

引文格式: 肖 洋 孟 露 卢 松 等.地质雷达法在岩溶隧道探测及图谱智能识别中的应用[J].现代隧道技术,2023,60(增刊1):182-186.

XIAO Yang, MENG Lu, LU Song, et al. Application of Ground Penetrating Radar Method in Karst Tunnel Detection and Intelligent Identification of Spectrum [J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(S1): 182-186.

# 地质雷达法在岩溶隧道探测及图谱智能识别中的应用

肖 洋 孟 露 卢 松 汪 旭

(中铁西南科学研究院有限公司, 成都 611731)

**摘 要:** 岩溶隧道施工极可能遭遇岩溶涌水、突泥等地质灾害, 严重危及施工人员安全。地质雷达因其分辨率高、探测快速、无损性等优点, 已在岩溶隧道超前地质预报中得到广泛应用。但由于岩溶形态的复杂性、充填物的多样性以及物探人员解译的差异性, 有效且正确地解译不良地质的雷达图像存在困难。鉴于此, 依托叙毕铁路隧道工程进行实例分析, 通过雷达正演模拟, 得出不同类型岩溶的雷达图谱特征, 并基于卷积神经网络对其特征进行智能识别, 有助于实现智能、准确预测掌子面前方岩溶地质灾害, 为岩溶隧道施工安全提供技术支持。

**关键词:** 岩溶隧道; 地质雷达; 溶洞; 图像识别

**中图分类号:** U457+.5

**文献标志码:** A

## 1 引 言

随着我国西南山区铁路、公路建设规模逐年增大, 穿越的长大岩溶隧道越来越多, 面临的隧道涌突水、涌突泥等不良地质问题十分突出。岩溶突水灾害一般规模大、突发性强、破坏损失严重, 例如, 渝怀铁路圆梁山隧道发生爆喷型突水突泥, 造成 9 人死亡; 宜万铁路野三关隧道发生大型溶洞透水事故, 造成 10 人死亡; 龙厦铁路象山隧道发生岩溶突水, 造成地表塌陷及斜井被淹<sup>[1-2]</sup>。

地质雷达(GPR)因其测试便捷、分辨率高、无损性、抗干扰能力强等特点, 已广泛应用于岩溶探测<sup>[2]</sup>。但由于岩溶形态的复杂性、充填物的多样性以及物探人员解译的差异性, 有效且正确地解译不良地质的雷达图像存在困难。

近年来, 随着科技的发展, 具有自动化、信息化、智能化特征的新技术已逐渐应用于隧道工程建设。基于卷积神经网络对不同类型岩溶的雷达图像特征进行智能识别, 有助于实现智能、准确预测掌子面前方岩溶地质灾害, 为岩溶隧道施工安全提供技术支持。

## 2 地质雷达工作原理

作为一种无损的超前地质预报方法, 地质雷达是通过电磁波对掌子面进行扫描, 从而确定掌子面前方地质体类型、形态、位置的一种电磁探测技术<sup>[3-5]</sup>。

地质雷达利用雷达发射天线发射电磁波, 经过地质体的反射及透射, 再利用接收天线接收反射回来的电磁波, 原理如图 1 所示。由于掌子面前方围岩介质的差异性, 电磁波场强度、波形将不同, 通过对时域波形的处理、分析, 结合相关地质资料, 即可确定掌子面前方围岩情况及不良地质体的规模、位置、形态等。

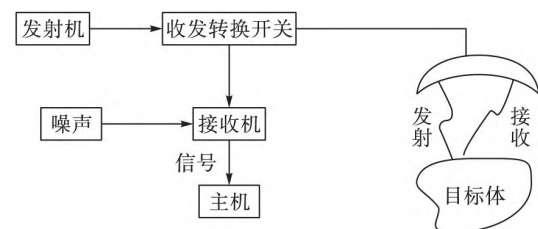


图 1 雷达工作原理示意

Fig.1 Schematic diagram of radar operating principle

收稿日期: 2023-09-01

修回日期: 2023-10-10

作者简介: 肖 洋(1987, 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事隧道及地下工程相关工作, E-mail: 409200233@qq.com.

雷达测试结果可用反射剖面图表示,如图2所示。横坐标表示雷达天线在隧道掌子面的位置,纵坐标表示电磁波从发射天线发出经掌子面前方地质体反射,并最终被接收天线接收所需的时间。雷达波形能清楚地显示地质体的位置、形态。

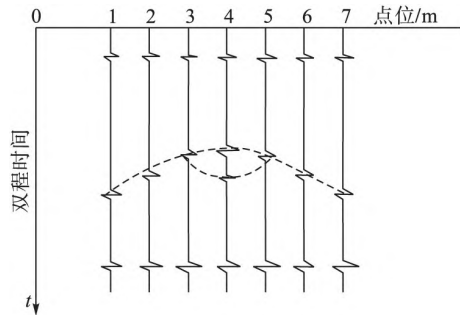


图2 雷达反射剖面示意

Fig.2 Schematic diagram of radar reflection profile

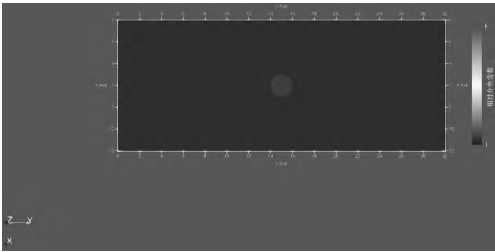


图3 溶洞模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of karst cave model

表1 介质的电磁参数

Table 1 Electromagnetic parameters of medium

介质类型	相对介电常数	电导率	相对磁导率
石灰岩	7.0	$1 \times 10^{-7}$	1.0
水	81.0	0.01	1.0
空气	1.0	0	1.0
黏土	15.0	0.001	1.0

3 岩溶典型图谱特征

在隧道施工中,对隧道危害较大,易引发涌水涌泥的主要是溶洞,针对不同类型的溶洞,利用时域有限差分法进行正演模拟,分析其雷达图像特征,建立岩溶雷达图谱,为后期图像识别提供依据。

为取得较好的模拟效果,模型参数的设置与实测隧道基本相符。模型尺寸大小为12 m×30 m,时间步长 $\Delta x = \Delta y = 0.2$  m,时窗为500 ns,网格大小设置为 $dx = dy = 0.005$  m,波源采用雷达子波,天线频率设置为100 MHz,采用PML作为边界吸收条件。模型如图3所示,空洞的中心点位于掌子面前方15 m位置处,半径设置为1.5 m。模拟所用不同介质的电磁参数见表1。

根据溶洞的充填物类型,分别设置溶洞充填介质为空气、水、黏土,对应空溶洞、充水溶洞、充填黏土溶洞,三类溶洞的正演模拟结果如图4所示。由图4可得出不同类型溶洞的雷达波谱特征<sup>[6-8]</sup>。

(1) 无充填型溶洞。由于内部没有填充物,电磁波在溶洞内部传播速度快,反射频率高;空气与围岩的介电常数相差较大,因此电磁波在无充填型溶洞的顶底部反射明显,反射波规律性较好,呈典型的孤立反射信号,同相轴弧状连续;空气的相对介电常数小于灰岩,因此顶界面反射波振幅与入射波相同,底界面反射波振幅与入射波相反。

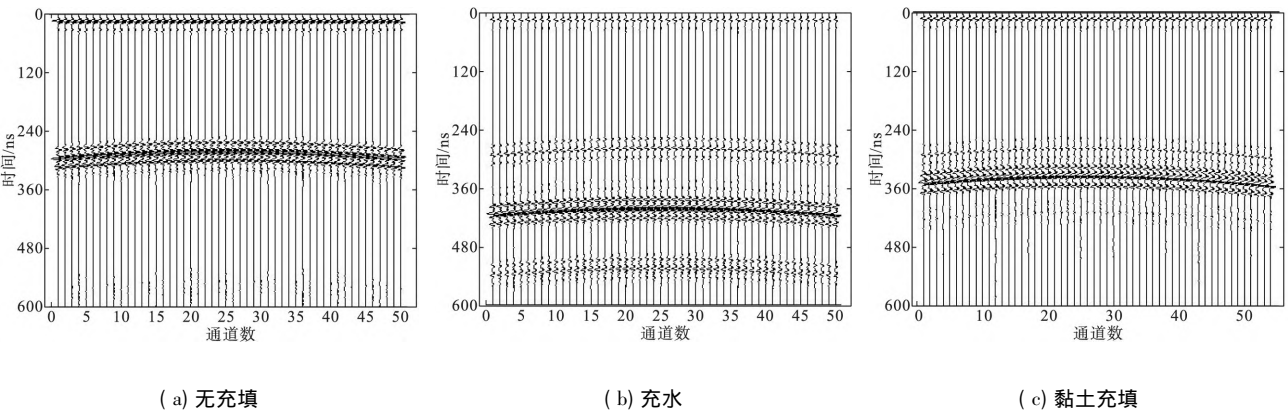


图4 不同类型溶洞正演模拟结果

Fig.4 Forward simulation results of different types of karst caves

(2) 充水溶洞。由于水会使电磁波能量迅速衰减,高频部分被吸收,大部分反射波为低频波,出现一定规律的多次反射现象,相位异常明显;水与围岩的介电常数相差较大,因此电磁波在溶洞的顶部反射明显,反射波规律性较好,呈典型的孤立反射信号,同相轴弧状连续,底界面波形不明显;水的相对介电常数大于灰岩,因此顶界面反射波振幅与入射波相反。

(3) 黏土充填溶洞。由于黏土会使电磁波能量迅速衰减,高频部分被吸收,大部分反射波为低频波,出现一定规律的多次反射现象;黏土与围岩的介电常数相差较大,因此电磁波在溶洞的顶底部反射明显,反射波规律性较好,呈典型的孤立反射信号,同相轴弧状连续;黏土的相对介电常数大于灰岩,因此顶界面反射波振幅与入射波相反。

#### 4 雷达图谱智能识别

深度学习方法能够主动学习样本数据的个体特征,可以有效克服检测精度低、复杂目标体识别困难、识别流程繁琐等传统雷达图像识别方法的不足。2014年R Girshick等提出深度卷积神经网络RCNN后,陆续出现了如Fast R-CNN、Faster R-CNN、SSD、YOLO等一系列优秀的图像识别算法。其中,Faster R-CNN算法以其优越的检测性能在目标检测领域广泛应用<sup>[9,10]</sup>,其网络架构如图5所示。本文以Faster R-CNN算法为研究模型,以地质雷达图谱中的溶洞为识别研究目标,制作溶洞标注的数据集,并利用数据增强等优化方法,提高模型识别准确率。

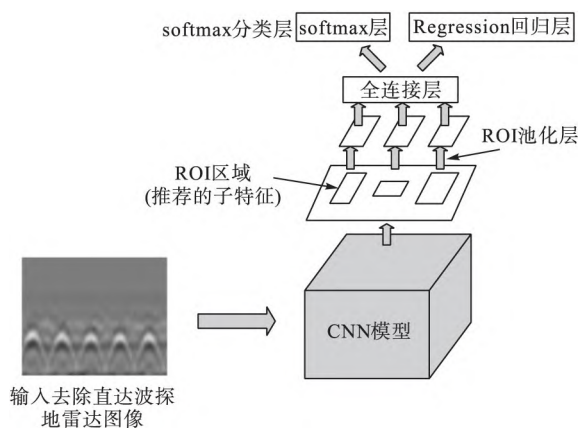


图5 Faster R-CNN 网络架构

Fig.5 Faster R-CNN network architecture

由于现场实测的岩溶雷达图像特征不明显,故采用监督学习。即根据前述典型溶洞雷达波谱特征对经过专家二次复核的典型岩溶雷达图像进行人工标注,形成训练数据集和测试数据集。为了防止数据量过小导致模型出现过拟合,采用水平翻转、随机噪声、高斯模糊、随机擦除等图像数据增强方法,以增大数据集<sup>[11]</sup>,具体网络训练流程如图6所示。

#### 5 工程应用

叙毕铁路(川滇段)起于泸州市叙永县,经宜宾市兴文县、云南省昭通市威信县,止于贵州省毕节市。全长151.84 km,桥隧占比89%。由于横跨川滇黔三省,铁路全线岩溶强烈发育,易发生涌水、突泥等灾害。

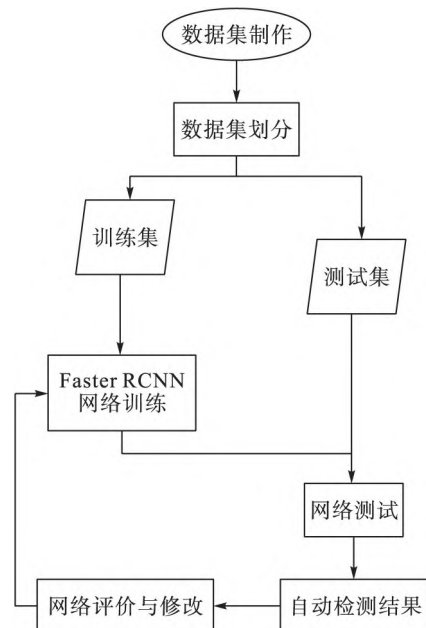


图6 网络训练流程

Fig.6 Network training process

叙毕铁路罗家湾隧址区属剥蚀中低山地貌,地形连绵起伏,沟壑纵横,隧区绝对高程1 509~1 710 m,相对高差50~200 m,自然斜坡10°~70°。隧道穿越地层为二叠系( $P_1q+m$ )灰岩,中厚—厚层状,钙质胶结,节理裂隙发育。根据地表调查,区内溶蚀现象发育,多见溶槽、溶蚀裂隙、溶蚀洼地、暗河口等岩溶形式,岩溶强烈发育。地下水发育,水质无侵蚀性。现场对D1K276+503开展地质雷达探测,采用SIR-4000型地质雷达,地质雷达探测成果如图7所示。

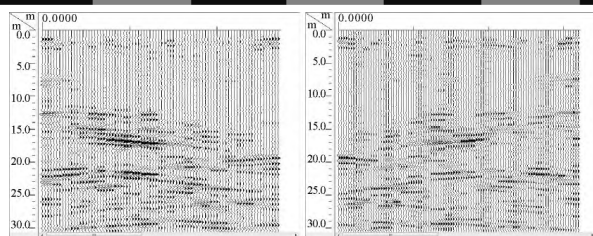


图7 地质雷达探测成果

Fig.7 Detection results of ground penetrating radar

基于前述卷积神经网络模型,对地质雷达探测成果图进行智能识别,识别结果如图8所示。由图8可以看出,该模型在对两次不同方向探测结果的识别中,均认为掌子面前方12~24 m即里程D1K276+491~D1K276+473范围内存在异常,并判定为黏土充填型溶洞,该识别结果与人工判别结果基本一致,但自动识别结果不受解译人员主观经验限制,能够实现物探异常的快速解译。

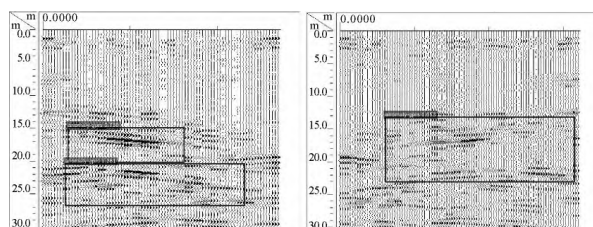


图8 地质雷达探测成果识别结果

Fig.8 Identification results of detection results of ground penetrating radar

开挖验证:罗家湾隧道D1K276+485里程位置,掌子面开挖揭示溶洞,泥质充填;地质雷达法揭示D1K276+491~D1K276+473段软弱夹层发育,岩溶强烈发育(溶洞、溶腔等)泥质充填,具有突水、

突泥风险,与实际情况相吻合。现场揭露照片如图9所示。



图9 罗家湾隧道D1K276+485现场揭露照片

Fig.9 Site picture of Luojiawan Tunnel (D1K276+485)

## 6 结论

基于雷达工作原理,模拟了3种不同充填介质的典型岩溶,得出不同类型岩溶的雷达图谱特征,利用Faster R-CNN算法进行图像识别,并在叙毕铁路中进行了应用。得出主要结论如下:

(1) 地质雷达能有效预报隧道岩溶,现场测试便捷,预报准确率高。不同类型岩溶的地质雷达波谱特征较为明显,是基于卷积神经网络进行图像识别的基础。

(2) 基于Faster R-CNN算法建立的模型实现了典型溶洞地质雷达图像的智能识别,在叙毕铁路罗家湾隧道中得到了成功应用。

(3) 由于隧道岩溶规模、位置、形态的复杂性及测试环境的干扰性等,岩溶地质雷达图像识别算法还需进一步优化,且应该通过大量工程应用进行验证,同时不断扩充典型图谱数据库,才能不断提升识别准确率。

## 参考文献

### References

- [1]何发亮,吴德胜,郭如军,等.隧道施工地质灾害与致灾构造及其致灾模式[M].成都:西南交通大学出版社,2015.  
HE Faliang, WU Desheng, GUO Rujun, et al. Geological Hazard and Disaster-Causing Structure and Its Disaster-Causing Mode during the Construction of Tunnel [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2015.
- [2]邬立,万军伟,陈刚,等.宜万铁路野三关隧道“8.5”突水事故成因分析[J].中国岩溶,2009,28(2):212-218.  
WU Li, WAN Junwei, CHEN Gang, et al. Cause of the “8.5” Water Burst Incident at Yesanguan Tunnel along the Yi-Wan Railway [J]. Carsologica Sinica, 2009, 28(2): 212-218.
- [3]王玉琴,高树全.综合超前地质预报技术在贵南铁路岩溶隧道中的应用[J].工程地球物理学报,2021,18(4):538-546.  
WANG Yuqin, GAO Shuquan. Application of Comprehensive Geological Prediction Technology in Karst Tunnel of Guiyang-Nanning Railway [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2021, 18(4): 538-546.
- [4]高树全,王玉琴,牟元存.岩溶隧道地质雷达超前地质预报及图像分析[J].工程地球物理学报,2021,18(5):642-646.

- GAO Shuquan ,WANG Yuqin ,MOU Yuancun.Advanced Radar Geological Prediction of Karst Tunnels and Their Image Analysis [J].Chinese Journal of Engineering Geophysics 2021 18( 5) : 642-646.
- [5]王 涛.基于并行计算的地质雷达正演模拟及典型岩溶洼地地质特征智能识别[D].北京: 北京交通大学 2019.
- WANG Tao.Ground Penetrating Radar Forward Modeling Based on Parallel Computing and Intelligent Identification of Typical Karst Depression Features [D].Beijing: Beijing Jiaotong University 2019.
- [6]郝 彤 赵 杰.面向双曲线形态的探地雷达图像识别技术综述[J].电子学报 2019 47( 6) : 1366-1372.
- HAO Tong ZHAO Jie.A Brief Review of the Hyperbola Signature Recognition Techniques for Ground Penetrating Radar [J].Acta Electronica Sinica 2019 47( 6) : 1366-1372.
- [7]李晨博.岩溶隧道探地雷达超前地质预报的智能解译研究[D].成都: 成都理工大学 2021.
- LI Chenbo.Research on Intelligent Interpretation of Advanced Geological Forecast by Ground Penetrating Radar in Karst Tunnel [D].Chengdu: Chengdu University of Technology 2021.
- [8]薛丽君.基于探地雷达 B-scan 图像双曲线特征的目标检测与定位研究[D].哈尔滨: 哈尔滨工业大学 2021.
- XUE Lijun.Research on Target Detection and Location Based on Hyperbolic-Shaped Signatures in GPR B-Scan Image [D].Harbin: Harbin Institute of Technology 2021.
- [9]李聪聪.隧道主要不良地质体探地雷达图像智能识别方法研究[D].济南: 山东大学 2022.
- LI Congcong.The Research on Intelligent Recognition of Ground Penetrating Radar Image of Main Adverse Geological Bodies in Tunnel [D].Jinan: Shandong University 2022.
- [10]陈培帅 袁 青 张子平 等.基于卷积神经网络的隧道富水破碎带地质超前预报图像解译方法[J].应用基础与工程科学学报 2022 30( 1) : 196-207.
- CHEN Peishuai ,YUAN Qing ZHANG Ziping ,et al.Image Interpretation Method for Geological Advance Prediction in Water-Rich Fracture Zone of Tunnel Based on Convolutional Neural Network [J].Journal of Basic Science and Engineering 2022 30( 1) : 196-207.
- [11]杨夏青.基于深度学习的雷达图像目标识别与跟踪方法研究[D].成都: 电子科技大学 2022.
- YANG Xiaqing.Research on the Methods of Radar Image Target Recognition and Tracking Based on Deep Learning [D].Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China 2022.

## Application of Ground Penetrating Radar Method in Karst Tunnel Detection and Intelligent Identification of Spectrum

XIAO Yang MENG Lu LU Song WANG Xu

( China Railway Southwest Research Institute Co.,Ltd., Chengdu 611731)

**Abstract:** The construction of the karst tunnel is highly likely to encounter geological disasters such as karst water gushing and mud bursting ,seriously endangering the safety of construction personnel. Ground penetrating radar ( GPR) has been widely used in advanced geological prediction of karst tunnels due to its advantages of high resolution ,fast detection and non-destructive property.However ,due to the complexity of karst morphology ,diversity of filling materials and difference in interpretation by geophysical personnel ,it is difficult to effectively and correctly interpret radar images of unfavorable geology.In view of this ,instance analysis is performed based on the Xuyong-Bijie Railway Tunnel Project ,radar forward modeling is used to obtain radar spectrum features of different types of karst ,and intelligent recognition of their features is carried out based on convolutional neural network ,which helps to achieve intelligent and accurate prediction of karst geological disasters in front of the tunnel face ,and provides technical support for the safety of karst tunnel construction.

**Keywords:** Karst tunnel; Ground penetrating radar ( GPR) ; Karst cave; Image recognition