

屏蔽电极法数值模拟

黄松, 瓮晶波, 赵斌

(中南大学 信息物理工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 提出了屏蔽电极法——一种通过电流补偿来改变地下电流密度分布, 从而突出深部目标体的异常, 达到提高电法勘探深度目的的方法。先从理论上作了分析, 然后利用 ANSYS 软件进行了直流电阻率剖面和电阻率测深法的模拟计算。结果表明, 当屏蔽电极的位置和补偿电流的大小选择合理时, 屏蔽电极法较之一般直流电阻率法的探测深度有明显提高, 提高程度与地质体本身的形态、产状有内在的联系。理论分析和数值模拟都说明了该方法能够有效地提高直流电阻率法的勘探深度。

关键词: 屏蔽电极法; ANSYS; 勘探深度; 数值模拟

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2007)01-0038-05

地面直流电阻率法有一个普遍的弱点, 即地下电流的分布主要集中在近地表的浅部, 随深度的增加电流密度急剧衰减, 严重地影响了直流电阻率法的探测深度。地面电法勘探是通过测量地表的电场变化来探测地下电性不均匀体的, 如果所要探测的地电体受到的激励电流密度本身很小, 那么它对地表电场分布的影响也很小, 因而很难探测到它^[1]。过去常常采用加大供电电极距或者加大供电电流来增加勘探深度, 但这种措施以丧失轻便性和降低工作效率为代价, 而且探测深度加大的程度也不理想。因此, 寻求提高探测深度的途径一直是电法工作者努力的方向。

屏蔽电极法的研究思路始于前苏联的物探工作者, 即从改变地下电流密度的分布入手, 达到加大勘探深度的目的。据记载, 国外研究过单极、偶极以及四极屏蔽法, 国内黄启声研究过屏蔽法、费锡铨研究过聚焦法、李治华研究过可控深度电法等^[2]。笔者提出的屏蔽电极法, 就是在地表建立电流补偿装置, 借以改变地下电流密度的分布, 使得近地表的浅部有效电流密度相对减小, 地下某个深度的电流密度相对增大, 从而提高目标体的异常强度, 达到增大探测深度的目的。以常规的对称四极装置为例, 笔者通过理论分析和数值模拟, 证明了在合理选择屏蔽电极位置和补偿电流强度的前提下, 屏蔽电极法能够有效地提高电阻率法的探测深度, 有利于发现深部的电性不均匀体。

1 理论基础

对常规对称四极装置做如图 1 的改造, 即加上 2 个以装置中心 O 为对称的补偿电极 a 和 b , 就形成了屏蔽电极法的六极装置。该装置可做剖面 and 测深。做剖面测量时, 6 个电极 $AaMNbB$ 保持相对位置不变, 跑极时做整体移动; 做测深时则保持 ab/AB 的比例不变, 在 AB 极距拉大的同时, ab 极距按比例随之拉大。

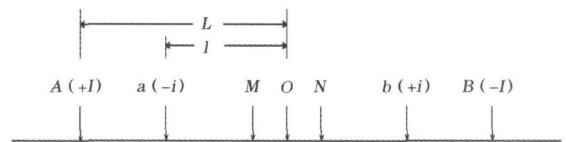


图 1 电极分布

下面将有屏蔽电极 a 、 b 的屏蔽六极装置和常规的对称四极装置在均匀半空间中的电流分布做一个对比。首先设置如下参数: 基本极距 $L = AO$, 补偿极距 $l = aO$, 令 $\alpha = l/L$ 。由 A 、 B 流入大地的基本电流为 I , 补偿电流为 i , 令 $\beta = i/I$ 。 j_0 为地表 O 点处的电流密度, j_h 为 O 点下方深度为 h 处的电流密度, j_{h0} 为此处地质体受 j_0 激励在地表产生的电流密度异常部分。从视电阻率的微分表达式 $s = (j_{MN}/j_0) \cdot \rho_0$ 来看, s 异常与 j_{MN}/j_0 成正比, 由于 $j_{MN} = j_0 + j_{h0}$, 故电阻率的相对异常为 $s/\rho_0 = j_{h0}/j_0$, 由均匀各向同性半无限介质表面点电源的电场特性, 以及场的叠加原理可以导出如下各式:

$$j_b = \frac{2}{L^2} \cdot \frac{I}{L^2}, \quad (1)$$

$$j_b = \left\{ \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{h}{L} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{h}{L} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right\} \cdot \frac{I}{L^2} \quad (2)$$

在理想状况下,通过对补偿极距和补偿电流的控制可以将地表 O 点的电流密度 j_b 调到 0,即达到临界补偿,使得在 MN 间观测到的电流密度只有 j_h 。此时由式 (1) 可得 $= 2$,这就是达到临界补偿的条件。将地表 O 点电流密度为 0 时的 e 值记为 e_0 ,若令 $e = e_0$,则 $e = 1$ 对应临界补偿状态,而 $e = 0$ 对应无补偿电流的状态。

将 e 值一定时, O 点及其下方电流密度沿深度的变化与 e 的取值关系作一个对比分析,结果见图 2a。临界补偿状态下, O 点及其下方电流密度沿深度的变化与 e 的取值关系见图 2b。图中 L 、 I 的取值均为无量纲值,曲线形态定性反映了相应的对比关系。

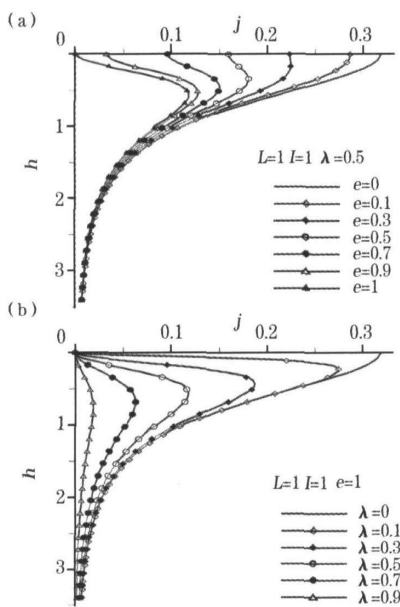


图 2 O 点下方电流密度大小与 e 、 λ 的取值关系

从图中的对比关系可以看出:屏蔽电极法的电流密度分布状况取决于 e 和 λ 值的选取。同常规四极法相比,屏蔽电极法的 j_b 可以调节,适当地选取 e 和 λ 值,可以将 j_b 调至为 0 的程度,而此时深部电流密度改变很少,从而 j_h 也将改变很少。从电阻率的相对异常表达式来看, j_b 有极大的减小而 j_h 几乎不变,显然相对异常将会有很大的提高,即加大了勘探深度。选取合适的 e 和 λ 值是必要的。显然 e 值越趋近 1,电流密度分布状况越理想,但考虑实际情况,一般不取到 1,因为此时对电流控制的精度要求很高,而且容易造成仪器读取数据的困难。而 λ 值

的选取不宜过小,也不宜过大,过小时,浅部会有很剧烈的电流密度变化,对克服浅部不均匀体不利;过大时,深部电流密度实际上也有较大幅度的衰减,不利于发现深部异常体。综合考虑, e 值取 0.8~0.9, λ 值取 0.3~0.5 比较理想。

2 数值模拟

物理模型难以模拟一些复杂的地质体或地电断面^[1]。随着计算机技术的飞速发展,各种数值模拟技术已有了长足的进步,成为解决地球物理正反演问题的有力工具^[3]。笔者采用 ANSYS 软件进行正演模拟计算。

ANSYS 软件是一个以有限元分析为基础的大型通用 CAE 软件,具有强大而广泛的分析功能,包括热、电、磁、流体和结构等诸多模块,具有强大的求解器和前、后处理功能,为人们解决复杂、庞大的工程项目和致力于高水平的科研攻关提供了一个优良的工作环境,更使我们从繁琐、单调的常规有限元编程中解脱出来^[4]。

直流电法三维有限元正演,国内外已有不少工作,直到近几年才逐渐进入实用阶段,但其仍然需要高端的硬件支持,而且如果要获得高精度的分析结果需要漫长的演算时间^[3]。鉴于演算量的关系,笔者进行的是二维模拟。ANSYS 中的二维模拟是在 xy 平面内进行的,加载在平面内的点电源实际上是沿 z 轴无限延伸的,具体地讲,应该是二维线电源的有限元模拟。尽管如此,就屏蔽电极法而言,其反映问题的能力具有很强的相似性,同样能说明问题。

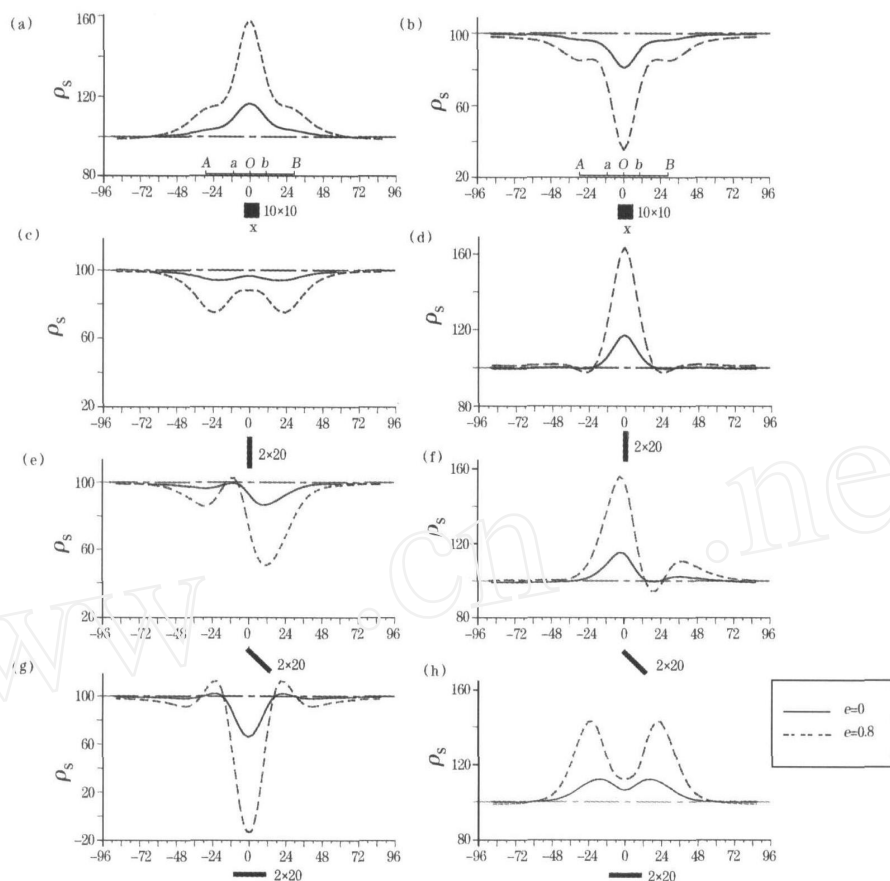
2.1 屏蔽电极法剖面测量模拟

模拟了板状和柱体 2 种地质体形态,分为高阻和低阻,板状体又分为水平、倾斜以及垂直 3 种产状。模型参数为:背景电阻率 100,低阻为 2,高阻为 5 000,基本极距 $AB = 58$,基本供电电流 $I = 1$,补偿极距 $= 0.3448$ ($ab = 20$)、补偿电流 $e = 0.8$, x 为点位距离,所有取值均为无量纲值。图 3 为 $h = 12$ 时的屏蔽电极法剖面模拟结果。

分析模拟计算的曲线可以看出:

(1)不同类型的地质体模型,在同等埋深条件下,屏蔽电极法的异常幅度都要大于常规法,而且提高的幅度很大。这说明相对常规对称四极法而言,屏蔽电极法的探测深度有很大提高。

(2)异常幅度(探测深度)的提高与地质体类型有一定相关性,这是由对称四极法本身的特点决定



a—低阻柱体；b—高阻柱体；c—低阻垂直板；d—高阻垂直板；e—低阻 45 倾斜板；f—高阻 45 倾斜板；g—低阻水平板；h—高阻水平板。图 4 图 5 同。

图 3 埋深为 12 时的屏蔽电极法剖面模拟结果

的。对称四极装置对低阻水平板和高阻垂直板的探测效果要明显优于低阻垂直板和高阻水平板，柱体和倾斜板则相差不大。屏蔽电极法也具有同样的规律。

(3)从曲线形态上来看，有屏蔽电极和没有屏蔽电极的异常曲线具有很强的相似性。屏蔽电极法的异常可以说是常规对称四极法的异常在幅度上的一种拉伸和放大，而在水平方向上异常位置并无改变，这样就有效地突出了异常。这种相似性对于推断异常体的位置和产状是有利的，基本上可以沿用常规对称四极法的推断法则。

(4)注意到低阻水平板的视电阻率出现了负值，这并不意味着此时的测量数据有问题，而是由屏蔽电极法的装置特点所引起的。因为此时低阻水平板被很好地激励，能强烈地反映到地表，使得地表观测点附近 j_h 的方向相反，因而出现负的视电阻率。要注意到 $e > 1$ 时，不论地下有没有异常地质体，都会测出负值，因此应调节补偿电流，使 $e = 1$ 。当满足此条件时， ρ_s 负值的出现将是低阻板状体或者低阻层状地质体赋存的 1 个极佳信号。

图 4 为各模型视电阻率极值埋深变化规律。

2 种装置剖面 ρ_s 异常曲线的对比，定性反映了屏蔽电极法相对常规对称四极法在提高探测深度上的有效性。而 ρ_s 随深度变化规律的对比则能定量反映这一点。分析图 4 的模拟结果可以得到如下结论：

(1)屏蔽电极法中，低阻柱体在埋深为 24 个单位时，相对视电阻率异常约 20%；而常规对称四极方法，当柱体埋深为 12 个单位时，相对视电阻率异常也为 20%。若以同样达到 20% 相对异常来衡量，屏蔽电极法对低阻柱体的探测深度有 1 倍的提高。类似地，高阻柱体的探测深度由 11 个单位提高到 23 个单位，也有近 1 倍的提高。

(2)对于板状体，屏蔽电极法相对常规对称四极法探测深度提高程度分别为：低阻垂直板由 4 个单位提高到 16 个单位，有 4 倍的提高；高阻垂直板则由 11 个单位提高到 22 个单位，有 1 倍的提高；低阻倾斜板由 9 个单位提高到 23 个单位，有近 1.5 倍的提高；高阻倾斜板由 11 个单位提高到 22 个单位，有 1 倍的提高；低阻水平板由 16 个单位提高到 32 个单位，有 1 倍的提高；高阻水平板由 4 个单位提高到 20 个单位，有近 5 倍的提高。

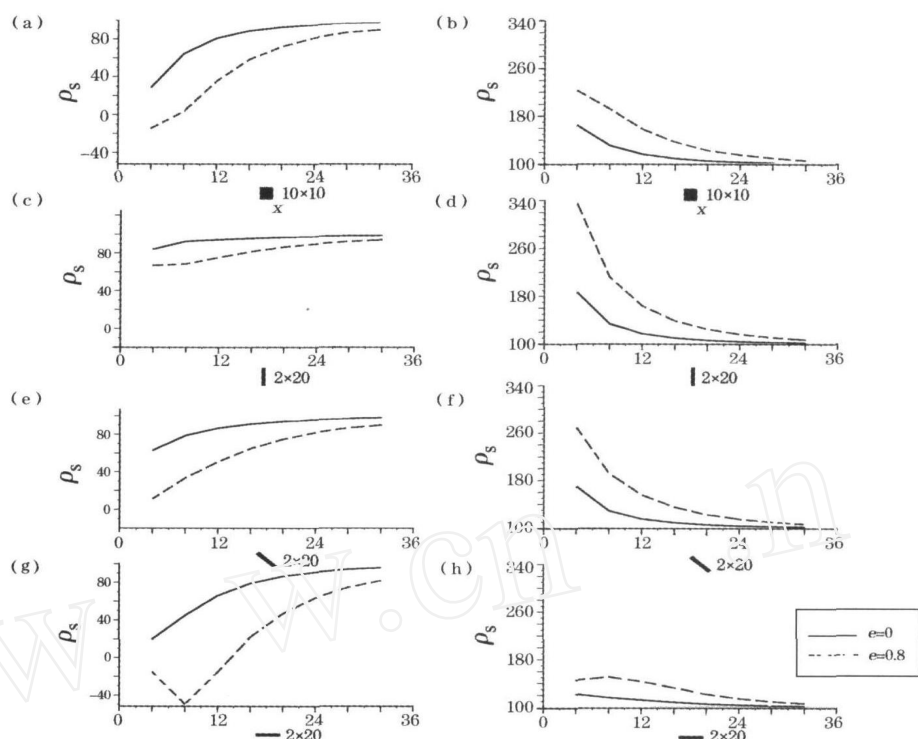


图 4 各模型视电阻率极值随埋深变化规律

从探测深度提高的程度上还可以看出,对于常规对称四极法所难以探测的地质体,如低阻垂直板、高阻水平板,屏蔽电极法的优势更为明显。

2.2 屏蔽电极法测深模拟

和剖面测量一样,模拟了板状和柱体 2 种地质

体形态,分为高阻和低阻,板状又分为水平、倾斜以及垂直(图 5)。倾斜板测深点位于板顶正上方,其他模型的测深点则位于模型中心点正上方。模型参数为:背景电阻率 100,低阻为 2,高阻为 5 000,基本供电电流为 $I=1$ 。此时,随着 $AB/2$ 的拉大,补偿极

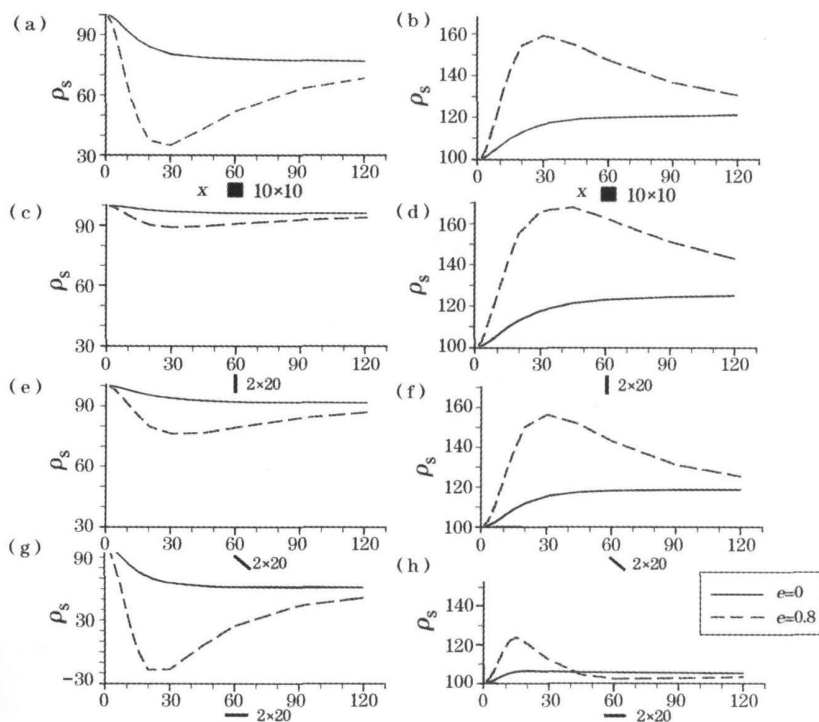


图 5 埋深为 12 的屏蔽电极法测深模拟结果

距也变化,但固定 $\rho = 0.3$,补偿电流固定取 $e = 0.8$,所有取值均为无量纲值。

对比分析各模型屏蔽电极测深与对称四极测深的曲线形态,有如下特点:

(1)对以上各种地质体模型,常规对称四极法的测深曲线形态和 2 层地电断面相似,而屏蔽电极法的测深形态则相似于 3 层地电断面。这实际上是对异常体的一种突出,在地质体埋深较大时,屏蔽电极法能有效地显示地质体的存在。从低阻体的模拟情况来看,有补偿电流的曲线都呈现出了近似 H 的形态。随着 $AB/2$ 的增加,视电阻率先是下降,到达极小值后又回升,并逐渐接近于常规测深的尾支。而高阻板则呈现 K 型曲线,与低阻板情况相反。

(2)虽然不同的低阻体呈现的测深曲线形态一样,但其低阻极值幅度有较大的差别。总体情况按低阻幅值由大到小为:水平板—柱体—倾斜板—垂直板,而高阻则是垂直板—柱体—倾斜板—水平板,这说明对低阻体,测深的效果与异常体或者构造的延展性关系密切,越接近水平呈层,效果越好。这与常规对称四极测深是一致的,只是有补偿电流的测深效果要显著得多。

(3)和剖面装置中一样,水平板的测深曲线同样出现了负的视电阻率情况。其出现情况和剖面法相似,负视电阻率的出现对于异常解释是有利的。它正好说明了地下有良导体的存在,而且是接近水平层状或者在宽度上有一定的延展性。

3 结论

对常规对称四极装置加以改造得到六极屏蔽装置。从理论分析和模拟计算来看,屏蔽电极法具有提高探测深度的效果。六极屏蔽装置的电流密度分布状况取决于 ρ 和 e 。考虑实际情况, ρ 值宜取 $0.3 \sim 0.5$,而 e 值宜取 $0.8 \sim 0.9$,此时的电流密度分布比较理想,最有利于发现深部异常体。同时地质体模型的电阻率和产状不同时,异常幅度提高的程度有一定差异。但总体而言,异常幅度是有很提高的,这说明屏蔽电极法在提高勘探深度方面是有效的。该方法特点鲜明,装置简单,异常曲线形态与常规对称四极有很强的相似性,便于推断解释。

该方法有不足之处。由于增加了 2 个电极,不但要增加人员,而且此时对跑极的准确性要求更高,需要更精确的测量控制和跑极工的责任心,同时调节补偿电流也需要较高的精度,才能获得较好的效果。这些问题都需要在实际应用中加以注意。

参考文献:

- [1] 中南矿冶学院物探所教研室. 金属矿电阻法勘探 [M]. 北京:冶金工业出版社, 1980.
- [2] 李治华. 可控深度电阻法勘探 [J]. 地质与勘探, 1994, 30 (6).
- [3] 徐世浙. 地球物理中的有限单元法 [M]. 北京:科学出版社, 1994.
- [4] 龚曙光, 谢桂兰. ANSYS 操作命令与参数化编程 [M]. 北京:机械工业出版社, 2004.

THE NUMERICAL SIMULATION OF THE SCREEN ELECTRODE METHOD

HUANG Song, WENG jing-bo, ZHAO Bin

(School of Info-Physical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The Screen Electrode Method (SEM) is an electro-exploring method which can emphasize anomaly of the deep object and increase the detecting depth of the electro-exploring method through changing the distribution of the underground current density by the current compensate electrode. First of all, the distribution of the current density in the uniform half space is theoretically analyzed in this paper when the screen electrodes are arranged at the earth's surface. Then simulating calculation of profiles and soundings of the DC electro-exploring method are numerically carried out, supported by ANSYS that is a software based on the finite element analysis method. The calculation results show that the detecting depth of SEM is deeper than that of the common DC electro-exploring method when the locations of the screen electrode and the intensity of the compensate current are rationally selected. The theoretical analysis and simulating calculation show that the SEM can efficiently increase the detecting depth of the DC electro-exploring method.

Key words: Screen Electrode Method, ANSYS, detecting depth, simulating calculation

作者简介: 黄松 (1981 -), 男, 中南大学信息物理工程学院 04 级在读硕士研究生, 主要从事地电场理论及观测系统研究。