



直流电法超前探测异常响应规律研究

崔少北^{1,2}, 陈威^{1,2}, 蔡军^{1,2}

(1 瓦斯灾害监控与应急技术国家重点实验室, 重庆 400039;

2 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037)

摘要:本文以全空间导电球模型为基础,根据点源条件下全空间任意场点的电位表达式,绘制全空间电位分布图,发现巷道后方镜像位置电位差曲线没有畸变,证明“球壳理论”不能解释超前探测的可行性。视电阻率的表达式可以取阶数 n 为 1 的简化形式,利用求导得到视电阻率极值点与点源的距离是源心距的两倍。设计了三极-三极法探测数据,通过移动、缩放和归一化处理,得到指示前方导电球体位置与范围的异常等值线图。

关键词:矿井直流电法;超前探查;球体;视电阻率;三极三极超前探测

中图分类号:P631.3

文献标识码:A

文章编号:1008-0155(2023)19-0001-03

DOI:10.13487/j.cnki.imce.024247

直流电法超前探测是掘进工作面前方富水异常体探测的主要方法之一,在我国有近 30a 的历史^[1-3]。直流电法超前探测的理论主要是“球壳理论”。球壳理论认为,当巷道前方存在异常时,后方对称位置电位也发生变化,在后方测到的异常可以对应解释前方地质条件。然而,一些专家学者对该理论的正确性提出质疑。张平松^[4]等认为依据点电源电场球壳理论的超前探测在应用中仍存在诸多问题;罗国平^[5]通过球体解析解计算、地面相似性试验和实例分析,认为该方法解释结果与实际相差较远;王鹏^[6]等梳理了“球壳理论”渊源,指出球壳理论解释直流电法超前探测技术的可行性及所获结论不具代表性。以上学者从球壳理论的源起、基本理论和解释方法等方面进行探讨,主要论点为:①当巷道前方存在异常体时,在巷道后方不会产生突变异常,直流电法超前探测的球壳理论存在问题;②视电阻率异常范围远大于异常体的实际大小,视电阻率极值点不能指示异常位置;③直流电法超前探测测得的异常信号主要来自巷道底板而非巷道前方。

本文根据点源条件下全空间任意点的电位表达式,分析点源前后方电位的分布特征,总结视电阻率极值点与导电球位置的对应关系,设计三极-三极法探测数据。

1 全空间导电球电场分布特征

1.1 电位分布

在电阻率为 ρ_1 的全空间中有一半径为 r_0 、电阻率为 ρ_2 的导电球,在球外一点 A 处供入电流 I (见图 1),则球外任意一点 M 的电位表达式 (1), $P_n(\cos\theta)$ 为 n 阶勒让德函数。

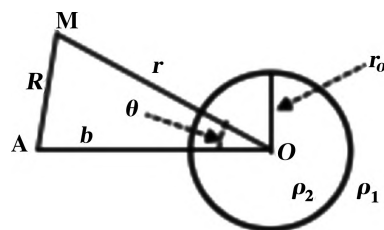


图 1 点源电流场导电球体图

电流 I 为 10A, 球体半径 r_0 为 10m, 源心距 b 为 20m, 电阻率 ρ_1 为 $100\Omega \cdot m$, 电阻率 ρ_2 取 $100\Omega \cdot m$ 和 $10\Omega \cdot m$ 两个值。在 n 取 100 的条件下, 绘制 AOM 平面上电位对数等值线图 (见图 2~图 3)。图中右侧实线圈为导电球, 左侧虚线圈为镜像球。当 ρ_2 取 $10\Omega \cdot m$ 时, 导电球位置电位畸变明显, 在镜像球体位置电位线未出现明显畸变。

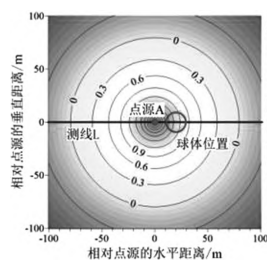


图 2 电位对数等值线图

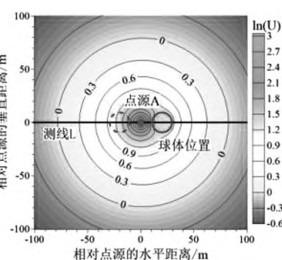


图 3 导电球电位对数等值线图

1.2 视电阻率曲线

设球体位于巷道正前方, 电位差、视电阻率的表达式为式 (2)、式 (3), 式中 R_{M-N} 为 MN 的中点坐标。在 n 取值不同时, 沿测线 L 绘制电位 U_M 、电位差 U_{MN} 和视电阻率曲线 (图 4~图 6)。图 4 中, 电位随测点远离点源逐渐下降; 右侧电位曲线出现明显变化; 左侧电位曲线呈现平缓下降。图 5 中, 电位差 U_{MN} 随着 R_{M-N} 的增大

而平缓下降。图6中,1阶曲线明显偏离其他曲线,高阶视电阻率曲线接近重合。

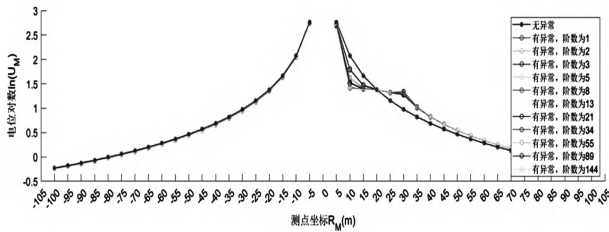


图4 电位变化曲线

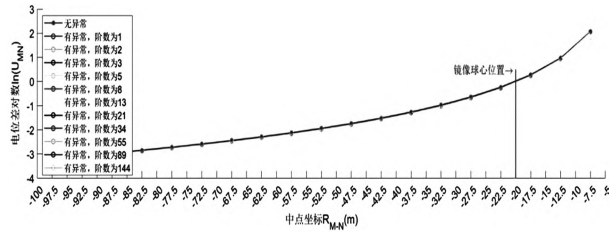


图5 电位差变化曲线

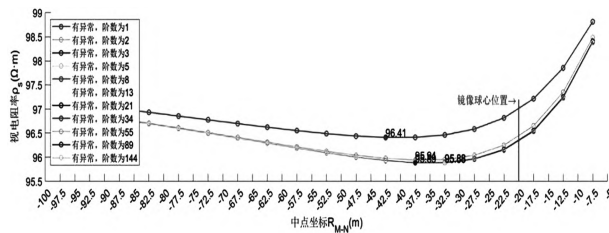


图6 视电阻率变化曲线

2 异常位置判别

2.1 电位差表达式的简化

设 $Ratio_i$ ($Ratio_1 = 1$) 为式(2)中相邻累加项的比值,电位差 U_{MN} 表达式变形为:

$$U = \frac{I\rho_1}{4\pi} \left[\frac{1}{R} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\rho_2 - \rho_1)n}{\rho_1 n + \rho_2(n+1)} \frac{r_0^{2n+1}}{b^{n+1} r^{n+1}} P_n(\cos\theta) \right] \quad (1)$$

$$U_{MN} = \frac{I\rho_1}{4\pi} \left[\frac{a}{4R_M^2 - a} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\rho_2 - \rho_1)n}{\rho_1 n + \rho_2(n+1)} \frac{r_0^{2n+1} r_N^{n+1} - r_M^{n+1}}{b^{n+1} r_M^{n+1} r_N^{n+1}} \right] \quad (2)$$

$$\rho_s = K \frac{U_{MN}}{I} = \frac{4\pi R_M R_N U_M - U_N}{a I} \quad (3)$$

$$U_{MN} = \frac{I\rho_1}{4\pi} \left[\left(\frac{1}{R_M} - \frac{1}{R_N} \right) + \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + 2\rho_2} \frac{r_0^3 r_N^2 - r_M^2}{b^2 r_M^2 r_N^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{n+1} \prod_{i=1}^n Ratio_i^{-1} \right] \quad (4)$$

$$Ratio_n = \frac{n}{n+1} \frac{\rho_1(n+1) + \rho_2(n+2)}{\rho_1 n + \rho_2(n+1)} \frac{b}{r_0^2} \left(\frac{r_N^{n+1} - r_M^{n+1}}{r_N^{n+2} - r_M^{n+2}} \right) r_M r_N \quad (5)$$

下面计算 n 大于 2 时 $Ratio_n$ 的取值范围:

①令 $r_M = b + k_1 a$, 则有:

$$\begin{aligned} \left(\frac{r_N^{n+1} - r_M^{n+1}}{r_N^{n+2} - r_M^{n+2}} \right) r_M r_N &= r_M - \frac{a r_M^{n+2}}{r_N^{n+2} - r_M^{n+2}} \\ &= b + a \left(k_1 + \frac{1}{1 - (1 + a/(b + k_1 a))^{n+2}} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

随着 n 增大,式(6)单调递增;随着 k_1 增大,式(6)单调递增。

②令 $\rho_2/\rho_1 = k_2$, 则有:

$$\frac{n}{n+1} \frac{\rho_1(n+1) + \rho_2(n+2)}{\rho_1 n + \rho_2(n+1)} = 1 - \frac{1}{n(n+1)/k_2 + n(n+2) + 1} \quad (7)$$

随着 n 增大,式(7)单调递增;随着 k_2 增大,式(7)单调递减。

③令 $b = k_3 r_0$, 由①②分析可知,相邻累加项的比值 $Ratio_n$ 随着 n 增大单调递增,在 $n=1$ 的条件下取到最小值:

$$Ratio_1 = \frac{3k_2 + 2k_3}{4k_2 + 2r_0} \quad (8)$$

下面 k_1 取 $4 \sim 40$; k_2 取 $0.01 \sim 0.4$; 源心距 b 取 $20 \sim 100m$; r_0 取 $5 \sim 40m$; k_3 取 $4 \sim 20$ 。在以上条件约束下, $Ratio_1$ 大于 11.6,且随着 n 增大而增大。由于

$$\sum_{n=2}^{\infty} \prod_{i=1}^n Ratio_i^{-1} \leq \sum_{n=2}^{\infty} 11.6^{-(n-1)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1 - 11.6^{-(n-1)}}{10.6} \approx 0.09 \quad (9)$$

即电位差 U_{MN} 表达式中的无穷累加项,起主要作用的是 1 阶项,大于 1 的阶数对于电位差 U_{MN} 的影响很微弱。

2.2 视电阻率极值点

在 $n=1$ 的条件下,三极装置测的电位差、视电阻率表达式可以简化为:

$$U_{MN} = \frac{I\rho_1}{4\pi} \left(\frac{1}{R_M} - \frac{1}{R_N} + \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + 2\rho_2} \frac{r_0^3 r_N^2 - r_M^2}{b^2 r_M^2 r_N^2} \right) \quad (10)$$

$$\rho_s = \rho_1 \left[1 + \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + 2\rho_2} \frac{r_0^3 (r_M + r_N) R_M R_N}{r_M^2 r_N^2} \right] \quad (11)$$

令 $(R_M + R_N)/2 = x$, 式(11)中的因数项为:

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{(r_M + r_N) R_M R_N}{r_M^2 r_N^2} \\ &= \frac{(2x + 2b)(x + a/2)(x - a/2)}{(x + b + a/2)^2 (x + b - a/2)^2} \end{aligned} \quad (12)$$

由式(11)可知,在项 $f(x)$ 取极值条件下,视电阻率 ρ_s 取极值。需要探测的掘进面前方球体一般与掘进面具有较大距离。取 $b \geq 4a, x \geq 4a$, 则式(12)变为式(13):

$$f(x) = \frac{(2x + 2b)(x + a/2)(x - a/2)}{(x + b + a/2)^2 (x + b - a/2)^2} \approx \frac{2(x^2 - a^2/4)}{(x + b)^3} \quad (13)$$

令 $f'(x) = 0$, 在 $f(x)$ 取极值的条件下:

$$b = \frac{1}{2}x - \frac{3}{8}\frac{a^2}{x} \quad (14)$$

总结前述分析,当巷道前方存在低阻球时,后方视电阻率曲线存在极值点,忽略高阶的条件下,极值点位置的 x 近似是源心距 b 的两倍。

3 三点-三极法数据的处理方法

直流电法超前探测常用的测量方式是三点-三极法,该方法由三个三极探测装置组成。通过改变点源 A 的位置探测三组数据,利用同一组 MN 测量的三组视电阻率校正,消除干扰,提高解释准确度。

3.1 三点-三极法视电阻率曲线

取极距 a 为 5m,源心距 b 的值将依次为 20m、25m、30m,在 $n=100$ 的条件下,沿巷道后方绘制三点-三极法视电阻率曲线(见图 7)。利用极值点与点源距离 X 计算源心距 b :

$$(X_3/2 - 10 + X_2/2 - 5 + X_1/2)/3 \approx 17.92 \quad (15)$$

其值接近 20。

3.2 数据处理方法

在三点-三极法中,MN 中点坐标 R_{M-N} 、极值点与点源距离 x 和探测距离 d 有以下关系:

$$\begin{aligned} x_i &= -R_{M-N} - (i-1)a \quad i=1,2,3. \\ d_i &= x_i/2 - (i-1)a \quad i=1,2,3. \end{aligned} \quad (16)$$

用每条视电阻率的最小值 ρ_{\min} ,归一化三条曲线,绘制曲线图(见图 8)。由图可见,三条曲线底部重合,最低点接近式(15)的值。

将曲线 1、2、3 上所有点纵轴值赋为 0、-2.5、2.5,然后绘制等值线图(见图 9)。蓝色异常区位于导电球边界内部,异常区可以指示前方球体的位置和范围。对于前方导电球体的探测,探测距离是有效测线长度的一半。

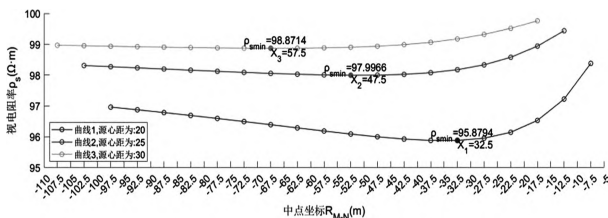


图 7 三点-三极法视电阻率曲线

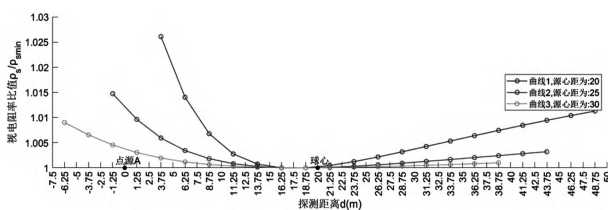


图 8 视电阻率归一化曲线

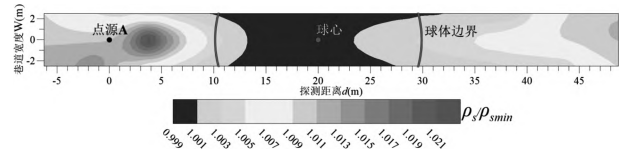


图 9 异常等值线图

4 结论

为准确判别掘进面前方球型异常体的位置与分布范围,本文以全空间低阻导电球模型为基础,通过严密的理论推导,梳理了直流电法超前探测的理论依据、异常位置的判别规律和数据处理方法,结论如下:

4.1 直流电法超前探测对掘进面前方球型地质体有异常响应,异常响应不出现“球壳理论”认为的后方对称位置,而是对前方低阻球体的整体响应。

4.2 后方测得的视电阻率曲线呈下凹型,有极值点,极值点与点源的距离接近源心距的两倍。

4.3 通过移动、缩放和归一化处理,三点-三极法绘制的归一化曲线可指示前方导电球的中心位置,异常等值线图可以标记出前方球的位置和范围。

参考文献:

- [1] 岳建华,杨海燕,冉华赓.矿井电法勘探研究现状与发展趋势[J].煤田地质与勘探,2023,51(01):259-276.
- [2] 李飞,张永超,连会青,等.掘进工作面直流电法超前探测技术问题探讨[J].煤炭科学技术,2020,48(12):250-256.
- [3] 李飞,程久龙,谭强,等.巷道掘进中电阻率法超前探测研究[J].煤矿安全,2012,43(07):30-34.
- [4] 张平松,李永盛,胡雄武.巷道掘进直流电阻率法超前探测技术应用探讨[J].地下空间与工程学报,2013,9(01):135-140.
- [5] 罗国平.直流电阻率三极超前探测的有效性[J].中国煤炭地质,2017,29(03):72-75.
- [6] 王鹏,鲁晶津,王信文.再论巷道直流电法超前探测技术的有效性[J].煤炭科学技术,2020,48(12):257-263.

基金项目:

矿井电阻率动态监测关键技术及装备研制(2022 ZDXM06)。

作者简介:

崔少北(1992-),男,河南濮阳县人,硕士,研究方向:煤矿地球物理勘探、三维地质建模。