

# 组合球形岩溶的中梯视电阻率异常特征

葛宝堂 李志联

(中国矿业大学资源环境学院)

**摘要** 岩溶是水工电法的主要研究目标之一。为探明地下岩溶的发育与分布,对较为复杂的组合球形岩溶地质体,建立了计算其视电阻率的物理数学模型,并采用等效视电阻率迭代法计算沿测线水平方向及垂直测线水平方向上组合球形岩溶的中梯装置的 $\rho_s$ 值。重点分析了不同组合模式的中梯 $\rho_s$ 曲线形态特征,并讨论了 $\rho_s$ 值变化,测量电极距 $MN$ 大小对组合球形岩溶地质体中梯 $\rho_s$ 异常的影响规律。得出中梯 $\rho_s$ 曲线对沿测线水平方向的组合球形岩溶地质体分辨能力最强,而对垂直测线水平方向以及铅垂方向的组合球形岩溶地质体,中梯 $\rho_s$ 曲线无法分辨; $\rho_s$ 值的变化既影响中梯 $\rho_s$ 曲线异常幅度,也影响其形态;当两个组合球形岩溶地质体之间的距离 $\Delta X$ 与 $MN$ 之比 $\Delta X/MN \leq 1/3$ 时, $\rho_s$ 曲线会发生畸变,直接影响分辨能力,并会导致错误的解释结果。故 $\Delta X/MN$ 值必须大于 $1/3$ ,在保证观测精度的前提下, $MN$ 越小越好。

**关键词** 岩溶 视电阻率 中间梯度法

## 0 引言

我国奥陶系碳酸盐地层分布范围广、面积大,蕴藏着丰富的地下水资源。另外,在大多数煤矿开采石炭、二叠系煤层时,遭受岩溶水威胁而发生突水事故约占各类水害事故总数的25%,受岩溶地下水威胁的煤炭储量约占受水害威胁总量的40%。探明岩溶构造,不仅可以为工农业生产提供丰富的地下水资源,还可以为煤矿治水工程提供科学依据。多年来,利用电阻率法勘探技术探测灰岩蓄水构造取得了相当显著的经济和社会效益。由于岩溶发育的复杂性,使得其电性特征复杂多变。本文研究了组合球形充水岩溶地质地球物理模型的中间梯度装置视电阻率曲线的异常特征规律。

## 1 数学物理模型的建立

组合球体地电模型的视电阻率 $\rho_s$ 值计算,采用先求出单一球体地电模型的电位解析表达

第一作者简介:葛宝堂,男,1961年出生,副教授,应用地球物理专业。(221008)江苏徐州市。

收稿日期:1995-06-25;末次改回日期:1996-07-09。

式,再根据地面观测装置形式计算其电阻率 $\rho_s$ 值,然后利用“等效电阻率迭代法”计算组合球体模型的视电阻率 $\rho_s$ 值。

### 1.1 单一球体地电模型的 $\rho_s$ 计算公式

设在地下半空间有一充水低阻球形溶洞,点电源在 $M$ 点处产生的总场电位(图1所示)为:

$$U = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[ \frac{1}{R} + \sum_{n=0}^{\infty} q_n Y_n \right]$$

$$\text{式中: } q_n = \frac{r_0^{2n+1}}{d^{n+1} + r^{n+1}} P_n(\cos\theta);$$

$$d_n = (D^2 + n^2)^{1/2};$$

$$D = (X_A^2 + Y_A^2)^{1/2};$$

$$r = (X_M^2 + Y_M^2 + h^2)^{1/2};$$

$$R = [(X_M - X_A)^2 + (Y_M - Y_A)^2]^{1/2};$$

$$\cos\theta = (d^2 + r^2 - R^2)/2dr;$$

$$P_n(\cos\theta) \text{ 为 } n \text{ 阶勒让德多项式};$$

$$\mu = \rho_2/\rho_1.$$

实际工作中,对于任何一种电阻率法观测装置,均是通过观测 $M$ 、 $N$ 两点之间的电位差 $\Delta U_{MN}$ 和供电电流强度 $I_{AB}$ 获得视电阻率 $\rho_s$ 值。所以,可以利用电位迭加原理,获得地面上任意一点的视电阻率 $\rho_s$ 表达式:

$$\rho_s = K \frac{\Delta U_{MN}}{I_{AB}} = K \frac{U_M - U_N}{I_{AB}}$$

式中 $K$ 为观测系统的装置系数。

### 1.2 组合球体模型视电阻 $\rho_s$ 计算方法

灰岩中除了发育单一溶洞外,实际上还常见有串珠状溶洞和在同一水平面发育有数个溶洞的情况,其地面视电阻率异常规律,可以等效成组合球体地电断面模型进行研究。

图2是两个球形充水溶洞的组合地电模型。点电源位于地面上的 $A$ 点,两个球体的电阻率、半径及埋藏深度分别为 $\rho_{21}$ 、 $\rho_{22}$ 、 $r_{01}$ 、 $r_{02}$ 和 $h_1$ 、 $h_2$ ,围岩电阻率为 $\rho_1$ ,观测点位于地面上的 $M$ 点处。组合球体上的视电阻率是各球体的综合影响结果,它与单一球体之间的具体联系可以用“等效电阻率迭代法”来确定。

对于两个球体的组合地电模型,等效电阻率迭代法就是先忽略其中一个球体,算出未被忽略球体存在时的 $\rho_s$ 值;然后用其代替围岩电阻率,再算出被忽略球体存在时的 $\rho_s$ 值。这样计算得到的视电阻率 $\rho_s$ ,

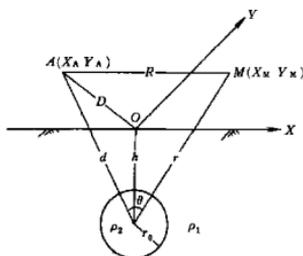


图1 点电源场中的导电球体

Fig. 1 Electric spheroid in current field

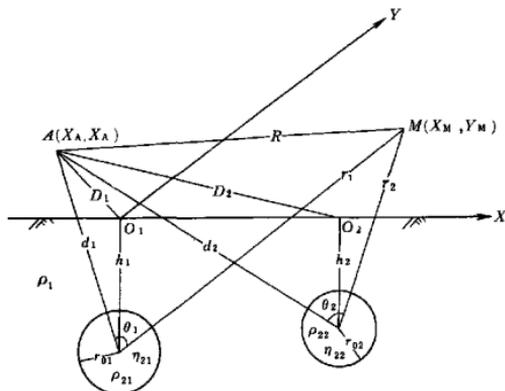


图2 两个组合球体地电断面

Fig. 2 Geoelectric sections of two combined spheroids

值可以近似地认为是两个组合球体的综合响应。

## 2 组合球体岩溶的中间梯度法 $\rho_s$ 异常特征

### 2.1 沿测线水平方向上组合球体的中梯 $\rho_s$ 异常

在图3中,三条中梯  $\rho_s$  曲线分别代表沿测线水平方向上两个球心(左侧球体固定不动)分别相距(以球体半径  $r_0=1$  为单位),2.3.0和3.5时两个组合球体模型的  $\rho_s$  正演计算结果。由图可见,对两个低阻球体,不论二者相距多远,在每个球体正上方均存在一个  $\rho_s$  极小值。而在

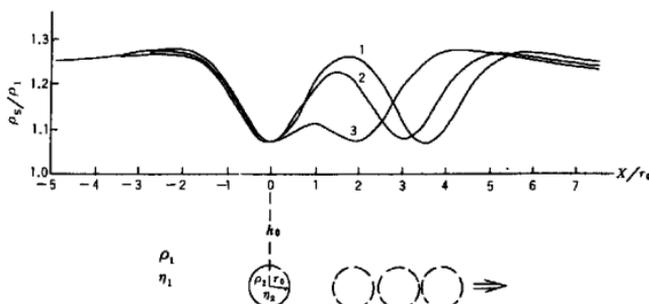


图3 水平方向两个组合球体的中梯  $\rho_s$  曲线

Fig. 3 Mid-gradient  $\rho_s$  curves of two combined spheroids in horizontal direction

$$\rho_2 = 0.1, \eta_1 = 0.1, \eta_2 = 0, h_0/r_0 = 2, X_1 = 0 \quad 1. X_2 = 3.5; 2. X_2 = 3; 3. X_2 = 2$$

两个低阻球体之间出现一个极大值,该极大值随两球之间距离的增大而愈接近围岩电阻率值  $\rho_1$ ,这表明两个球体的相互影响随它们之间的距离减小而增大。当两球心相距较远( $X/r_0 \geq 3.5$ )时,两个球体的相互影响可以忽略。

### 2.2 垂直测线方向上的水平(Y方向)组合球体中梯 $\rho_s$ 异常

由图4可以看出,这种组合球体地电断面的中梯  $\rho_s$  异常形态与单个球体一致。异常幅度随两个低阻球体球心之间距离的增大而减小,异常范围则变宽。显然,难以用单条中梯  $\rho_s$  剖面曲线分辨这种多异常地质体的存在。但是,可以通过沿异常体分布方向布置多条X方向的中梯  $\rho_s$  剖面曲线的  $\rho_s$  异常随y的变化规律分辨出单体或多体的存在。因为对单个球体,随测线远离球心位置,中梯  $\rho_s$  异常幅度单调递减。而对两个低阻球体,通过两个球体测线上的中梯  $\rho_s$  曲线将会分别出现明显的低阻异常,而位于两球体之间测线上的中梯  $\rho_s$  曲线则呈较小异常反映,这样就能分辨出组合球体的存在。计算结果表明,铅垂方向上组合球体的中梯  $\rho_s$  曲线形态与单一球体一致,组合球体的存在只影响中梯  $\rho_s$  异常幅度,难以用中间梯度观测装置分辨铅垂方向上的组合异常地质体的存在。

### 2.3 $\mu_2$ 值变化对组合模型中梯异常的影响

球体电阻率  $\rho_2$  与围岩电阻率  $\rho_1$  的比值  $\mu_2$  ( $\mu_2 = \rho_2/\rho_1$ ) 对组合球体中梯  $\rho_s$  异常特征的影响如图5所示。当相邻的两个球体一个为高阻,另一个为低阻时,在高阻球体上方中梯  $\rho_s$  出现极

大值,在低阻球体上方出现极小值异常,而在两个球体中间部分出现拐点。对于两个低阻球体,在每个球体上都对应存在极小值异常,其幅度与  $\mu_2$  值大小成正比。

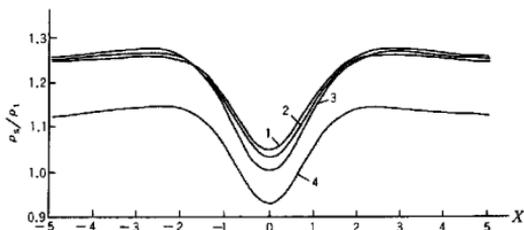


图4 Y方向上两个组合球体的中梯  $\rho_m$  曲线

Fig. 4 Mid-gradient  $\rho_m$  curves of two combined spheroids in Y direction

$\mu_2=0.1, \eta_1=0.1, \eta_2=0.4, \frac{h_2}{r_0}=2, X_1=Y_1=0$  1:  $Y_1=4; 2: Y_1=3; 3: Y_1=2; 4$ : 单个球体

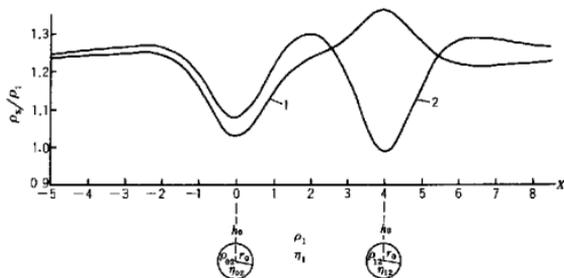


图5 相邻球体中梯  $\rho_m$  曲线异常与  $\mu_2$  的关系

Fig. 5 Relationship between mid-gradient anomaly of adjacent spheroids and  $\mu_1$

$\mu_{02}=0.1, \eta_1=0.1, \eta_2=0.4, \frac{h_2}{r_0}=2$  1:  $\mu_{12}=10; 2: \mu_{12}=0.01$

#### 2.4 测量电极距 $MN$ 大小对组合球体模型中梯 $\rho_m$ 异常的影响

在图6中,当  $MN=0.5$ ,测量电极距  $MN$  与水平方向两个球体的距离  $\Delta X$  之比  $\Delta X/MN=4$  时,两个球体异常清晰可辨。随着  $MN$  增大(即  $\Delta X/MN$  减小),  $\rho_m$  曲线变化梯度减小,幅度降低。当  $MN=6$ ,即  $\Delta X/MN=1/3$  时,  $\rho_m$  曲线异常发生畸变,在两个低阻球体之间反而出现低阻异常。这是因为当  $MN$  较大时,  $MN$  之间的电位差同时受到两个球体的共同影响而减小,而记录点在其中一球体上方时,另一球体会位于  $M$  极的一侧,它对  $MN$  之间的电场影响减弱,所以出现相对高阻异常。如果此时仍将中梯  $\rho_m$  最小值处解释为充水溶洞或两个相对  $\rho_m$  高值异常处解释为两个高阻异常地质体均是错误的。因此,在野外施工中,应尽可能减小测量电极距  $MN$ ,以利正确分辨组合异常地质体的存在。根据计算,当  $\Delta X/MN \geq 1$  时,中间梯度  $\rho_m$  曲线对沿测线水平方向上的组合球体有良好的分辨能力。

#### 2.5 组合球状充水岩溶的实测中梯 $\rho_m$ 曲线



阻率相差在一个级次内变化时,  $\rho_s$  曲线异常幅度随其变化明显, 当超过一个级次后, 异常幅度随其变化减慢。

(2) 随测量电极距  $MN$  增大, 异常幅度减小, 对水平方向上的组合异常地质体的分辨能力降低。

(3) 中间梯度法无法分辨出铅垂方向上的组合异常地质体。对于水平方向上的组合异常地质体, 应尽可能使测线方向与组合体走向保持一致, 这样中梯  $\rho_s$  曲线的横向分辨能力最高。

### 参 考 文 献

- 1 傅良魁主编. 电法勘探教程. 地质出版社, 1983, 40~47
- 2 陈福集、刘煜洲. 某些非水平层状体上对称四极测深视电阻率异常的特征与解释方法. 见: 傅良魁编. 电法勘探文集. 北京: 地质出版社, 1986, 87~94

## THE ANOMALY OF APPARENT RESISTIVITY FOR THE MID-GRADIENT METHOD ABOVE COMBINED SPHEROIDAL KARST

Ge Baotang Li Zhidan

(China University of Mining and Technology)

### Abstract

Karst is one of the aim items of hydroelectrical prospecting. In this paper, physical and mathematical models are set up for combined spheroidal karst geologic body to calculate its apparent resistivity. With the method of equivalent resistivity iteration the mid-gradient apparent resistivity curves are given along the horizontal and vertical directions of measuring line. The anomaly features of the mid-gradient above combined spheroidal karst  $\rho_s$  curve are analysed for varied combined modes, and the variation of  $\mu_2(\rho_2/\rho_1)$  and the influence of electrode separation ( $MN$ ) on mid-gradient  $\rho_s$  anomaly are discussed. It is concluded that the discrimination of the mid-gradient  $\rho_s$  curve is highest for the combined spheroidal karst distributed in the direction of measuring line. However, the mid-gradient method cannot discriminate the combined spheroidal karst located perpendicularly to measuring line. The change in  $\mu_2$  value has an affect on not only the anomaly amplitude, but also the anomaly configuration of the curve. When  $\Delta X/MN \leq 1/3$  ( $\Delta X$  being the distance between two spheroidal bodies), a distortion of  $\rho_s$  curve may appear, which affects directly the discrimination and results in incorrect interpretation. In this way, the minimum of  $\Delta X/MN$  must be equal to  $1/3$ . So long as the accuracy of measurement is ensured, the smaller the  $MN$ , the better the discrimination.

**Key words** Karst Apparent resistivity Mid-gradient method