文章编号:1000-5870(2004)05-0135-04

瞬变电磁探测地下洞体的可行性分析

薛国强[1], 宋建平[1], 闫 述[2], 郭文波[1]

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院,陕西西安 710049;2. 煤炭科学研究总院西安分院,陕西西安 710054)

摘要:针对工程建设中常见的地下洞体,从理论和实际应用两方面分析了用瞬变电磁法进行洞体探测的有效性及地下洞体瞬变电磁响应的物理过程和响应特征,给出了地下洞体的数学模型以及球坐标下地下洞体在阶跃电流激励下的瞬变电磁响应表达式。利用瞬变电磁法,对某煤矿的地下采空区进行了探测,其解释结果与钻探资料吻合得很好,证明了在工程勘察中利用该方法探测地下洞体的可行性和有效性。

关键词:瞬变电磁法;响应特征;地下洞体;探测方法;可行性分析

中图分类号:P 631.3 **文献标识码**:A

Feasibility analysis of transient electromagnetic method for detecting underground cave

XUE Guo-qiang[1], SONG Jian-ping[1], YAN Shu[2], GUO Wen-bo[1]

(1. *School of Electronic and Information Engineering in Xi'an Jiaotong University, Xi'an* 710049, *China*;
2. *Xi'an Branch of China Coal Research Institute, Xi'an* 710054, *China*)

Abstract: The availability of the transient electromagnetic method (TEM) for detecting the underground cave in engineering buildings was analyzed theoretically and practically. A mathematical model for expressing the underground cave was given, and the formulas for expressing the transient electromagnetic response in spherical coordinate were presented. The physical and the response features of the TEM for detecting underground cave were analyzed. The TEM was used to detect the digged cavern buried in subsurface of a coal mine. The interpretation results agree well with the drilling data, which shows the feasibility and availability of the TEM for detecting underground cave.

Key words: transient electromagnetic method; response feature; underground cave; detection technique; feasibility analysis

在对公路、铁路隧道以及古墓、煤矿采空区等进行工程地质勘查时,经常涉及到自然或人工地下洞体这一地质问题。运用有效的地球物理方法探测这一类地质体已成为工程勘察中一个重要的课题。瞬变电磁法以其体积效应小、分辨能力强、受地形影响小等特点,在工程勘察中得到广泛的应用[1]。研究层状介质下的瞬变电磁响应特性是为了解决深部地质构造问题[2],而研究局部不均匀体的瞬变电磁响应特性正是为了解决类似于地下洞体的工程地质问题[3,4]。为了更好地从数理角度分析地下洞体的瞬变电磁响应,笔者从简化的数学模型入手,解析地来研究地下洞体为球形地质体时的电磁响应,以得出一般意义下电磁场的表达式。

1 地下洞体的瞬变电磁响应分析

1.1 电磁响应解析分析

麦克斯韦方程描述了电磁场的基本规律[4]:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \tag{1}$$

$$\nabla \times H = j + \frac{\partial D}{\partial t}, \tag{2}$$

$$\nabla \cdot B = 0, \tag{3}$$

$$\nabla \cdot D = \rho. \tag{4}$$

式中,E 为电场强度,V/m;B 为磁感应强度,T;H 为磁场强度,A/m;D 为电位移矢量,C/m^2;j 为电流密度,A/m^2;ρ 为自由电荷密度,C/m^3。

地下洞体的赋存形态尽管不同,但总可以近似

收稿日期:2003-12-07

基金项目:国家自然科学基金(49974026)和教育部教育振兴行动计划资助项目

作者简介:薛国强(1966-),男(汉族),山西临猗人,副教授,博士研究生,从事电磁探测理论与应用研究。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

地看作球体或其组合,因此,用球体作为模型进行分析,具有代表性。地下洞体可以是高阻,也可以是低阻,本文中以低阻洞体为例进行研究。当洞体为高阻时,结论相反。地电模型如图 1 所示。发送回线水平放置于地面,假设电导率为 σ、半径为 r_0、中心埋深为 h_0 的球体位于圆形发送回线的正下方。围岩的电阻率为无穷大,即 $\sigma_1 = 0$。球体和围岩的磁导率分别为 μ 和 μ_1。地面任意一观测点为 P,阶跃电流 I 通入发送回线[5-7],

$$I(t) = \begin{cases} 1, t > 0; \\ 0, t < 0. \end{cases} \tag{5}$$

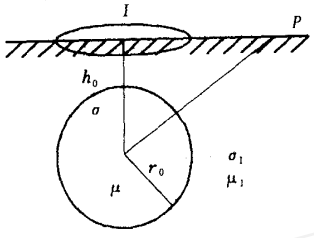


图 1 洞体的地电模型

在瞬变电磁测深问题中,感兴趣的是具有较大穿透深度的低频部分,故求解瞬变电磁测深问题时均忽略位移电流。

为了便于解决问题,引入标量位函数德拜位 Q,令

$$\mathrm{E} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \times (rQ), \tag{6}$$

$$\mathrm{H} = \nabla \times \nabla \times (rQ). \tag{7}$$

由麦克斯韦方程可知,德拜位函数 Q 在时间域满足如下基本方程:

$$\nabla^2 Q - \mu\sigma \frac{\partial Q}{\partial t} = 0. \tag{8}$$

德拜位函数 Q 在频率域满足如下基本方程:

$$\nabla^2 Q - k^2 Q = 0. \tag{9}$$

其中

$$k = (-\mathrm{i}\omega\sigma\mu_0)^{1/2}.$$

在球坐标下式(9)可写成如下形式:

$$\left[\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 \frac{\partial}{\partial r}\right) + \frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial}{\partial\theta}\right) + \frac{1}{\sin^2\theta} + k^2 r^2\right] Q(r, \theta, \phi, \omega) = 0. \tag{10}$$

用分离变量法求解,把通解写成积分形式,则

$$Q = \sum_{l=0}^{\infty}\sum_{m=0}^{n} A_{m,l}\mathrm{j}_l(kr)\mathrm{P}_l^m(\cos\theta)\mathrm{h}(m\phi). \tag{11}$$

式中,$A_{m,l}$ 为系数;$\mathrm{j}_l(kr)$ 为球贝塞尔函数;$\mathrm{P}_l^m(\cos\theta)$ 为关联勒让德函数;$\mathrm{h}(m\phi)$ 为汉克尔函数。根据边界条件求出特解,再进行域的变换,得出时间域的解,再由式(6),(7)求出电磁场解。

对于导电而非导磁性球体的阶跃函数响应见文献[6]。

在中心回线装置下球体的瞬变电磁场表达式为

$$V(t) = 3\pi^{-1}\mu_0 \frac{Ia^3 R^2 r^2}{(R^2 + h^2)^{2/3}(r^2 + h^2)^{3/2}} \times \sum \exp(-k^2 t/\pi), \tag{12}$$

式中,a 为球体半径;h 为球体的中心埋深;R 为发送回线半径;r 为接收回线半径;$V(t)$ 为二次感应衰减电压值。式(12)说明地下球体的电磁响应与球体本身的电阻率、埋深、半径、收发线圈的大小、围岩性质及发送电流有关。

在工程勘察中,多采用工作效率较高且信号较稳的大回线源装置,在此情况下球体上方的电磁响应表达式为

$$V(t) = \frac{3\mu_0 Iqa^3}{Rh^3\pi^2\tau}\sum_{h=1}^{\infty}\exp(-k^2 t/\tau). \tag{13}$$

式中,q 为接收线圈的有效面积。

1.2 地下洞体的电磁响应特性

在一次场切断的瞬时,地下产生了涡流。当地下洞存在时,地下涡流在空间上的分布是不一样的。起初涡流分布于球体表面,其分布状态恰使球内维持初始的均匀场,此时的电流分布与球体的电导率无关。由于球体的欧姆损耗,接着涡流开始衰减,涡流在球体内的分布随着时间的变化而变化。

早期磁感应强度曲线按指数规律衰减,晚期曲线近似按线性规律衰减[4]。把曲线性质变化的位置记为 A,其所对应的衰减时间记为 t,则可以由 $t = 1/2\tau$ 算出曲线进入晚期的起始时间 t,其中

$$\tau = \mu_0\sigma a^2/\pi^2.$$

式中,τ 为时间特征参数;σ 为洞体的电导率参数;a 为洞体的半径。

对于地下洞体不在同点装置正下方这一较复杂的情况[4,6],图 2 给出了洞体的电磁响应与水平距离的关系曲线。图中 $\sigma_2/\sigma_1 = 10$,洞体半径为 50 m,埋深为 75 m。由图可知,均匀半空间中的球体异常响应为一穹形异常,感应电压极大值位于球心上方,远离洞体两端,其异常响应值趋于零。当洞体为高阻时,结论相反。

对不同时间道和不同观测位置的地下洞体的瞬变电磁响应作了物理模拟[4,8]。模拟洞体埋深为 100 m;模型材料使用金属(导电率:紫铜为 5.8 ×107 S/m,铝为 2.73 ×107 S/m),测点位置和深度 z 用回线直径 L 做了归一化处理。采样时间范围为 0.4 ~

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

5.8 ms。可以得出与图 2 相似的磁感应强度响应曲线,不同时刻的响应曲线形状基本类似,只是其值大小不同。也可以通过图 2 对球体的物性参数进行大致估计。先求出曲线的半极值位置,再算出半极值间的距离,则曲线半极值点间距离大致等于球心的埋深。

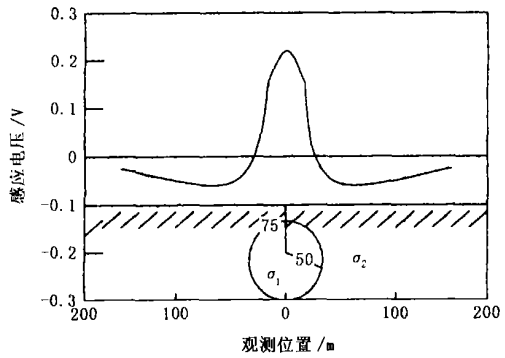


图 2　不同观测位置的洞体响应特征曲线

从图 2 可以看出,球体上方的电磁响应值比较大,而在球体的两侧,电磁场值比较小。也就是说感应异常主要集中在球体的上方,球体两侧可以忽略。所以,本文中从理论上对球体上方瞬变电磁响应分析得出的结论具有实际意义。

2　实例分析

设计中的山西清徐某煤矿是一个新建矿井,年设计生产能力为 60 $\times 10^4$ t。为查明拟建生活区的煤炭采空区范围和延伸方向,拟采用回线源瞬变电磁法进行采空区探测,迅速准确查明地下情况,为工程规划和采空区治理提供地质依据。

测区位于山西省太原市郊区,在太原西山煤田东南隅,属吕梁山余支,地势西北高,东南低,相对高差较大,属中低山区地貌。拟建生活区地形起伏大,为山坡梯田地形,最大相对高差约 20 m。应用大回线源瞬变电磁法探测技术来解决该问题。

在室内工作中,首先对所观测的数据进行滤波、圆滑处理,然后把所观测到的电磁场感应电压值转变成视电阻率值,转换公式为

$$\rho_\tau(t) = \frac{\mu_0}{4\pi t}\left(\frac{2\mu_0 Mq}{5tV(t)}\right).$$

在解释时,还要计算视探测深度,所用公式为

$$h_\tau = \left[\frac{3Mq}{16\pi V(t) S_\tau}\right]^{1/4} - \frac{t}{\mu_0 S_\tau},$$

$$S_\tau = \frac{16\pi^{1/3}}{(3Mq)^{1/3}\mu_0^{2/4}}[V(t)]^{1/3}.$$

式中,M 为发送磁矩;q 为接收偶极矩;$V(t)$ 为观测的感应电压值;S_t 为视纵向电导。

将处理结果绘成视电阻率等值线断面图和视深度等值线断面图,如图 3 和图 4 所示。在图 3 所示的剖面上,1 ～ 8 测道的视电阻率值横向变化大,局部有电阻率值偏高的现象,把电阻率值偏高部位定性解释为地下煤矿采空区。在图 4 中,视深度等值线在相应测道上有明显的向上弯曲现象,这两种情况都同时对应为地下目标体的电磁场异常的反映,定性解释为煤矿采空区。综合以上地质推断,形成推断解释成果图(图 5)。由此图可知,本区的主要含煤地层为二叠系下统山西组,场地采空区主要存在于二叠系下统山西组 2 号煤层中。采空区的顶部深度为 40 ～ 45 m,采空区影响半径约 20 m。

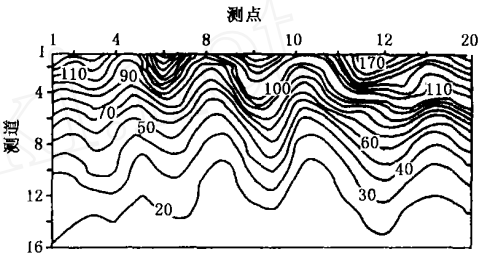


图 3　04 线视电阻率等值线断面图

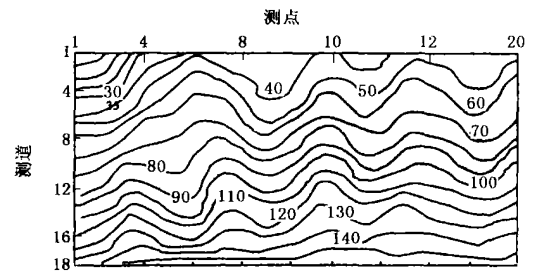


图 4　04 线视深度等值线断面图

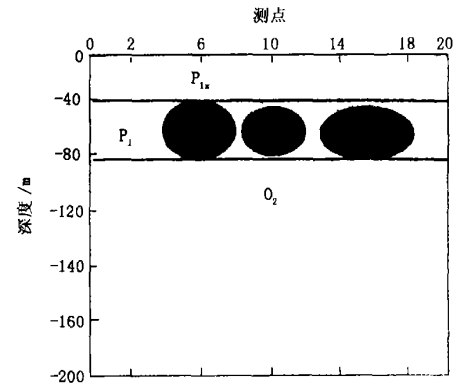


图 5　04 线推断解释断面图

在该测线上的 10 号点附近的钻孔显示为地下采空区顶部深度 45 m。完全与资料解释一致,从而验证了本方法的可行性。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 结束语

分析了地下洞体的瞬变电磁响应的物理过程及复杂情况下洞体的瞬变电磁响应特性,得出电性异常主要反映在洞体上方的结论。对某煤矿拟建生活区的地下采空区的成功探测,从实际应用上说明了方法的可行性。

对于复杂情况下地下洞体响应的研究,建议应用有限差分方法对地下洞体进行数值模拟,以使这一方法更加完善。

参考文献:

[1] 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. 1 - 5.

[2] 薛国强,等. 水平层状介质下瞬变电磁成像方法[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(2) : 215 - 218.
XUE Guo-qiang, *et al*. Method of transient electromagnetic imaging in horizontal layered medium [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(2) :215 - 218.

[3] 薛国强,等. 用瞬变电磁法探测灰岩溶洞[J]. 长安大学学报,2003,25(3) :50 - 53.
XUE Guo-qiang, *et al*. Detecting the limestone dissolved cavern by using the transient electromagnetic method [J]. Journal of Chang'an University, 2003, 25(3) :50 - 53.

[4] 阎述,等. 瞬变电磁法探测地下洞体的有效性[J]. 煤田地质与勘探,1999,27 (2) :64 - 68.
YAN Shu, *et al*. The availability of transient electromagnetic method in prospect of underground cave [J]. Coal Geology & Exploration, 1999, 27(2) :64 - 68.

[5] 丁世荣,等. 球形地质体在阶跃磁偶极源激励下的瞬变电磁响应[J]. 辽宁师范大学学报(自然科学版), 1997, 20(3) :218 - 223.
DING Shi-rong, *et al*. The transient electromagnetic response of aspherical geologic body excited by a step magnetic dipole [J]. Journal of Liaoning Normal University (Natural Science Edition), 1997, 20(3) :218 - 223.

[6] 米萨克 N,纳比吉安. 勘查地球物理电磁法[M]. 赵经祥,等,译. 北京:地质出版社,1992. 246 - 247.

[7] 牛之琏. 时间域电磁法原理[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1992. 32 - 33.

[8] OGILVY R D. A model study of the transient electromagnetic coincident loop technique[J]. Geoexploration, 1983, 21:231 - 246.

(编辑 修荣荣)

(上接第 134 页)

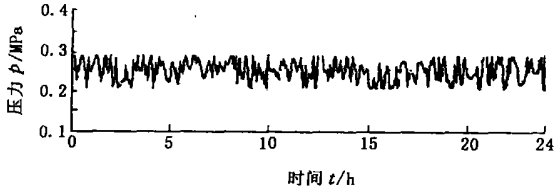


图 7 一号电脱水器压力运行曲线

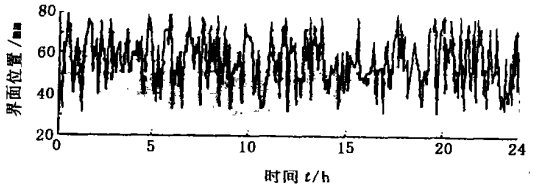


图 8 一号电脱水器油水界面高度运行曲线

4 结束语

针对电脱水系统的特点,在利用波谱分析方法设计干扰加权函数的基础上,结合 H_∞控制理论设计了系统输出点混合灵敏度 H_∞控制器。该控制器在保证系统鲁棒稳定性的同时,成功地抑制了系统扰动。仿真和实践应用的结果表明,该控制器的设计是成功的。

参考文献:

[1] 冯纯伯,田玉平. 鲁棒控制系统设计[M]. 南京:东南大学出版社,1995.

[2] 顾大伟. 线性多变量控制系统的 H_∞设计方法[J]. 控制理论与应用 1987,(4) :10 - 15.
GU Da-wei. H_∞ design of linear multivariable system[J]. Control Theory and Applications, 1987, (4) :10 - 15.

[3] 刘频. 状态空间中的 H_∞控制方法研究[D]. 长沙:国防科技大学,1990.

[4] 丁刚,王勋先,韩曾晋. 感应电机的 H_∞抗干扰控制[J]. 控制理论与应用 1999,16(4) :483 - 486.
DING Gang, WANG Xun-xian and HAN Zeng-jin. H_∞ disturbance attention control of induction motor[J]. Control Theory and Applications, 1999, 16(4) :483 - 486.

[5] LIU He and ZOU Ji-gang. The optimal control of the crude oil electric dehydrator[R]. IFORS'99 Conference, 1999.

[6] 邹继刚. 原油电脱水器建模及控制方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2000.

[7] 刘合. 联合站集输系统最优控制律研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2002.

(编辑 修荣荣)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net