第 37 卷 第 4 期	中国	岩容	Vol. 37 No. 4
2018年8月	CARSOLOGIC	A SINICA	Aug. 2018

刘伟,甘伏平,周启友,等.典型岩溶富水构造的多极距联合剖面曲线正演模拟研究[J].中国岩溶,2018,37(4):602-607. DOI:10.11932/karst2017y39

典型岩溶富水构造的多极距联合剖面 曲线正演模拟研究

刘 伟^{1,2}, 甘伏平², 周启友¹,张 伟² (1. 南京大学地球科学与工程学院,南京 210046; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘 要:基于点电源电场微分方程以及电场满足的边界条件出发,结合目前高密度电法找水时常用的点线布 设方式,对岩溶区常见的隐伏断层破碎带和溶洞两类低阻富水构造的多极距联合剖面曲线进行了二维正演 模拟。模拟结果表明:联合剖面曲线对地下隐伏低阻体反应灵敏,曲线存在良好的分异性。对溶洞低阻富水 构造来说,溶洞富水构造埋深约为 1/2~2/3 倍极距时,正交点异常最明显,随着联合剖面极距继续增大,同步 低趋势逐渐显现;地下低阻溶洞空间范围越大,联合剖面曲线分异性越好,正交点异常越明显。对断层破碎带 低阻富水构造来说,随着联合剖面极距的增大,正交点向断裂破碎带倾斜方向略为移动,但并不明显,正交点 位置主要受浅部低阻的影响,随着极距的逐渐增大,同步低趋势逐渐显现,正交点左侧在断层倾斜方向上越来 越多的测点呈现同步低异常,但曲线较平缓,而正交点右侧的曲线较陡,视电阻率值逐渐降低,当联合剖面曲 线异常形态以同步低为主时,随极距的增大正交点处视电阻率值趋于稳定。联合剖面曲线五交点附近较陡一 侧的曲线倾向一致。模拟结果可应用到岩溶地区高密度电法的多极距联合剖面曲线资料解释中。 关键词:正演模拟;多极距联合剖面曲线;溶洞;断层

中图分类号:P641.7 文献标识码:A 文章编号:1001-4810(2018)04-0602-06

0 引 言

联合剖面曲线的正交点或同步低异常特征在找 水实践中备受重视,是圈定地下富水构造最重要的参 考,众多学者曾结合工程实例证实了联合剖面曲线异 常在寻找地下隐伏富水构造方面发挥着重要的作 用^[1-7],一些学者还通过模型试验分析地下存在低阻 体或高阻体时联合剖面的曲线特征^[8-10]。在数值模 拟方面,熊斌已证实直流电场下二维的计算程序对具 有一定走向的三维地质体也能起到很好的解释效 果^[11],目前的研究对各类地电模型、不同装置下的视 电阻率等值线断面图的形态特征正演分析较 多^[12-14],而对两组三极装置下不同极距联合剖面曲 线的正演研究却少见文献报道。由于模型试验中合 适的模型材料选取较困难,且模型试验尺度较小,因 此,笔者从点电源电场微分方程以及电场满足的边界 条件出发,结合目前高密度电法找水时常用的二维剖 面布设方式,针对岩溶区常见的隐伏断层破碎带和溶 洞两类富水构造进行高密度多极距联合剖面视电阻 率曲线的数值模拟,分析并总结曲线的形态变化规 律,以期能够指导或有助于岩溶地区的物探找水定井 工作。

资助项目:基本科研业务费项目(YYWF201643);中国地质科学院基本科研业务项目(121237128100216);中国地质调查局地质调查项目(DD20160285) 第一作者简介:刘伟(1985--),助理研究员,博士研究生,主要从事岩溶水文地质灾害地质探测研究工作。E-mail;liuwei_999@126.com。 收稿日期:2017-10-16

1 高密度联合剖面法找水的原理

岩溶地区的富水构造与围岩存在较明显的电性 差异,富水构造为相对良导体。联合剖面法是将两个 三极装置组合在一起观测的电阻率剖面法。观测时 C极为负极置于无穷远端,供电电极分别为 A 和 B, 以及观测电极 M 和 N。AO(BO)距离为观测电极 M、N 中心点 O 至供电电极 A 或 B 的距离,在整条剖 面观测过程中,AO(BO)距离保持不变。同一观测 点,先后进行 A 极供电和 B 极供电,无穷远极 C 始 终是负极, M 和 N 与 A 极或 B 极组合观测得到 A 极 和 B 极供电时的视电阻率 ρ_s^A 、 ρ_s^B 并绘出视电阻率 曲线。联合剖面法以高密度方式测量时可通过高密 度电极转换器与数据采集的自动化功能来完成多个 极距的联合剖面数据的快速采集,大大提高了野外工 作效率。联合剖面曲线上断层、裂隙或溶洞等良导富 水构造常表现为正交点(交点左侧 $\rho_{a}^{A} > \rho_{a}^{B}$,交点 右侧 $\rho_s^A < \rho_s^B$)或同步低 ($\rho_s^A \cdot \rho_s^B$ 曲线同步下降, 呈"U"或"V"型)的形态,故可通过分析高密度联合 剖面曲线特征,来推断良导富水构造及其地质特征。

2 正演模拟

2.1 地下点源场的边值问题和变分问题

假设地下介质模型的电导率沿走向方向无变化, 则可采用空间域傅里叶变化将点源三维问题变成二 维问题,即"三维场源二维构造"问题,其微分方程及 边值问题可表述为^[15]:

$$\begin{cases} \nabla . (\sigma \nabla u) - k^2 \sigma u = -I\delta(A) & u \in \Omega \\ \frac{\partial u}{\partial n} = 0 & u \in \Gamma_0 \\ \frac{\partial u}{\partial n} + k \frac{K_1(kr)}{K_0(kr)} \cos(r, n)u = 0 & u \in \Gamma_\infty \end{cases}$$
(1)

等价的变分问题为:

$$\begin{cases} F(u) = \int_{\Omega} \frac{1}{2} \sigma (\nabla u)^2 d\Omega + \int_{\Omega} \frac{1}{2} \sigma k^2 u^2 d\Omega + \\ \int_{\Gamma_{\infty}} \frac{1}{2} \sigma k \frac{K_1(kr)}{K_0(kr)} \cos(r, n) u^2 d\Gamma - \int_{\Omega} I \delta(A) u d\Omega \end{cases}$$
(2)
$$\delta F(u) = 0$$

式中: u 代表电位, I 是供电电流强度, σ 为介质的电导率, r 为电源点 A 到测点的距离, n 是边界的外法向向量, Ω 是研究区域, Γ_0 为研究区域的地面边界, Γ_∞ 为研究区域的地下边界, k 为傅里叶反变换系数,

 K_0 为第二类零阶修正 Bessel 函数, K_1 为第二类一阶修正 Bessel 函数。

2.2 有限单元求解

利用有限单元法求解变分问题(2)式,主要涉及 到区域离散、单元分析以及大型线性方程组的求解。 本文正演模拟采用 Karaoulis(2013)开发的算法,该 算法的核心内容为非结构性的三角形网格单元剖分、 电导率分块连续变化以及高斯牛顿迭代法求解线性 方程组,有限元网格单元节点电位计算采用总电位 法,傅里叶波数选择为 Press(1988)提出的"5 点式" 波数,其计算精度已经得到很好的验证^[16]。

2.3 正演模型

根据岩溶区各类岩石常见的电阻率值范围^[17], 本文在模拟中设置低阻富水构造与围岩电阻率间为 5 倍差异,分别为 100 Ω • m 和 500 Ω • m,设置剖面 长度为 600 m,电极距为 10 m。需要说明的是,富水 构造与围岩间电阻率差异越大,联合剖面曲线异常越 明显,比较两者间电阻率差异不同时的联合剖面曲线 不属于本文要讨论的内容。富水构造选择常见的溶 洞和倾斜的断层破碎带模型。共设计 3 类模型,具体 参数如表 1 所示。

表1 富水构造模型参数设置表

Та	ble	e]	L I	Parameter	setting	of	water-rich	structrue	model
----	-----	-----	-----	-----------	---------	----	------------	-----------	-------

编号	类型	描述
模型1	水平椭球形溶洞	长轴 20 m,短轴 10 m,中心埋深 45 m
		直径 5 m,中心埋深 45 m
模型 2	球形溶洞	直径 10 m,中心埋深 45 m
		直径 20 m,中心埋深 45 m
模型3	倾斜断层	倾角 45°,铅直厚度 20 m,顶板 埋深 10 m,底板埋深 110 m

模型1为地下存在一水平椭球形溶洞,用于研究 已知溶洞大小和埋深时,联合剖面曲线随极距增大时 的变化特征;模型2为地下存在一球形溶洞,用于研 究极距固定时,联合剖面曲线随溶洞逐渐变大时的变 化特征;模型3为地下存在一倾斜断层,用于研究已 知断层破碎带倾角、厚度和埋深时,联合剖面曲线随 极距增大时的变化特征。

3 模拟结果与讨论

模型1不同极距的高密度联合剖面正演曲线如 图1所示,图中的水平椭球溶洞长轴为20m,短轴为





10 m,极距 AO(BO)从上到下依次为 25 m,45 m,65 m,85 m,105 m,125 m,145 m,165 m,185 m,205 m,MN间距为10m,各极距横纵轴采用相等的长度 显示。可以看出,各曲线中正交点位置均位于溶洞顶 点的正上方,联合剖面曲线左右两支形态关于正交点 或溶洞中心对称。当极距较小时,深部的低阻溶洞对 测量曲线的影响较小,理论上仍能观测到正交点,但 并不明显,如 AO=25 m 极距所示。随着极距的增 大,深部低阻溶洞的影响逐渐增强,联合剖面曲线正 交点在极距为 65~105 m 区间时最明显, 与溶洞 埋深大致的对应关系为 H=(1/2~2/3) AO。随着 极距的继续增大,虽然低阻溶洞处正交点异常仍然 存在,但同步低趋势却逐渐显现,并成为联合剖面曲 线主要的异常形态。此外,还可以观察到,当联合剖 面曲线正交点异常较明显时,随极距的增大正交点处 视电阻率值逐渐降低,当极距大于 105 m 时,随极距 的增大正交点处视电阻率值趋于稳定,稳定值约 为482 Ω·m。

模型 2 固定极距的联合剖面正演曲线如图 2 所 示,图中从上到下溶洞大小逐渐增大,直径分别为 5 m、10 m、20 m,极距 AO 固定为 95 m,MN 间距为 10 m,各曲线横纵轴采用相等的长度显示。可以看 出,正交点位于溶洞顶点正上方处,曲线左右两支形 态关于正交点对称。随着溶洞空间范围的逐渐增大, 正交点处视电阻率变低,但联合剖面曲线分异性越来 越好,正交点异常越来越明显。

模型3不同极距的高密度联合剖面正演曲线如 图 3 所示。极距 AO(BO)从上到下依次为 25 m,45 m,65 m,85 m,105 m,125 m,145 m,165 m,185 m, 205 m, MN 间距为 10 m, 各极距横纵轴采用相等的 长度显示。可以看出,由于低阻向深部延伸较远,与 溶洞模型相比,倾斜断层破碎带模型的联合剖面视电 阻率极小值进一步降低,极大值则有所增加,各曲线 均存在着低阻正交点, AO=25 m 时正交点位置在 350 m 测点附近, AO=205 m 时正交点位置移动到 335 m 测点附近,总体上看正交点沿着断层倾向移 动,但是并不明显,正交点位置主要受浅部低阻的影 响。联合剖面曲线正交点在极距小于 45 m 时较明 显,随着极距的继续增大,向下延伸的深部低阻构造 对曲线的影响也增大,虽然正交点异常仍然存在,但 同步低趋势却逐渐显现,并成为联合剖面曲线主要的 异常形态,同时可以观察到正交点左侧在断层倾斜方





向上越来越多的测点呈现同步低异常,但曲线较平缓,而正交点右侧的曲线较陡,视电阻率在断层顶板的正上方处出现极小值。此外,与溶洞模型类似,当倾斜断层破碎带模型的联合剖面曲线正交点异常较明显时,随极距的增大正交点处视电阻率值逐渐降低,当极距大于45m时,随极距的增大正交点处视电阻率值趋于稳定,稳定值约为320Ω•m。

模型1和模型2中的溶洞模型可归纳为水平对



称模型,在实际条件下,溶洞也可能是倾斜的,断层也 可能是直立的,联合剖面曲线左右两支形态对于水平 对称模型(如水平椭球形溶洞、球形溶洞、直立断层) 是对称的,对于倾斜模型(如倾斜椭球形溶洞、倾斜断 层)是非对称的,通过对模型3的分析,较为显著的特 点是倾斜低阻构造的倾向与正交点附近较陡一侧的 曲线倾向一致。

4 结论与建议

通过以上模型正演分析,可得到如下结论:

(1)联合剖面曲线对地下隐伏低阻构造反应灵 敏,曲线存在良好的分异性。

(2)对溶洞低阻富水构造来说,正交点位置位于 溶洞顶点的正上方。联合剖面异常形态与低阻溶洞 的埋深紧密相关,溶洞富水构造埋深约为 1/2~2/3 倍极距时,正交点异常最明显,随着联合剖面极距继 续增大,曲线逐渐趋于同步低异常形态,并成为联合 剖面曲线主要的异常形态。地下低阻溶洞空间范围 越大,联合剖面曲线分异性越好,正交点异常越明显。

(3)对断层破碎带低阻富水构造来说,随着联合 剖面极距的增大,正交点向断裂破碎带倾斜方向移动,但并不明显,正交点位置主要受浅部低阻的影响, 随着极距的继续增大,向下延伸的深部低阻构造对曲 线的影响也增大,虽然正交点异常仍然存在,但同步 低趋势却逐渐显现,并成为联合剖面曲线主要的异常 形态,正交点左侧在断层倾斜方向上越来越多的测点 呈现出同步低异常,但曲线较平缓,而在正交点右侧 的曲线较陡,视电阻率在断层顶板的正上方处出现极 小值。

(4)当联合剖面曲线正交点异常较明显时,随极 距的增大正交点处视电阻率值逐渐降低,当联合剖面 曲线以同步低为主要异常形态时,随极距的增大正交 点处视电阻率值趋于稳定。

(5)联合剖面曲线左右两支形态对于水平对称模型是对称的,而对于倾斜模型是非对称的,倾斜低阻构造的倾向与联合剖面曲线正交点附近较陡一侧的曲线倾向一致。

虽然地下介质电性分布比模型设计要复杂得多, 但模拟结果仍对实际具有指导意义,这种低阻富水构 造的异常特征可应用到岩溶地区高密度电法的多极 距联合剖面曲线资料解释中,依据绘制的小极距到大 极距多条联合剖面曲线,可综合分析获取地下低阻富 水构造的埋深和产状等特征。

参考文献

- [1] 刘福臣,程兴奇,王启田.联合剖面法探测鲁东中生界地层地 下水[J].节水灌溉,2008(5):57-58+61.
- [2] 董健,胡雪平,李肖鹏,等.联合剖面法寻找基岩裂隙水[J].科 学技术与工程,2012,12(14):3520-3522,3527.
- [3] 徐振宇、利用联合剖面法寻找岩溶裂隙水[J]. 地下水, 1994(3):133-135.
- [4] 王爱国. 高密度电阻率成像与联合剖面法的联合测试技术[J]. 工程勘察, 2006(2):68-71.
- [5] 卞兆津,叶明金,刘斌辉. 红层地区综合应用联合剖面法和激 发极化法找水一例[J]. 物探与化探,2008,32(3):306-307, 315.
- [6] 甘伏平,喻立平,卢呈杰,等.不同岩溶储水结构分析与地球物 理勘察[J].地质与勘探,2011,47(4):663-672.
- [7] Chalikakis K, Plagnes V, Guerin R, et al. Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview[J].
 Hydrogeology Journal, 2011, 19(6):1169-1180.
- [8] 任杰.联合剖面法探测地质体深度的试验研究[J].河北煤炭, 2007(3):17-18.
- [9] 郑智杰,曾洁,甘伏平. 装置和电极距对岩溶管道高密度电法 响应特征的影响研究[J].水文地质工程地质,2016,43(5): 161-165,172.
- [10] 曹崇本.高阻溶洞上高密度电法与高密度联合剖面法异常响 应特征研究[J].贵州地质,2012,29(2);112-118.
- [11] 熊彬,阮百尧,黄俊革.直流电阻率测深中二维反演程序对三 维数据的近似解释[J].地球科学-中国地质大学学报,2003, 28(1),102-106.
- [12] 向阳,李玉冰,易利,等.排列方式及电极距对高密度电法异常 响应的影响分析[J]. 工程地球物理学报,2011,8(4):426-432.
- [13] 欧阳永永,熊章强,张大洲.基于不同装置的二维高密度电法 勘探效果比较与分析[J].世界地质,2011,30(3);451-458.
- [14] 郭清石.高密度电法对溶洞勘探的数值模拟研究[D].成都:西 南交通大学,2013.
- [15] 徐世浙.地球物理中的有限单元法[M].北京:科学出版社, 1994.
- [16] Karaoulis M, Revil A, Tsourlos P, et al. IP4DI: A software for time-lapse 2D/3D DC-resistivity and induced polarization tomography[J]. Computers & Geosciences, 2013, 54(4):164-170.
- [17] 郑智杰,陈贻祥,甘伏平.岩溶区岩土层地球物理性质浅析: 以吉利岩溶塌陷区为例[J].地球物理学进展,2016,31(2): 920-927.

Research on forward simulation of multi-electrode spacing combined profile curves of typical karst water-rich structrues

LIU Wei^{1,2}, GAN Fuping², ZHOU Qiyou¹, ZHANG Wei²

(1. School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210046, China;
2. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract Based on differential equation of a point source and the boundary conditions of electric field, and combined the popular high density electrode layout for exploring groundwater at present, we conduct 2D forward simulation of multi-electrode spacing combined profile curve for two common and water-rich structures with low resistance in karst area such as buried fault zone and karst cave. The simulation results show that the combined profile curves are sensitive to underground hidden low resistivity structrues, and the curves are well differentiated. For the water-rich cave, the orthogonal point is the most prominent when the depth of water-rich cave is about 1/2-2/3 times the electrode space; as the distance of the electrode continues to increase, the synchronous low trend gradually appears. The larger the space range of the underground low-resistance cave is, the better the curve differentiation of the combined profile is, and the more obvious abnormal of the orthogonal point presents. For the water-rich fault zone, when the electrode space increases, the orthogonal point slightly moves to the dip direction of the fault, but is not obvious. The position of the orthogonal point is mainly affected by the low resistivity in the shallow part. With the increase of the electrode space, the downward low resistivity zone play a considerable role, for which more and more measuring points present as low synchronization in the dip direction on the left side of the orthogonal point with smaller slope curve while larger slope curve from the right side of the orthogonal point, the apparent resistivity reaches the minimum value at the top of the fault. The apparent resistivity decreases gradually with the increase of the electrode space when the orthogonal points of combined profile curve are obvious, whereas the apparent resistivity tends to be stable with the increase of the electrode space when the abnormal shape of combined profile curve shows as low synchronization. Branches of combined profile curve on both sides are symmetrical to the horizontal symmetry model while asymmetric to the tilt model, and the inclination of low resistance body is consistent with the inclination of the steep side of the orthogonal point nearby. The simulation results can be applied to the interpretation of multi-electrode spacing combined profile curve in karst area.

Key words forward simulation, multi-electrode spacing combined profile curves, karst cave, fault zone

(编辑 张玲)