doi: 10.11720/wtyht.2022.1467

王亮,龙霞,王婷婷,等.等值反磁通瞬变电磁法在城市浅层空洞探测中的应用[J].物探与化探,2022,46(5):1289-1295. http://doi.org/10. 11720/wtyht.2022.1467

Wang L, Long X, Wang T T, et al. Application of the opposing-coils transient electromagnetic method in detection of urban shallow cavities [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(5): 1289-1295. http://doi.org/10.11720/wtyht. 2022.1467

等值反磁通瞬变电磁法在城市浅层空洞 探测中的应用

王亮1,龙霞1,王婷婷2,席振铢2,陈兴朋1,钟明峰2,董志强1

(1. 湖南五维地质科技有限公司,湖南长沙 410083; 2. 中南大学 地球科学与信息物理学院,湖南 长沙 410083)

摘要:快速高效地查明城市中引起地面塌陷的隐患,对于城市建设、灾害防护及保护人民财产具有重要意义。将 城市浅层地面塌陷归纳为3类:溶蚀作用造成的空洞塌陷、无序抽排地下水造成的土洞塌陷以及人防工程老旧空 洞塌陷,通过正演计算,研究分析了3类空洞地质模型的等值反磁通瞬变电磁响应规律,以及各模型分别在高阻和 低阻覆盖层下的衰减曲线的变化特征;利用岩石的瞬变电磁响应变化率分析了各类空洞地质模型的电性特征。正 演结果表明:溶蚀空洞模型和土洞模型与围岩相比呈低阻特性,人防空洞模型呈高阻特性;3种模型的瞬变电磁响 应变化率表明等值反磁通技术对各类空洞隐患均具有较好的识别能力。将等值反磁通瞬变电磁法应用于昆明、郑 州等地的3类空洞探测,结果证明该方法对城市浅部空洞探测是行之有效的。

关键词:城市地质;等值反磁通瞬变电磁;浅层空洞;地面塌陷

中图分类号: P631 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2022)05-1289-07

0 引言

随着城镇化建设进程的加快,城市地下空间开 发中的地质问题凸显,尤其地面塌陷引起的地质灾 害问题最为严重。地面塌陷形成的原因有多种,有 因地下溶蚀严重发育形成的溶洞引起的,有战备挖 掘的防空洞因老失修引起的,有因地下水的无序抽 排造成土壤流失形成土洞造成的。任何一种造成地 面塌陷的原因都可以归结为地下存在空洞问题,因 此对空洞的探测是对城市地面塌陷的提前排查。

目前探测空洞的物探方法有很多种,如探地雷达、地震反射、地震映像、主动源面波、微动、高密度 电阻率法、瞬变电磁法等^[1-6]。探地雷达对埋深 5 m 内的空洞隐患探测效果较好^[1,5],但对埋深超过 5 m 的空洞探测成功案例较少;地震反射、地震映像、主 动源面波等主动源地震方法在城市中常受到严重的 人文干扰,测线布放困难,施工不便;微动观测时间 较长,受台站观测装置的限制,对浅部空洞分辨欠 佳;因城市地面被建筑、植被、硬化路面高度覆盖而 造成接地条件不利以及展布空间受限,制约了高密 度电法的大规模应用;瞬变电磁法^[7-10]可免于接地 困扰,且可以采用小回线装置以适应受限空间的探 测,然而传统小回线瞬变电磁法因收发互感严重而 易出现浅层探测盲区。等值反磁通瞬变电磁法 (OCTEM)^[10-12]解决了瞬变电磁法早期信号受互感 影响的问题,避免了浅层探测盲区,该方法采用接收 一体的小回线装置,不受场地限制,发送和接收在各 测点上均保持一致,且施工便利,工作效率高,在城 市以及工程探测中越来越受重视^[14-16]。

本文针对造成塌陷隐患的几类空洞特点进行地 球物理建模,概化空洞隐患为3种模型,分别为溶蚀 空洞模型、松散的土洞模型以及人防空洞模型(无 钢筋型)。基于等值反磁通瞬变电磁法的原理,对

收稿日期: 2021-08-24; 修回日期: 2022-01-11

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC0303104)

第一作者:王亮(1989-),男,硕士,从事电磁法勘探应用与正反演算法研究工作。Email: 353240527@ qq. com

以上3种类型空洞模型的电性差异特征进行分析,研究了3种空洞模型的瞬变电磁响应规律,对 比了无覆盖层、高阻覆盖层以及低覆盖层条件下 各类空洞的瞬变电磁响应规律。最后,应用等值 反磁通瞬变电磁方法在多地进行实际空洞探测, 结合钻孔资料分析,发现该方法对各类空洞探测 均有效果,证明了等值反磁通瞬变电磁探测城市 地下空洞的有效性。

1 方法理论

瞬变电磁法采用不接地回线源向地下发送一次 阶跃电磁场,通过探测地下介质因激励源关断后产 生的二次感应场随时间的变化响应,来探测地下介 质的电性特征。因瞬变电磁法发射源与接收线圈之 间的互感造成早期道数据失真,形成浅部勘探"盲 区",对浅部的空洞塌陷隐患十分不利。与传统瞬 变电磁法不同,等值反磁通瞬变电磁法(OCTEM)采 用双线圈源进行发送,双线圈源中同时供入大小相 同方向相反的电流 I,在电流关断后进行测量。接 收线圈处的磁力线为水平方向,在关断前后,其垂直 磁场为0,在该位置平面上磁通量为0,而在其他平 面上则存在垂直磁场;零磁通面的形成,对任意时刻 都可以消除一次场关断的影响,通过在零磁通位置 进行测量,能够消除"盲区",达到探测浅层地下空 间目的。图1中为中心回线装置的等值反磁通瞬变 电磁法的布设方式。



图 1 等值反磁通瞬变电磁法中心回线装置示意 Fig. 1 OCTEM device Schematic

对等值反磁通进行场源分析,建立以水平电流 环中心为原点的柱坐标系(单位向量分别为 u_{ρ} 、 u_{θ} 、 u_{z}),采用矢量叠加原理得到等值反磁通瞬变电磁法 一次场的计算公式^[12]:

$$B_{\text{primary}}(\rho, z) = [B_{\rho}(\rho, z - d) + B_{\rho}(\rho, z + d)]u_{\rho} + [B_{z}(\rho, z - d) - B_{z}(\rho, z + d)]u_{z} \circ$$
(1)

式中:d为发射线圈与接收线圈之间的距离;B为磁 感应强度。同理,等值反磁通瞬变电磁法二次场也 可以通过叠加原理进行计算,计算方式参照 Coggon^[17]的算法,从 Maxwell 旋度方程出发:

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \varepsilon \, \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} + \sigma \boldsymbol{E} + J_e, \qquad (2)$$

考虑边界条件:

$$n \times (\boldsymbol{H}^{1} - \boldsymbol{H}^{2}) \mid_{\Gamma} = 0 , \qquad (3)$$

$$J_e = P_e \omega(t) \delta(x) \delta(y) \delta(z) , \qquad (4)$$

$$\omega(t) = \begin{cases} 0, & (t < 0) \\ 1, & (t \ge 0) \end{cases}$$
(5)

式中:H 为磁场强度;E 为电场强度; J_e 为电流密度; ε 为介电常数; μ 为磁导率;t 为时间; $\delta(x)$ 为脉冲函数; P_e 为电场或磁场的磁矩; $\omega(t)$ 为源电流波形。

利用有限元法求解磁场则可获得任意地电模型的瞬变电磁响应,其实现过程可以参考文献[18-25]。

2 地球物理模拟

2.1 地球物理模型的建立

城市地下空洞主要有3种存在形式:溶蚀作用 形成的空洞、无序抽排水土流失形成的土洞以及 人防工程砖石堆砌的空洞。溶蚀性形成的空洞一 般都存在填充物,一般为水、泥或杂填土,将此类 空洞设立为半填充空洞模型;因地下水的无序抽 排造成土壤流失形成土洞,其周边一般存在一层 较为松散的土质或者土洞表层土质含水,为此建 立边缘低阻包裹的空洞地质模型;人工砖石堆砌 的人防工程则直接简化模型为导电性较差的由素 混凝土围成的空洞。

基于上述分析建立了3种空洞模型(图2)。各 空洞模型走向无限延伸,为二维模型,空洞顶部埋深 均为15m,表面覆盖层厚度均为5m。空洞其余参 数分别为:溶蚀型空洞模型(图2a),溶洞宽2.5m, 洞内空气层高度2.5m,填充层厚度2.5m;土洞模 型(图2b),土洞宽2.5m,高2.5m,土洞周边松散土 层厚0.5m;人防空洞模型(图2c),空洞宽2.5m,高 2.5m,溶洞周围混泥土圈厚0.5m。

模型中电阻率参数设置分别如下:均匀围岩的 电阻率设为 300 Ω · m;岩溶空洞半填充物电阻率值 相对围岩值较低,设为 50 Ω · m;溶蚀边界相对围岩 电阻率值也较低,设为 80 Ω · m;空气层相对围岩 电阻率值较高,设为 2000 Ω · m;混凝土的电阻率 相对较高,设为 1500 Ω · m。在城市探测过程中,



(a) 溶蚀空洞模型







图 2 空洞模型示意

Fig. 2 Cavity Model Schematic diagram

存在道路地表有砼和绿化区中地表为填土的情况,考虑到这2种情况下的电阻率差异较大,因此 覆盖层电阻率分别设置为高阻1000Ω・m、低阻 100Ω・m。

2.2 模型的响应曲线分析

为了给实际应用提供参考,数值模拟计算的 参数与实际野外应用的情况尽量一致,采用了直 径为1m的双发射线圈,2个发射线圈的高度为 0.5m,有效发射电流为1A,对上述6个含空洞的 模型以及不含空洞的背景模型(表1)分别进行计 算。模型0为参考的背景模型,模型1~模型3为 低阻(100Ω·m)覆盖下含不同类型空洞的3种模 型,模型4~模型6为高阻(1000Ω·m)覆盖下含 不同类型空洞的3种模型。

定义岩性的瞬变电磁响应变化率为:m=模型 响应值/围岩响应值;m>1为低阻响应,m<1为高 阻响应,m接近于1时表示相比围岩背景响应变 化不大。

	表 1	计算的各模型参数值
Table 1	Mod	lel parameters to be calculated

		-					
模型 编号	空洞大小 (m×m)	空洞 类型	L∕m	$ ho_{ au ext{ iny iny ext{ iny ext{ iny ext{ iny iny ext{ iny ext{ iny ext{ iny ext{ iny iny ext{ iny ex$	$ ho_{背景}/$ (Ω・m)		
模型0	0×0	无	无	100/1000	300		
模型1	2.5×2.5	溶蚀型	2.5	100	300		
模型2	2.5×2.5	土洞	0.5	100	300		
模型3	2.5×2.5	人防空洞	0.5	100	300		
模型4	2.5×2.5	溶蚀型	2.5	1000	300		
模型5	2.5×2.5	土洞	0.5	1000	300		
模型6	2.5×2.5	人防空洞	0.5	1000	300		

注:L为填充或包围物厚度。

2.2.1 低阻覆盖下的响应对比

图 3 中,在 100 Ω · m 的覆盖层下,t<2×10⁻⁶s,溶 范围内各模型的响应曲线接近一致;t>2×10⁻⁶s,溶 蚀型空洞的响应幅值相对于土洞模型的响应明显 偏高,比参考的围岩响应幅值高出很多,相对于围 岩表现为相对低阻。土洞模型与人防空洞的响应 相比幅值较高,且比围岩背景响应幅值高,因此土 洞模型与围岩相比表现为低阻状态;人防空洞响 应幅值在 3 种空洞模型中最低,且比围岩的响应 幅值更低,相对于围岩表现为高阻状态。



图 3 100 Ω·m 覆盖层下各模型响应曲线 Fig. 3 Response of models under 100 Ω·m overlay

图 4 给出了低阻覆盖下 3 种模型的瞬变电磁响 应变化率 m 的变化曲线。溶蚀性空洞模型(模型 1)的 m≫1,最高值接近于 8,表明等值反磁通瞬变 电磁法对溶蚀性空洞响应值比较高,对溶蚀性空洞 反应比较强烈,推测实地探测效果会比较明显。土 洞模型(模型 2)的 m>1,最高值接近于 1.5,但其在 早期段就表现为低阻状态,易被误认为表层存在低 阻层;m 值的变化表明等值反磁通瞬变电磁法寻找 土洞模型类型表现为低阻异常。人防空洞模型(模 型3)的m<1,极低值接近于0.7,相对于半填充模



图 4 100 Ω · m 覆盖层下各模型的 m 曲线

Fig. 4 The *m* changes of models under $100 \,\Omega \cdot m$ overlay

型的 m 变化情况,模型 3 的 m 变化相对较弱,表明 等值反磁通瞬变电磁能够寻找人防空洞,从 m 值的 大小可知,其相对围岩表现为高阻异常。 分析响应值以及岩性的瞬变电磁响应变化率可 知,利用等值反磁通瞬变电磁法寻找3种不同原因 形成的空洞,均能取得成效,且寻找溶蚀性形成的低 阻空洞异常体更加灵敏。

2.2.2 覆盖层导电性差异的对比

图 5 中的参考响应值均为无覆盖层(覆盖层电 阻率=围岩电阻率)情况下,各空洞模型的等值反磁 通瞬变电磁响应值。

从图中可以看出,早期段响应值均与覆盖层的 电阻率有直接关系,且覆盖层阻值越低其响应幅值 越高;半填充模型的响应曲线与纯空洞模型相比,其 受覆盖层的电阻率值变化影响最小;在当前参数情 况下,t>10⁻⁵s部分表现为不受明显的影响,而土洞 模型和人防空洞模型在 t>10⁻⁴s 的部分表现为与无 覆盖层的曲线一致。



图 5 不同覆盖层的各模型响应

Fig. 5 Response of models under overlay changes

3 实例应用

3.1 溶蚀型空洞隐患探测

昆明市某轨道交通线穿过多个居民小区,工区 范围内包含多个已建区和在建区,电磁干扰严重,常 规的电法无法进行施工,因该轨道交通路线位于地 面下 30 m,探地雷达效果不明显,且因线路穿过的 城区较多,各地震方法和微动受到的影响较大,最终 选取等值反磁通瞬变电磁法进行勘察。采集仪器采 用等值反磁通瞬变电磁系统的 HPTEM-18,发射频 率为6.25 Hz,发射电流为10 A,点距5 m。工区地层 主要为第四系覆盖层和灰岩层,灰岩中岩溶发育较 多。图 6a 为原始数据曲线,其中在岩溶中心区的曲 线与图 3 中模型 1 的曲线形态相似,而在岩溶外测 的曲线形态与图 3 中的参考曲线相似。 采集的数据通过反演后,在工区6500~6700 m 区段穿过深度范围内发现多处低阻异常(图6b),因 采集的数据与溶蚀型空洞模型正演响应情况相似, 据此成功圈划出3处隐患,其中2处经打钻验证了 存在明显空洞,为排查塌陷隐患提供了帮助。

3.2 土洞塌陷隐患探测

郑州市受 7.21 特大暴雨灾害影响,市道路多处 涌水,整个城市交通陷入瘫痪,水灾后城市道路出现 很多塌陷区,还有很多道路存在隐患。为确定塌陷 的范围,组织物探人员对隐伏塌陷进行探测,依据周 边建筑物及干扰因素,确定用浅层探地雷达对表层 塌陷进行圈定,用等值反磁通瞬变电磁方法进行浅 部塌陷探测。以瞬变电磁传输缆(长 6 m)为参照, 该处现场存在塌陷范围超过 5 m 的塌陷坑(图 7a), 从坑的周边可以看到塌陷处主要为黄土以及路基填 埋物,未见灰岩等溶蚀性岩石,可确定该处塌陷为土



图 6 昆明某轨道交通岩溶探测成果







洞塌陷。沿着该道路布置测线,在其反演电阻率断面图(图7b)中位于测线205~210m附近圈出的红色区域为图7中所见的塌陷坑,塌陷处的电阻率特征与模型计算的特征一致,表现为低阻形态。

3.3 人防空洞隐患探测

某地区地下存在人工堆砌的防空洞,因年久 失修,存在塌陷隐患,需要将防空洞的走向确定。 在某防空洞露头处进行了等值反磁通瞬变电磁 实验,使用 HPTEM-18 仪器,发射频率为 25 Hz, 发射电流为 10 A,测量点距 0.5 m。井口的砖墙 露出位置大概位于测线点号 5~8 m 处(图 8a)。

图 8b 为现场采集的数据,可以发现防空洞 中心的测量曲线与防空洞外测的测量曲线,同图 3 中模型 3 的曲线与背景参考曲线极为相似。图 9 为该防空洞的 OCTEM 反演电阻率断面,图中 砖墙位置电阻率明显变大,与人防模型分析出的 结论吻合,效果明显。







4 结论

对溶蚀型空洞模型、土洞模型以及人防空洞模型的正演计算以及对岩性的瞬变电磁响应变化率的分析表明,等值反磁通瞬变电磁法对各种空洞模型均有较好的识别能力,与传统的瞬变电磁方法相比,等值反磁通瞬变电磁技术对浅层的空洞塌陷勘探效果更好。

通过改变覆盖层电阻率之后计算模型响应值发现,溶蚀空洞模型的响应曲线受到覆盖层影响时间 较短,而土洞以及人防空洞均受到覆盖层影响时间 较长,说明在空洞型隐患勘探中,相同地质条件下等 值反磁通瞬变电磁技术更容易探测到溶蚀型空洞。

将该方法应用于昆明轨道交通的岩溶探查、郑 州市区道路塌陷探查以及在城市开展的人防工程探 查,其勘探效果表明等值反磁通瞬变电磁技术能在 城市各种强干扰条件下对各种空洞塌陷隐患进行有 效勘探,是城市道路塌陷隐患排查中的一种有效手 段。

参考文献(References):

[1] 陈灿华,廖秀英,陈绍裘.高速公路不同地层路基中岩溶洞穴的探测[J].中南大学学报:自然科学版,2004,35(6):1014-1018.

Chen C H, Liao X Y, Chen S Q. Explore karst in different strata of highway roadbed [J]. Chinese J. Journal of Central South University: Science and Technology, 2004,35(6): 1014 – 1018.

 [2] 袁永才,李术才,李利平,等.尚家湾强岩溶隧道突水突泥伴生 灾害源综合分析[J].中南大学学报:自然科学版,2017,48
 (1):203-211.

Yuan Y C, Li S C, Li L P, et al. Comprehensive analysis on disaster associated by water inrush and mud gushing in Shangjiawan karst tunnel [J]. Chinese J. Journal of Central South University: Science and Technology, 2017, 48(1): 203-211.

[3] Konstantinos C, Valérie P, Roger G, et al. Contribution of geo-

physical methods to karst-system exploration: An overview [J]. Hydrogeology Journal, 2011, 19(6):1169-1180.

- [4] Sumanovac F, Weisser M. Evaluation of resistivity and seismic methods for hydrogeological mapping in karst terrains [J]. Journal of Applied Geophysics, 2001, 47(1):13–28.
- [5] 李才明,王良书,徐鸣洁,等. 基于小波能谱分析的岩溶区探地 雷达目标识别[J]. 地球物理学报,2006,49(5):1499-1504.
 Li C M, Wang L S, Xu M J, et al. Objects recognition of ground penetrating radar in karst regions using wavelet energy spectrum analysis [J]. Chinese Journal Geophysics, 2006, 49(5): 1499-1504.
- [6] 孙怀凤,李凯,陈儒军,等. 浅层岩溶瞬变电磁响应规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(3):652-661.
 Sun H F, Li K, Chen R J, et al. Experimental study on transient electromagnetic responses to shallow karst [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 652-661.
- [7] 牛之琏.时间域电磁法原理[M].长沙:中南大学出版社, 2007:69-70.
 Niu Z L. Theory of time domain electromagnetic [M]. Changsha: Zhongnan University Press, 2007:69-70.
 [8] 李貅.瞬变电磁测深的理论与应用[M].西安:陕西科学技术
 - J 子孙. 姆父电概例体的理论与应用[M].四女:陕西科学技术 出版社,2002:5-8.
 Li X. Theory and application of transient electromagnetic sounding
 [M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 2002:5-8.
- [9] 席振铢,刘剑,龙霞,等. 瞬变电磁法三分量测量方法研究[J]. 中南大学学报:自然科学版,2010,41(1):272-276.
 Xi Z Z, Liu J, Long X, et al. Three-component measurement intransient electromagnetic method [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(1): 272-276.
- [10] Nabighian M N, Macnae J C. Time domain electromagnetic prospecting methods: Electromagnetic methods in applied geophysics
 [M]. Houston: Society of Exploration Geophysicist, 1988:427 520.
- [11] Xi Z Z, Long X, Huang L, et al. Opposing-coils transient electromagnetic method focused near-surface resolution [J]. Geophysics, 2019, 81(5): E279 – E285.
- [12] 席振铢,龙霞,周胜,等.基于等值反磁通原理的浅层瞬变电磁法[J].地球物理学报,2016,59(9):3428-3435.
 Xi Z Z, Long X, Zhou S, et al. Opposing coils transient electromagnetic method for shallow subsurface detection [J]. Chinese

Journal Geophysics, 2016, 59(9): 3428-3435.

[13] 席振铢,宋刚,周胜,等.一种瞬变电磁测量装置及方法[P].中 国专利,201410092714.X,2014.

Xi Z Z, Song G, Zhou S, et al. A measure method and device of transient electromagnetic method [P]. Patent in Chinese, 201410092714. X, 2014.

[14] 李建平. 等值反磁通瞬变电磁法在高山隧道施工选线中的应 用[J]. 兰州理工大学学报,2018(1):143-147.

Li J P. Application of opposing coils electromagnetometry in route selection for alpine tunnel construction [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2018(1): 143-147.

[15] 赖刘保,陈昌彦,张辉,等. 浅层瞬变电磁法在城市道路地下病 害检测中的应用[J]. 地球物理学进展,2016,31(6):2743-2746.

Lai L B, Chen C Y, Zhang H, et al. Application of shallow transient electromagnetic method in the detection of city road disease [J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(6): 2743 – 2746.

- [16] 王银,席振铢,蒋欢,等.等值反磁通瞬变电磁法在探测岩溶病 害中的应用[J].物探与化探,2017,41(2):360-363.
 Wang Y, Xi Z Z, Jiang H, et al. The application research on the detection of karst disease of airport runway based on OCTEM [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(2): 360-363.
- [17] Coggon J H. Electromagnetic and electrical modeling by the finite element method [J]. Geophysics, 1970, 36: 132 – 153.
- [18] 陈丹丹. 瞬变电磁法三维正演研究[D]. 北京:中国地质大学 (北京),2008.

Chen D D. Study of three-dimensional forward of TEM [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2008.

[19] 李贺.直接时间域矢量有限元瞬变电磁三维正演模拟[D].西

安:长安大学,2016.

Li H. Three-dimensional transient electromagnetic forward modeling in the direct time-domain by vector finite element [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.

- [20] 余翔,王绪本,李新均,等.时域瞬变电磁法三维有限差分正演 技术研究[J].地球物理学报,2017,60(2):810-819.
 Yu X, Wang X B, Li X J, et al. Three-dimensional finite difference forward modeling of the transient electromagnetic method in the time domain [J]. Chinese Journal Geophysics, 2017, 60(2): 810-819.
- [21] 李瑞雪,王鹤,席振铢,等. 深海热液硫化物矿体 3D 瞬变电磁 正演[J]. 地球物理学报,2016,59(12):4505-4512.
 Li R X, Wang H, Xi Z Z, et al. The 3D transient electromagnetic forward modeling of volcanogenic massive sulfide ore deposits [J].
 Chinese Journal Geophysics, 2016, 59(12): 4505-4512.
- [22] 孙怀凤,程铭,吴启龙,等. 瞬变电磁三维 FDTD 正演多分辨网格方法[J]. 地球物理学报,2018,61(12):374-382.
 Sun H F, Cheng M, Wu Q L, et al. A multi-scale grid scheme in three-dimensional transient electromagnetic modeling using FDTD [J]. Chinese Journal Geophysics, 2018, 61(12): 374-382.
- [23] 熊彬,罗延钟. 电导率分块均匀的瞬变电磁 2.5 维有限元数值 模拟[J]. 地球物理学报,2006,49(2):590-597.
 Xiong B, Luo Y Z. Finite element modeling of 2.5D TEM with block homogeneous conductivity [J]. Chinese Journal Geophysics, 2006,49(2):590-597.
- [24] Li W D. Modeling and inversion of time domain electromagnetic data[D]. SLC: The University of Utah, 2002.
- [25] Key K. MARE2DEM: A 2-D inversion code for controlled-source electromagnetic and magnetotelluric data [J]. Geophys. J. Int., 2016, 207: 571-588.

Application of the opposing-coils transient electromagnetic method in detection of urban shallow cavities

WANG Liang¹, LONG Xia¹, WANG Ting-Ting², XI Zhen-Zhu², CHEN Xing-Pen¹, ZHONG Ming-Feng², DONG Zhi-Qiang¹

(1. Hunan 5D Geosciences Co. Ltd., Changsha 410083, China; 2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Quickly and efficiently identifying the hidden dangers inducing ground collapse in cities are greatly significant for urban construction, disaster protection, and protection of people's properties. In this study, the urban shallow ground collapse was classified into cavities caused by dissolution, disorderly drainage of groundwater, and old civil air defense works. Through forward calculations, this study analyzed the response laws of the geological models of the three types of cavities using the opposing-coils transient electromagnetic method (OCTEM), as well as the various characteristics of attenuation curves of the models under high resistance and low resistance overburden strata. Moreover, this study investigated the electrical characteristics of the geological models of the three types of cavities using the rate of change in the transient electromagnetic responses of rocks. The forward results are as follows. Compared with the surrounding rocks, both the models of cavities caused by dissolution and disorderly drainage of groundwater showed low resistance characteristics, while the model of cavities caused by civil air defense works showed high resistance characteristics. The rates of change in the transient electromagnetic responses of the three models show that the opposing-coils technology has a good ability to identify the hidden dangers inducing all kinds of cavities. The application results of the OCTEM to the detection of three types of cavities in areas such as Kunming and Zhengzhou show that this method is effective for the detection of urban shallow cavities.

Key words: urban geology; OCTEM; shallow cavity; ground collapse