

高密度电阻率法探测溶洞的实验研究

王波 刘剑

(国家电力公司贵阳勘测设计研究院 贵阳 550002)

[摘要]高密度电阻率法具有观测精度高、信息丰富、工作效率高等特点。当前工程勘探中,为了提高工作效率,大多数只选用其中某一种观测方式,造成异常不明显,难以作出定性、定量判断。文章从直流电法的偶极断面异常分析入手,分析了同一地电条件、同一电极排列下 α 、 β 、 γ 三种最常用的装置的视电阻率的相互关系,依据此关系及 β 、 γ 的互补特性,提出用T比值参数突出高阻异常,通过识别 β 断面异常标识及T异常特性,可以准确地进行溶洞探测;同时,给出了应用一次布极进行 α 、 β 测量,再用这两组数据换算出 γ 和T的方法进行的一个溶洞探测实例,实验说明应用该方法技术探测溶洞,异常标识明显、能进行定性及定量解释、工作效率较高。

[关键词] 高密度电阻率法 溶洞探测 电极排列装置 T比值参数

1 引言

西南地区主要为岩溶地貌,地下溶洞是进行工程建设最大隐患之一。电法勘探,尤其是高密度电法,因其具有工作效率高、不需要钻孔、成本低等特点,被广泛用来进行交通、水利、工民建等浅层溶洞的探测工作。目前,国内各省主要物探队伍基本上都配备了高密度电法测量系统,开展了大量而广泛的勘探工作,并取得了一定成绩(如地层划分、覆盖层探测、隐伏断层破碎带探测、地下管网探测等),但在溶洞探测方面进行的确切工程实例及令人信服的高密度电法勘探成果很少见到。本队近年来在交通、民航、工民建领域也进行了高密度电法勘探的工作,这些工程勘探的主要目的就是解决溶洞问题,通过若干次的现场工作,发现高密度电法的溶洞异常并不是想象的那样清晰明晰了,当工作量较大、条件复杂时,忽略溶洞异常时有发生,为此,应该进行高密度电法探测溶洞的方法技术研究。

高密度电阻率法最早源于70年代末期的阵列电探思想,经过20多年的发展,高密度电法在仪器、软件、方法及应用上已取得了明显的成绩。尤其是近几年,高密度电法测量仪器生产销售量与日俱增,与此相对应的是:各种性状的异常体在高密度电法的诸方法中的异常特性的研究较少显现于公开发表的刊物或场所。

高密度电法虽然属于电阻率法的范畴,但它仍然有自身的特点:

(1) 电极布设一次完成,野外数据采集自动化或半自动化,避免由于手工操作所出现的错误,工作效率高;

(2) 在同一剖面上,保持部分参数(电极数、电极间距、测点位置、接地电阻)不变的情况下,可进行多种电极排列方式的扫描测量,不仅获得同断面同等密度的数据,而且为进行更高级的资料处理、显示提供了可靠基础;

(3) 具有较高的测量密度,这种高密度、高精度的数据,地质信息丰富,可进行更高级、精确的脱机处理。

高密度电法的上述特点在当前被生产单位表现得最淋漓尽致的是它的高效,而潜在的后续处理进行的较少,或基本就无法进行,原因是多方面的,既有由于发包方压低了高密度电法收费单价,造成“薄利多销”的情况,而使承接方在规定的时间内无暇顾及;也有因测区地形、地质较复杂,而又没有适当的技术措施。本文从偶极装置下球、板体异常特性入手,

通过分析、实验，提出高密度电法在溶洞探测上的一种方法。

2 偶极装置下单一异常体的电阻率测量特征

我们都不会忘记直流电法勘探教科书中对偶极剖面异常的描述：在所有电法装置中，偶极装置具有具有较好的分辨率，以至于在多异常体上部，异常曲线变得较为复杂，同时，偶极所需导线很短，可减弱游散电流及电磁干扰[1]。温纳装置在工程勘探中应用较广泛，其异常也好解释、直观，但实际应用效果表明：温纳装置的异常灵敏度不高，异常形态不完整。这在我们平时的实际工作和一些高密度电法书籍中可以找到[2]

2.1 偶极装置下低阻体异常特征[1]

在普通的直流电法中，受设备、数据处理方式的限制，在一个剖面上一般只能作一至两个极距的曲线，偶极装置的异常形态随极距的变化显现的比较丰富，这一点对于常规直流电法来说显的比较麻烦，正是这种丰富的，单一曲线不易显现的特点在高密度电法的彩色断面图中显示得非常明显。图1为低阻球体少量极距下的剖面曲线及等值断面图，等值断面图呈现低阻的“八”字形异常特点。

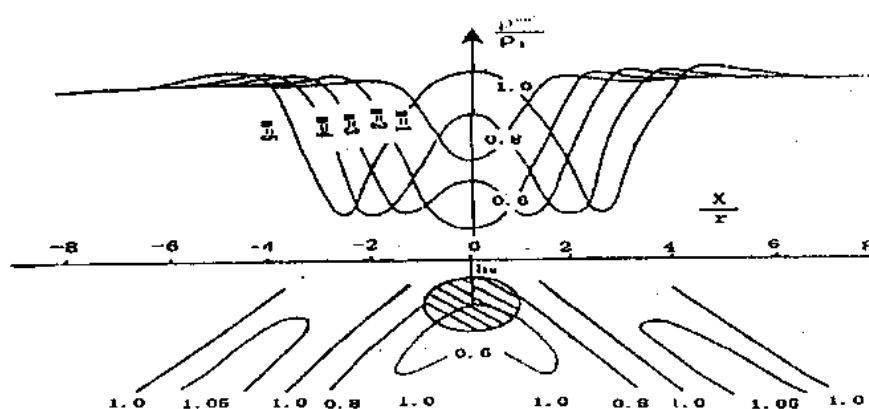


图1 低阻球体上偶极装置的视电阻率剖面曲线及等值断面异常图(球体半径为 r_0)

图2(a)和图3(a)为低阻直立和低阻水平板的偶极剖面曲线及断面异常，其异常形态也呈现出低阻“八”字形异常特点。

比较上述集中不同低阻体的断面异常特点，其共同点是呈现“八”字形低阻异常，随着异常体形态、产状的变化，其断面图中的“八”字形低阻异常特征也发生一定的变化，如低阻中心位置、对称性等，这些特点为在高密度电法断面图象中快速识别异常体特征提供了重要标识。

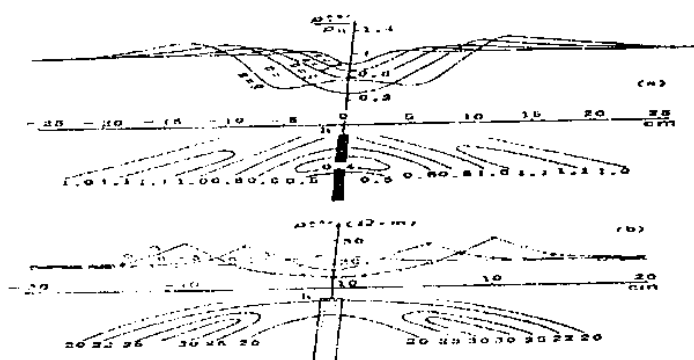


图2 直立板状体上偶极装置的视电阻率剖面曲线及等值断面异常图
($AB=MN=2\text{ cm}$)；(a)：直立铜板($h=2.5\text{ cm}$)；(b)：直立高阻浸染石墨板($h=2\text{ cm}$)

2.2 高阻体异常特征[1]

图 2 (b) 和图 3 (b) 为高阻直立和低阻水平板状体的偶极剖面曲线及断面异常, 其异常形态也呈现出高阻“八”字形异常特点。

比较上述两种不同高阻体的断面异常特点, 其共同点是呈现“八”字形高阻异常, 随着异常体形态、产状、埋深的变化, 其断面图的“八”字形高阻异常特征也发生一定的变化, 如高阻中心位置、对称性等, 这些特征为在高密度电法断面图中快速判别异常体特征提供了重要标识。

2.3 比值特征

在灰岩地层中进行岩洞探测, 首先必须了解岩洞的特征: 溶洞一般发育在高阻灰岩地层中, 溶洞内部可能被低阻的第四系粘土、碎石、水填充, 有一定规模的溶洞一般呈现出上半部为空洞, 下部为半充填状态, 空气、溶洞充填物这两种互为相反电性特征的异常体处在了同一位置上, 他们的异常叠加会使断面异常形态变得十分复杂, 这也是温纳装置在溶洞上的断面异常形态不明显的原因之一。

三电位电极系高密度电法的基本电极排列方式主要有 α 、 β 、 γ 三种, 也是在工程中应用最多的, 对于同一三电位电极系排列 (即电极基本间距相同的同一地电断面), α 、 β 、 γ 所测量的同一个测点、同一极距间隔条件下的视电阻率有如下关系式:

$$\rho_s^\alpha = \frac{1}{3}\rho_s^\beta + \frac{2}{3}\rho_s^\gamma \quad (1)$$

当已知其中的任意两种排列的视电阻率时, 通过式 (1) 便可计算第三者, 在通常情况下, α 排列被使用的情况最多, 而在同一电极系上另加一种 (β 或 γ) 测量方式所花费的时间只是少量的, 却得到了四种断面图 α 、 β 、 γ 及 T 比值断面图像。

在直流电法中, 比值参数有两种: γ 比值和 T 比值参数, 前者是二电位电极系下的, 因二电位电极系涉及到无穷远极, 严重阻碍了工作效率而事实用的较少, 在此不表述。T 比值参数的提出是基于 β 、 γ 两种电极排列在同一电体上所获视电阻率总是具有相反的变化规律这一现象。T 比值的公式如下关系式:

$$T(i) = \frac{\rho_s^\beta(i)}{\rho_s^\gamma(i)} \quad (2)$$

从 (1) 式中可以看出, ρ_s^β 一般来说要比 ρ_s^γ 大, 所以 T 比值一般小于 1, T 比值具有压制干扰、突出高阻异常的作用, 半充填溶洞在 β 、T 断面图中均呈现明显的“八”字形异常形态, 而 α 、 γ 呈现单峰高阻。

3 实验方法技术

3.1 研究实验场地条件

贵阳的南郊公园是一个以溶洞为景点的公园, 实验地选在距溶洞出口 300m 的地段, 溶洞顶板埋深约 4m, 溶洞空间高宽为 1.5m×1.5m, 底部存在充填物, 厚度不详, 溶洞发育在灰岩地层中, 高密度测线垂直溶洞走向, 溶洞中心位于测线 44m 的位置, 地表岩性测线变化为 0~60m 泥质灰岩, 60~120m 为厚层白云质灰岩。测线地表地形为中间平坦且较低, 两端偏高, 最大高差为 2m。

3.2 实验方法技术

使用仪器为 WDZDJ-1、WGMD-1 高密度电阻率测量控制系统, 60 路电极, 电极排列装置采用 α (温纳装置)、 β (偶极装置)、 γ (微分装置) 三种方式进行固定断面测量, 基

本电极间距为 2m，每次测量供电时间为 1 秒，测量周期为 1.5 周。

实验在一天内进行， α 、 β 、 γ 三种排列装置的测量在一次布极条件下完成，并在每次测量前，对 60 根电极进行自动接地电阻检查，确保电极接地良好、各电极接地电阻均一。根据溶洞埋深的实际情况，设计观测层数为 10 层， $AB/2$ 最大至 20m。

3.3 处理技术

利用自己所编制的“DATAFORM”程序，将原始数据转换成两种数据格式：Winsurf 格式和数字图象格式。为了保持实验数据的真实性，没有对测量数据进行滤波、光滑、地形改正等处理。另外编制了一个名为“T”的比值换算及检验程序。对 β 、 γ 两种观测方式下的数据进行比值换算、数据精度检查（即利用 α 、 β 、 γ 在（1）式中的关系进行相互检查）、格式生成等。

经过 DATAFORM 及 T 程序处理后的数据生成两组（Winsurf 等值线、彩色图象）数据，每组含有四种（ α 、 β 、 γ 、T）方式的成果数据，通过 Winsurf 和 Cgraph 生成四幅等值线图及四幅彩色图形。Winsurf 和 Cgraph 的区别在于：Winsurf 是一种应用较为广泛的科学绘图软件，功能较强（可绘制二、三维等值线图、彩色），但选取光滑半径、光滑系数对图形或图象质量产生较大影响，有时将异常形态处理得面目全非；而 graph 是我们针对阵列数据图象而编制的彩色图象生成与显示程序，其特点是保持图象数据的真实可靠，其相邻像元间的像素采用线性内插。

高密度电法探测溶洞工作流程图见图 4。

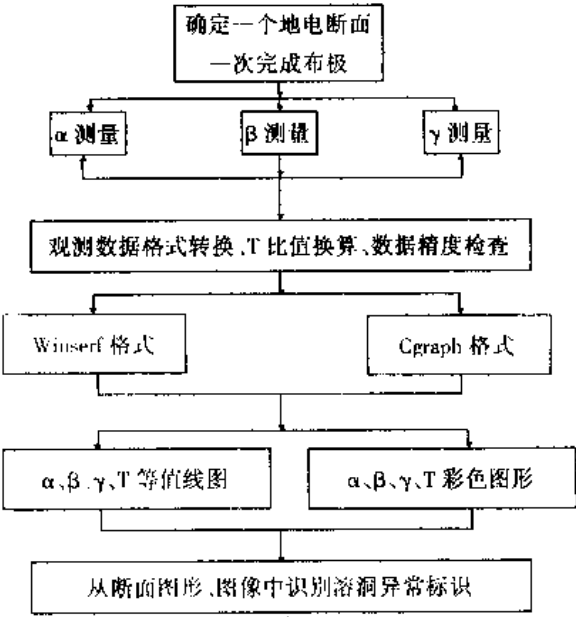


图 4 高密度电法探测溶洞工作流程图

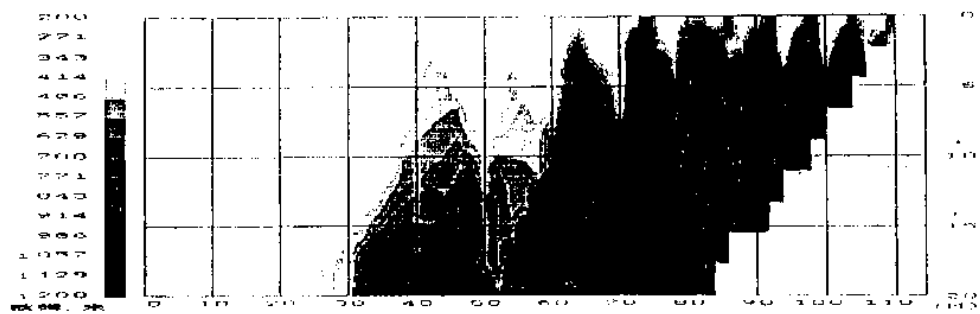


图 5 α (温纳)装置(极间距= na , n :层数; a :基本极距。该断面中共 10 层, $a=2$ m)

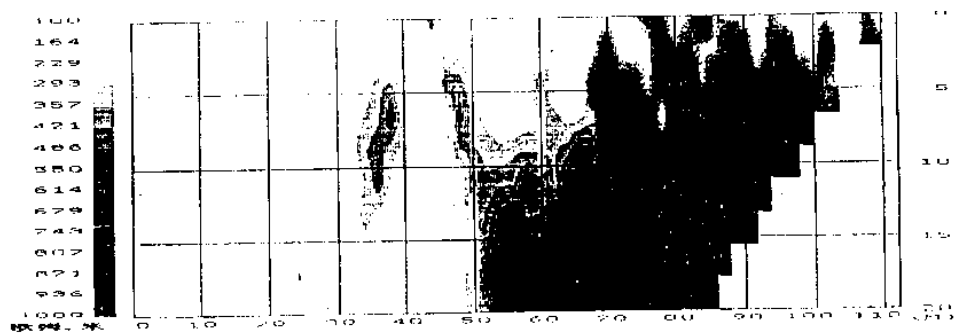


图 6 β (偶极)装置(极间距= na , n :层数; a :基本极距。该断面共 10 层, $a=2$ m)

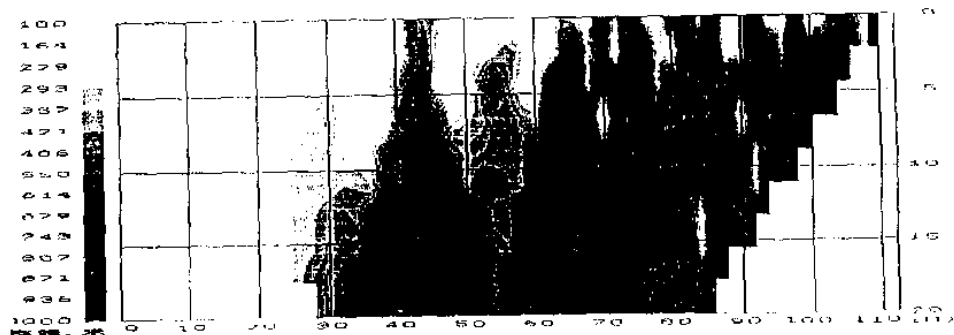


图 7 γ (微分)装置(极间距= na , n :层数; a :基本极距。该断面共 10 层, $a=2$ m)

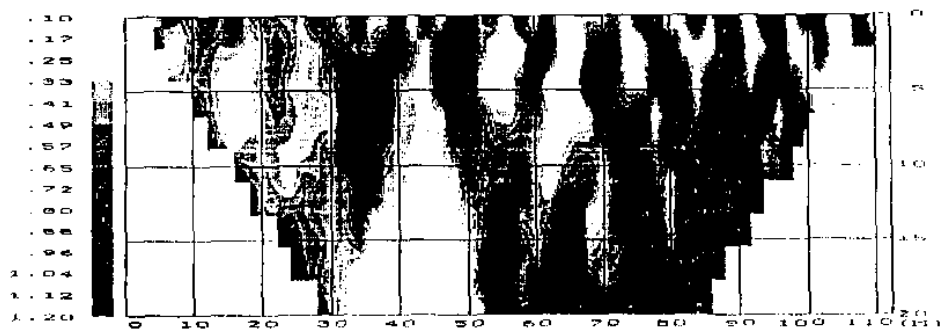


图 8 T 比值图像($\beta\gamma$ 比值)

4 实验结论

图 5、6、7、8 分别为南郊公园地下溶洞的高密度 α 、 β 、 γ 、T 比值断面图， α 、 β 、 γ 、T 四个断面图的溶洞异常特点为：

α 断面异常呈单一高阻，虽然 AB/2 极距较大，但异常底部不能揭示，同时，断面上也存在多个单峰高阻异常，在不知晓溶洞的情况下，很难对其下结论。在定量方面，断面异常中心可以确定溶洞的中心，但溶洞顶板埋深没有根据。

β 断面异常呈明显的“八”字形对称双峰，在同一断面内没有与其特征相同的其它异常，确定了其标识的唯一性；定量上，“八”字形异常的对称中心即是溶洞的中心，溶洞中心埋深为“八”字形异常对称中心连线的中点上。

γ 断面异常与断面异常性质相反，介于之间，决定了该方式只能作为处理过程的辅助手段。

T 比值断面是 α 、 β 、 γ 三种方式异常的集中和突出，尤其在突出高阻空洞上，具有定性和定量特征。

综上所述，高密度电法在进行溶洞探测时，同时采用 α 、 β 两种观测方式，然后换算出 γ 断面及 T 比值断面，尤其是 β 、T 断面明显的“八”字形异常溶洞标识为我们进行近地表溶洞定性及半定量探测提供了一种有效的方法技术。该方法工作效率较高，如用重庆地质仪器厂产的高密度电法测量系统，12 层的断面完成一种方法的测量只多增加了 15 分钟，而完成一次布极需要一个多小时。

5 展望

高密度电法勘探在工程上的应用要取得更好的效果还有耐于进一步的实验研究及处理技术的进一步提高和深入，如：高密度电法的各个排列装置在特征异常体上的断面特征、层状介质端面特征及任意测点测深曲线抽取和定量解释、高密度电法的地形改正、高密度电阻率反演（Zohdy 和层析成像技术），在短期内，这些技术必将变为现实。所以，高密度电法是相当有发展前途的一种工程勘探方式。

6 参考文献

[1]傅良魁.《电法勘探》

[2]王兴泰.《工程与环境物探新方法新技术》