

doi: 10.11720/wtyht.2020.1509

刘杰,段炜,王俊,等.等值反磁通瞬变电磁法在公路隧道塌陷区的探测应用[J].物探与化探,2020,44(6):1470-1475.http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1509

Liu J, Duan W, Wang J, et al. The application of opposing coils transient electromagnetic method to the detection of underground collapse in highway tunnel under construction[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(6): 1470-1475. http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1509

等值反磁通瞬变电磁法在公路隧道塌陷区的探测应用

刘杰¹, 段炜², 王俊¹, 刘成¹, 戴国强¹

(1. 中国电建集团 昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650000; 2. 云南省地震局, 云南 昆明 650000)

摘 要: 某在建公路隧道开挖中发生塌陷, 选用等值反磁通瞬变电磁法 (OCTEM) 进行抢险探测。文中介绍了 OCTEM 方法原理, 针对公路隧道地电结构建立模型, 通过正演计算证明了 OCTEM 具有对地电阻率反映灵敏、分辨率高的特点; 将该公路隧道的 OCTEM 探测结果与高密度电法探测结果进行对比分析, 二者异常对应良好, 都反映了已知塌陷区。此次抢险探测结果表明, OCTEM 设备轻便, 施工便捷, 作业效率高, 适合浅层快速探测, 可用于公路隧道塌陷区快速探测。

关键词: 等值反磁通瞬变电磁; 塌陷区; 快速探测

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2020)06-1470-06

0 引言

瞬变电磁法是先利用接地导线或不接地线圈, 向地下发射一次磁场, 然后突然关断一次场以激励地下导电地质体产生涡流, 并在一次场关断间隙观测该涡流产生的二次磁场随时间变化的响应, 通过分析响应曲线提取地下地质体的电阻率、埋深等信息, 从而解决相关地质问题^[1-3]。传统大定源装置在城市、公路、铁路工程勘察中难以快速布线, 快速勘探, 应用局限性大, 近年来国内很多专家将小线圈中心回线、小线圈重叠回线应用于工程勘探、隧道超前预报等^[4-12]。然而非固定小回线形态变化对一次磁场影响很大^[13], 此外, 由于接收天线与发射天线之间的强耦合关系, 造成接收二次场畸变严重, 反演电阻率失真, 反演深度难以把控^[14-17]。席振铎等^[18-19]提出的等值反磁通瞬变电磁法 (OCTEM) 采用反相对偶磁源中心回线装置, 消除了收发线圈互感影响, 提高了浅层探测分辨率, 因而在岩溶探测、铁路选线、公路病害探测等工程勘察中应用日益广泛。

本文主要研究 OCTEM 在某公路隧道塌陷区的

抢险探测应用。针对待探测隧道的探测深度浅、围岩背景电阻率相对低、地形地貌复杂等特点以及快速勘察的需求, 选择采用 OCTEM 进行探测。

1 工程概况及物探方法选择

1.1 工程概况

在建公路隧道位于云南山区, 隧道进口端覆盖层以第四系残积的硬塑状粉质黏土为主, 电阻率约 $100\ \Omega\cdot\text{m}$, 平均厚约 10 m; 基岩主要为砂岩夹黏土岩, 局部夹有褐煤层, 属半成岩, 岩质极软, 围岩电阻率 $200\sim 300\ \Omega\cdot\text{m}$, 相对低。隧道长约 300 m, 隧道轴线距离地面高程 20~70 m, 埋深较浅。在隧道进口左线开挖到里程 21 554 m 附近时地面发生塌陷, 隧道进口左线内出现涌水、涌泥现象。为避免再次出现塌陷和隧道涌水、涌泥, 需要对隧道轴线上可能的塌陷区进行探测, 为后期隧道的掘进施工提供依据。

1.2 物探方法选择

针对探测深度在几十米至百米深的工程勘探, 常用的物探方法有地震波法、高密度电阻率法、瞬变电磁法等。由于该隧道地面地形差异大, 而地震波

法在复杂地形测区施工相对困难,数据解释比较复杂,因而未采用。高密度电阻率法在接地条件良好的地区适应性强,适用于本次勘察,然其不足在于探测深度与横向测点密度(横向分辨率)有时难以兼顾;为了提高高密度电阻率法的探测效果,考虑采用瞬变电磁法作为补充勘察。传统瞬变电磁法在山区布线困难,且由于收发电磁互感影响严重,早期信号受一次场影响严重失真,导致浅层探测盲区较大,而等值反磁通瞬变电磁法(OCTEM)克服了收发线圈互感影响,可大大减小浅层探测盲区,采用收发一体固定小回线装置不仅便携方便施工,且保证了各测点激发场源的一致性以及收发相对位置的一致性,可避免地形差异以及回线形态变化对一次场的影响,进一步减小观测噪声,提高浅层分辨率,因此OCTEM适用于本次勘察。

2 OCTEM 方法原理

OCTEM 方法原理与传统回线源瞬变电磁法相同,即先由人工源向发射回线供入电流产生一次场,然后瞬间关断电流,激励大地感应出二次涡流场,再通过感应线圈接收随时间衰减变化的二次场,根据其幅值和变化规律,获得地下电阻率分布信息。

OCTEM 与传统瞬变电磁法不同之处在于其采用反相对偶磁源小型中心回线装置(图1),上下两个发射线圈相同且平行共轴,二者电流同步且等值反向,接收线圈在距上下线圈相等的中间平面,在该平面上两磁性源产生的垂向磁场大小相等方向相反,矢量叠加后垂向磁场恒为0,磁力线呈水平状,在该平面一次场总磁通始终为0,根据法拉第电磁感应定律,在发射电流关断前后接收线圈中将不产生一次场感应电动势,等效于消除了一次场的影响。在接收面以外的广大区域,关断电流前后一次场磁通发生变化激发感应涡流,被感应线圈接收。可见,OCTEM 在早期不受一次场影响,将接收到大地纯二次场响应,可减小浅层探测盲区。

OCTEM 测深是基于瞬态电磁场扩散原理。在非磁性(磁导率 μ_0)导电均匀大地中,当地表上方发射线圈中的电流突然关断时,首先在距离发射线圈最近的地表附近产生感应涡流以维持在断开电流以前存在的磁场。接着由于大地电阻引起欧姆损耗,感应涡流将随时间衰减变化,随着延时 t 增加,感应涡流极大值向下向外形如“烟圈”扩散。扩散速度 v 和扩散深度 δ 都与电阻率的平方根成正比:

万方数据
$$v = \sqrt{\rho/(2\mu_0 t)}$$

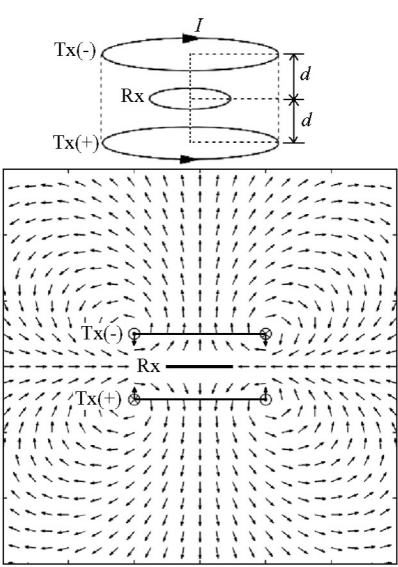


图1 OCTEM 线圈及其径切面一次场磁力线
Fig.1 OCTEM coils and its primary magnetic field line on the diametric plane

$$\delta = \sqrt{2\rho t/\mu_0}$$

而在地面接收到的二次磁场时间导数响应曲线幅值与大地电阻率平方成反比^[20],当大地电阻率减小至原来的1/10,其响应增加至原来的100倍,对低阻体反映较灵敏。综上,结合扩散深度和接收到的二次场衰减曲线幅值及其衰减规律可以分析得到测点下方电阻率的变化规律,达到测深目的。

3 理论计算

先通过正演计算^[21],为方法可行性提供理论依据。根据隧道实际情况建立简化的三维地电模型(图2):围岩背景设为两层,第一层电阻率为 $100\ \Omega\cdot\text{m}$,厚10 m,代表浅表覆盖层;第二层电阻率为 $200\ \Omega\cdot\text{m}$,代表基岩层;塌陷地质体电阻率为 $50\ \Omega\cdot\text{m}$,设为规则长方体,其走向长度1 500 m,远大于其宽度 W 、厚度 H 及顶部埋深 D ,塌陷体中心在地表投影

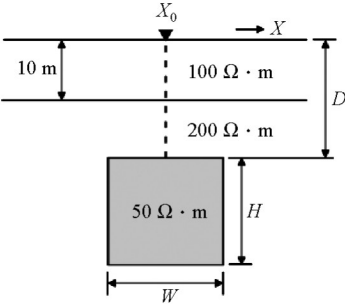


图2 塌陷体地电模型
Fig.2 Geoelectric model of underground collapse

点对应 X_0 位置,垂直塌陷体走向(沿着 X 方向)布置测线,点距 25 m,剖面范围-200~200 m;发射电流 1 A,发射有效面积 1 m^2 ,接收有效面积 1 m^2 ,激发场源为单位阶跃脉冲。

本文计算了大小不同、埋深不同的 4 组低阻塌

陷体模型的 OCTEM 响应,塌陷体模型的宽度×厚度(即边长)分别为:25 m×25 m 和 50 m×50 m,顶部埋深分别为 50 m 和 25 m,计算结果见图 3,上图为磁场时间导数响应剖面曲线,下图为相对异常剖面曲线。

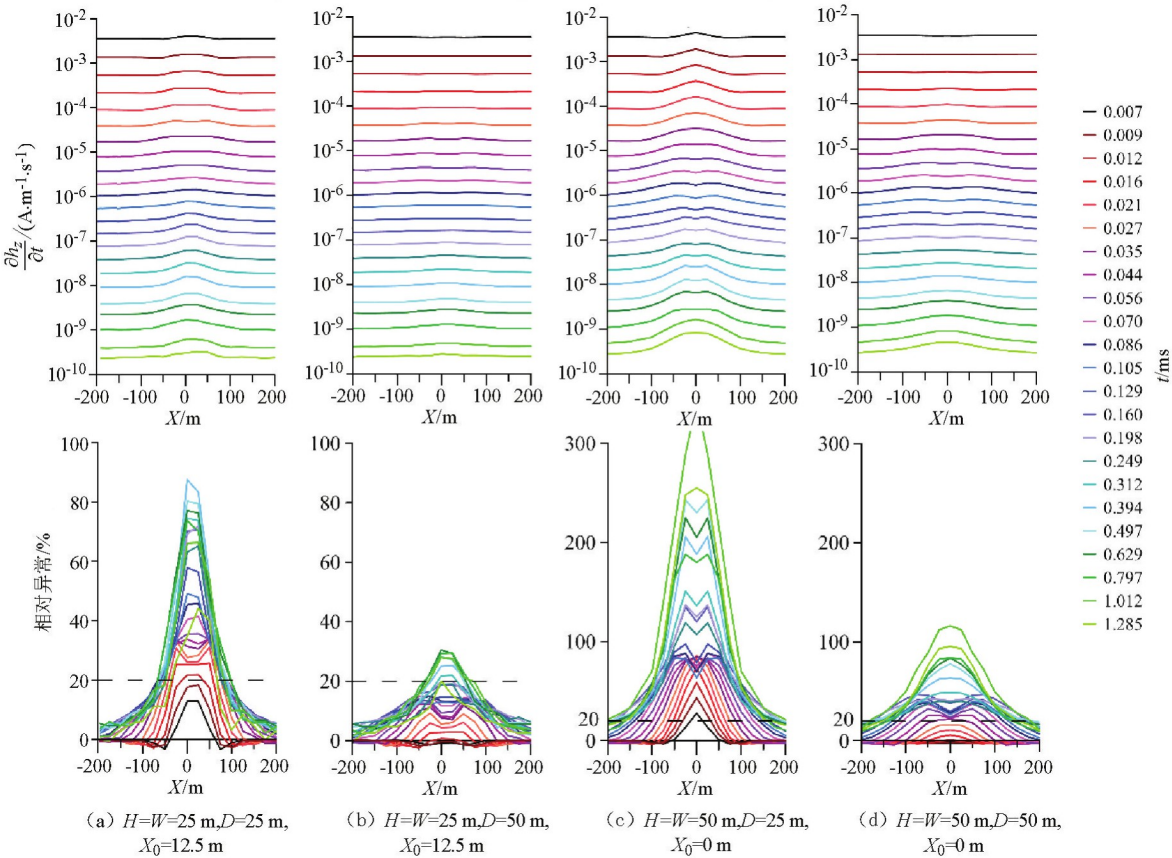


图 3 不同厚度、不同埋深塌陷体 OCTEM 响应

Fig.3 OCTEM responses of different size target collapse under different depths

从响应剖面曲线来看,除了边长 25 m、顶深 50 m 塌陷体模型响应曲线(图 3a)看不出明显隆起异常,其他 3 个模型响应曲线隆起异常明显,塌陷体越大,埋深越浅,异常越明显,若取相对异常值 0.2 为临界可分辨相对异常,则理论上 4 个塌陷体异常都可以被分辨。边长 25 m 的塌陷体,顶深 25 m 时的相对异常极大值为 87.5%(图 3a),顶深 50 m 时相对异常极大值 30.05%(图 3b);边长 50 m 的塌陷体,顶深 25 m 时的相对异常极大值为 341%(图 3c),顶深 50 m 时相对异常极大值 116%(图 3d);粗略测算,塌陷体规模增加至 4 倍,相对异常极大值也增加至约 4 倍;塌陷体埋深增至 2 倍,相对异常极大值减至约 1/3。据此判断,在本文所述地电条件下,若以 20% 相对异常为可分辨阈值,则理论上某塌陷体的最大可探测深度大概为其横向尺寸的 2 倍,当围岩电阻率增加或塌陷体电阻率减小时,相对异常幅度

也将增加,探测能力将提升。

4 应用分析

4.1 仪器设备

本次探测采用湖南五维地质科技有限公司研制的 HPTM18 系统。设备由收发一体天线、主机、天线与主机连接电缆及移动 PC 组成,主机与移动 PC 通过 WIFI 连接。该系统运用等值反磁通原理消除收发线圈之间的感应耦合;利用对偶中心耦合原理提高横向分辨率;采用统一标准的微线圈对偶磁源、高灵敏度磁感应传感器、高速 24 位数据采集卡以及高密度测量技术实现浅层高精度瞬变电磁勘探。

4.2 数据采集与处理

本次数据采集采用定点测量模式,测点距 2 m,发射频率 6.25 Hz,发射电流 10 A,关断时间 50 μs,

叠加周期 400 次。

采用 HPTEM 系统自带处理软件进行数据处理,主要包含信号校正、平滑滤波和电阻率成像三个步骤:①信号校正:收发一体小回线瞬变电磁系统具有施工灵活方便的特征,但是其振荡耦合噪声增强,包含了信号线缆耦合、接收与发射之间的残余感应耦合等噪声,需要对实测信号进行校正。②平滑滤波:瞬变电磁法在实际观测数据时,由于某一周期性的干扰或气候等其他因素的影响,无法通过多次叠加统计的方法将其剔除,导致衰减曲线在晚期出现跳变,出现不正常衰减,不利于数据的进一步处理和解释,因此需要对数据进行平滑滤波。③电阻率成像:类似于传统瞬变电磁法,HPTEM 系统针对等值反磁通瞬变电磁法响应曲线特点提供了电阻率快速成像方法。该方法基于瞬变电磁“烟圈”扩散理论,综合考虑了实测电压幅值及其随时间衰减速率特征,能很好地反映局部电阻率变化特征,适合本次勘察目的。

4.3 成果图分析

图 4 为在该公路隧道轴线上里程 21 502 ~ 21 810 m 段的 OCTEM 探测结果,剖面长 308 m。实测感应电压剖面(图 4a)呈现多处大大小小的局部隆起异常,对应在电阻率断面(图 4b)中出现电阻率等值线下凹或局部低阻异常区,推测为岩体塌陷或节理裂隙集中发育区。将 OCTEM 探测结果与高密度电法(电极距 5 m,单个排列长 295 m)探测结果(图 5)进行对比分析:OCTEM 异常 S-1 与高密度电法异常 G-1 对应,反映了已知塌陷,证明了两者的方法的有效性;另外 OCTEM 异常 S-2 与高密度电法异常 G-2 接近;此外高密度电法异常 G-3 在 OCTEM 电阻率断面上呈现独立的 3 个异常 S-4、S-5、S-6,OCTEM 异常 S-3 在高密度电法图上没有明显对应,原因一方面是 OCTEM 反映电阻率变化灵敏度更高,另一方面因为其点距更小,横向分辨率更高。所以 OCTEM 能够弥补高密度电法分辨率与探测深度难以兼顾的问题。

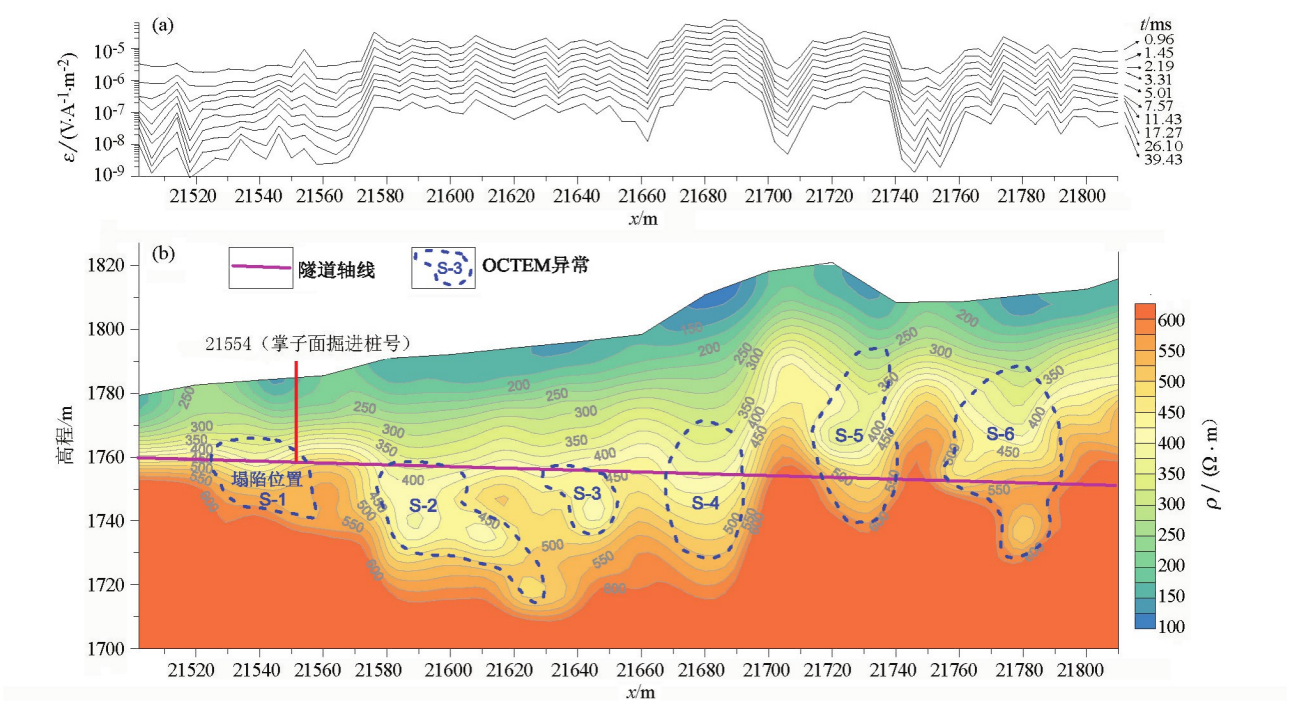


图 4 OCTEM 感应电压剖面 (a) 及反演电阻率断面解释成果 (b)
Fig.4 Induced voltage profile (a) and resistivity section (b) of OCTEM

5 结论

OCTEM 接收发射固定一体,设备轻便,野外施工便捷,作业效率高,其采用反向对偶磁源中心耦合装置从物理上直接消除了一次场影响,大大减小了浅层探测盲区。野外正演计算表明:均匀导电大地

中 OCTEM 对地电阻率变化反应灵敏,针对该隧道建立的良好围岩下的局部低阻塌陷体模型,当其埋深不大于其横向尺寸 2 倍时 OCTEM 相对异常大于 20%。在本次公路隧道塌陷区的探测应用中,OCTEM 对已知塌陷反应明显,与高密度电法探测结果异常吻合,证明了方法的有效性。

致谢:向中南大学瞬变电磁法研究团队成员提

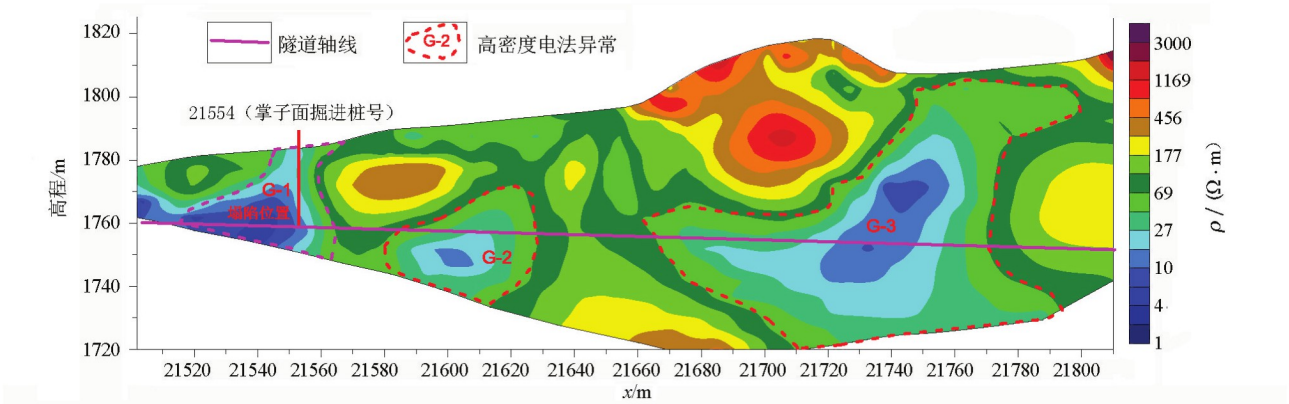


图 5 高密度电阻率法反演电阻率断面及解释

Fig.5 Resistivity section of high density electrical resistivity

供的帮助表示感谢。

参考文献 (References) :

[1] 牛之璉. 时间域电磁法原理 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2007.
Niu Z L. Principle of transient electromagnetic method [M]. Changsha: Central South University Press, 2007.

[2] 李貅. 瞬变电磁测深的理论与应用 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2002.
Li X. Theory and application of transient electromagnetic sounding [M]. Xi'an: Shanxi Science and Technique Publishing House, 2002.

[3] 蒋邦远. 实用近区磁源瞬变电磁法勘探 [M]. 北京: 地质出版社, 1998.
Jiang B Y. Practical transient electromagnetic method prospecting in near zone of Magnetic dipole source [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998.

[4] 薛国强, 李貅. 瞬变电磁隧道超前预报成像技术 [J]. 地球物理学报, 2008, 51(3): 894-900.
Xue G Q, Li X. The technology of TEM tunnel prediction imaging [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(3): 894-900.

[5] 曾友强, 谢国胜, 智庆全, 等. 小回线源 TEM 法全域视电阻率成像在某金矿水害中的应用 [J]. 地球物理学进展, 34(2): 416-421.
Zeng Y Q, Xie G S, Zhi Q Q, et al. Application of small loop source TEM method for full-domain apparent resistivity imaging in water damage of a gold mine [J]. Progress in Geophysics, 34(2): 416-421.

[6] 薛国强, 于景邨. 瞬变电磁法在煤炭领域的研究与应用新进展 [J]. 地球物理学进展, 2017, 32(1): 319-326.
Xue G Q, Yu J C. New development of TEM research and application in coal mine exploration [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(1): 319-326.

[7] 于景邨, 胡兵, 刘振庆, 等. 矿井瞬变电磁探测技术的应用 [J]. 物探与化探, 2011, 35(4): 532-535.
Yu J C, Hu B, Liu Z Q, et al. The application of mine transient electromagnetic detection technology [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35(4): 532-535.

[8] 张平松, 刘盛东, 李培根, 等. 矿井瞬变电磁探测技术系统与应用 [J]. 地球物理学进展, 2011, 26(3): 1107-1114.
Zhang P S, Liu S D, Li P G, et al. Mine transient electromagnetic technology system and its application [J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(3): 1107-1114.

[9] 杨农合, 徐小林, 吴朝俊, 等. 瞬变电磁法小线框技术研究及其应用 [J]. 西安理工大学学报, 2012(3): 97-103.
Yang N H, Xu X L, Wu C J, et al. Transient electro-magnetic method (TEM) small coil technology and its application [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2012(3): 97-103.

[10] 岳建华, 薛国强. 中国煤炭电法勘探 36 年发展回顾 [J]. 地球物理学进展, 2016, 31(4): 1716-1724.
Yue J H, Xue G Q. Review on the development of Chinese coal electric and electromagnetic prospecting during past 36 years [J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(4): 1716-1724.

[11] 张淑婷, 张华, 杨海燕, 等. 瞬变电磁法多匝小回线装置实验对比 [J]. 物探与化探, 2013, 37(5): 843-847. doi:10.11720/j.issn.1000-8918.2013.5.16.
Zhang S T, Zhang H, Yang H Y, et al. A comparative study of transient electromagnetic devices of small multi-turn loop [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(5): 843-847. doi:10.11720/j.issn.1000-8918.2013.5.16.

[12] 田卫东. 瞬变电磁法中大电流小中心回线与大定源回线两种观测方式的对比 [J]. 物探与化探, 2015, 39(3): 558-561. doi:10.11720/wtyht.2015.3.20.
Tian W D. A comparative study of TEM measurement mode on small size central loop with large current and large loop [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(3): 558-561. doi:10.11720/wtyht.2015.3.20.

[13] 马炳镇. 瞬变电磁法回线源形态对一次场畸变特征研究 [J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(6): 154-158. doi:10.3969/j.issn.1001-1986.2017.06.025.
Ma B Z. Study on the form of transient electromagnetic loop source versus the distortion characteristics of the primary field [J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(6): 154-158. doi:10.3969/j.issn.1001-1986.2017.06.025.

[14] 李飞, 程久龙, 温来福, 等. 矿井瞬变电磁法电阻率偏低原因分析与校正方法 [J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1959-1964.

Li F, Cheng J L, Wen L F, et al. Reason and correction of low resistivity problem in mine transient electro-magnetic method [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1959 - 1964.

[15] 陈明生, 石显新, 解海军. 对瞬变电磁测深几个问题的思考(二)——小回线瞬变场法探测分析与实践[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(3): 125 - 130. doi:10.3969/j.issn.1001-1986.2017.03.023.

Chen M S, Shi X X, Xie H J. Analysis and practice of detection of small loop transient field [J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(3): 125 - 130. doi:10.3969/j.issn.1001-1986.2017.03.023.

[16] 嵇艳鞠, 林君, 王忠. 瞬变电磁接收装置对浅层探测的畸变分析与数值剔除[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(1): 262 - 267. doi:10.3969/j.issn.1004-2903.2007.01.038.

Ji Y J, Lin J, Wang Z. Analysis and numerical removing of distortion in transient electromagnetic receiver device for shallow sounding [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(1): 262 - 267. doi:10.3969/j.issn.1004-2903.2007.01.038.

[17] 姜志海, 岳建华, 刘树才. 多匝重叠小回线装置的矿井瞬变电磁观测系统[J]. 煤炭学报, 2007, 32(11): 1152 - 1156. doi:10.3321/j.issn:0253-9993.2007.11.007.

Jang Z H, Yue J H, Liu S C. Mine transient electromagnetic observation system of small multi-turn coincident configuration [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(11): 1152 - 1156. doi:10.3321/j.issn:0253-9993.2007.11.007.

[18] 席振铎, 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.

[19] 席振铎, 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. doi:10.6038/cjg20160925

Xi Z Z, Long X, Zhou S, et al. Opposing coils transient electromagnetic method for shallow subsurface detection [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(9): 3428 - 3435. doi:10.6038/cjg20160925

[20] 龙霞, 席振铎, 周胜, 等. 等值反磁通瞬变电磁法探测薄层能力[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(2): 753 - 759.

Long X, Xi Z Z, Zhou S, et al. Detection capability of opposing coils transient electromagnetic method for thin layers [J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(2): 753 - 759.

[21] 李瑞雪. 瞬变电磁快速三维正演[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2016, 47(10): 3477 - 3482. doi:10.11817/j.issn.1672-7207.2016.10.026

Li R X. Fast 3D forward modeling of transient electromagnetic [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2016, 47(10): 3477 - 3482. doi:10.11817/j.issn.1672-7207.2016.10.026

The application of opposing coils transient electromagnetic method to the detection of underground collapse in highway tunnel under construction

LIU Jie¹, DUAN Wei², WANG Jun¹, LIU Cheng¹, DAI Guo-Qiang¹

(1. Kunming Engineering Corporation Co., Ltd., Kunming 650000, China; 2. Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650000, China)

Abstract: Collapse occurs during the excavation of a highway tunnel, and hence it is urgent to use geophysical method to detect other potential collapse areas. In view of the large difference of the terrain, the lush surface vegetation and the low resistivity of the surrounding rock, the authors selected the opposing coils transient electromagnetic method (OCTEM) as the equipment of this method which is relatively light and it has high resolution in reflecting the resistivity. Firstly, OCTEM response of underground collapses buried in conductive host was calculated, and the results theoretically proved that OCTEM was sensitive to underground resistivity and had high resolution, and then the OCTEM detection result was compared with the high-density electrometer detection result. It is proved that they correspond well, and both reflect the known collapse area. It is shown that OCTEM can be applied to rapid detection of collapse area in the highway tunnel under construction.

Key words: OCTEM; collapse area; rapid detection

(本文编辑:沈效群)