

基于数值模拟的地下空洞高密度电法分析

郑明新,张永伟,陈养强,刘林,黄文君

(华东交通大学 道桥与岩土工程研究所,江西 南昌 330013)

摘要:采用高密度电法探测地下空洞时,由于受到地下空洞类型、地下电流分布等干扰因素的影响,常常会导致探测结果有所偏差.利用 ANSYS 对典型地下空洞地电模型进行了数值模拟,结果表明探测精度不仅与空洞埋深、电阻率值高低及相邻洞体间距有关,还与所采用的探测装置类型、电极间距等因素有关;还通过对实际煤矿采空区开展高密度电法的数值模拟,计算结果与现场实测结果基本一致,也证明将数值模拟技术与现场实测结果相结合,对于补充解释和准确判断地下空洞的分布具有较好的参考价值.

关键词:高密度电阻率法;地下空洞;视电阻率断面图;数值模拟

中图分类号:P631.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2014)03-0033-04

Analysis on the high - density resistivity method of underground cavity by numerical simulation

ZHENG Mingxin, ZHANG Yongwei, CHEN Yangqiang, LIU Lin, HUANG Wenjun

(Institute of Bridge & Road Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: When detecting the underground cavity by the high-density resistivity method, a deviation detection results were made due to the interference factor of the type of underground cavity and current distribution. Typical models of underground cavity were simulated and analyzed by means of numerical simulation method of ANSYS. The results show that the accuracy of the detection results not only involve with the depth, the level of resistivity values and the distance of the adjacent hole, but also has something to do with the type of detecting devices and the electrode spacing etc. Through the numerical simulation of high-density resistivity method in the actual coal-mining area, the calculation results and the field test results are basically consistent. And it also proves that combining the numerical simulation results and the field test results have good reference value for supplementary explaining and accurately determining the distribution of underground cavity.

Key words: high-density resistivity method; underground cavity; apparent resistivity cross section; numerical simulation

高密度电法是以岩土体导电性差异为基础的一类电探方法,研究在施加电场的作用下地中传导电流的分布规律.地下空洞的探测是根据所测定的电场分布来推断隐患区域的地质构造和异常体分布的情况.为解决隐患区域地下条件复杂,影响因素多的问题,研究在有地下空洞条件下稳定电流场分布及异常特征显得极为重要,需要进行大量的正

演模拟研究^[1].

目前在高密度电法正演方法^[2]中,使用较多的是数值模拟方法.数值模拟方法主要包括2种:有限差分法和有限单元法.对于物性参数复杂分布或场域的几何特征不规则以及起伏地形条件时,有限差分法的适应性较差;而有限单元法是将偏微分方程的边值问题通过变分法转变为有限元方法解

泛函极值问题,它适用于物性参数复杂分布区域和起伏地形条件.相比国外^[3-4],国内在利用有限单元法做电法的模拟研究相对较少.本文利用 ANSYS 软件在电法正演方面进行了大量的理论研究^[5],对几种常见的工程地质隐患模型进行模拟分析,并将模拟结果与工程实际进行对比分析,从而验证了 ANSYS 进行采空区高密度电法探测数值模拟^[6]的可行性.

1 典型地下空洞模型的数值模拟

1.1 ANSYS 稳定电流分析

利用 ANSYS 进行地电断面高密度电法的正演模拟,选择 ANSYS 软件中的稳态电流传导分析模块^[7],地电模型采用 PLANE230 二维八节点四边形单元,模型主要采用 3 种材料:大地、高阻异常体、低阻异常体.为便于在模型中加载电流,对地面和洞体边缘网格加密,模型及网格划分见图 1.对于内边界和地表边界在计算中自动满足,因此只需选择模拟无穷远边界,设置边界条件.施加的荷载主要是指在不同测点的不同极距的供电点 A、B 处赋大小相等,符号相反的电流,正值代表电流流入节点,负值代表流出节点.在求得测量点电位后,利用 APDL 语言编制程序对记录点的视电阻率进行计算.

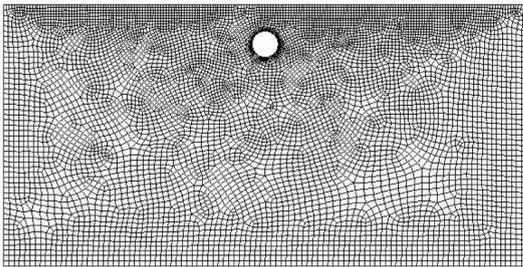


图 1 模型示意图

1.2 典型地下空洞模型

1) 不同埋深条件下目标体异常情况

水平大地下,有一圆柱(圆柱的走向沿 Z 轴),其截面半径 $r = 5 \text{ m}$,圆柱电阻率为 $\rho_1 = 1\,000 \Omega \cdot \text{m}$,埋深 h_0 分别为 4 m, 7 m, 10 m,大地电阻率 $\rho_2 = 500 \Omega \cdot \text{m}$.假设介质为各向同性,在一断面上进行二维模拟,建立如图 2 所示模型.在 3 种埋深情况下视电阻率 ρ_s 剖面曲线如图 3.

由图 3 可见,曲线形态基本可以反映 22 m 到 37 m 之间的高阻球体,在球心上方有 ρ_s 极大值,视电阻率曲线左右对称,可以根据 ρ_s 极值点的坐标判断球心在地面的投影位置.随着球体埋深加大,异常幅值会逐渐降低,影响测试效果,由图得 $h_0 = 4 \text{ m}$ 时,异常效果最为显著.

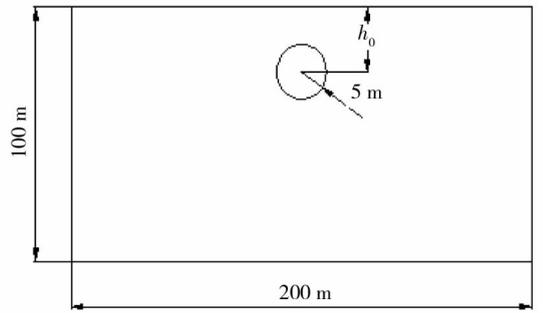


图 2 模型一示意图

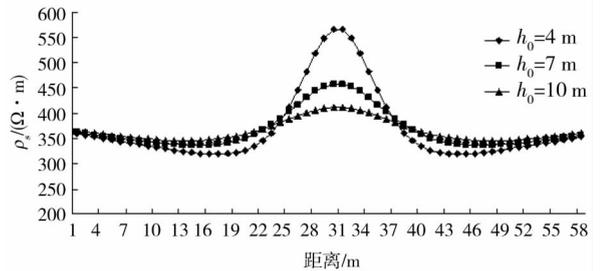


图 3 中梯装置 ρ_s 剖面曲线图

2) 不同装置条件下目标体异常情况

水平大地下,有一高阻圆柱(圆柱的走向沿 Z 轴),其截面半径为 $r = 3.5 \text{ m}$,球体的电阻率 $\rho_1 = 500 \Omega \cdot \text{m}$,埋深为 $h_0 = 4 \text{ m}$,大地电阻率 $\rho_2 = 100 \Omega \cdot \text{m}$,根据模型的特征,进行二维模拟(在 xy 平面内进行模拟),建立如图 4 所示模型.分别采用偶极装置和温纳装置(α 排列)进行模拟,隔离系数 $N = 1, 2, 3 \dots 9$.

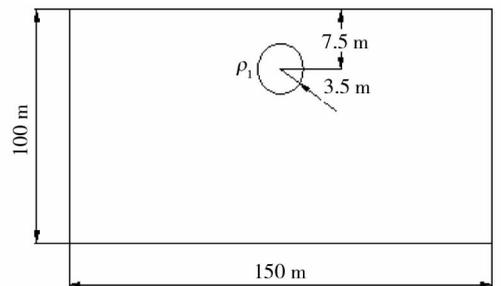


图 4 模型二示意图

图 5 偶极装置和温纳装置(α 排列)的视电阻率断面图(在模型和网格划分都相同情况下),可反应出一个位于 $-4 \sim 4 \text{ m}$ 的一个高阻异常.从图 5 (a)可以看出,根据深度和 N 经验转换公式^[8]可知,位于中心位置深度在 4 ~ 8 m 有高阻异常区,与正演模型吻合;两侧逐渐向斜下方衍生,呈上窄下宽的“八”字形.从图 5 (b)可以看出在中心位置下深度 4 m 左右有明显的电阻率大于 $116 \Omega \cdot \text{m}$ 的圆形高阻区域,与正演模型吻合.相比之下温纳装

置的效果更好。

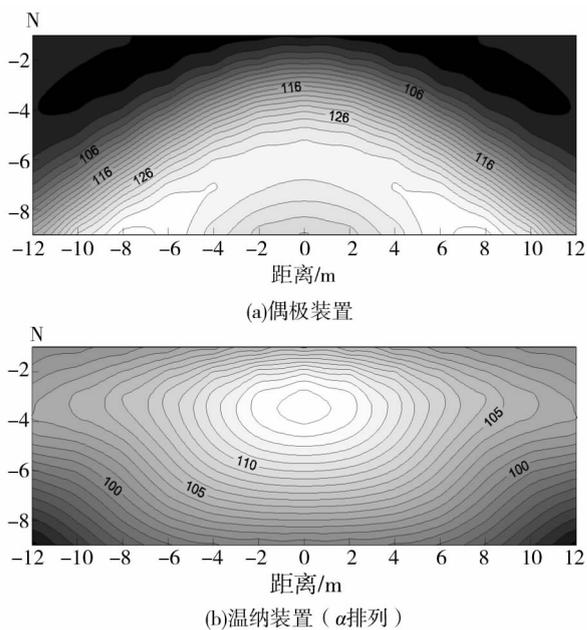


图5 视电阻率断面图

3) 相邻洞体研究

二维水平地面下,有2个相隔一定距离且埋深均为 $h_0 = 3\text{ m}$,电阻率 $\rho_2 = 500\ \Omega \cdot \text{m}$ 的地质体,其大小分别为半径 $r = 5\text{ m}$ 的圆和 $8\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的矩形,大地电阻率 $\rho_1 = 100\ \Omega \cdot \text{m}$. 采用温纳装置(α 排列)进行模拟. 建立如图6所示模型.

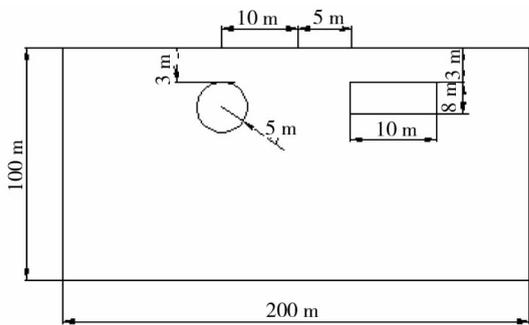


图6 模型三示意图

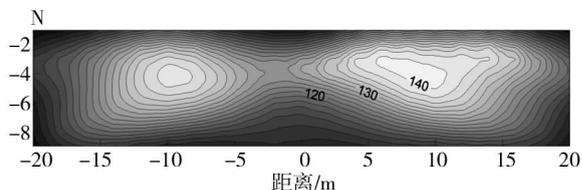


图7 两相邻高阻体正演模拟视电阻率断面图

在正演模拟结果中,如图7所示,左右两边分别出现近似圆形和矩形电阻率大于 $142\ \Omega \cdot \text{m}$ 的2个视电阻率异常区域,而当这2个地质体之间足够

近时,视电阻率异常区域将会合并为一个而无法分离出来,这时它们之间的距离可以认为是横向分辨率^[9]. 2个高阻的异常体极距越小,横向分辨率也就越差.

2 工程实例模拟研究

2.1 工程地质概况

富阳市万市镇杨家村煤矿和桐庐县朝阳村煤矿经过多年的开采,形成了大片的采空区,加上煤层埋藏较浅,在原矿区范围内造成了多处塌陷区. 采空区矿山出露的岩层为寒武系地层,主要为下寒武统荷塘组和中寒武统扬柳岗组灰岩. 决定采用高密度电法探明这一区域煤矿采空区的分布情况,测区物探测线布置示意图如图8所示.

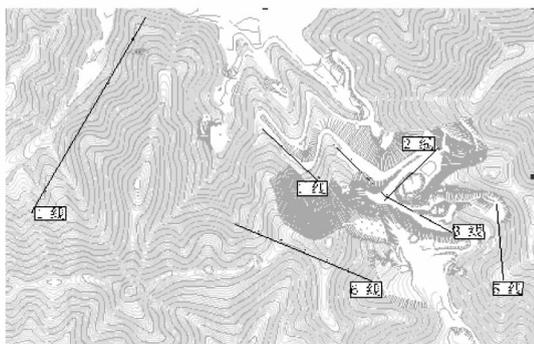


图8 测区物探测线布置示意图

2.2 高密度电法仪器设备、方法选择

高密度电法量测系统为重庆奔腾数控技术研究所生产的WDJD-3型高密度测量系统,该系统集电剖面 and 电测深于一体,采用高密度布点,具有数据快速采集,多参数测量,能获取关于地电断面结构特征的大量信息. 野外测量时将剖面上电极一次性布设好,设置好仪器的采集参数和装置参数,则可自动进行断面视电阻率值的测量和存储记录工作. 视电阻率断面图是研究沿测线方向的断面上视电阻率 ρ_s 值的变化特征,能比较详细地反映出地下地质构造和各种地质体的赋存状态^[10].

2.3 实测结果模拟

图9是实测的2线高密度电法的反演剖面图,从图中可发现在测线范围有4块采空区. 整个测线视电阻率变化情况大体一致,总体趋势是上低下高,变化范围在几十~几百 $\Omega \cdot \text{m}$ 之间. 第1块水平桩号在 $24.3 \sim 32.9\text{ m}$ 之间,高程在 $236.9 \sim 244.0\text{ m}$ 之间;第2块水平桩号在 $53.3 \sim 68.3\text{ m}$ 之间,高程在 $235.0 \sim 244.5\text{ m}$ 之间;第3块水平桩号在 $83.5 \sim 102.7\text{ m}$ 之间,高程在 $237.4 \sim 249.4\text{ m}$ 之间;第4块水平桩号在 $127.7 \sim 131.8\text{ m}$ 之间,

高程在 248.6 ~ 253.8 m 之间。

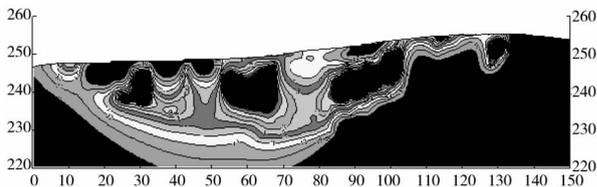


图9 测线2高密度电法反演剖面图

根据实测结果所得到的采空区分布情况建立 ANSYS 模型进行正演模拟,在水平地面下设置不同间距的异常体,异常体电阻率为 $\rho_2 = 500 \Omega \cdot m$,大地电阻率为 $\rho_1 = 100 \Omega \cdot m$,模拟实际情况采用温纳装置(α 排列),模型示意图如图 10 所示。测线长度为 150 m,电极距分别取 3 m 和 5 m。

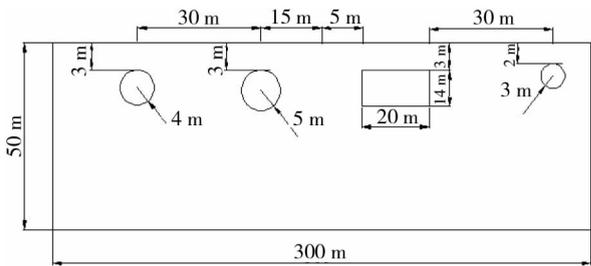


图10 模型示意图

模拟结果如下图所示,图 11 是电极距为 5,3 m 时,温纳装置的视电阻率断面图。从图 11 不仅能反映出异常区域的水平位置 -57 ~ -35 m, -21 ~ -3 m, 6 ~ 33 m, 51 ~ 60 m 处存在地下异常区域,而且也能反映出大致埋深。在 5 m 极距时,可以反映出异常区域大致位置,但异常区域形状,埋深情况反映不明;而在 3 m 极距时,因为数据点增加,在异常区域反映的更明显,从图 11(b) 不仅可以看出存在 4 块

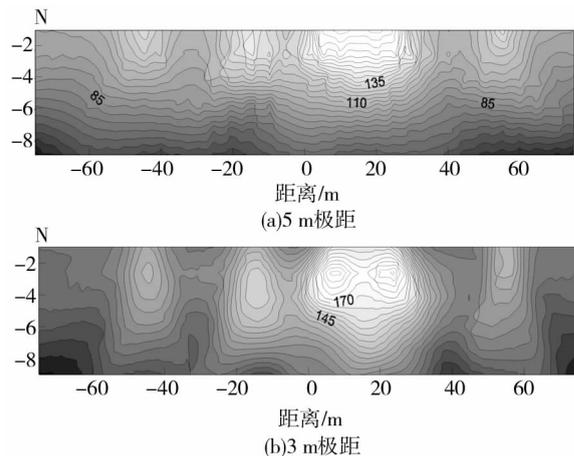


图11 温纳装置视电阻率断面图

电阻率在 $200 \Omega \cdot m$ 以上异常区域,而且能大致反映出埋深在 3 m 左右和异常体的外形。将图 11 所得模拟结果同图 9 实测结果进行对比,电极距越小断面图的效果也就越理想,与实测结果基本一致。

3 结论

1) 通过 ANSYS 有限法模拟了不同地下空洞类型,得到随着探测深度的增大,采用高密度电法探测的范围会变小,效果也会变差;而对同一目标体的探测,温纳装置要明显优于中梯装置;地下不同间距高阻体间距越大横向分辨率越高,而间距越小横向分辨率则越低;供电电极距越小,计算结果也就越精确。

2) 通过对实际煤矿采空区高密度电法数值模拟表明,计算结果与现场实测结果基本一致,证明将数值模拟与现场实测相结合,对于补充解释和准确判断地下采空区分布具有较好的参考价值。

参考文献:

- [1] Coggon J H. Electromagnetic and electrical modeling by the finite element method [J]. Geophysics, 1971, 36 (2):132 - 151.
- [2] 邓正栋,关洪军,聂永平,等. 稳定点电流源场三维有限差分正演模拟[J]. 解放军理工大学学报,2000, 1 (3):2609 - 2616.
- [3] Lamontagne Y, West G F. EM response of a rectangular thin Plate [J]. Geophysics, 1971, 36:26
- [4] Alfano L. Introduction to the interpretation of resistivity measurements for complicated structural condition [J]. Geophysical Prospecting, 1959(7):311 - 316.
- [5] 张军,赵莹,马炳镇. 基于 ANSYS 的矿井直流电场模拟[J]. 地球物理学进展,2012,27(6):2610 - 2616.
- [6] 阮百尧,熊彬,徐世浙,等. 三维地电断面电阻率测深有限元数值模拟[J]. 中国地质大学学报,2001,26(1): 73 - 77.
- [7] 胡仁喜,孙明礼. ANSYS13.0 电磁学有限元分析从入门到精通[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
- [8] 中南矿冶学院物探所教研室编. 金属矿电法勘探[M]. 北京:冶金工业出版社,1980.
- [9] 孙瑛. 基于 ANSYS 直流电阻率法在工程地质隐患探测的正演研究[D]. 南京:南京大学,2012.
- [10] 袁树森,张志军. 高密度电阻率法在地下煤矿采空区探测中的应用[J]. 矿产与地质,2006,20(3):273 - 278.