

许献磊,朱小松,李涛涛,等. 矿井钻孔雷达定向探测技术研究[J]. 矿业科学学报,2025,10(1):14-23. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2024937
XU Xianlei,ZHU Xiaosong,LI Taotao, et al. Research on directional detection technology of mine borehole radar[J]. Journal of Mining Science and Technology,2025,10(1):14-23. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2024937

矿井钻孔雷达定向探测技术研究

许献磊¹,朱小松^{1,2},李涛涛³,刘芳奕^{1,2},梁鹏^{1,2}

- 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室,北京 100083;
- 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083;
- 萍乡学院机械电子工程学院,江西萍乡 337055

摘要:为解决常规钻孔雷达受雷达波传播特性和复杂矿井地质条件影响,难以对钻孔周围目标体进行定向探测的问题,开展矿井定向钻孔雷达天线技术及定向探测方法的研究。首先,通过辐射面和屏蔽结构的仿真设计,优化天线结构,提高天线的聚焦辐射能力,并有效降低矿井环境中的信号干扰。其次,通过电阻加载仿真分析,实现天线阻抗匹配,提高天线的辐射效率,并优化天线的结构参数,最终选定辐射面张角为 60° ,屏蔽壳高度为40 mm。然后,构建钻孔雷达定向识别模型,提出基于振幅谱比法确定矿井孔中异常方位角的探测方法。矿井实验结果表明,该定向钻孔雷达能够准确探测并识别煤岩界面及断层小构造的径向探测深度、离孔口距离和相对钻孔方位,探测深度误差不超过0.01 m,目标方位与实际方位的偏差小于 1° 。

关键词:钻孔雷达;定向探测;聚焦辐射;PID算法;定向识别模型

中图分类号:TD 97

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2025)01-0014-10

Research on directional detection technology of mine borehole radar

XU Xianlei¹,ZHU Xiaosong²,LI Taotao³,LIU Fangyi²,LIANG Peng²

- State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, Beijing 100083, China;
- College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;
- School of Mechanical and Electronic Engineering, Pingxiang University, Pingxiang Jiangxi 337055, China

Abstract:To address the problem that conventional borehole radar has difficulties in performing directional detection of surrounding targets due to the effects of radar wave propagation characteristics and complex geological conditions in mines, research on directional borehole radar antenna technology and directional detection methods has been conducted. First, through the simulation design of the radiation surface and shielding structure, the antenna structure was optimized to improve its focusing radiation ability and effectively reduce signal interference in the mine environment. Next, impedance matching was achieved through resistance loading simulation analysis to improve the antenna's radiation efficiency and optimize its structural parameters. Finally, the radiation surface aperture angle was selected to be 60° , and the shielding shell height was set to 40 mm. A borehole radar directional recognition model was then constructed, and a detection method based on the amplitude spectrum ratio method was proposed to determine the anomalous azimuth angle within the mine borehole. Experimental results in the mine show that this directional borehole radar can accurately detect and identify the radial detection

收稿日期:2024-07-08 修回日期:2024-12-21

基金项目:国家重点研发计划(2023YFC3008902,2023YFB3211002);国家自然科学基金(52174155)

作者简介:许献磊(1982—),男,河南南阳人,博士,教授,主要从事探测仪器开发与应用方面的研究工作。E-mail:xuxl@cumt.edu.cn

depth, distance from the borehole opening, and relative azimuth of coal-rock interfaces and small fault structures. The detection depth error is less than 0.01 m, and the deviation between the detected and actual target azimuth is less than 1° .

Key words: borehole radar; directional detection; focused radiation; PID algorithm; directional identification model

目前,我国煤炭资源仍然是最经济、可靠的一次能源^[1]。然而,由于煤层顶板坍塌、陷落柱或裂隙带透水等原因,煤矿安全事故频发^[2],严重威胁煤矿安全生产。电法^[3]、瞬变电磁^[4-5]、槽波^[6]、坑透^[7]、探地雷达^[8-9]等煤矿井下超前探测技术已经广泛应用于地质灾害隐患的探测中,但因矿井巷道空间狭小、探测作业环境受限,常规的超前探测方法在实际应用中还存在诸多问题。比如,电法勘探与地震勘探仪器布线繁琐,施工难度大;电法具有体积效应,探测精度低;低频探地雷达虽然可以增加探测深度,但是对远处目标体的探测精度仍然有限等。近些年发展起来的钻孔地质雷达,是一种通过孔中探测确定孔周围一定范围内地质结构的物探方法,其原理与地面使用的地质雷达相同,利用一个天线发射高频宽带电磁波,另一个天线接收来自地下岩土介质的反射波。钻孔雷达在孔中进行数据采集,受巷道环境干扰小,同时又具有高分辨率的优势^[10],在矿井煤层走向预测、超前小构造等灾害隐患高精度探测中具有较大的应用潜力。

钻孔雷达技术始于20世纪70年代的欧美、日本等地区。1972年,HOLSER等^[11]、COOK^[12]成功研制出首台可投入实际应用的钻孔雷达系统,探测到地下达100 ft深的煤矿资源,验证电磁波在煤层中传播的可行性。1983年,NICKEL等^[13]通过脉冲钻孔雷达技术,对位于3 000 m深处的盐丘进行单孔探测,并设计连续波系统进行跨孔探测,验证钻孔雷达在地质勘探领域的可靠性。20世纪90年代,日本东北大学的SATO等^[14]研究并开发极化钻孔雷达系统,显著提升对地下结构的成像能力和分辨率,为地质勘探、环境保护以及地质灾害监测提供重要的技术支持。进入21世纪后,针对传统钻孔雷达在识别目标体方位角方面的不足,定向钻孔雷达天线技术得到快速发展。SATO等^[15]最早提出利用4根接收天线接收信号的微小差异,判定反射电磁波的到达方位角。随后,EBIHARA等^[16-17]在接收天线中心加装同轴电缆进行馈电,有效降低4根接收天线间的耦合噪声,显著提升其实用性。在前人研究的基础上,刘四新等^[18-20]构建了1套由1根发射天线和4个圆周阵列接收天

线组成的定向钻孔雷达收发系统。该系统依据4个接收天线的信号差异,利用反正切法、改进残差法及BS-MUSIC等技术计算目标体方位,显著提高运算速度。同时,赵青等^[21]采用分布介质加载和集中电阻加载宽带小设计,成功研制出四方向的定向天线,实现对信号方位的精确测量和定位。

针对井下定向探测需求,开展矿井定向钻孔雷达天线技术及定向探测方法的攻关研究,改进雷达天线结构提高天线的聚焦能力,采用PID算法控制电机驱动“同轴双管”使天线始终朝向设定方向,构建钻孔雷达定向识别模型确定异常方位角实现孔中定向探测。研究成果为煤矿采掘工作面内部地质构造的超前精细探测提供技术支持。

1 钻孔雷达定向探测原理及设计思路

钻孔雷达系统包括孔中天线、线缆、推杆、采集系统4部分。测量时,将推杆与偶极子天线连接置于钻孔内,通过推动推杆使天线前进,前进过程中发射天线按设定好的采样率不断发射电磁波,遇到顶底板界面及特殊构造时,电磁波发生反射并被接收天线接收,将接收到的信号绘制成图像,即为雷达剖面图。目标体有不同的空间特征,其反射电磁波属性也不同,根据发射电磁波属性可以分辨地质体为点状体、面状体等。同时,根据图像可以推算异常体与钻孔的相对位置(相离、相交)和夹角。通常,双曲线图像对应点反射体,K字型图像对应过钻孔的断层面。现阶段煤矿井下瓦斯抽放领域,国内大多采用底抽巷和高抽巷的方式,运用回转钻机钻孔施工^[22]。

目前钻孔雷达测量方式有单孔、跨孔及井(孔)-地面测量3种^[23]。单孔测量使用反射法,即单孔反射测量;跨孔测量既可使用透射法进行层析成像,又可使用反射法估算特殊构造的存在和产状;井(孔)-地测量使用透射法测量垂直雷达剖面,获取速度层析成像^[24]。图1为单孔反射探测示意图。

为定向探测井下钻孔周围目标体,设计如图2所示的矿井钻孔雷达定向探测技术路线。在硬件

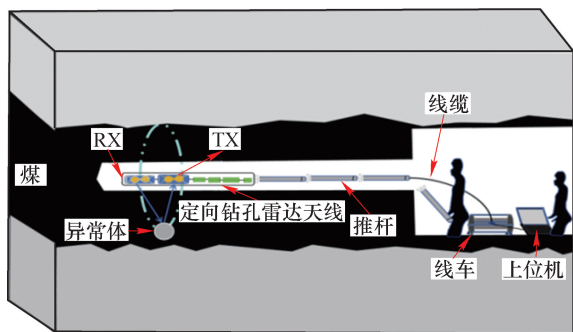


图1 单孔反射探测示意图

Fig.1 Schematic diagram of the single-hole reflection probe

方面,以偶极子天线电阻加载的方式形成小型化定向钻孔雷达天线,并进行屏蔽设计,增加天线的方向性和抗干扰能力;采用PID算法,控制电机驱动使钻孔雷达天线朝向设定方向。在处理方法方面,提出一种基于振幅谱比法的矿井孔异常方位角探测方法,研究钻孔雷达定向识别模型,并利用该模型确定异常方位角。

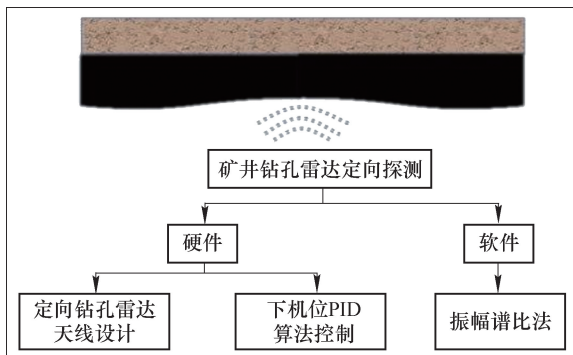


图2 矿井钻孔雷达定向探测技术路线

Fig.2 Roadmap of directional detection technology of mine borehole radar

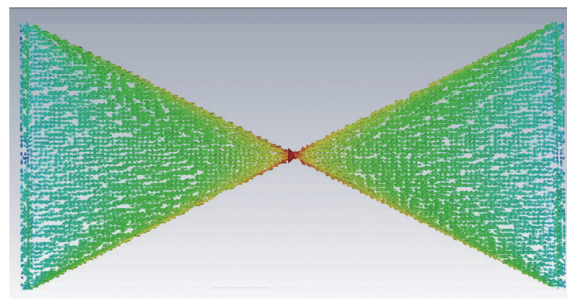
2 定向钻孔雷达天线技术

通常情况下瓦斯抽采时钻孔直径为 80 mm^[25]。煤矿井下工作面内部开设水平钻孔,钻孔直径在 96 mm 以下^[26]。井下瓦斯孔和水平钻孔孔径小,因此基于蝶形偶极子天线形状结构设计定向钻孔雷达天线。蝶形天线体积较喇叭天线、旋转天线等体积更小,符合钻孔雷达小型化要求,同时有较宽的频带,良好的方向性^[27]。

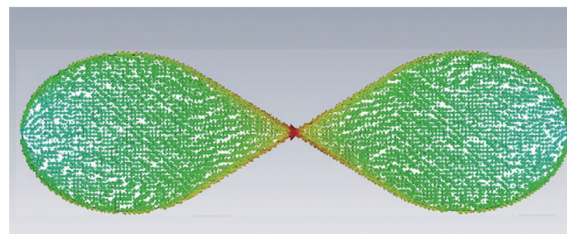
2.1 蝶形偶极子屏蔽天线设计

为保证设计的定向钻孔雷达在井下钻孔中具有一定探深效果,天线中心工作频率为 900 MHz。天线的长度决定天线中心频率,通常以工作频率波长的 1/4 作为天线的长度^[28]。设计天线长度 L 为 75 mm。

图3为偶极子天线。三角形蝶形天线存在电流分布不均的情况,特别是在尾端区域,电流发生异常聚集,导致回波损耗增加,进而缩小天线的频率带宽并降低辐射性能。为解决这一问题,采用尾端为圆弧形的蝶形天线设计,使电流分布更加均匀、有效减少回波损耗^[29],同时天线宽度 W 仅为三角形蝶形天线的 1/2,为小型化提供基础。



(a) 三角形蝶形天线



(b) 优化变形后的蝶形偶极子天线

图3 偶极子天线

Fig.3 Dipole antenna

蝶形天线在馈线连接处为一个尖角,该尖角为天线的张角 θ ,其大小会影响自身的阻抗和辐射面积,进而影响天线性能。以天线张角为变量的仿真模拟结果如图4所示。

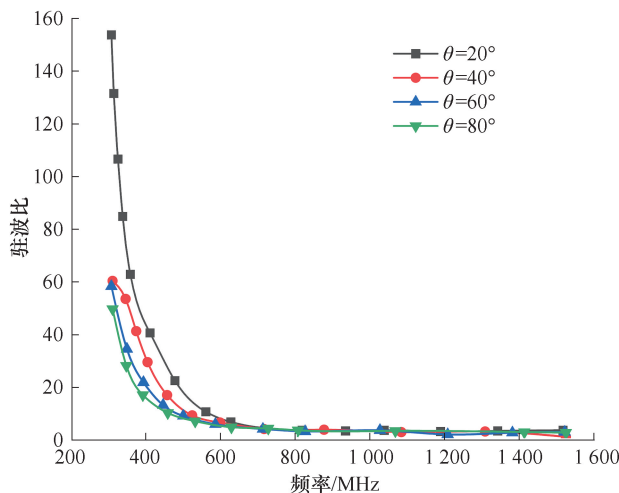


图4 不同张角天线驻波比

Fig.4 Standing wave ratio of antenna with different aperture angles

天线带宽是指驻波比小于 2 时的频段范围。图 4 中显示, 在驻波比小于 2 时, 各曲线的横坐标最大值趋于无穷大, 而频段范围的最小值越小, 天线带宽越大。随着天线张角的增大, 驻波比小于 2 的频段范围的最小值逐渐减小, 导致天线带宽增大。因此, 天线的带宽和张角成正相关关系。所设计的天线用于定向钻孔雷达, 辐射面张角过大时辐射范围也会扩大, 导致辐射能量分散、方向性变差, 同时不符合钻孔雷达天线小型化要求, 最终选取 60° 的蝶形天线。

2.2 背腔屏蔽装置结构设计

蝶形天线是一种全向型天线, 能接收来自各个方向的反射信号, 包括非探测方向干扰物的反射噪声, 不利于提高信噪比。为此, 设计带有屏蔽壳装置的钻孔雷达天线^[30]。屏蔽壳可以有效减少非探测方向的电磁波传播, 使得天线具有向特定方向辐射电磁波的作用, 同时对天线辐射的电磁波进行反

射, 有增强朝向探测方向电磁波的作用。这种反射增强作用可以看作原来天线的镜像天线, 即天线对实际地质体辐射的电磁波强度是原天线和镜像天线的叠加, 可以由式(1)计算得到:

$$E = 2E_1(1 - e^{-2jkH}) \quad (1)$$

式中, E_1 为天线辐射电场; k 为波数, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为发射信号最强频点对应的波长; H 为屏蔽壳背腔高度。

理想状态下, 当 $h = \lambda/4$ 时, 天线有最大的辐射强度, $E = 2E_1$; 但实际加工过程无法保证绝对精度, 不同加载方式以及屏蔽壳厚度等原因, 导致 $h = \lambda/4$ 时天线对地辐射未必最大, 最终需根据仿真数据以及实际运用情况综合考虑^[31]。

屏蔽壳对天线辐射特性的影响主要取决于屏蔽壳两端的高度, 因此以 H 为主要变量(取值范围为 30~50 mm, 步间距 5 mm)进行仿真分析(图 5)。表 1 为屏蔽壳背腔高度仿真垂直极化方向图参数。

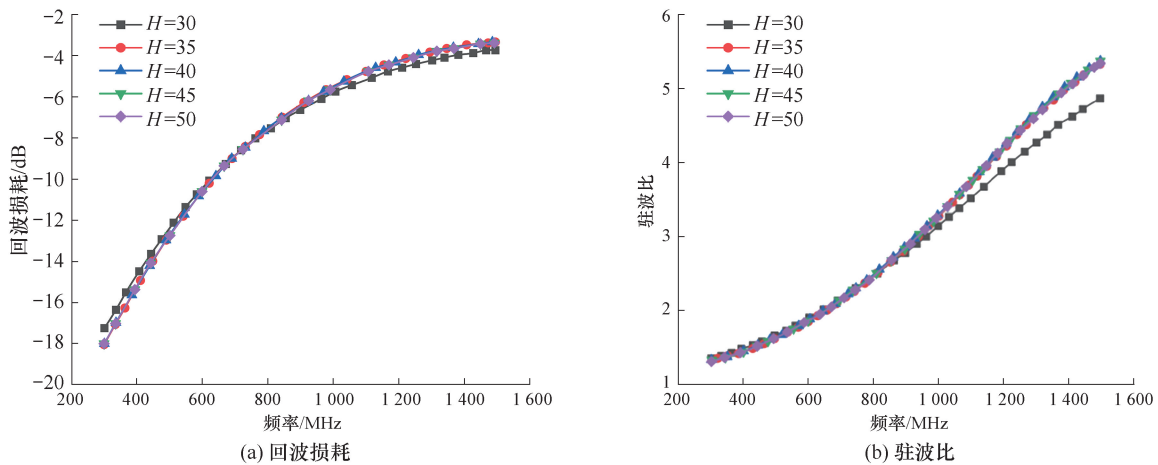


图 5 天线屏蔽壳背腔高度仿真

Fig. 5 Simulation of back cavity height H of antenna shield shell

由图 5 可知, 随着 H 变化, 回波损耗和驻波比参数变化很小。当回波损耗小于 -10、驻波比小于 2 时, 信号传输效率最高, 此时对应频率约为 700 MHz, 钻孔雷达频率较设计频率偏低, 在后期信号处理时进行相应调整^[32]。

表 1 屏蔽壳高度仿真垂直极化方向图参数

Table 1 Simulation parameters of vertical polarization radiation pattern for shielding shell height

H/mm	主瓣幅值/dB	主瓣宽度/(°)	副瓣电平/dB
30	5.51	96.80	-6.40
35	5.56	98.10	-5.90
40	5.53	99.50	-5.40
45	5.46	100.80	-7.60
50	4.64	104.60	-8.10

由表 1 可以看出, 在 $H = 50$ mm 时主瓣幅值最小; 随着 H 的增大, 副瓣电平先增大后减小, 但变化趋势不明显; 在 $H = 40$ mm 时副瓣电平最大。综合分析, 在 $H = 40$ mm 时天线有最好的方向性, 所以优选接收天线屏蔽壳背腔高度为 40 mm。

2.3 天线加载设计

采用在辐射面圆弧段加载电阻的方式设计钻孔雷达天线, 每个辐射面分别经 2 个电阻与屏蔽壳相连。由仿真结果可知, 辐射面上电流分布不均, 电阻可以吸收部分电流, 减少回波损耗, 提升辐射效率^[33-35]。电阻本身是一种导体, 可以消耗电功, 降低辐射能量。因此, 在天线屏蔽壳背腔高度 $H = 90$ mm 情况下, 对加载电阻 R (取值范围 150~300 Ω , 步间距 50 Ω) 进行仿真试验。图 6 为天线加载电阻 R 仿真。

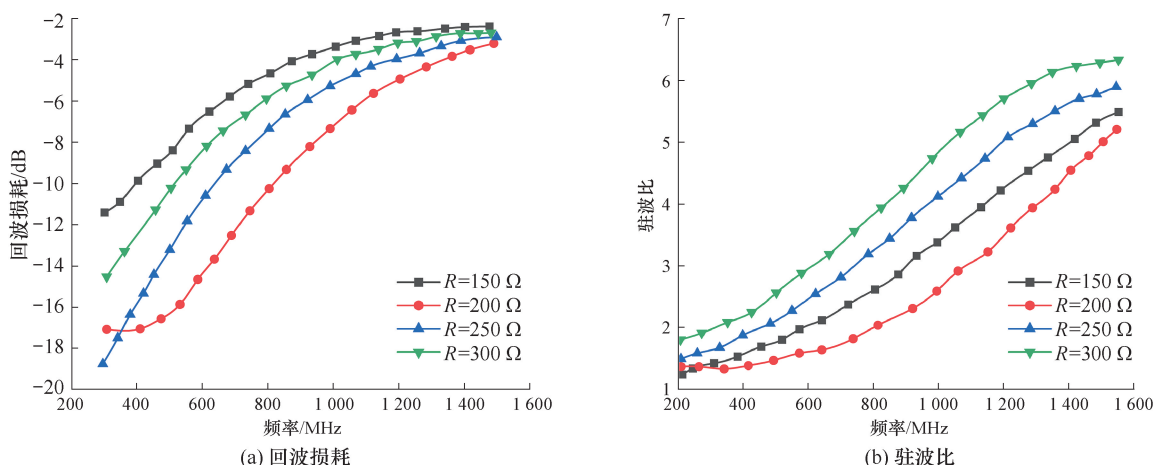


图 6 天线加载电阻 R 仿真

Fig. 6 Simulation of antenna loading resistance R

由图 6 可以看出,随着加载电阻值的增大,天线带宽先增大后减小,电阻值为 $200\ \Omega$ 时,天线带宽最大。因此,加载电阻值取 $200\ \Omega$ 。

2.4 定向控制算法

为使钻孔雷达天线始终朝向预定角度,采用 PID 算法进行控制。PID 控制算法需要比例、积分和微分三者共同作用,以达到被控对象输出值与设定值稳定拟合的目标。该算法在连续系统中应用较多,且效果良好。PID 控制的实质是根据连续系统测得输入与设定值的偏差值,按照比例、积分和微分的函数关系进行运算,使输出结果趋于设定值并保持稳定^[36-37]。

采用位置式 PID 算法:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

式中, K_p 为比例系数; K_i 为积分系数; K_d 为微分系数; $u(t)$ 为控制输出; t 为当前时间; $e(t)$ 为当前时间误差。

陀螺仪角速度输出最大值为 $1\ 000$, 在偏离探测方向 $\pm 180^\circ$ 范围内,确定定向控制算法的 K_p 为 7.5 , K_i 为 5.8 , K_d 为 0.08 。

通过控制电脑给出一个设定角度 X_1 , 采集板采集当前天线角度 X_2 , 根据角度之差采集板向电机驱动板发出信号,再由电机驱动同轴双管结构发生逆反馈转动,使天线角度接近设定角度。调节过程中发生矫正过度的情况,采集板会再次做逆反馈,直到天线达到设定角度并稳定下来。图 7 为定向逻辑结构。

为测试钻孔雷达的设定角度与实际角度的角度偏差,在室内进行水平状态和垂直状态测试。设定探测方向角度 X_1 , 等待钻孔雷达完成转动回

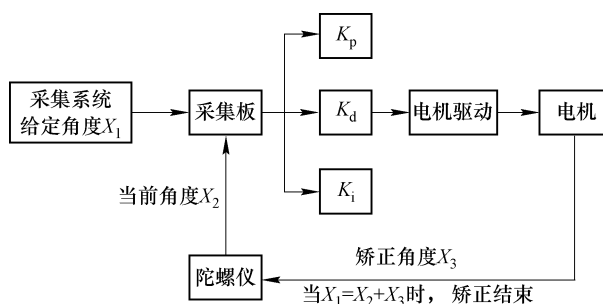


图 7 定向逻辑结构

Fig. 7 Diagram of directional logic structure

并稳定后,通过数字指南针计算当前钻孔雷达天线辐射面朝向 X_2 , 计算两者角度偏差 $X_1 - X_2$ 及出现的频数。表 2 为水平状态和垂直状态角度偏差与频数表。

表 2 水平状态和垂直状态角度偏差与频数表
Table 2 Angular deviation and frequency of horizontal and vertical states

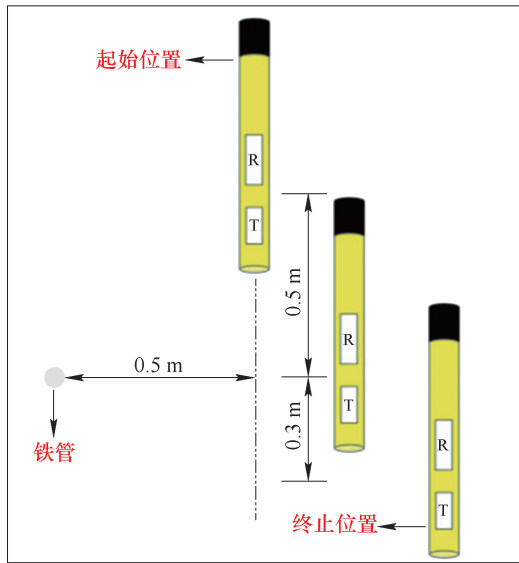
不同状态	$X_1 - X_2 / (^\circ)$	频数/次
水平测试	0	70
	1	2
垂直状态	0	68
	1	4

由表 2 可知,水平状态和垂直状态下,预设角度定向采集偏差都在 1° 范围内,准确度达到 97.2% 。这反映出钻孔雷达在该种探测模式下具有很强的稳定性和准确性,为实际探测中钻孔雷达天线辐射面角度准确朝向设定角度及确定地质异常体方位提供支撑作用。

3 钻孔雷达定向识别模型

图 8 为钻孔雷达定向识别模型, 由 900 MHz 定向钻孔雷达天线和直径 3.3 cm 的铁管组成。铁管

距天线的水平距离为 0.5 m, 时间窗口设置为 20 ns, 采样频率为 40 kHz。铁管中心位于天线南偏西 20° 方向, 正北方向探测角度为 0°, 顺时针方向角度递增。



(a) 钻孔雷达移动轨迹示意图

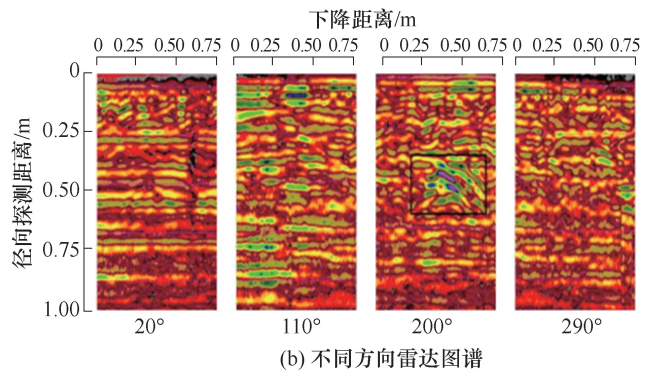
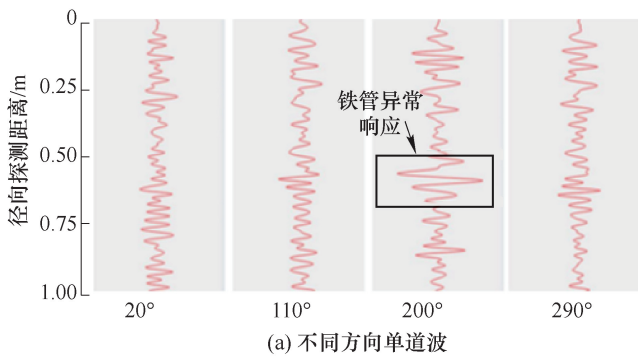
(b) 模型实物

图 8 钻孔雷达定向识别模型

Fig. 8 Directional identification model of borehole radar

通过上位机设定探测方向为 200°, 钻孔雷达下降至天线中心位置与铁管位于同一水平线时, 雷达图像上有双曲线响应特征。

与该方向相距 90° 及 180° 方向上相同深度处, 雷达图像无异常响应。图 9 为不同方向钻孔雷达探测结果。



(a) 不同方向单道波

(b) 不同方向雷达图谱

图 9 不同方向钻孔雷达探测结果

Fig. 9 Detection results in different directions by borehole radar

由上述探测结果知, 当天线探测方向正对异常目标体时, 单道波中异常响应区波形振幅最大。而实际探测时, 异常体正对方向可能未处于设置探测方向。为此, 设置 8 个探测方向 (0° ~ 360°, 45° 步间距), 均不正对铁管中心位置。图 10 为振幅谱比法结果。当上位机设定 180°, 钻孔雷达下降至天线中心位置与铁管位于同一水

平线时, 单道波中有较为明显异常响应, 如图 10 (a) 所示。

计算各方向振幅值与 0° 方向振幅之比, 得到未插值振幅谱比。采用 3 次 B 样条插值算法在各区间进行插值, 使插值后相邻角度变化值都为 1°, 得到 3 次 B 样条插值后振幅谱比, 如图 10 (b) 所示。

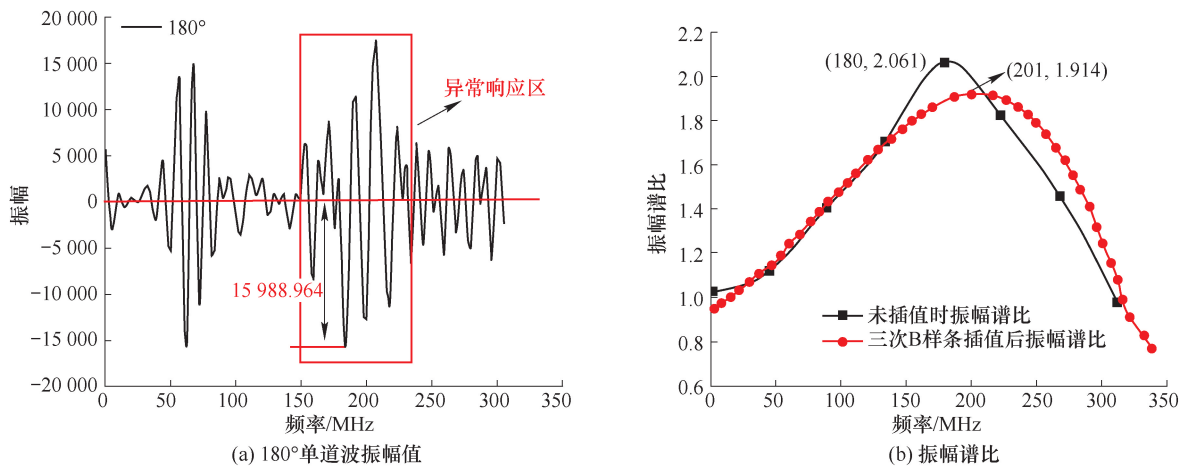


图10 振幅谱比法结果

Fig. 10 Results by amplitude spectrum ratio method

由图10(b)可知,3次B样条插值后振幅谱比最大值横坐标所在角度为201°,与实际目标体方位偏差仅1°。未插值时,目标体正对方向识别误差为5.56%;3次B样条插值后,目标体正对方向识别误差仅为0.28%。

4 矿井验证实验

为进一步验证设计定向钻孔雷达天线及定向探测方法在矿井煤层中的探测效果,在山西某矿2313工作面借助钻孔进行煤岩分界线及断层小构造探测。

4.1 煤层厚度验证实验

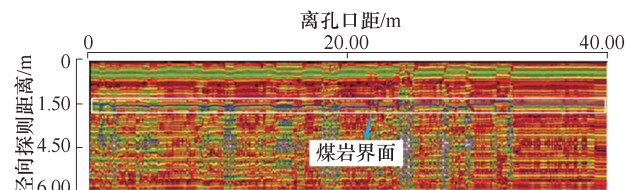
采用900 MHz 钻孔雷达天线沿孔口方向进行前进探测,探测方向为水平向下(180°),图11为煤岩界面探测结果。如图11(a)所示,发现一层位分界线,经分析判定为煤岩分界面,该界面上方为岩石,下方为煤层。抽离出煤岩界面曲线如图11(b)所示。

由图11可知,煤岩界面深度在1.54~1.97 m,探测深度的误差范围不超过0.01 m。经过现场小队验证,雷达探测结果的准确性较高。

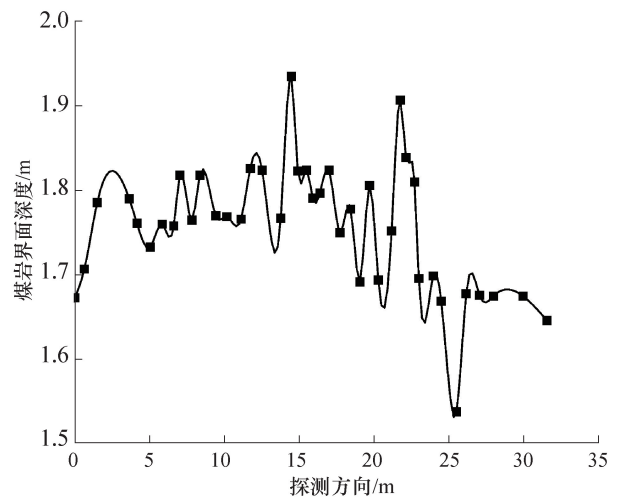
4.2 工作面内小构造探测实验

图12为不同方向断层探测结果。在3个探测角度(180°、225°和270°)均发现一处明显的异常响应特征,距离钻孔口38.2 m,深度为0.10~0.52 m。

结合现场实际情况及相关资料,推测存在断层。采用振幅谱比法分析断层的方位。图13为振幅谱比法断层方位探测结果。提取各方向雷达图像中,距离钻孔口38.2 m,深度范围为0.10~0.52 m的单道波异常体响应区的振幅值。以0°方向为基准



(a) 雷达数据处理结果



(b) 煤岩界面深度

图11 煤岩界面探测结果

Fig. 11 Detection results of coal rock interfaces

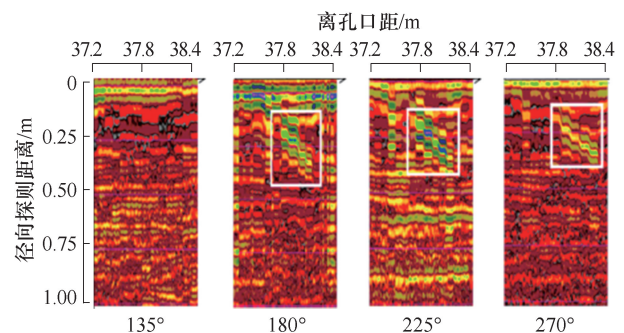
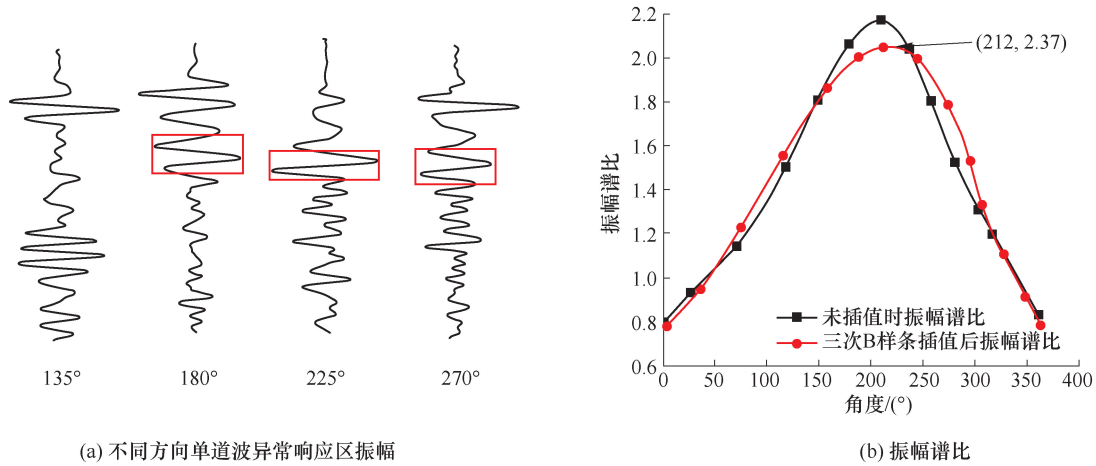


图12 不同方向断层探测结果

Fig. 12 Detection results of faults in different directions

方向, 计算各方向振幅值与 0° 方向振幅值之比, 得到振幅谱比。随后, 利用 3 次 B 样条插值算法对

二维深度平面进行插值处理, 结果如图 13 (b) 所示。



(a) 不同方向单道波异常响应区振幅

(b) 振幅谱比

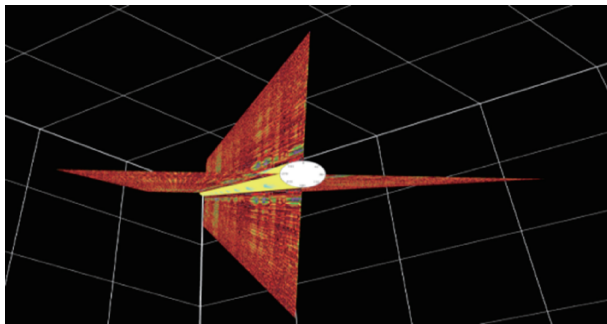
图 13 振幅谱比法断层方位探测结果

Fig. 13 Results of amplitude spectrum ratio method for faults

从图 13(b) 可以看出, 3 次 B 样条插值后振幅谱比横坐标最大值为 212°, 即在距离孔口 38.2 m 处, 与正上方向夹角为 212° 方向上存在煤岩界面的断层。

将该地质模型数据与透明工作面地质模型相融合, 即可实现透明工作面模型的动态更新, 从而提高模型精度。透明工作面地质模型是指通过模拟和可视化工作面内部的地质特征, 实时反映工作面变化的地质模型。

图 14 为定向钻孔雷达三维数据模型和地质模



(a) 钻孔雷达三维数据模型



(b) 断层三维地质模型

图 14 定向钻孔雷达三维数据模型和地质模型

Fig. 14 3D data model and geological model of directional borehole radar

5 结 论

矿井定向钻孔雷达是实现矿井灾害隐患高精度探测的重要技术之一。提出一种基于优化蝶形偶极子天线和 PID 算法的定向钻孔雷达探测方法, 解决传统钻孔雷达定向探测中的精度和可靠性问题。主要结论如下:

谱比法确定异常方位角, 目标方位预测与实际方位的偏差在 1° 以内, 验证该方法的有效性。

(3) 设计的定向钻孔雷达能够准确探测煤岩界面及断层小构造, 精确测量径向深度、离孔口距离和相对钻孔方向, 探测深度误差范围不超过 0.01 m。现场打孔验证探测结果的准确性。

(1) 设计并实现一种中心工作频率为 900 MHz 的定向钻孔雷达。优化天线结构, 采用背腔屏蔽装置提高天线的聚焦辐射能力, 并实现良好的阻抗匹配。通过开发 PID 算法进行电机驱动控制, 确保雷达的定向探测能力。

(2) 构建钻孔雷达定向识别模型。基于振幅

参考文献

[1] 国家统计局. 中华人民共和国 2022 年国民经济和社会发展统计公报[J]. 中国统计, 2023(3): 12-29. National Bureau of Statistics of China. Statistical communiqué on national economic and social develop-

- ment of the People's Republic of China (PRC) in 2022 [J]. *China Statistics*, 2023 (3): 12-29.
- [2] 宁小亮. 2013—2018年全国煤矿事故规律分析及对策研究[J]. *工矿自动化*, 2020, 46(7): 34-41.
NING Xiaoliang. Law analysis and counter measures research of coal mine accidents in China from 2013 to 2018[J]. *Industry and Mine Automation*, 2020, 46(7): 34-41.
- [3] 王敏, 刘玉, 牟义, 等. 多装置矿井直流电法巷道超前探测研究及应用[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(S1): 396-405.
WANG Min, LIU Yu, MU Yi, et al. Research and application of multi-array mine DC electrical method for roadway advanced detection[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(S1): 396-405.
- [4] 牟义, 李江华, 徐慧, 等. 矿井瞬变电磁法参数优化试验及超前探测应用[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(6): 184-190.
MU Yi, LI Jianghua, XU Hui, et al. Parameters optimization test of mine transient electromagnetic method and application of advanced detection[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(6): 184-190.
- [5] 胡雄武, 徐虎, 彭苏萍, 等. 煤层采动覆岩富水性变化规律瞬变电磁法动态监测[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(5): 1576-1586.
HU Xiongwu, XU Hu, PENG Suping, et al. Dynamic monitoring of water abundance of overlying strata in coal seam by transient electromagnetic method[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(5): 1576-1586.
- [6] 王伟, 高星, 李松营, 等. 槽波层析成像方法在煤田勘探中的应用: 以河南义马矿区为例[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(3): 1054-1062.
WANG Wei, GAO Xing, LI Songying, et al. Channel wave tomography method and its application in coal mine exploration: an example from Henan Yima mining area [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(3): 1054-1062.
- [7] 温亨聪, 杨海涛, 张辉辉. 多频无线电坑透技术在煤矿地质构造探测中的应用[J]. *煤炭技术*, 2021, 40(7): 71-74.
WEN Hengcong, YANG Haitao, ZHANG Huihui. Application of multi-frequency radio wave perspective technology in geological structure exploration of coal mine[J]. *Coal Technology*, 2021, 40(7): 71-74.
- [8] 许献磊, 陈令洲, 彭苏萍, 等. 矿井煤岩界面节点式雷达快速动态探测系统及实验研究[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(4): 1964-1975.
XU Xianlei, CHEN Lingzhou, PENG Suping, et al. Mining coal-rock interface nodal GPR rapid dynamic detection system and experimental research [J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(4): 1964-1975.
- [9] 彭苏萍, 杨峰, 许献磊. GPR城市道路病害检测应用技术研究综述[J]. *办公自动化*, 2014, 19(S1): 134-139.
PENG Suping, YANG Feng, XU Xianlei. Review of GPR urban road disease detection application technology[J]. *Office Informatization*, 2014, 19(S1): 134-139.
- [10] 宋雷, 黄家会, 杨维好. 钻孔地质雷达工作原理及应用[J]. *物探与化探*, 1999, 23(6): 454-458.
SONG Lei, HUANG Jiahui, YANG Weihao. The principle and application of geological drillhole radar [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1999, 23(6): 454-458.
- [11] HOLSER W T, BROWN R, ROBERTS F A, et al. Radar logging of a salt dome [J]. *Geophysics*, 1972, 37(6): 1082-1092.
- [12] COOK J C. Borehole - radar exploration in a coal seam [J]. *Geophysics*, 1977, 42(6): 1254-1257.
- [13] NICKEL H, SENDER F, THIERBACH R, et al. Exploring the interior of salt domes from boreholes [J]. *Geophysical Prospecting*, 1983, 31(1): 131-148.
- [14] SATO M, OHKUBO T, NIITSUMA H. Cross-polarization borehole radar measurements with a slot antenna [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 1995, 33(1-3): 53-61.
- [15] SATO M, TANIMOTO T, et al. A shielded loop array antenna for a directional borehole radar [J]. *Geophysics Journal International*, 1992. DOI:10.3997/2214-4609-pdb.303.40.
- [16] EBIHARA S. Directional borehole radar with dipole antenna array using optical modulators [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(1): 45-58.
- [17] EBIHARA S, YAMAMOTO T. Resonance analysis of a circular dipole array antenna in cylindrically layered media for directional borehole radar [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(1): 22-31.
- [18] 刘四新, 王文天, 鹿琪, 等. 基于反正切法的定向钻孔雷达三维成像算法[J]. *物探与化探*, 2018, 42(2): 358-362.
LIU Sixin, WANG Wentian, LU Qi, et al. A directional borehole radar 3D imaging algorithm based on arctangent method [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(2): 358-362.
- [19] 王文天, 刘四新, 鹿琪, 等. 基于改进残差法的定向钻孔雷达三维成像算法[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2018, 48(2): 402-410.
WANG Wentian, LIU Sixin, LU Qi, et al. 3D imaging algorithm of directional borehole radar based on improved residual method [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2018, 48(2): 402-410.
- [20] 刘四新, 王文天, 傅磊, 等. 基于BS-MUSIC的定向钻孔雷达三维成像算法[J]. *地球物理学报*, 2017,

- 60(12): 4928-4937.
LIU Sixin, WANG Wentian, FU Lei, et al. 3D borehole radar imaging method based on BS-MUSIC[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(12): 4928-4937.
- [21] 赵青, 邓祥开, 常兴浩, 等. 钻孔雷达定向天线仿真与设计[J]. 电子科技大学学报, 2014, 43(5): 691-695, 716.
ZHAO Qing, DENG Xiangkai, CHANG Xinghao, et al. Simulation and design of directional antenna in borehole radar[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2014, 43(5): 691-695, 716.
- [22] 李渊. 一种应用于小孔径的手持式钻孔测斜仪研制[J]. 煤矿机电, 2021, 42(4): 71-75, 79.
LI Yuan. Development of a hand-held borehole inclinometer for small aperture[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2021, 42(4): 71-75, 79.
- [23] 张午阳, 郭都城, 叶东昌, 等. 管波探测法和跨孔弹性波 CT 法在岩溶场地勘察中的联合应用研究[J]. 广州建筑, 2021, 49(1): 3-7.
ZHANG Wuyang, GUO Ducheng, YE Dongchang, et al. Combined application research of tube wave detecting method and cross hole elastic wave CT method in Karst site investigation[J]. Guangzhou Architecture, 2021, 49(1): 3-7.
- [24] 曾昭发, 刘四新, 冯暄, 等. 探地雷达原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
ZENG Zhaofa, LIU Sixin, FENG Xuan. Principle and application of ground penetrating radar[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
- [25] 姚宁平. 我国煤矿井下近水平定向钻进技术的发展[J]. 煤田地质与勘探, 2008, 36(4): 78-80.
YAO Ningping. Development trend of nearly horizontal directional drilling technology in coal mines of China[J]. Coal Geology & Exploration, 2008, 36(4): 78-80.
- [26] 荆履财. 煤矿井下瓦斯综合抽采工艺技术的应用研究[J]. 山西化工, 2023, 43(11): 144-146.
JING Lücai. Research on the application of comprehensive gas extraction technology in coal mines[J]. Shanxi Chemical Industry, 2023, 43(11): 144-146.
- [27] 郭晨, 刘策, 张安学. 探地雷达超宽带背腔蝶形天线设计与实现[J]. 电波科学学报, 2010, 25(2): 221-226.
GUO Chen, LIU Ce, ZHANG Anxue. Design and implementation of an UWB bow-tie antenna with back-cavity for ground penetrating radar[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(2): 221-226.
- [28] LIU H, XUE J, LAN T, et al. Comparison among three bowtie antennas for subsurface imaging using ground penetrating radar[C]//. 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS). August 8-11, 2016. Shanghai, China. IEEE, 2016: 2124-2128.
- [29] CHEN G, LIU R C. A 900MHz shielded bow-Tie antenna system for ground penetrating radar[C]//. Proceedings of the XIII International Conference on Ground Penetrating Radar. June 21-25, 2010. Lecce. IEEE, 2010: 1-5.
- [30] WU B H, JI Y C, FANG G Y. Analysis of GPR UWB half-ellipse antennas with different heights of backed cavity above ground[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010, 9: 130-133.
- [31] 郭士礼, 王雯璐, 范永亮, 等. 商用探地雷达蝶形天线三维数值模拟[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(3): 406-413.
GUO Shili, WANG Wenlu, FAN Yongliang, et al. Three dimensional numerical simulation of commercial ground penetrating radar bow-ties antenna[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2015, 12(3): 406-413.
- [32] 吴彦奇, 刘四新. 一种基于吸波材料的屏蔽领结天线的研究与应用[J]. 电波科学学报, 2018, 33(2): 132-137.
WU Yanqi, LIU Sixin. A shielded bow Tie antenna based on absorbing material[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2018, 33(2): 132-137.
- [33] 宋劲. 矿井防爆地质雷达关键技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
SONG Jin. Research on key technologies of mine explosion-proof geological radar[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [34] XU X L, MA Z, LI J P, et al. Research on the geological radar antenna for application in full space of mine roadway[C]//. 2018 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). June 18-21, 2018. Rapperswil. IEEE, 2018: 1-6.
- [35] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
LI Daxin. Method and application of ground penetrating radar[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- [36] 张天赫. 基于 PLC 的油田注水站测控系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2024.
ZHANG Tianhe. Design of measurement and control system for oilfield water injection station based on PLC[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2024.
- [37] 朱晶. 基于模糊 PID 的三容水箱液位控制系统应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2024.
ZHU Jing. Study on application of liquid level control system of three water tank based on fuzzy PID[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2024.

(责任编辑: 陈贵仁)