

黄俊革, 鲍光淑, 阮百尧. 坑道直流电阻率测深异常研究. 地球物理学报, 2005, 48(1): 222 ~ 228

Huang J G, Bao G S, Yuan B Y. A study on anomalous bodies of DC resistivity sounding in tunnel. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, 48(1): 222 ~ 228

坑道直流电阻率测深异常研究

黄俊革¹, 鲍光淑², 阮百尧¹

1 桂林工学院资源与环境工程系, 桂林 541004

2 中南大学资源环境与建筑工程学院, 长沙 410083

摘 要 电阻率测深数据可利用坑道的四个面和四个角得到. 但由于受到坑道本身和体积效应影响, 坑道内电阻率测深资料解释的困难很大. 本文用有限单元法对坑道内的直流电阻率测深进行数值模拟计算. 首先给出坑道中正常电位的取值, 并利用有限单元异常电位算法对坑道内电阻率测深进行正演计算. 结果表明, 在异常体断面尺寸、埋深及所用电极距与坑道截面尺寸相差不大时, 坑道面上的测深断面反映的基本是本坑道面外侧地质体的信息, 对其他位置的地质体没有明显反映, 坑道角断面则反映的是相邻两个坑道面外侧地质体的综合信息.

关键词 坑道 电阻率 测深 有限元 数值模拟

文章编号 0001 - 5733(2005)01 - 0222 - 07 中图分类号 P631 收稿日期 2003 - 07 - 14, 2004 - 09 - 27 收修定稿

A study on anomalous bodies of DC resistivity sounding in tunnel

HUANG Jun-Ge^{1, 2}, BAO Guang-Shu², RUAN Bai-Yao¹

1 Department of Resources and Environment Engineering, Guilin Institute of Technology, Guilin 541004, China

2 School of Infor Physics Engineering, Central-South University, Changsha 410083, China

Abstract The resistivity sounding data can be obtained on four corners and four surfaces in tunnel. It is difficult to interpret the sounding data in tunnel because of the influence of tunnel and volume effect. In this paper, we perform modeling of DC resistivity sounding in tunnel using the finite element method (FEM). First, the value of normal potential in tunnel is presented. Then, modeling of resistivity sounding in tunnel using anomalous potential method of FEM is performed. The result shows that, when the size, the depth of bodies and spacing of electrodes are little different from the size of the cross section of tunnel, the section maps of sounding on surface of tunnel mainly reflect the geologic bodies outside the surface and weakly the bodies on other positions. The section maps of sounding on corners of tunnel show the bodies outside the two adjacent surfaces synthetically.

Key words Tunnel, Resistivity, Sounding, FEM, Numerical Modeling.

1 引 言

矿山和一些工程勘探工作中,常常遇到坑道测量的问题,主要涉及金属矿探测^[1,2]、坑道超前探

测^[3]、地下水变化的监测^[4]等方面;坑道内测量的最大优势是可以对异常体进行近距离探测,但是它也有明显的缺陷,尤其在电阻率测量时,坑道本身对测量结果具有较大影响;同时由于体积效应,沿任何一个坑道面或坑道角的测量,除了反映本测线外侧

基金项目 国家自然科学基金项目(40064001)、教育部优秀青年教师基金项目、广西培养新世纪学术和技术带头人专项资金部分研究内容、桂林工学院科研启动费项目联合资助。

作者简介 黄俊革, 1966 生, 男, 副教授, 2003 年于中南大学信息物理工程学院获博士学位, 主要研究方向为电法勘探和地球物理数值模拟技术. E-mail: hjunge@163.com

(上、下、左、右)的地质体,还会受到其他坑道面外侧的不均匀体的影响,坑道内地质体的定位和定性分析困难较大,增加了资料解释的难度.

针对上述情况,刘煜洲等^[5]利用边界元法对坑道内壁点电源场进行了计算,初步研究了巷道对电阻率剖面测量的影响.本文利用有限单元异常电位算法对各个坑道面及坑道角上的电阻率测深曲线进行数值模拟并对断面异常进行分析.

2 有限单元异常电位算法

为了提高有限单元法求解三维电场的精度,采用异常电位法进行计算^[6],将全区域的积分分解为每个单元的积分,将各单元的积分相加,可以得到

$$Ku = - K u_0, \tag{1}$$

其中 K 和 K 为系数矩阵, u 为待求异常电位向量, u_0 为正常电位向量.解方程(1),可得各结点的异常电位 u .

3 坑道内正常电位的计算

均匀半空间、均匀全空间中电源点 A 分别位于

地表和地下时,地下某点 P 的正常电位 u_0 的表达式分别为

$$u_0 = \frac{I}{2 r} \tag{2}$$

和

$$u_0 = \frac{I}{4 r}, \tag{3}$$

其中的 I 为点 A 的供电电流, r 为均匀半空间或均匀全空间的电阻率, r 为电源点 A 到某点 P 的距离.对于地表水平的均匀半空间电源点 A 来说,大地对 A 所张的立体角为 2π ;对于均匀全空间,大地所张的立体角为 4π .因此空间的电位可以用大地对电源点所张的立体角来计算,(2)、(3)式可以用统一的表达式

$$u_0 = \frac{1}{\Omega} \frac{I}{r}, \tag{4}$$

式中 Ω 为空间对电源点所张的立体角,均匀半空间中 $\Omega = 2\pi$,均匀全空间中 $\Omega = 4\pi$.

在坑道中进行直流电阻率测量时,忽略地表反射面对地下电流场的影响,即假设坑道距离地表无穷大,地下近似为全空间, $\Omega = 4\pi$.用(4)式计算各结点的正常电位值,并采用下式计算视电阻率

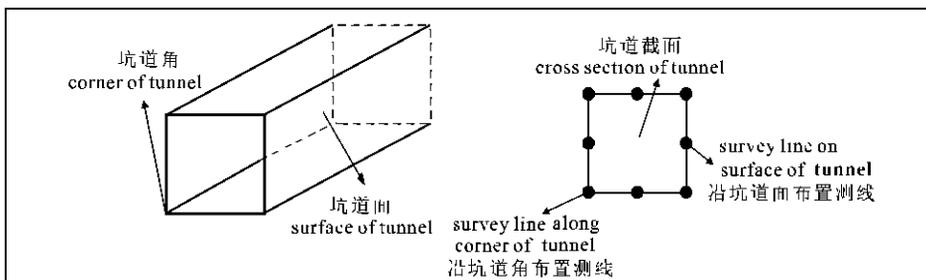


图 1 坑道测线布置示意图
(a) 坑道示意图;(b) 坑道截面及测线布置.

Fig. 1 Arrangement of survey lines in tunnel

(a) Diagram of tunnel ;(b) Tunnel section and arrangement of survey lines.

$$\rho_a = K \frac{V}{I}, \tag{5}$$

式中 V 为测量电极间的电位差, K 为电阻率法全空间的装置系数.测线沿坑道面布置,当测量点与电源点间距离较小时,大地对电源点所张的立体角近似为 2π ,与均匀半空间的情况类似,因此得到的视电阻率大约为大地真实电阻率的两倍.随着与电源点距离的增大,逐渐与全空间的情况类似,视电阻率与真实电阻率的结果越来越接近.测线沿坑道角布置,与电源点距离较小时,大地对电源点所张的立体角近似为 3π ,所测得的视电阻率应该为正常电阻率

的 $4/3$ 倍.随着与电源点距离的增大,逐渐与全空间的情况类似,视电阻率与真实电阻率的结果越来越接近.

为了验证以上分析结果,对坑道内偶极-偶极视电阻率测量装置进行数值模拟.设坑道的边长为 d ,由于坑道宽度大小影响测量结果,用偶极-偶极的探测深度 OO 与坑道宽度 d 之比 t 作横坐标,考察视电阻率随极距变化的关系.模型中坑道边长 $2m$,围岩电阻率为 $20 \Omega m$,测线分别沿坑道面和坑道角布置,正演模拟结果见图 2 所示.沿坑道面布置的测线(图 2a),在小极距时,视电阻率接近围岩电阻率的

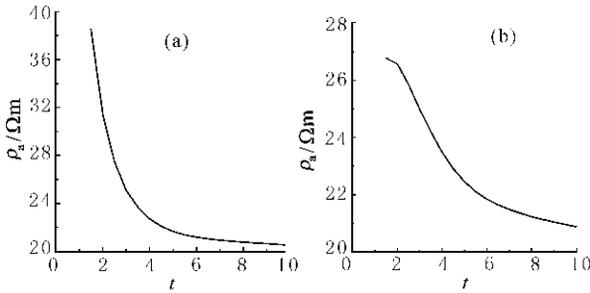


图2 坑道内偶极-偶极测量装置的视电阻率与探测深度 OO 关系

(a) 沿坑道面布置测线; (b) 沿坑道角布置测线.

Fig. 2 Relationship between apparent resistivity and probing depth OO (dipole-dipole array) in tunnel
(a) Survey lines on the surface of tunnel;
(b) Survey lines along the corners of tunnel.

两倍,随着极距的不断增大,视电阻率逐渐与围岩电阻率相近, $t = 7$ 时,视电阻率与围岩电阻率的偏差在5%以内;沿坑道角布置的测线(图2b),在小极距时,视电阻率接近围岩电阻率的4/3倍,随着极距的不断增大,视电阻率逐渐与围岩电阻率相近, $t = 10$ 时,视电阻率与围岩电阻率的偏差在5%以内.

综上所述,只有增大探测深度与坑道宽度的比例,即尽量保持较大的探测深度,才能减少坑道对视电阻率的影响.以偶极装置为例,当 $t = 10$ 时,坑道的影响基本可以忽略.当然,当 $t \ll 1$ 时,所测得的视电阻率可以完全按照均匀半空间的情况计算.

4 坑道异常体的正演模拟

由于体积效应,坑道内的电阻率测量,反映的是整个空间的综合效应,在任意坑道面上的观测,都含有坑道四壁外侧的地质体的信息.为了比较各条测线对不同位置的地质体的反映,在坑道内布置了8条剖面(图1b)进行测量,坑道面测线和坑道角测线各4条,测线走向与坑道方向一致;坑道面测线布置于各个坑道面的中心位置,坑道角测线位于两个坑

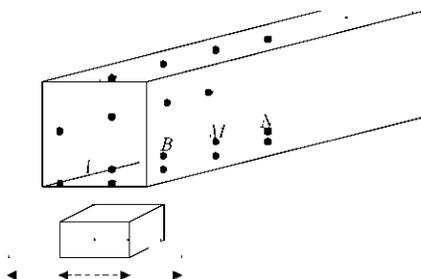


图3 算例1~3模型示意图

Fig 3 Sketch diagram of models for example 1 to 3

道面的交线上.坑道电阻率在理论上应为无穷大,在算法中取 $5 \times 10^9 m$ 模拟,坑道边长为4m,长度80m,坑道顶部距离地表100m.所有算例均采用偶极-偶极装置进行测量, $AB = MN = 1m$,点距1m.

为了研究在不同空间位置的测线对三维地质体的响应,本文采用了不同尺寸、不同空间位置以及不同的电阻率特征的三维地质体作为研究对象,对每个坑道面和坑道角上的测线所测得的电阻率断面进行分析对比.为了方便说明问题,给每个坑道面和坑道角统一以其空间位置命名,测线编号与其所处相应的位置名相同,例如坑道地面的坑道面命名为底面,坑道左侧的坑道面叫左面,坑道左面与底面的交线称为左下角等.

坑道底面下方存在低阻长方体,长方体走向与坑道垂直,围岩电阻率为100 m,低阻体电阻率为1 m,埋深1m;长方体截面为5m x5m的正方形.为了考察长方体长度变化对各剖面测量结果的影响,计算当其长度分别为4m、8m以及无限延伸时各条测线上的响应.这里,模型相对于坑道来说是轴对称的,只需计算两个坑道角和三个坑道面的断面,即底面、左下角、左面、左上角、顶面的结果即可.由于偶极-偶极测深的隔离系数 n 从1增大到20,在坑道的各个断面图上均不同程度地受到坑道的影响,但这并不影响对地质体异常形态的分析.

算例1

图4中所示的断面图为低阻体长度为4m时的计算结果.此时,地质体完全处于坑道底面正下方1m处.在所有的视电阻率断面图中,底面对低阻体的反映最强,“八”字形特征非常明显(图4e),与低阻球体的异常特征极为相似;另外一个低阻异常比较明显的断面为左下角的断面(图4c),但异常的强度相对底面来说稍弱了一些.在坑道左上角、左侧面和顶面的断面图中(图4(a,b,d)),没有任何低阻体的反映.

算例2

算例1的结果为低阻体的长度未超出坑道边长的情况.不改变坑道截面大小,围岩、低阻体电阻率均不改变,低阻长方体截面仍与上例相同,加大低阻长方体的长度,使其由原来的4m增加到8m,超出坑道的边长,正演模拟结果见图5.与图4对比,底面断面(图5e)异常形态基本没有改变,坑道左下角(图5c)上的异常幅度增大了;与算例1相似,坑道左上角、坑道左侧面和顶面的视电阻率断面(图5(a,b,d))均没有低阻体的反应.

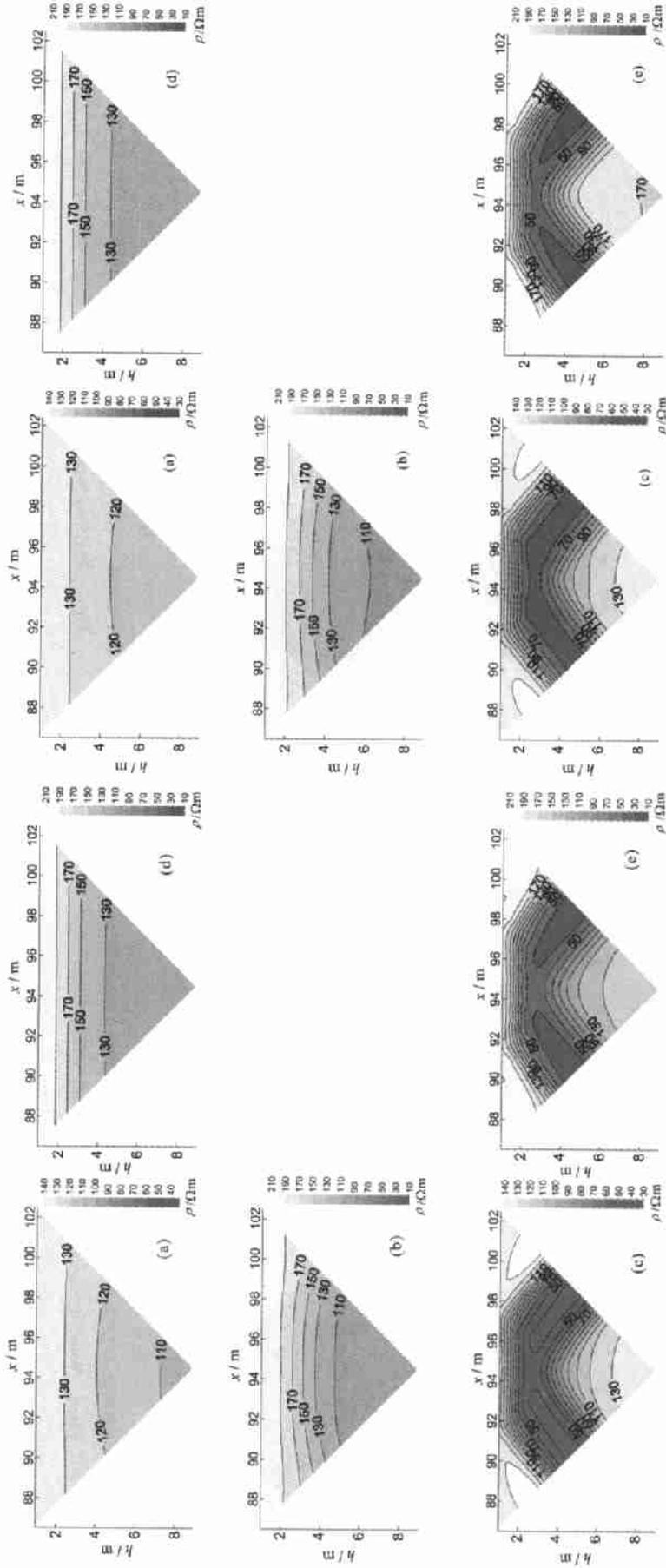


图 4 低阻体长度为 4m 时的正演模拟结果

图 5 低阻长方体长度为 8m 时的正演模拟结果

Fig.4 Modeling results of low-resistivity body with the length of 4m

Fig.5 Modeling results of low-resistivity body with the length of 8m

(a) Up-left corner section; (b) Left section; (c) Lower-left corner section; (d) Top section; (e) Bottom section.

(a) Left section; (b) Lower-left corner section; (c) Left section; (d) Top section; (e) Bottom section.

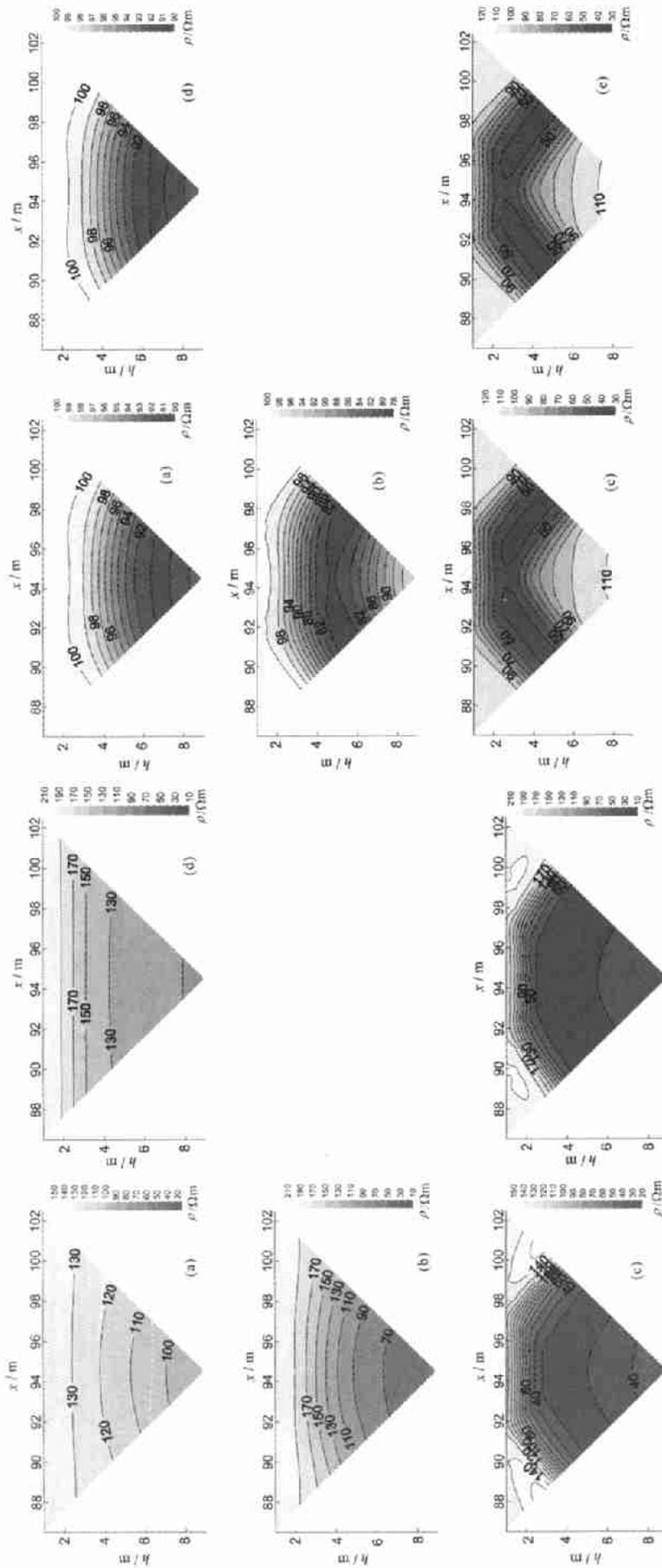


图 7 无限长低阻体正演模拟结果

(a)左上角断面;(b)左面断面;(c)左下角断面;(d)顶面断面;(e)底面断面.

Fig.7 Modeling results of low-resistivity body extending limit

(a) Top-left corner section;(b) Left section;(c) Lower-left corner section;

(d) Top section;(e) Bottom section.

图 6 无坑道时低阻体正演模拟结果

(a)左上角断面;(b)左面断面;(c)顶面断面;(d)底面断面.

Fig.6 Modeling results of low-resistivity body without tunnel

(a) Top-left corner section;(b) Left section;(c) Lower-left corner section;

(d) Top section;(e) Bottom section.

事实上,当没有坑道存在时,同样位置、相同大小的低阻体,在相应的剖面上,异常是比较明显的.图 6 为没有坑道存在时各剖面的计算结果.

算例 3

在不改变长方体截面等参数的前提下,继续增大长方体的长度至无限长,模拟计算结果见图 7.图 7 中,左下角和底面上的电阻率断面图(图 7c,7e)中低阻异常的基本形态没有改变,只是异常幅值有所增加.在坑道左侧面的电阻率断面(图 7b)上已经可以清楚地看到低阻异常,形象地说,随着低阻长方体长度不断增加,“看到”了低阻体.而坑道左上角和顶面的电阻率断面(图 7a,7d)基本没有改变,仍然“看不到”低阻体.

从以上几个算例的计算结果来看,在异常体断面尺寸、埋深及所用电极距与坑道截面尺寸相差不

大时,坑道对地质体的响应具有一定的屏蔽作用.那么,是否在某个坑道面进行测量时,主要反映的是本坑道面以下地质体的信息呢?为了验证这一结论,以算例 2 的模型为背景,坑道左侧面以外 1m 处存在一 5m x5m x4m 高阻体立方体,电阻率为 500 m,计算结果见图 8.图中,坑道底面的电阻率断面(图 8e)并未受到左侧面高阻体的影响;左下角的断面(图 8c)则既包含高阻信息,也有低阻体信息存在;左侧面断面(图 8b)上只有高阻体的反应.

根据以上多个实例的计算结果,可以得出,在坑道内进行电阻率测量时,为了解坑道某个侧面(底面、顶面)以外(以下、以上)的地质体信息,应尽量在坑道面上布设测线;坑道角布设的测线反映了两个坑道面外侧地质体信息,但对地质体的定位、定性分析就会变得比较困难,应尽量避免.

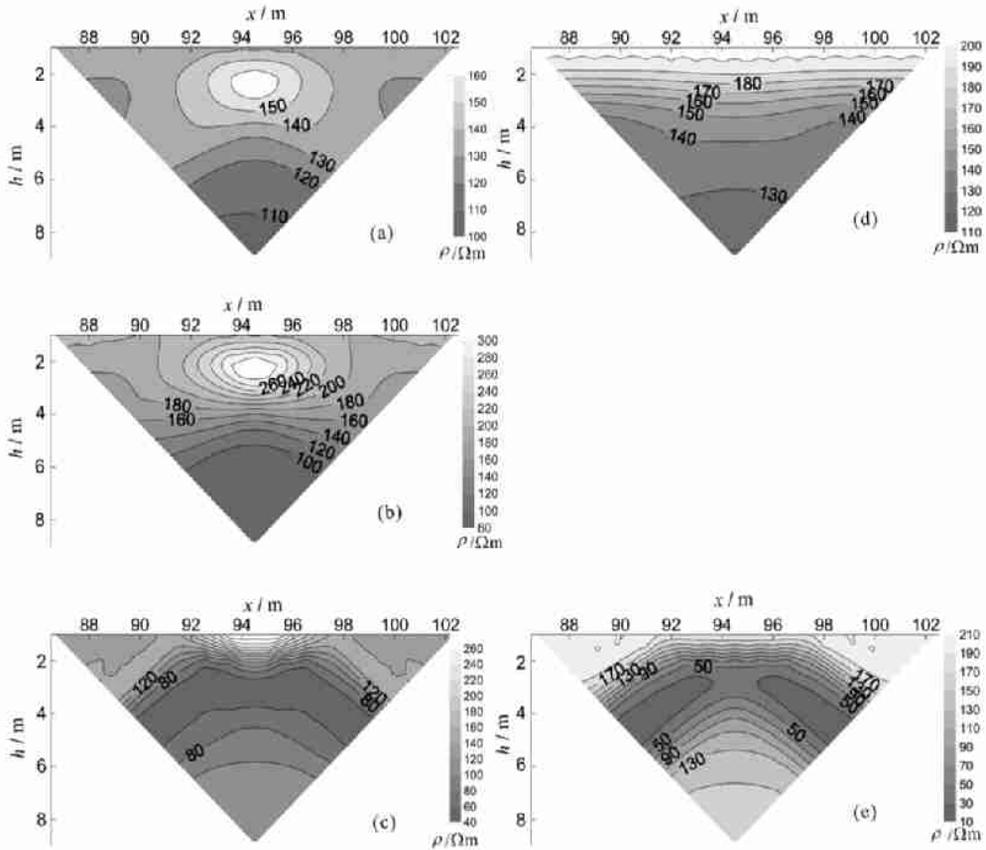


图 8 坑道外侧存在多个地质体的正演模拟结果 (a)左上角断面;(b)左面断面;(c)左下角断面;(d)顶面断面;(e)底面断面.

Fig. 8 Modeling results of several geologic bodies around the tunnel (a) Up-left corner section;(b) Left section;(c)Lower-left corner section;(d) Top section;(e) Bottom section.

5 结 论

5.1 在坑道内进行电阻率测量时,坑道对视电阻率

具有较大影响,距离电源点越近,影响越大.因此,增大电阻率测量的收发距,可以有效地减少坑道本身的影响.

5.2 沿坑道面布置的测深断面,在异常体断面尺

寸、埋深及所用电极距与坑道截面尺寸相差不大时,主要反映的是本坑道面外侧地质体信息,与其他坑道面外侧地质体的分布基本无关;因此在坑道内进行电阻率测深时,可以根据实际需要在相应的坑道面上布设测线,以了解该延伸方向上的地质体分布情况.

5.3 沿坑道角布置的测深断面,了解的是相邻两坑道面外侧地质体的综合信息,信息量大,资料解释难度也大,应尽量避免.

参考文献 (References)

- [1] 敬荣中,鲍光淑,周 屹. 坑道综合物探方法在生产矿山中的应用. 中南工业大学学报, 2000, 31(1) : 4 ~ 8
Jing R Z, Bao G S, Zhou Q. The application of composite geophysical methods in mine tunnels. *Journal of Central South University* (in Chinese), 2000, 31(1) : 4 ~ 8
- [2] 徐振超. 几种常规直流电法在矿山坑道中的应用. 矿产与地质, 1995, 49(5) : 337 ~ 340
Xu Z C. The application of DC resistivity methods in mine tunnels. *Mineral Resources and Geology* (in Chinese), 1995, 49(5) : 337 ~ 340
- [3] 程玖龙,王玉和,于师建等. 巷道掘进中电阻率法超前探测原理与应用. 煤田地质与勘探, 2000, 28(4) : 60 ~ 62
Cheng J L, Wang Y H, Yu S J, et al. The principle and application of advance surveying in roadway excavation by resistivity method. *Coal Geology and Exploration* (in Chinese), 2000, 28(4) : 60 ~ 62
- [4] Koichi Suzuki, Eiji Nakata, Masayuki Minami, et al. Estimation of the zone of excavation disturbance around tunnels, using resistivity and acoustic tomography. *Exploration Geophysics*, 2004, 35 : 62 ~ 69
- [5] 刘煜洲,陈福集,寇绳武等. 全空间中内壁点电源场电位的边界元算法及其应用. 物探化探计算技术, 1997, 19(4) : 317 ~ 322
Liu Y Z, Chen F J, Kou S W, et al. The boundary element method used for calculating the electric potential of point power supply field on the internal wall of empty cavity in 3-D space and application. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 1997, 19(4) : 317 ~ 322
- [6] 徐世浙. 地球物理中的有限单元法. 北京: 科学出版社, 1994. 178 ~ 188
Xu S Z. *The Finite Element Method in Geophysics* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1994. 178 ~ 188
- [7] 阮百尧,熊 彬,徐世浙. 三维地电断面电阻率测深有限元数值模拟. 地球科学, 2001, 26(1) : 73 ~ 77
Ruan B Y, Xiong B, Xu S Z. Finite element method for modeling resistivity sounding 3-D geo-electric section. *Earth Science-Journal of China University of Geoscience* (in Chinese), 2001, 26(1) : 73 ~ 77
- [8] 黄俊革,阮百尧,鲍光淑. 齐次边界条件下三维地电断面电阻率有限元数值模拟法. 桂林工学院学报, 2002, 22(1) : 11 ~ 14
Huang J G, Ruan B Y, Bao G S. FEM under quantic-boundary condition for modeling resistivity on 3-D geoelectric section. *Journal of Guilin Institute of Technology* (in Chinese), 2002, 22(1) : 11 ~ 14
- [9] 阮百尧,熊 彬. 电导率连续变化的三维电阻率测深有限元模拟. 地球物理学报, 2002, 45(1) : 131 ~ 138
Ruan B Y, Xiong B. A finite element modeling of three dimensional resistivity sounding with continuous conductivity. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, 45(1) : 131 ~ 138