

巷道掘进中孔中地震高精度预报系统

陈家焯¹, 陈杰炜^{2*}

¹哈尔滨工业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨

²福建平潭旭坤实业有限公司, 福建 福州

收稿日期: 2024年8月15日; 录用日期: 2024年11月21日; 发布日期: 2024年11月29日

摘要

巷道掘进中孔中地震高精度预报系统是完全自主开发的高性能产品。该预报系统主要是由“井下”和“地面”两大部分组成的。其中, 井下部分主要是由1个无线主机、3个无线探头、1个无线触发器、1个震源铜锤、1根触发信号线以及其它配件(如: 蜂鸣器、锤垫等)组成。主要功能是进行现场数据采集和存储, 如果无线主机安装有分析软件, 就可在现场解析出探测结果。井下设备都是本质安全型设计, 并且通过了国家煤矿安全机构的防爆性能检测和安全认证。地面部分主要是由PC机、仪器电源适配器(充电器)和分析软件组成的, 其主要功能是对所采集的地质数据进行转储、深度解析、分析处理和形成成果报告文件, 亦即预报结果。该系统与同类产品相比精度高、准确率高和施工方便的优势。

关键词

高精度预报系统, 无线探头, 信号处理, 孔中地震勘探, MEMS检波器

High Precision Earthquake Prediction System in Roadway Excavation

Jiaye Chen¹, Jiewei Chen^{2*}

¹School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang

²Fujian Pingtan Xukun Industrial Co., Ltd., Fuzhou Fujian

Received: Aug. 15th, 2024; accepted: Nov. 21st, 2024; published: Nov. 29th, 2024

Abstract

The high-precision tunnel seismic forecast system for boreholes in roadway tunneling is a completely self-developed, high-performance product. This forecasting system comprises two main components: the “underground” section and the “surface” section. The underground section includes one wireless

*通讯作者。

文章引用: 陈家焯, 陈杰炜. 巷道掘进中孔中地震高精度预报系统[J]. 嵌入式技术与智能系统, 2024, 1(2): 85-91.

DOI: 10.12677/etis.2024.12010

host, three wireless probes, one wireless trigger, one seismic source copper hammer, one trigger signal line, and additional accessories such as buzzers and hammer pads. Its primary function is to collect and store on-site data. If the wireless host is equipped with analysis software, it can also process and display detection results on-site. The underground equipment is designed with intrinsic safety and has passed explosion-proof performance testing and safety certification by national coal mine safety institutions. The surface section consists of a PC, an instrument power adapter (charger), and analysis software. Its main function is to transfer, deeply analyze, and process the collected geological data, ultimately generating result reports, *i.e.*, forecast results. Compared to similar products, this system offers higher precision, greater accuracy, and ease of use.

Keywords

High-Precision Forecast System, Wireless Probe, Signal Processing, Borehole Seismic Exploration, MEMS Detector

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

目前,相应的在国内外使用的巷道超前预报预测设备主要有:国外的有瑞典生产的 TSP203 探测系统[1]、美国生产的 TRT7000 探测系统[2],俄罗斯生产的 TGS-360Pro 探测系统[3]等;国内的有北京同度工程物探技术有限公司生产的 TST 探测系统[4]、北京市水电物探研究所生产的 TGP206 探测系统[5]和云南航天工程物探检测股份有限公司生产的 AGI-T3 探测系统[6],以及还有在煤矿井下巷道掘进前方作预报预测的 MSP 探测设备[7][8]。这些设备在使用过程中预报预测的准确性和可靠性还有待提高,主要存在的问题如下:在现有设备中,基本采用传感部件与采集部件分开设计,也有把传感部件安装于钻孔中,例如, KDZ1114-6B30 矿井巷道地质探测仪中的孔中传感器是由三个正交的单分量速度传感器安装在钢管里制作而成[9]。单分量速度传感器选择动圈传感器,频率响应不超过 400 Hz,响应频带窄,工作时,适应于竖直安装,而置入孔中时,动圈传感器并不是竖直安装,这大大降低了传感器灵敏度,有效的微弱信号无法感知。另外,施工时孔中传感器置于预先打好的钻孔中,利用打气装置对其打气把孔中传感器压紧在孔壁,采集装置放在孔外使用信号线缆连接孔中的传感装置,施工极其不便,而且有效信号损失比较严重。所以,现有巷道地质超前探测设备在使用过程中无法接收极微弱信号,对断层、陷落柱、老空等较大构造的反射信号反应较为明显,对较小断层、软弱结构、溶洞和含水层反映不明显,特别在电磁波干扰较大、地形复杂的环境中,其探测精度和准确率更是无从谈起。

2. 预报系统组成和功能

2.1. 组成和功能

巷道掘进中孔中地震高精度预报系统是由“井下”和“地面”两大部分组成的。其中,井下部分主要是由 1 个无线主机、3 个无线探头、1 个无线触发器、1 个震源铜锤、1 个锤垫、1 根触发信号线以及其它配件(如:蜂鸣器等)组成。主要功能是进行现场数据采集和存储,井下设备都是本质安全型设计,并且通过了国家煤矿安全机构的防爆性能检测和安全认证。地面部分主要是由 PC 机、仪器电源适配器(充电器)和分析软件组成的,其主要功能是对所采集的地质数据进行转储、深度解析、分析处理和形成成果报告

文件, 亦即预报结果。预报系统组成设计如图 1 所示。

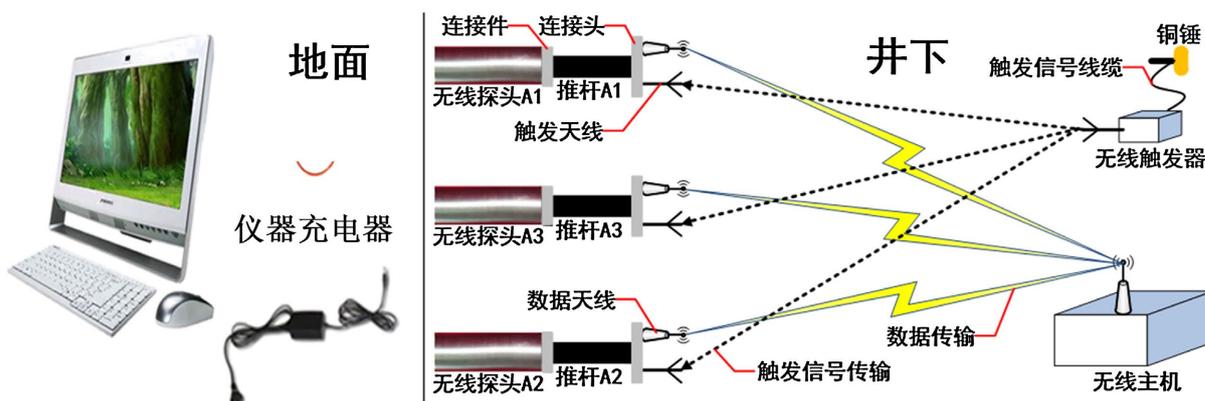


Figure 1. Schematic diagram of the high-precision borehole seismic prediction system for tunnel excavation

图 1. 巷道掘进中孔中地震高精度预报系统组成示意图

2.2. 预报系统各部件功能简介

(1) **无线主机**: 在数据采集之前, 无线主机可对 3 个无线探头进行参数设置和命令, 同时, 在数据采集时实时接收 3 个无线探头发送的地震数据进行存储、预处理以及各种实时显示; 数据采集开始时, 通知 3 个无线探头(A1、A2、A3)执行提前并行数据采集; 现场数据采集后, 可把数据无线传输给计算机;

(2) **无线探头**: 无线探头集成了 MEMS 三分量加速度模块、数据调理处理模块、模数转换模块、微控制器模块、WIFI 通讯模块、无线触发接收模块、电源模块(包括充电电路)、电池以及天线等。当现场数据采集时, 3 个无线探头接收到无线主机的触发命令时, 同时同步进行数据采集并把采集的地震数据传送给无线主机;

(3) **无线触发器**: 通过触发信号线连接安装在震源铜锤上的蜂鸣器, 把震源铜锤激发蜂鸣片产生的触发信号发送给无线主机。无线触发器有 3 种触发方式: 先短后断触发、先断后短触发和外部信号触发;

(4) **震源铜锤**: 采用 8 磅铜锤, 激发产生地震波和触发信号为地震数据采集提供信号;

(5) **锤垫**: 供震源铜锤激发时使用;

(6) **触发信号线**: 连接蜂鸣器与无线触发器;

(7) **蜂鸣器**: 产生触发信号。

2.3. 预报系统的特点

巷道掘进中孔中地震高精度预报系统具有独特和精细的设计风格, 并应用最先进的电子技术, 该系统普遍采用高集成度、高精度、低噪声、低功耗、小封装器件, 在硬件、软件和设备组成上加强抗干扰措施, 同时, 极大限度地简化常规地震数据采集中所有的模拟电路和数字电路, 这样, 既可以减小硬件电路结构体积, 又能避免因模拟器件的阀门效应而造成有效信号不可挽回性丢失。其特点如下:

- (1) 采用专用模拟 - 数字抗干扰设计, 实现强干扰中微弱有效信号的采集;
- (2) 锤震或炮震探测施工方式可选;
- (3) 采用高性能三分量加速度检波器, 提高探测精度及距离;
- (4) 同时对反射波、绕射波进行反演分析, 保证分析成果的准确度;
- (5) 波场分离采用 F-K 滤波, 消除噪声提高信噪比;
- (6) 三维观测三维成像;
- (7) 数据通讯可选择为无线或有线传输方式;
- (8) 具有远程升级功能;
- (9) 低通、高通、带通、陷波四种数字 DSP 滤波方式;

(10) 锤震探测距离 80 m 以上, 炮震探测距离 150 m 以上。

2.4. 预报系统的技术指标

巷道掘进中孔中地震高精度预报系统技术指标如表 1 所示。

Table 1. Key technical specifications of the high-precision borehole seismic prediction system for tunnel excavation
表 1. 巷道掘进中孔中地震高精度预报系统主要技术指标

性能指标	技术参数	性能指标	技术参数
无线主机处理器	200 MHz (FPGA)	存储容量(GB)	64
无线探头处理器	120 MHz (FPGA)	存储容量(GB)	8
采集精度	24 位	触发方式	模拟信号外触发
采集长度(dot)	2 ^k (k = 9、10…20)	模数转换率(KSPS)	128
放大增益(倍)	1、10、100、1000	动态范围(dB)	150
通讯协议	802.11 b/g 无线网络	通讯速率(Kbps)	1000
传感器	三分量加速度	灵敏度(mV/g)	1000
连续工作时间(小时)	≥8	工作温度(°C)	-10~+50

3. 预报系统的结构设计

3.1. 无线主机结构简介

巷道掘进中孔中地震高精度预报系统无线主机组成主要包括：主板、液晶显示、面板、锰酸锂电池组、无线路由器、WIFI 模块、2.4 G-WIFI 天线、外壳、密封圈、电池盒、托架等，如图 2 所示为无线主机外观示意图。



Figure 2. Appearance diagram of the wireless host in the high-precision borehole seismic prediction system for tunnel excavation
图 2. 巷道掘进中孔中地震高精度预报系统无线主机外观示意图

3.2. 无线探头结构设计

巷道掘进中孔中地震高精度预报系统中的无线探头主要包括：MEMS 三分量加速度传感模块、信号处理采集模块、2.4 GHz-WIFI 无线数据传输模块、1.0GHz 无线模拟接收模块、电源电路、锰酸锂柱状电池组、圆柱外壳、圆柱电池盒、推杆、连接部件、天线等。无线探头结构如图 3 所示，外观图如图 4 所示。

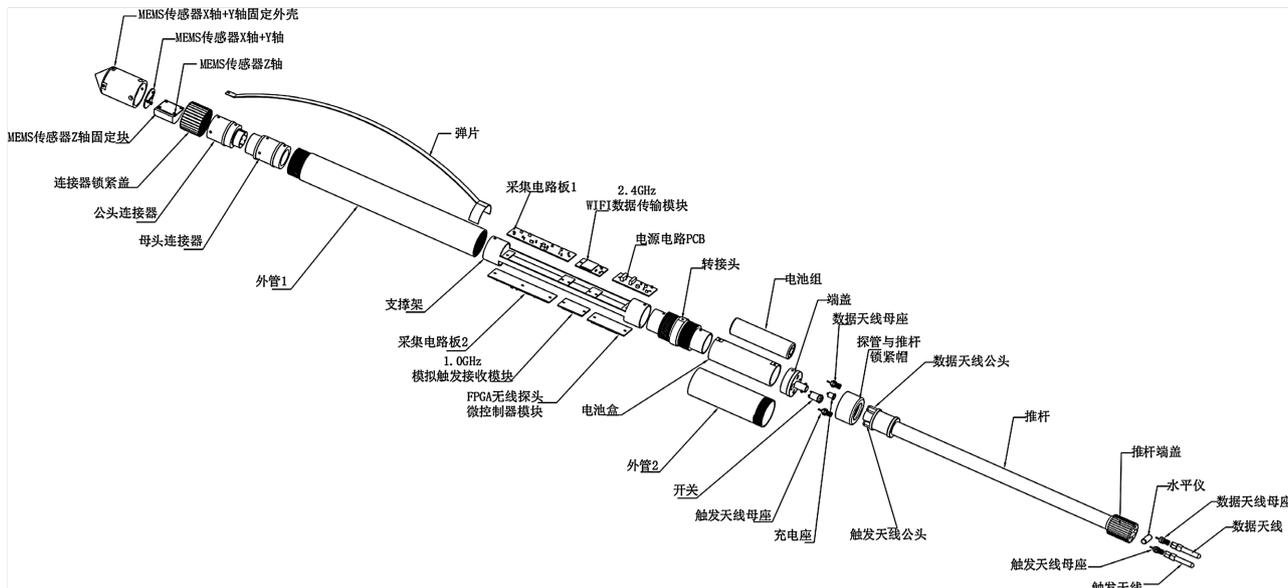


Figure 3. Structural diagram of the wireless probe in the high-precision borehole seismic prediction system for tunnel excavation
图 3. 巷道掘进中孔中地震高精度预报系统无线探头结构示意图

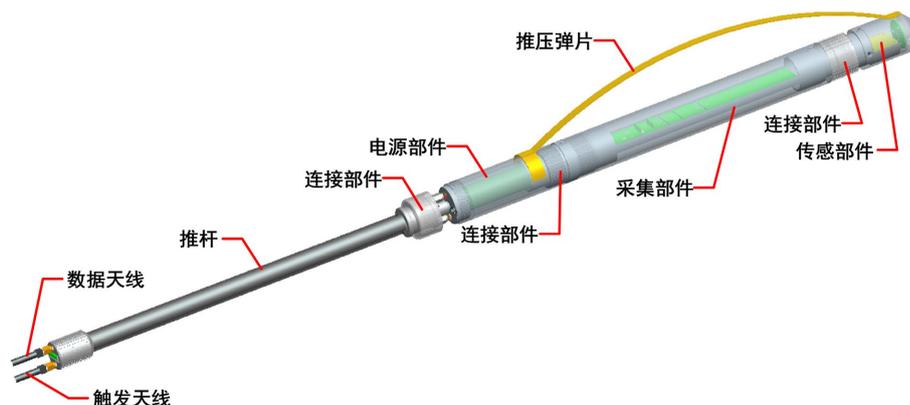


Figure 4. Appearance diagram of the wireless host in the high-precision borehole seismic prediction system for tunnel excavation
图 4. 巷道掘进中孔中地震高精度预报系统无线主机外观示意图

3.3. 预报系统硬件设计特点

巷道掘进中孔中地震高精度预报系统硬件布置主要是采集到有效的微弱信号。为了实现这个目标，本设计调研了目前市场上同类产品的使用状况，充分了解这些产品应用过程中存在的优缺点，在此基础上进行精心设计、反复试验、步步把关，克服了其它设备存在的缺陷，设计出优良的巷道掘进中孔中地震高精度预报系统。其硬件特点如下：

- (1) 无线主机和无线探头分开设计，并利用无线联系，避免它们之间因有线联系而产生的互相干扰。
- (2) 无线主机硬件结构简单，探测时置于巷道空旷处；无线探头包括 FPGA 微处理中央单元、高性能 MEMS 三分量加速度传感器、信号处理电路、模数转换电路、无线触发接收电路、无线 WIFI 通讯电路以及电源电路等，设计时把这些电路合理设计成模块板，各板布局得当、合理安排，使获取微弱信号能力最强，抗干扰能力最强。
- (3) 无线主机和无线探头硬件设计是基于最先进的强大电子技术的基础上完成的，它采用分布式控

制、无线传输和集中处理方式, 核心芯片选用美国 Altera 公司片上可编程 SOPC 技术, FPGA 控制人机对话、机机通讯以及相关的各种算法和控制, FPGA 控制信号的放大、去噪、实时采集和存储, 接着把采集的地震数据传输给系统主机进行显示和存储, 最后把有效的地震数据传给 PC 机由后台分析软件来处理。

4. 预报系统的软件设计

巷道掘进中孔中地震高精度预报系统分析软件基于所设计硬件作为观测系统, 首先对三维波场中纵横波信号进行分离和共接收点信号编排, 然后应用“F-K”二维波速滤波方法, 提取保留掌子面前方的回波信号(负速度), 滤除巷道侧面及其它方向的干扰信号; 接下来进行围岩速度扫描分析, 确定围岩的速度分布; 最后是在围岩波速的基础上, 应用观测到的纵横波信号进行地质构造的偏移成像。该系统通过上述系列处理过程即可解决波场分离和速度分析问题, 具有先进水平。

巷道掘进中孔中地震高精度预报系统包括嵌入式软件、初始化软件、信号调理和处理软件、模数转换控制软件、数据存取控制软件、触发信号处理软件、通讯控制软件、电源管理监控软件以及检测警示软件。

5. 预报系统的应用

巷道掘进中孔中地震高精度预报系统设计适用于探测巷道前方 150 米以内软弱带、破碎带或裂隙发育情况以及探测巷道前方断层、陷落柱、采空区或赋水情况等。预报系统应用多项创新技术, 可以有效解决巷道在掘进过程中存在的安全隐患, 在矿井安全生产预测预报中起着重要作用。自巷道掘进中孔中地震高精度预报系统上市以来, 应用次数超过百例, 预测预报准确率超过 90%, 带来较高的社会效益和经济效益。

探测案例:

(1) 现场施工: 本施工案例为在山西潞安集团某矿工作面巷道掘进前方进行探测, 进一步了解工作面前方的地质情况。在布置中, 左右两侧各布置 12 个间距 2 m 的锤击点, 其中锤击点距掌子面最近 5 m 左右, 锤击点距检波器 1 为 5 m 左右, 锤击点距检波器 2 为 5 m 左右, 检波器 1、检波器 2 在同一个平面上。

(2) 探测结果(如图 5 所示): ①在掘进头前方 24 m 附近有反射界面, 推测为陷落柱局部裂隙较发育及岩层变化影响所致。实际情况在 20 m 处发生岩性变化, 泥岩变砂岩; ②在 60 m 附近为异常界面二, 推测为陷落柱中部裂隙及岩层变化影响所致; ③在 98~108 m 范围为异常带三, 推测为陷落柱边界, 煤岩层变化影响所致。以上结果在后期施工过程得到验证。

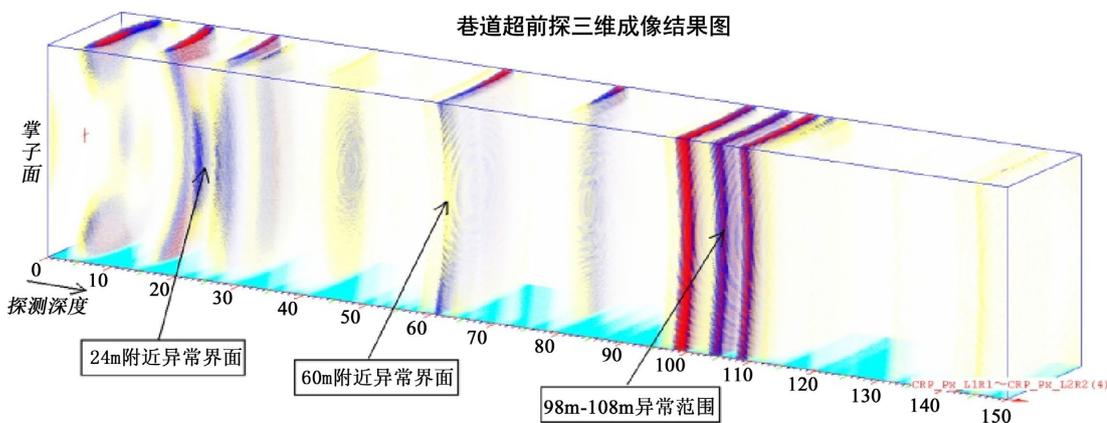


Figure 5. 3D prediction results diagram

图 5. 三维预测预报成果图

6. 结论

本文详细介绍了巷道掘进中孔中地震高精度预报系统, 该系统的独特设计以及应用过程中的验证, 其有益效果在于:

(1) 采集部件与振动传感部件各自独立而集成一体, 避免线缆连接易受到外部电磁波干扰, 增强采集极弱信号的能力。

(2) 启动触发信号和数据均采用无线传输, 没有线缆受损而影响施工的问题, 数据采集完成后立即被数字化保存并进行无线传输, 不受环境干扰。另外, 无线主机与无线探头因采用无线传输而没有线缆连接, 无线主机对数据采集产生不了干扰, 简化施工复杂度, 减少工作量, 提高了采集极弱信号的能力和探测效率。

(3) 探测施工时, 无线探头埋在钻孔中, 不受外部环境影响, 降低外部干扰, 提高了采集数据分辨率, 而且埋在孔中的传感器, 与被测介质耦合得更好, 更容易感知微弱的地震信号。

综上所述, 该系统实现了在巷道掘进中的地震勘探, 对高精度、高灵敏度以及准确率的需求, 与目前同类产品相比具有更高的稳定性和探测准确性, 具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] Alimoradi, A., Moradzadeh, A., Naderi, R., Salehi, M.Z. and Etemadi, A. (2008) Prediction of Geological Hazardous Zones in Front of a Tunnel Face Using TSP-203 and Artificial Neural Networks. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **23**, 711-717. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2008.01.001>
- [2] Dong, X., Zhu, J., Wang, Q., *et al.* (2023) A Technical Study of Advanced Geological Prediction of Tunnels under Complex Geological Conditions. *Academic Journal of Architecture and Geotechnical Engineering*, **5**, 52-57.
- [3] 徐磊, 尹剑, 张建清, 等. TGS360Pro 技术三维正演及其与 TSP 技术对比试验研究[J]. *地球物理学进展*, 2022, 37(3): 1321-1329.
- [4] 谷江洪, 申康路. TST 地质超前预报技术在 N-J 水电工程中的应用[J]. *土工基础*, 2018, 32(2): 224-228.
- [5] 王健. TGP206 在隧道超前地质预报中的应用[J]. *石家庄铁路职业技术学院学报*, 2022, 21(2): 44-47.
- [6] 赵国军, 李俊杰, 江宗高, 等. AGI-T3 在输水隧洞超前地质预报中的应用[J]. *水利水电技术*, 2018, 49(6): 164-170.
- [7] 任云峰, 白如镜, 王晋宁. 基于 MSP 勘探法在煤矿掘进巷道地质构造超前探测应用[J]. *煤炭与化工*, 2021, 44(10): 72-74.
- [8] Fan, J., Yuan, Q., Chen, J., *et al.* (2024) Investigation of Surrounding Rock Stability During Proximal Coal Seams Mining Process and Feasibility of Ground Control Technology. *Process Safety and Environmental Protection*, **186**, 1447-1459.
- [9] 李小雷. 矿井巷道震波超前探测技术在煤矿的应用研究[J]. *煤矿现代化*, 2012(3): 34-35.