.org/10.12677/ag.2016.64034>

## 摘要

本文首先简述了隧道地质超前预报的基本原理及其重要性, 然后对无线分布式三维隧道地质超前预报的关键技术: 三维观测系统设计、波场分离与回波提取和波速扫描对比分析法进行了较为详细地论述。最后通过应用实例进行对比分析, 进一步验证了无线分布式三维隧道地质超前预报方法技术和仪器系统的先进性和实用性。

## 关键词

无线分布, 波速扫描, 三维观测, 超前预报

## 1. 引言

隧道地质超前预报技术是一个国际前沿课题, 各国都在研究之中。欧洲开始得较早(1980 年代), 美洲稍晚些(1990 年代), 中国在 1990 年代初也开始了超前预报技术研究, 在 2001 年中国工程地球物理年会上被定为工程检测五大难题之一。伴随着大量隧道工程的建设, 地质超前预报作为隧道施工中的一个重要环节, 发挥着越来越重要的作用。隧道地质超前预报技术能够从时间和距离上提前了解隧道围岩地质情况, 以便对后续施工提供可靠的指导, 减少施工的盲目性, 降低施工的风险性。无线分布式三维隧道地质超前预报技术主要有以下用途: 不良地质预报及灾害地质预报、水文地质预报、断层及其破碎带的预报以及围岩类别及其稳定性预报等[1] [2]。

应用无线分布式三维隧道地质超前预报技术能够更为准确的预报出工作面前方地质情况, 对不良地质体的空间定位更准确、精度更高、成果也更加直观。该技术作为当前一种比较先进的探测技术将在我国铁路、公路、水利、水电、煤炭等系统的各类隧洞或地下洞室工程中得到应用, 同时对我国国防地下工程的安全高效建设也能够起到积极的指导作用。

## 2. 关键技术研究

目前, 以 TSP 和 TRT 为代表的地震反射波法是当前地下工程超前预报中的主导方法[3]。TSP 是基于二维观测和一维成像的方式, 无法准确推断地质构造和不良地质体在工作面前方的具体位置和空间分布情况; TRT 虽然采用三维观测方式和三维成像方法, 但只能进行单分量检波, 无法利用纵横波进行综合解释, 直接影响了成像结果的准确性和实际应用价值。无线分布式三维隧道地质超前预报技术综合了 TSP 和 TRT 两种方法技术所具有的特点, 并且在许多方面取得了创新成果。项目组应用数值仿真分析, 研发了三维信号观测系统, 利用三分量检波器实现了空间三维信号快速高效率采集[4]; 根据负速度原理, 提出了应用“F-K”二维滤波有效提取掌子面前方回波信号, 提高了三维成像的精度和准确度[5] [6]; 基于共反射面元偏移成像和计算机三维绘图技术, 研发了无线分布式三维隧道地质超前预报仪器系统[7]。

无线分布式三维隧道地质超前预报主要工作原理是在隧道内使用锤击(或炸药)震源激发弹性波, 弹性波沿掌子面前方传播过程中, 遇到断层面、岩溶等不良地质体, 会产生反射与散射回波信号, 然后被安置在隧道内的传感器所接收, 根据回波信号走时和能量大小, 应用三维成像技术分析得出不良地质体空间分布位置和类型[8]。

### 2.1. 三维观测系统设计

研究利用大型动力有限元程序模拟工程内地震波的传播过程, 对不同工况下的地质超前预报观测系

统进行分析研究,为设计最优观测系统提供理论依据[9]。在分析中不考虑整个山体的应力变化及重力影响,只考虑工作面前方存在的含水等不良地质体对地震波的影响,即地震波在隧道前方遇到弹性分界面时的反射情况,与隧道方向正交的水平方向和竖直方向视为均匀无限,在四个侧面边界施加无反射边界条件。计算分析模型结构对称,应力条件对称,属于对称问题。实际建立的模型为沿对称面取 1/2 模型。建立的三维立体模型,尺寸稍小一些对计算结果不会产生明显的影响,但却可以节省大量计算时间及存储空间,方便计算分析,进而针对不同工况进行计算分析,弹性波传播云图如图 1 所示[10]。

根据弹性波传播理论和三维仿真分析结果,同时考虑到现场工作特点和信号去噪要求,设计现场信号采集观测系统如图 2 所示。作为一种具体实现方式,在开挖的隧道中,确定工程开挖方向与 X 轴方向一致,工作面纵向为 Y 轴方向,工作面横向为 Z 轴方向。设定在距离工作面 35 m 处的隧道断面上安置检波器,且定义左侧壁地面为零点坐标(0, 0, 0)。在隧道左右两侧壁距离地面 1 m 的位置标记两条测线,其中左边线(L1)的起始和终止坐标分别为(0, 1, 0)和(35, 1, 0),右边线(L2)的起始和终止坐标分别为(0, 1, Z)和(35, 1, Z)(Z 为隧道断面宽度)。1 号和 2 号检波器分别安置在测线 L1 和 L2 起点,3 号检波器安置在断面顶点(0, Y, Z/2)(Y 为隧道断面高度),同时在附近用带钩膨胀螺丝安置并开启无线数据采集装置。最后打开控制终端(PC),运行信号采集软件,点击采集按钮,在锤击(或炮震)之后,即可通过无线数据采集装置自动采集地震波信号[11]。

## 2.2. 波场分离与回波提取

早期的超前预报技术缺乏理论指导,普遍存在的技术缺陷是未考虑波场分离问题。而对于三维隧道地质超前预报系统,提取前方有效回波(反射波或散射波)是基础,提取回波的质量直接影响到后续数据的处理,关系到三维成像质量的高低。由于地震波场非常复杂,而掌子面前方的地质构造信息完全体现在反射波里面,因此有效提取反射波是关键技术之一,也是区别于常规地震反射法的关键技术所在[12]-[14]。

波场分离是依据不同方向、不同类型地震波的视速度不同,采用相应的方式方法对不同的地震波进行区分、提取。本系统应用 F-K 变换的方法来进行波场分离,从而能够更有效的提取出回波信号。在地震勘探中,一条测线记录的信号可表示为测线距离  $x$  和时间  $t$  的二元函数。对该函数作二维傅氏变换,可得到基于 F、K 的二维谱,其中 K 为对应于  $x$  的波数;F 为对应于时间  $t$  的频率。F-K 变换亦可称为 F-K 滤波方法,主要是根据各种波在视速度上的差异提取不同类型的波。反映在 F-K 平面上直达波和反射波位于不同的区域,通过给定速度域的滤波门限,就可确定滤波的范围。本系统根据直达波和回波信号的频率、视速度规律,设计出不同的滤波器,滤除或保留不同视速度、不同频率的信号,实现二维信号滤波,应用效果如图 3 所示。

## 2.3. 波速扫描对比分析法

掌子面前方围岩的回波速度是地震资料处理和成像过程中非常重要的参数,同时也是划分围岩等级和类别的重要依据。三维成像质量依赖于地震波速度,并且对速度的误差具有很强的敏感性。在以往的地震波速度的求取过程中,需要丰富的实践经验才能得到较为准确的速度,但误差仍然较大。精确的求出工程掌子面前方的地质体速度分布,是提高三维成像精度的关键所在。

三维隧道地质超前预报系统基于自主研发的波速扫描对比分析法,通过分析波速扫描图上能量团与迭加信号的对应关系,当波速扫描分析图上的能量团拟合点和迭加信号拟合相对较好时,能量团上的拟合点对应的波速就是地震波在隧道围岩中传播的准确速度,如图 4 所示。该扫描分析方法有效提高了波速扫描的准确性,解决了波速扫描分析问题,从而进一步提高了三维成像的精度。

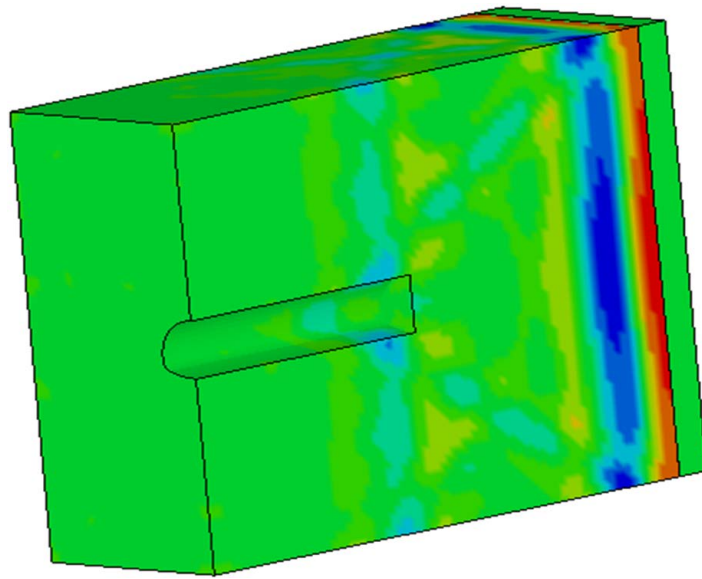


Figure 1. The elastic wave propagation diagram  
图 1. 弹性波传播云图

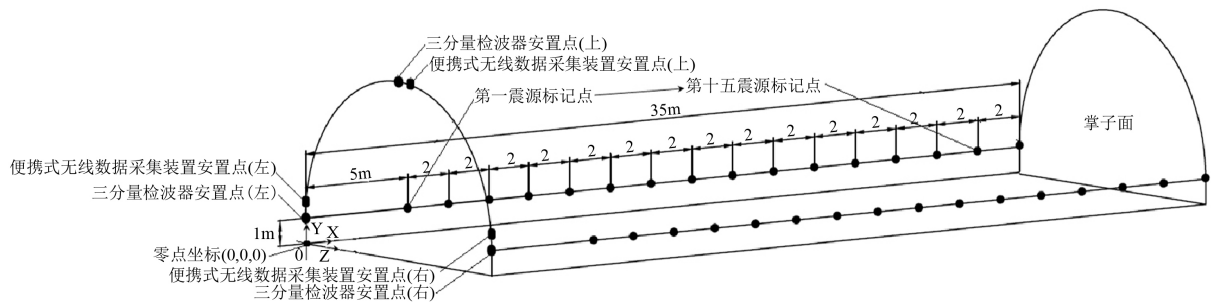


Figure 2. 3D geometry diagram  
图 2. 三维观测系统示意图

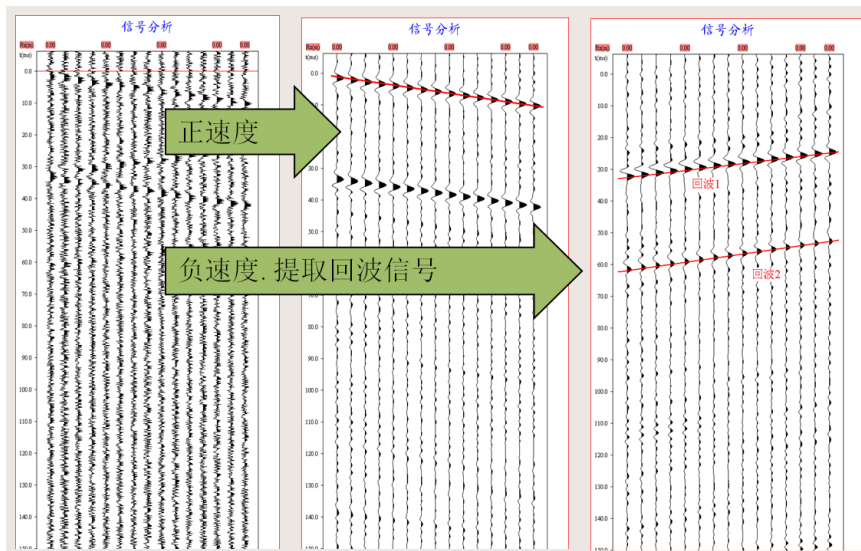


Figure 3. The schematic diagram of F-K application effect  
图 3. F-K 应用效果示意图

### 3. 仪器系统简介(AGI-T3)

项目组在解决了上述关键技术问题的基础上研发出了无线分布式三维隧道地质超前预报系统，并获得发明专利(ZL201310048090.7)。如图 5 所示，该系统主要由计算机终端、无线采集器、三分量检波器、锤击震源、信号触发计时传感器、信号采集与处理软件及辅助器材等组成，其主要创新特点如下。

1) 采集器轻便节能，四通道独立采样，超长待机。支持 Wi-Fi 无线数据传输，根据应用需求，信号触发可选择有线或无线等多种方式，实现无线分布式多测点同时采集。

2) 采用传感器震动信号触发计时方式，一方面可有效解决触发延时所带来的计时误差，另一方面可根据探测距离要求，选择锤击或炸药不同激震方式。

3) 使用平板电脑(Win 8/10)作为控制终端，操作方便快捷。同时承担实时信号采集、保存、数据处理、成果报告等一系列工作。

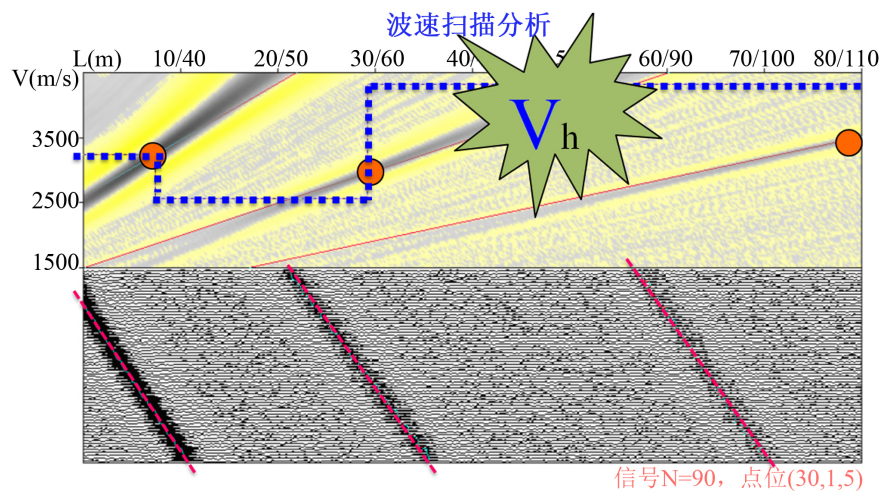


Figure 4. Analysis map of wave velocity scanning  
图 4. 波速扫描分析图



Figure 5. The composition of instrument system  
图 5. 仪器系统组成示意图

4) 基于无线采集器和无线触发器设计，信号采集完全实现了无线观测系统。一方面可提高探测工作效率；另一方面施工车辆可正常通过，保证了施工进度。

#### 4. 应用实例对比分析

在系统设计完成并应用模型数据分析验证正确之后，结合工程实例对系统进行了大量应用，并与 TSP 系统进行了对比分析验证。如图 6、图 7 所示，TSP 和 AGI-T3 两者成像结果表明：一方面两者图中显示的可能存在缺陷的位置大致吻合；另一方面 AGI-T3 在成果直观性上远超 TSP 系统，具有更高的成像精度。通过对现场施工跟踪验证，成像结果与工程实际开挖情况相一致，进一步验证了其实用性和先进性。

#### 5. 结语

目前我国国防地下工程、交通、水利等隧道工程的建设越来越多，市场越来越大，对于超前地质预报技术的要求和需要也越来越高。研究成果与初步应用表明，应用无线分布式三维隧道地质超前预报系统能够大大提高不良地质体位置、规模、形态等等的预测准确性，有效避免开挖过程中地质灾害的发生，

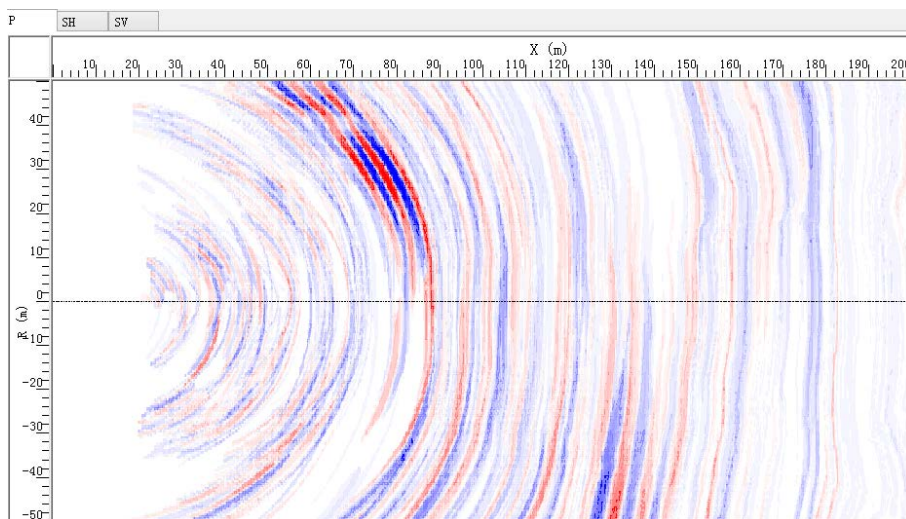
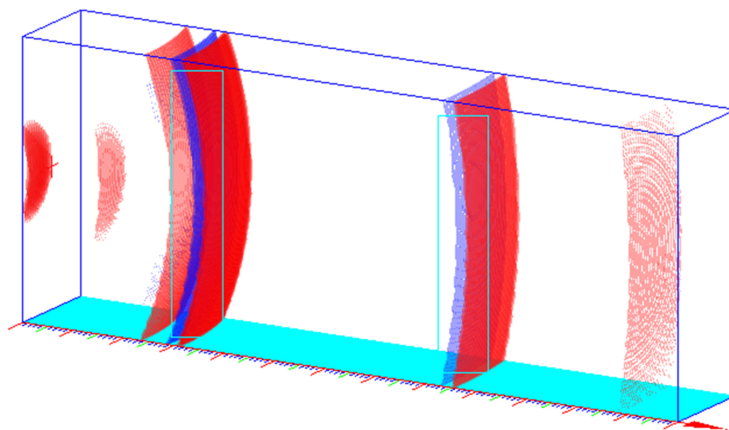


Figure 6. Imaging diagram of TSP system  
图 6. TSP 系统成像图



剖面起点里程=50.00m，起点中心「+」(50,0,5)，探测范围(130,50,20).dat 欢迎试用！

Figure 7. Imaging diagram of 3D tunnel geological prediction system  
图 7. 三维地质预测系统成像图

确保施工安全，并为隧道工程动态设计和信息化施工提供可靠依据，具有重大的社会效益。

无线分布式三维隧道地质超前预报系统采用三分量检波器，基于三维观测方式，相对于其它方法具有独特的优越性。与其它设备相比，其探测准确率和探测精度已有明显提高，必将在工程上得到广泛的应用，产生重要的军事和经济价值。

## 参考文献 (References)

- [1] 赵永贵, 刘浩, 孙宇, 等. 隧道地质超前预报研究进展[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(3): 460-464.
- [2] 李术才, 刘斌, 孙怀凤, 等. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1090-1113.
- [3] 贾祥雨. 浅析 TSP 及 TRT 超前探测在 TBM 隧道中的探测特点[J]. 山西建筑, 2011, 37(13): 168-169.
- [4] 冯雷. 隧道超前预报地震波模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2009.
- [5] 王朝令, 刘争平, 黄云艳, 等. F-K 变换在隧道反射地震预报波场分离中的数值模拟研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(4): 71-76.
- [6] 赵娟娟, 李德春, 匡伟, 等. F-K 滤波方法分离地震绕射波和反射波[J]. 能源技术与管理, 2010(3): 16-17.
- [7] 孙小东, 李振春, 滕厚华, 等. 共反射面元叠加技术及其在偏移成像中的应用[J]. 石油物探, 2008, 47(5): 465-469.
- [8] 朱超, 许兆义, 王晓. 三维地震波层析成像技术在隧道超前地质预报中的应用[J]. 北京交通大学学报, 2010, 34(4): 31-35.
- [9] 王朝令. 隧道地震超前预报中波场分离与反演方法的数值模拟研究[D]: [博士学位论文]. 峨眉山: 西南交通大学, 2012.
- [10] 曹国侯, 王运生, 李耀华, 等. 三维成像系统在地下工程地质灾害预报中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(S1): 1735-1739.
- [11] 王统金, 王运生, 唐平祥, 等. 一种三维隧道地质超前预报新方法的研究与应用[J]. 工程地球物理学报, 2014, 11(2): 147-150.
- [12] 王运生, 苏建黎. 浅层地震联合成像技术及其应用研究[J]. 工程地球物理学报, 2007, 4(4): 306-311.
- [13] 冯雷, 张东方, 王运生. 浅层地震绕射波成像研究与工程应用[J]. 中外公路, 2010, 30(1): 205-208.
- [14] 王运生, 王瑞琪, 张启洲, 等. 无线浅层地震仪实现方法及其在隧道工程中的应用[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(5): 163-166.

### 期刊投稿者将享受以下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>