

42-47

综合物探在南昆线岩溶复查工作中的应用

李 坚

(铁道部第二勘测设计院地路处·成都·610031)

p642.25
U212.22

阐述了以综合物探为主要手段探测地下隐伏岩溶的工作原理及过程。针对岩溶勘探的特点,通过采用多种物探方法、布置高密度测网、勾绘高密度资料定性解释图件、剔除非可溶岩地层干扰影响以及总结一套简单实用的定性及准定量资料判释方法等5项措施,在南昆线岩溶复查工作中取得了良好的效果。

关键词 岩溶复查 综合物探

岩溶, 铁路, 南昆线

国家重点建设工程南(宁)—昆(明)铁路线路总长898km,跨越桂、黔、滇三省,其中可溶岩地段的线路长度为387.6km,占总长度的43%。

1 岩溶地貌和岩溶发育特征

岩溶的发育必须具备两个基本条件:第一是可溶岩;第二是溶蚀可溶岩的水。岩溶发育的结果形成不同岩溶地貌,以下4种岩溶地貌反映了不同的岩溶发育规律:1)溶丘谷地。地面以溶丘和谷地为主,地下溶洞、溶隙较发育,但以充填为主;2)峰丛(峰林)洼地。地面以峰丛、峰林和洼地为主,同时发育众多的漏斗、竖井和落水洞;3)峡谷。地面以悬挂溶洞、暗河为主,同时可见众多的漏斗、竖井和落水洞;4)高原溶原—丘峰。地面以溶蚀平原为主,偶见残丘、孤峰,局部地区可见石林地貌,地下溶洞、溶隙发育,但以充填或半充填为主,深层进入相对活动时期,以暗河或溶蚀空洞为主。岩溶发育还受地下水、构造和岩性等因素的影响。一般说来,在断层破碎带和方解石成份含量较高的岩性地段以及可溶岩与非可溶岩,特别是与泥页岩等致密、隔水岩性接触带处,岩溶比较发育。

2 野外工作方法

2.1 方法的选择

在铁路施工过程中,路基已大体平整成型,所以物探工作地段处于狭长的地形平缓地带。根据实际观测统计表明,路基面至以下30m深度范围内的岩溶,特别是溶洞对路基的稳定及行车安全构成的威胁最大。因此,要求物探的勘探深度为30m。此外,虽然岩溶与围岩有一定的电阻率、介电常数、地震波阻抗差异,但因其为不规则三维形体,空间组合十分复杂,要查清这样深度范围内岩溶的位置、形态及埋深,对物探方法的勘探精度提出了较高的要求。据此,我们选用直流电测深法和地质雷达探测法为主进行勘探;个别地段辅以联合剖面法、充电法和四极对称剖面法;在具备网格状布孔的条件下,采用了孔内无线电波透视法。由于工作区岩溶的三维不规则形态和规模小(一般溶洞的直径为1m~5m),实际激发的地震波有效频率为25Hz~300Hz,分辨率低,用常规的二维地震反射波法难以取得良好效果。

2.2 测网布置

由于岩溶勘探要求精度高,所以需布置高密度测网。一般在单股轨道地段沿线路方向布置3~4条测线,线距2m~5m;在车站地段,视轨道数量而定,一般至少布置5条测线以上。电测深法点距为5m,异常地段加

本文1997年7月收到,9月改回,王延忠编辑。

密至 2.5 m;地质雷达探测法采用连续追踪剖面观测;孔内无线电波透视法采用定发、定接及同步等多种方式观测,接收点距为 0.5 m~1 m。

2.3 观测参数

电测深法: $AB/2$ 从 1.5 m 变至 50 m, $MN/2=0.5$ m;地质雷达探测法:为兼顾勘探深度和精度,采用 100 MHz 和 300 MHz(有时为 500 MHz)两种对空屏蔽天线进行施测;采样点为 512 点/扫描;记录长度为 300×10^{-9} s ~ 650×10^{-9} s。

3 资料处理整理

3.1 电测深法

把各测线观测值绘制在模数为 6.25 cm 双对数坐标纸上;用微机绘制各测线的等 ρ_s 值线断面图和各种极距 ($AB/2=1.5$ m ~ 50 m) 的等 ρ_s 值线平面图(以下分别简称等 ρ_s 断面图和等 ρ_s 平面图),作为电测深资料定性解释的主要依据。采用 $\rho_s = (10, 15, 20, 30, 50, 70, 100, 150, 200, 300, \dots, 5000, 7000, 10000) \Omega \cdot m$ 间隔值勾绘等值线图,以突出岩溶异常的形态及细节,当图中等值线仍显稀疏时,再加密勾绘等值线。

3.2 地质雷达探测法

为提高资料的信噪比和分辨率,对野外原始资料用 RADAN III 系统软件按以下流程进行处理:

原始磁带数据读入微机→数字滤波→能量均衡→输出时间剖面图

4 资料解释

4.1 剔除非可溶岩地层

对一般岩溶工点而言,除可溶岩地层以外,还可有人工填土、第四纪覆土、砂岩、泥岩、页岩、甚至火成岩等地层,有的岩层亦可与可溶岩互层,而这些岩层与可溶岩中岩溶的电阻率及介电常数差异不大,其物性容易混淆,因此要正确判释岩溶异常,首先应根据

物探资料把这些地层与可溶岩区分开,其电性特征描述如下:

1) 人工填土及第四纪覆土

由于结构及湿度不均匀,造成了人工填土及第四纪覆土电性的不均匀性。在电测深曲线前支,曲线类型多变;等 ρ_s 断面图上部等值线形态复杂,高低阻闭合圈或半闭合圈较多, ρ_s 值变化大,从几十 $\Omega \cdot m$ ~ 上万 $\Omega \cdot m$ 不等;潮湿的粘土 ρ_s 值极低,一般为几十 $\Omega \cdot m$,而干燥或土夹块石土层 ρ_s 值极高,一般为上千 $\Omega \cdot m$ 。当地面为潮湿的覆土时,地质雷达勘探深度会大大降低,一般在时间剖面图上看不到较深地层的反射信号,因此可以利用这一特征并结合电测深资料来判断覆土的电性特征。而可溶岩的 ρ_s 值在 $300 \Omega \cdot m$ ~ 几千 $\Omega \cdot m$,反映在测深曲线中段及尾支,并且土石分界线在电测深曲线的特征点,如 H、K、A、Q 点比较稳定有规律,通常可根据辅助量板解释法、最优化反演计算或经验系数法求出覆土厚度,即土石分界线埋深。

2) 砂岩、泥岩及页岩

砂岩、泥岩及页岩的电性与可溶岩相比,差异较大。砂岩的 ρ_s 值在 $100 \Omega \cdot m$ ~ $300 \Omega \cdot m$;泥岩及页岩的 ρ_s 值在 $20 \Omega \cdot m$ ~ $100 \Omega \cdot m$,相邻测点的电测深曲线形态变化不大,等 ρ_s 断面及平面图的等值线平缓而又稀疏;与之相反,可溶岩的 ρ_s 值在 $300 \Omega \cdot m$ ~ 几千 $\Omega \cdot m$,相邻测点的电测深曲线形态变化大,高低阻圈相间,岩溶发育时,此特征尤为明显。此外由于砂岩、泥岩及页岩的电阻率低,对电磁波吸收大,所以在雷达时间剖面图上反射信号弱。与之相反,可溶岩特别是岩溶发育地段雷达时间剖面图上反射信号较强。应特别注意的是:当可溶岩夹薄层砂泥岩或可溶岩含泥质或碳质成份较高时,其电性与砂泥岩相差不大,容易混淆,所以在解释资料时,要注意排除这种干扰。当砂岩、泥岩及页岩与可溶岩呈水平接触时,可用前述定量确定土石分界线方法划分这些岩层界线。

4.2 确定岩溶发育规律

在剔除非可溶岩地层后,可以根据等 ρ_s 断面图、平面图、电测深曲线和雷达时间剖面图,结合地貌、岩性、构造和地下水等地质测绘资料从宏观上来判定测区可溶岩中的岩溶发育规律及其分区。一般来说,岩溶发育时在物探资料中所显示的特征有:由于受岩溶三维不规则形体的影响,等 ρ_s 断面图、平面图的等值线变化凌乱,高低阻圈交错,并且其峰值高于或低于背景值的 3~5 倍以上;相邻测点的电测深曲线类型变化较大,有时曲线的上升段或下降段与横坐标轴的交角分别大于 45° 或 62.5° ;有时曲线中出现上凸或下凹的平台;雷达时间剖面图上存在较强条带状或反“U”字形反射信号或小范围极弱信号区。另外,根据等 ρ_s 断面图高低阻圈异常的长轴方向近于垂直或近于水平可确定岩溶是以垂直方向或水平方向发育为主;根据等 ρ_s 平面图的高低阻圈异常的长轴方向可大致确定岩溶在平面上的发育方向。

4.3 定性判释单个岩溶

在大致确定测区的岩溶发育规律后,就可根据物探资料来进一步判释可溶岩中所赋存的单个岩溶。

地下岩溶对路基直接形成较大危害的有溶洞(包括充填及半充填洞、空洞和暗河)、溶隙(包括溶槽和溶沟)和溶蚀破碎带,因此,准确判定其埋深、大小及形态显得尤为重要。物探资料定性判释这些异常的依据是:

1) 充填溶洞、半充填溶洞(充填潮湿土)和暗河。电测深曲线反映为 H 型或下凹平台;等 ρ_s 断面图和平面图为低阻圈,其 ρ_s 值一般小于 $100\Omega\cdot m$ 或比背景值小 3 倍以上;雷达时间剖面图为反“U”字异常或反射信号能量特低。

2) 空洞和半充填溶洞(充填干燥土和块石)。电测深曲线为 K 型或上凸平台;等 ρ_s 断面图和平面图为高阻圈,其值一般大于 $5000\Omega\cdot m$ 或比背景值高 5 倍以上;雷达时间

剖面图为反“U”字异常。

3) 小溶洞群。相邻测点电测深曲线类型变化大;等 ρ_s 断面图、平面图形态变化特别凌乱,等值线密集,高低阻圈多;雷达时间剖面图有杂乱的强反射信号。

4) 溶隙。在等 ρ_s 断面图反映为垂直或近于垂直的低阻带,在等 ρ_s 平面图则反映为向某一方向延伸的低阻带,其 ρ_s 值一般比背景值小 2 倍以上。

5) 溶蚀破碎带。在等 ρ_s 断面图、平面图都反映为低阻异常,其 ρ_s 值仅比背景值小 2 倍;雷达时间剖面图反映为条带状强反射信号。

需注意的是:在可溶岩中,若泥质或碳质成份含量较重时,如泥质或碳质灰岩,这时在等 ρ_s 断面图和平面图上整个 ρ_s 背景值都较低,一般只有 $50\Omega\cdot m \sim 200\Omega\cdot m$,因此岩溶异常与背景值混淆,极难识别;另外,由于电阻率低,雷达时间剖面图上反射信号弱,很难辨别异常。在这种情况下,使用电测深和地质雷达资料判释岩溶显得困难。

4.4 准定量判释单个岩溶

由于岩溶多为三维不规则复杂形体,使用常规的定量解释方法误差大,只能算做“准定量解释”。下面介绍我们通过大量实践总结的“准定量解释”方法。

4.4.1 确定岩溶顶底板埋深

在等 ρ_s 断面图上,以低(高)阻圈异常的顶部或底部的等值线梯度变化最大处所对应的极距($AB/2$)乘以系数 E,即是岩溶顶板或底板的埋深, E 为经验系数,其值取为:

$$E = \begin{cases} 0.6 \sim 0.9 & (AB/2) < 15 \text{ m} \\ 0.4 \sim 0.5 & (AB/2) > 15 \text{ m} \end{cases}$$

对雷达时间剖面,利用 $h = tc/(2\epsilon^{1/2})$ 即可算出岩溶的顶板埋深 h 。其中 t 为反“U”字异常顶部所对应的双程走时, ϵ (介电常数) 为 7~11, c 为电磁波在空气中的传播速度。

4.4.2 确定岩溶边界

高低阻圈异常或垂直梯度带的四周(对

等 ρ_a 平面图)或两侧(对等 ρ_a 断面图)等值线梯度变化最大处即是岩溶在平面上的边界或在断面上的侧边界。

此外,当地下溶洞近似为球体时,可根据雷达资料求双曲线的渐进线方法来计算溶洞半径,其原理如下^[1](图1):

设溶洞顶面埋深为 H , 半径为 R , 地面任意记录点 Q 至洞心的距离为 $D+R$ (其中 D 为雷达波从 Q 至球面的传播路径, 并且 $D = y$, 它与时间剖面上反“U”字异常顶部

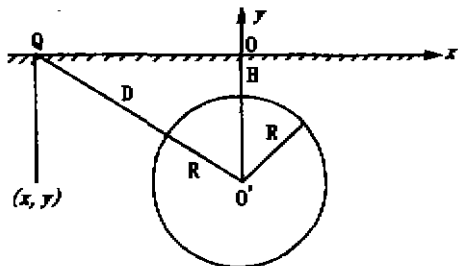


图1 利用雷达资料求双曲线的渐进线, 求解溶洞半径原理图

所对应时间的关系为: $D = tc/2\epsilon^{1/2}$, 其中介电常数 ϵ 取 9~11, c 为电磁波在空气中的传播速度)。由图1的 $\Delta QOO'$ 得关系式: $(y+R)^2/(H+R)^2 - x^2/(H+R)^2 = 1$, 该式 x 和 y 的关系为一双曲线方程, 其渐进线方程为 $y = \pm x - R$ 。因此, 把时间剖面图的反“U”字异常进行时深转换, 再作斜率为 ± 1 的两条渐进线, 其线与 y 轴的交点 y_0 即为所求的溶洞半径。

4.5 实例

下面以南昆线捏龙路基岩溶勘探工点为例说明综合物探资料解释步骤和方法原理。

该工点位于云南省师宗县境内, 线路里程为 DK644+320~DK646+380^①; 地层主要分布有三叠纪中统法郎组下段(T_2^f)灰岩和个旧组第三段(T_2^g)灰岩及砂质泥岩; 地面地质调查表明, 工区内岩溶发育并有3条断层穿过。为查清地下隐伏岩溶, 采用电测深法和地质雷达探测法进行综合勘探。

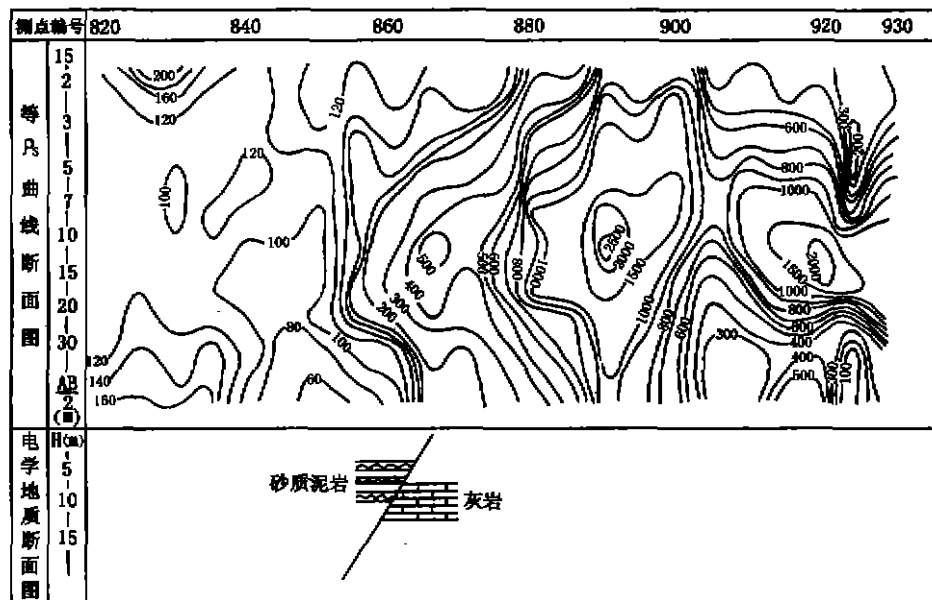


图2 砂质泥岩与灰岩接触的等 ρ_a 曲线断面图(上部)和电学地质断面图(下部)

① DK644+320, DK 为铁路定测线路里程, 铁路上通常以北或东方向为线路起始里程, 即零里程, 所以南昆线则以南宁为起始里程; 数值表示沿线路与起始里程(南宁)的距离长度, 其中“+”号以左的数值单位为 km, 以右为 m, 如 DK644+320 位置表示该点沿线路距南宁为 644.32km; 它是铁路勘测设计施工中常用的位置表示方法。

对所作电测深曲线和雷达速度资料进行统计分析,得到工区电性参数(表 1)。

表 1 工点电性参数表

名 称	视电阻率 ($\Omega \cdot m$)	介电常数
完 整 灰 岩	500~2500	7~8
砂 质 泥 岩	20~120	6~7
充填溶洞及溶隙	2~200	9~12
空洞及半充填溶洞	3000~10000	1~2

由表可见,砂质泥岩与灰岩、灰岩与岩溶间都存在较大的电性差异,有利于物探资料判释和划分。下面按前述方法步骤对资料进行解释:

剔除砂质泥岩地层的干扰。

由于地表有 1m 左右的第四纪覆土所盖,砂质泥岩与灰岩的界线及其产状情况不详,但从图 2 可知,左侧等值线稀疏,变化平缓(ρ_s 在 $60\Omega \cdot m \sim 120\Omega \cdot m$);而右侧等值线则密集且变化大(ρ_s 在 $500\Omega \cdot m \sim 2500\Omega \cdot m$);按等值线的变化形态可大致确定砂质泥岩与灰岩的分界线及其产状(图 2 下部)。剔除砂质泥岩后,资料解释的重点即可放在灰岩部分了。

确定岩溶发育规律。

工区内灰岩与砂质泥岩(隔水层)接触;有 3 条断层通过;特别是在 DK644 + 370 ~ + 420、DK645 + 190 ~ + 530 和 DK645 + 650 ~ DK646 + 200 三个地段,等 ρ_s 断面图、平面图高低阻圈交错,并且其峰的等值线变化凌乱,值高于或低于背景值的 3~5 倍以上;相邻测点的电测深曲线类型变化较大,有时曲线的上升段或下降段与横坐标轴的交角分别大于 45° 或 62.5° ;有时曲线中出现上凸或下凹的平台;雷达时间剖面图上存在较强的条带状或反“U”字形反射信号或小范围的极弱信号区;上述依据表明工区岩溶,特别是在这三个地段非常发育。

定性和准定量判释单个岩溶。

图 3 为测线 2 的一段实测断面。图 3

上、中两图的两侧分别有反“U”字形异常和高阻圈,两图的中间则分别有极弱反射信号

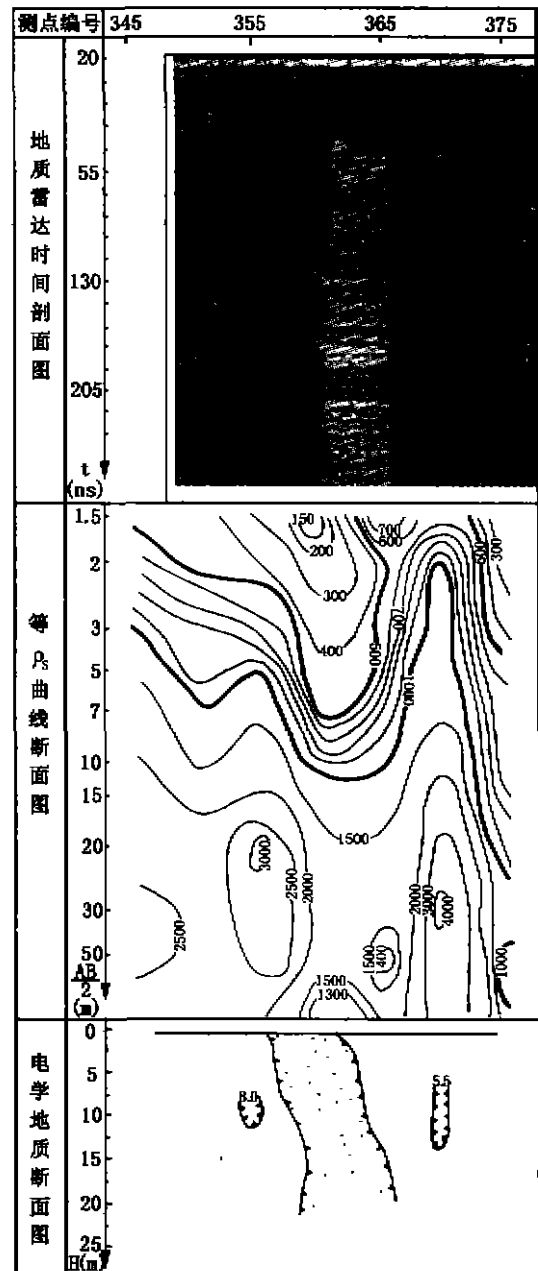


图 3 空洞和充填岩洞所对应的雷达时间剖面图和等 ρ_s 曲线断面图

区和低阻异常,按 4.3 节和 4.4 节所述方法原理判释单个岩溶,图的两侧分别对应了两个较小空洞,中间则对应了一个较大充填溶洞且洞顶埋深极浅或者基本出露;为确定两

侧空洞的顶板埋深,取 $\epsilon = 7$,两空洞反“U”字形异常顶部所对应的双程走时(t)分别为 $145 \times 10^{-9}s$ 和 $100 \times 10^{-9}s$,两空洞高阻圈异常的顶部等值线梯度变化最大处所对应的极距($AB/2$)分别为 15m 和 10m,解释结果见图 3 下部。

按照上述方法步骤对工点资料进行解释,后来在物探异常位置布置 11 个钻孔进行抽样验证,验证结果为:8 个孔见溶洞,2 个孔见溶蚀破碎带,仅 1 个孔见到较完整灰岩。

5 物探成果

在南昆线岩溶复查工作中,根据物探资料共布置 92 个验证钻孔,其中有 56 个孔见溶洞或暗河,12 个孔见溶蚀破碎带,物探资料的准判率为 74 %。

根据前述的方法和步骤,对全线可溶岩分布地区中的 237.93km 线路长度地下岩溶发育情况进行了勘探,并从中划分出了累计 19 余 km 线路长度的岩溶特别发育地段。在这些地段,隐伏岩溶埋深浅,以垂直方向发育为主,分布的溶洞、溶隙和溶蚀破碎带多,对行车安全构成极大的隐患,物探为岩溶整治工作提供了必需的基础资料。物探资料判

释分别有溶隙、溶洞以及溶隙与溶洞、溶隙与破碎带相互穿插等异常,后经施工单位开挖处理,实际情况与物探判释基本一致。据迄今为止整治工地反馈的信息,物探判释结果与实际工程处理情况基本吻合。

6 小结

物探方法在南昆线岩溶复查中所以能取得良好的勘探效果,主要有以下 5 点:

(1)施测场地地形平整,不存在物探资料地形校正问题;

(2)采用综合物探方法。在实际工作中采用了多种物探方法,并以直流电测深法和地质雷达探测法为主,其中地质雷达又采用了两种或两种以上频率的天线施测,几种物探方法资料相互对比印证,取长补短;

(3)布置高密度测网和勾绘高密度等值线定性解释图件,不漏掉单个小的岩溶异常,提高了资料的分辨率;

(4)正确地剔除了与岩溶异常物性相近的非可溶岩地层的干扰影响,提高了资料的准判率;

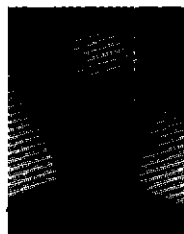
(5)总结了一套简单实用的物探资料定性及准定量判释岩溶的系统方法。

THE APPLICATION OF GEOPHYSICAL PROSPECTING IN KARST CHECKING IN NANNING - KUNMING RAILWAY

Li Jian

The operating principle and process of detecting hidden underground karst with comprehensive geophysical prospecting method are stated. In accordance with the features of detecting karsts, five measures should be taken, including selecting various geophysical prospecting methods, arranging high-density survey grids, drawing high-density qualitative interpreting maps, rejecting disturbing effects of non-soluble layers and using a set of simple practical principle about qualitative and quasi-quantitative discrimination. As these five measures were taken, the Karst checking in Nanning - Kunming railway was completed very well.

Key words karst checking, comprehensive geophysical prospecting



第一作者简介:

李 坚 男,1960 年生,成都市人。1982 年毕业于成都地质学院物探系,获学士学位。现任铁道部第二勘测设计院地路处高级工程师和物探专业负责人,主要从事水文工程物探的生产技术工作和管理工作。

通讯地址:四川成都通铺路 3 号 铁道部第二勘测设计院地路处 邮政编码:610031