doi: 10.11720/wtyht.2021.0266

苏宝,刘晓丽,卫晓波,等. 井间超高密度电阻率法溶洞探测研究[J]. 物探与化探, 2021, 45(5):1354-1358. http://doi.org/10.11720/wtyht. 2021.0266

Su B, Liu X L, Wei X B, et al. Karst cave prospecting using cross-hole ultra-high density resistivity method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(5):1354-1358. http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.0266

# 井间超高密度电阻率法溶洞探测研究

苏宝1,刘晓丽<sup>2,3</sup>,卫晓波<sup>4</sup>,高歌<sup>5</sup>,王云鹏<sup>5</sup>

(1.广东珠三角城际轨道交通有限公司,广东广州 510335; 2. 清华大学 土木水利学院,北京 100084; 3. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室,北京 100084; 4. 广州地铁集团有限 公司,广东广州 510330; 5. 中国石油华北油田分公司 勘探开发研究院,河北 任丘 062552)

摘要:利用井间超高密度电阻率法对广州地铁某在建段浅层隐伏岩溶发育情况进行了探测实验。结果表明:利用 现有勘察孔进行井间超高密度电阻率法探测溶洞是可行的,通过正反演计算获得的井间电阻率分布特征能直观给 出溶洞在横向、纵向上的分布范围,但是对溶洞连通性不易区分,深度偏差为电极距大小。探测时,电法孔孔深一 致,孔深和孔间距比大于1.5倍,电极间距1~2m。

关键词:城市地质;井间电法;超高密度电法;溶洞

中图分类号: P631 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2021)05-1354-05

### 0 引言

我国很多城市地下发育灰岩,当城市地铁建设 采用盾构施工时,由于土层和灰岩层的施工参数不 同,不仅造成盾构施工难度加大,施工成本增加,而 且由于灰岩中溶洞发育,常发生盾构机倾伏、被埋等 施工安全事故,所以在轨道交通建设中,用地质测 绘、遥感技术、静力触探、同位素示踪、勘察孔、工程 物探等技术对地铁穿越的区域进行勘察,具有重要 的工程意义和价值。其中,勘察孔是最实用、最直 观、精度最高的探测溶洞方法,但勘察孔只能得到孔 深范围内的岩溶发育情况,若要全面了解盾构机穿 越范围内的隐伏岩溶,需要加密勘察孔,这样就大大 增加了勘察成本,因此,工程物探成为了勘查隐伏岩 溶的首选方法。工程物探主要包括:高密度电阻率 法、探地雷达、跨孔电磁法、地面地震反射波法、跨孔 地震法和微重力法,其中,地面地震反射波法、跨孔 地震法、微重力法分辨率低,受环境影响大,主要用 于宏观上土层与灰岩分界面、岩溶发育带的探测;探 地雷达、跨孔电磁法的工作原理均为电磁波反射,由

于电磁波能量受地层中含水程度影响大<sup>[1]</sup>,导致探测垂直、水平距离有限,通常不超过10m;而高密度电阻率法由于电极距通常≥5m,一般只能探测直径超过5m的溶洞。

本文从降低探测成本出发,基于现有勘察孔,用 井间超高密度电阻率法对广州某地铁线规划前的隐 伏岩溶进行了探测,避免了隐伏岩溶对施工的影响, 同时为同类工程提供借鉴。

#### 1 探测原理

超高密度电阻率法勘探仍然基于在人工直流电 场的作用下,地表的电场分布与地下岩土介质的电 阻率分布相关的基本原理<sup>[2-4]</sup>,主要特点如下:

采用 64 电极排列方式,电极间距 1~2 m。数据 采集时,程序自动将每个排列的 64 个电极分为奇数 组和偶数组,每组各 32 个电极;在 2 组电极中各选 取 1 个作为供电电极 A 和 B,在一次通电过程中同 时测量其他电极相对于某一电极 M 的电位差,得到 61 个电位差(MN<sub>1</sub>、MN<sub>2</sub>、MN<sub>3</sub>、……、MN<sub>60</sub>、MN<sub>61</sub>)数 据(图 1)。奇数组 32 个电极和偶数组 32 个电极互

#### 收稿日期: 2021-05-12; 修回日期: 2021-06-21

第一作者:苏宝(1978-),男,硕士,高级工程师,从事轨道交通建设技术研究及管理工作。Email:youguyema@139.com

基金项目:国家重点研发项目(2018YFC1504801);国家自然科学基金重大项目(41941019);国家自然科学基金面上项目(52079068)



图1 超高密度电阻率法电极布置示意

Fig. 1 Electrode layout of ultra-density resistivity method

相配对做供电电极,即做一个排列就有 32×32=1024 次供断电过程,每次供电可同时采集 61 个电 位差数据,总数据量应为 32×32×61=62 464 个。

与高密度电阻率法相比,超高密度电阻率法能 一次布极、软件调控,实现多层次、多角度测试,采集 的数据不仅具有丰富性、一致性,而且采集速度提高 上百倍,大大提高了工作效率。其丰富性提高了反 演结果的准确性和可靠性,一致性则避免了在高密 度电法的数据采集中,有些偏重于横向分辨率,有些 偏重于纵向分辨率,导致在同一地点采集的数据所 产生的反演结果不同的缺点,加上电极间距1~2m, 可以进行更加精细的数据处理网格剖分,提高了电 性异常体的分辨率,能更加真实反映出地下不同电 性异常体的位置和大小。

2 溶洞探测实例

#### 2.1 布极方式

在广州某地铁线规划前采用超高度电阻率法对 清布站进行了隐伏岩溶探测,以避免隐伏岩溶对施 工及运营的影响<sup>[5-7]</sup>。超高密度电法布极方式分为 地面<sup>[8]</sup>、井—地及井—井3种形式,本次隐伏岩溶探 测使用了井间超高密度电法,在2个勘察孔中分别 放入32个电极,观测两孔间的电流和电压数据,电 极距1m(图2)。

# 2.2 数据采集

为了节约探测成本,利用 12 个勘察孔,在工区 内布置了 21 条井间超高密度电法测线,孔深和孔间 距比大于 1.5 倍(图 3)<sup>[9]</sup>,数据采集使用重庆奔腾 数控技术研究所研发的 WDJD-4 型多功能数字直流 激电仪。

#### 2.3 数据处理

每组井间电阻率剖面均以左侧勘察孔的 32#电 极所在点为原点(0,0),以 2 个勘察孔所在的直线 为 x 轴,左侧勘察孔沿深度方向为 y 轴,建立直角坐 标系统;对所采集的数据开展电阻率正反演计算,获 取井间介质的电阻率特征差异;对采集的原始数据 进行去除异常点、设置阻尼系数、网格剖分、拟合误 差阈值、正演模拟处理,并在最小二乘法反演中增加 组合反演、加强反演等相关工作,最终得到精度较高



图 2 井间超高密度电法电极布置

# Fig. 2 Electrode layout of cross-hole ultra-density resistivity method

的二维成果剖面[9-12]。

1) 电法正演基本方程:

 $\nabla \cdot (\sigma \cdot \nabla U) = -I\delta(r - r_c); r, r_c \in \Omega_c$  (1) 式中: $\sigma$  为电导率,I 为电场强度, $\delta$  为狄拉克函数, $r_c$ 为电极位置。由式(1)可以得到任意电极处的电场 强度分布特征。

2) 电法反演基本方程:

$$\frac{\partial \Phi(m)}{\partial m} = \frac{\partial \Phi_d(m)}{\partial m} + \lambda \frac{\partial \Phi_m(m)}{\partial m} = 0 ; \quad (2)$$
$$\Phi_d(m) = \| W_d [d_0 - d(m)] \|^2,$$
$$\Phi_m(m) = \| W_m(m - m_0) \|^2_{\circ}$$

式中:m 为电阻率; $\lambda$  为平衡因子;d(m)和  $d_0$  分别 为正演和实测的电场数据; $m_0$  为反演初始模型; $W_d$ 和  $W_m$  为加权因子,用来控制迭代过程中对模型的 修正量,其数值大小根据实测数据的信噪比确定,一 般取 0.005~0.2。

超高密度电阻率数据反演的具体步骤如下:首 先,设一个电阻率的理论分布模型;其次,利用理论 模型进行正演计算,得到理论电阻率数值;再次,计 算实测数据与理论数值之间的差值后,根据不同的 算法把差值归算到剖分的网格中去,以此来校正理 论电阻率模型,并得到一个新的理论电阻率分布模





型;最后,利用这个新的理论模型做正演计算,重复 上述步骤,不断迭代拟合,直至拟合均方根误差足够 小或满足要求时,结束反演。此时的理论电阻率分 布模型被认为是最终的反演结果。

#### 2.4 结果分析

以其中3条测线为例,将其反演剖面和勘察孔 所获得的地层柱状图进行对比。3条测线所对应的 勘察孔参数见表1。

图 4 为 540 孔~180 孔超高密度电法反演电阻 率剖面、地质推断剖面及地层柱状图。由图 4 可知: ①根据 180 勘察孔地层柱状图,在 28.7 m 处见灰 岩,但有裂隙发育,30.0~34.0m、34.7~40.0m为溶

表1	井间	1超高密	度电阻	1率法	勘察孔	毛参数
Table	e 1	Parame	ters of	resist	ivity	holes

			-	
剖面 序号	对应勘察孔 ( 电缆 I—电缆 Ⅱ)	电缆 I 孔深/m	电缆 Ⅱ 孔深/m	孔间距 /m
1	540—180	40.0	42.5	19.47
2	542—186	45.0	39.0	11.98
3	541—539	39.0	38.0	14.73
电极间距:1m		1	采样间隔:2:	3

洞,溶洞全充填,主要充填物为软塑状黏土,40.0~42.5m为有裂隙发育的灰岩;②根据反演电阻率剖面,并间超高密度电法对溶洞造成的低阻异常反映明显,29.0~38.0m有溶洞,但反演解释的溶洞顶上升偏差1.0m,洞底上升偏差2.0m,但对多层溶洞的



图 4 540 孔~180 孔反演电阻率剖面、地层柱状图及地质推断剖面 Fig. 4 Inversion resistivity profile, stratigraphic histogram and geological inference profile

between No. 540 hole and No. 180 hole

45 卷

分辨率低;③小于1.0m的灰岩夹层分辨不出来。

图 5 为 542 孔~186 孔超高密度电法反演电阻 率剖面、地质推断剖面及地层柱状图。由图 5 可知: ①根据 186 勘察孔地层柱状图,在 24.5 m 处见灰 岩,27.0~30.2 m、31.3~33.9 m、35.2~37.1 m 有溶 洞。②根据反演电阻率剖面图所示,28.0~35.5 m 有 溶洞,因为 186 孔深度不够,溶洞造成的低阻异常较 明显;但反演解释的溶洞顶下降偏差 1.0 m,同时造成 溶洞底上升偏差1.6m。③对多层溶洞的分辨率低。

图 6 为 541 孔~539 孔超高密度电法反演电阻 率剖面、地质推断剖面及地层柱状图。由图 6 可知: ①根据 539 勘察孔地层柱状图,在 23.0 m 处见灰 岩,24.7~27.0 m、28.5~30.0 m、31.8~34.3 m 有溶 洞;②根据反演电阻率剖面,23.5~34.5 m 有溶洞, 但反演解释的溶洞顶上升偏差 1.2 m,溶洞底下降 偏差 0.2 m。



图 5 542 孔~186 孔反演电阻率剖面、地层柱状图及地质推断剖面 Fig. 5 Inversion resistivity profile, stratigraphic histogram and geological inference profile

between No. 542 hole and No. 186 hole



图 6 541 孔~539 孔反演电阻率剖面、地层柱状图及地质推断剖面 Fig. 6 Inversion resistivity profile, stratigraphic histogram and geological inference profile between No. 541 hole and No. 539 hole

# 3 结语

1)利用勘察孔进行井间超高密度电法溶洞探测是可行的,且节约了钻孔费用。超高密度电法对充填溶洞探测灵敏度较高,对高、低阻异常区判定较为有效,数据重现性好,通过正反演计算获取的井间 电阻率分布特征能直观地给出溶洞在横向、纵向上的分布范围,丰富了溶洞的探测手段。

2)根据溶洞与电阻率之间的对应关系能圈定 溶洞发育范围,但对于直径小于电极距的溶洞及岩 石夹层,容易被"掩盖";对溶洞的连通性等还不易 区分。

3)总体上看,反演电阻率剖面对井间岩面起 伏、溶洞发育部位均有较好的定量解释,深度偏差基 本上为电极距大小。

4) 探测时,电法孔最好取同样孔深,避免探测 盲区或造成单点异常,影响反演准确性;另外,孔深 和孔间距之比应大于1.5倍,确保探测效果。

#### 参考文献(References):

[1] 郭贵安,魏柏林. 井间电磁波 CT 技术在溶洞探测中的应用 [J]. 华南地震,1999,4(19):28-34.

Guo G A, Wei B L. Prospecting corroded cavities using cross-section electromagnetic tomographic technique between boreholes [J]. South China Journal of Seismology, 1999, 4(19): 28-34.

[2] 严加永,孟贵祥,吕庆田,等.高密度电法的时展与展望[J].物 探与化探,2012,36(4):576-584.

Yan J Y, Meng G X, Lyu Q T, et al. The progress and prospect of the electrical resistivity imaging survey [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(4): 576–584.

[3] 刘宏岳. 直流高密度电法在浅海工程勘察中的应用[J]. 物探 与化探,2013,37(4):756-760.

Liu H Y. The application of DC resistivity to shallow marine engineering exploration [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(4): 756-760.

[4] 蔡运胜. 高密度电法探测地下牡蛎礁(滩)的实验[J]. 物探与 化探,2009,33(6):635-637.

Cai Y S. The experimental application of the high density electric

method to the detection of underground oyster bioherm [J]. Geophysical ang Geochemical Exploration, 2009, 33(6): 635-637.

- [5] 孟娟,颜庭成,陈晓飞,等.双线隧道盾构机侧穿时古石塔地基 及塔身变形规律研究[J].河南科学,2020,38(4):626-631.
   Meng J, Yan T C, Chen X F, et al. Deformation of the foundation and tower body of ancient tower when double-line shield tunneling beside the tower [J]. Henan Science, 2020, 38(4): 626-631.
- [6] 吕根根,张晓平,刘泉声,等. TBM 掘进速度预测模型研究
  [J].河南科学,2019,37(8):1289-1295.
  Lyu G G, Zhang X P, Liu Q S, et al. Prediction models of the TBM penetration rate [J]. Henan Science, 2019, 37(8): 1289-1295.
- [7] 张兵. 基于改进信息熵值分析的 TBM 掘进参数研究[J]. 河南 科学,2019,37(5):785-791.
   Zhang B. TBM driving parameters based on improved information entropy analysis [J]. Henan Science, 2019, 37(5): 785-791.
- [8] 李俊杰,何建设,严家斌,等.超高密度电阻率在隐伏断层探测中的应用[J].物探与化探,2016,40(3):624-628.
  Li J J, He J S, Yan J B, et al. The application of ultra-density resistivity method to detection of buried fault [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(3): 624-628.
- [9] 李红立,张华,汪传斌. 跨孔超高密度电阻率法在花岗岩球状风 化体勘探中的试验研究[J]. 工程勘察,2010,38(8):88-92.
  Li H L, Zhang H, Wang C B. Experimental study on the crosshole ultra-density resistivity method used in the exploration for the spheric lightly-weathered granite [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010, 38(8): 88-92.
- [10] 刘申芬,李天成,慕洪涛. 三维井地电阻率有限元数值模拟及 反演[J]. 物探与化探,2009,33(1):88-90.
  Liu S F, Li T C, Mu H T. The numerical modeling and inversion of 3D borehole-surface resistivity finite element [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2009, 33(1): 88-90.
- [11] 王志刚,何展翔,刘昱. 井地直流电法三维数值模拟及异常规 律研究[J]. 工程地球物理学报,2006,3(2):87-92.
  Wang Z G, He Z X, Liu Y. Research of three-dimensional modeling and anomalous rule on borehole-ground DC method [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2006, 3(2): 87-92.
- [12] 余鹏洲,张志勇,黄临平,等.带井观测高密度电阻率法 2.5 维
   非结构化网格反演[J].地球物理学进展,2019,34(4):1687-1693.

Yu P Z, Zhang Z Y, Huang L P, et al. 2.5D inversion of borehole and surface multi-electrode DC data using unstructured mesh [J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(4): 1687 - 1693.

## Karst cave prospecting using cross-hole ultra-high density resistivity method

SU Bao<sup>1</sup>, LIU Xiao-Li<sup>2,3</sup>, WEI Xiao-Bo<sup>4</sup>, GAO Ge<sup>5</sup>, WANG Yun-Peng<sup>5</sup>

(1. Guangdong Pearl River Delta Intercity Rail Transit Co., Ltd., Guangzhou 510335, China; 2. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Guangzhou Metro Group Co. Ltd., Guangzhou 510330, China; 5. Research Institute of Exploration and Development, Huabei Oilfield Company, PetroChina, Renqiu 062552, China)