音频大地电磁法(AMT)在贵州省余遵高速公路路基勘察方面的应用

刘永锋[1],闫维华[1],叶 佩[2]

(1. 贵州省地质矿产勘查开发局 104 地质大队,贵州 都匀 558000;
2. 中国国土资源航空物探遥感中心,北京 100083)

[摘 要]余庆至遵义高速公路位于贵州省东北部,地形切割大、地质结构复杂,利用常规方法进行定测勘察,费时费力、成本高、工期长、效果一般,后选用音频大地电磁法(AMT)和钻探相结合的方法,物探结果和钻孔岩性相互对比,相互验证,以点带线,提高了工作效率,降低了勘察成本,并且物探成果可以指导钻探施工,为隧道掘进提供超前预报。该方法在该区取得了较好的效果,通过总结方法的优缺点,可以将该方法在相似区域进行推广应用。

[关键词]隧道勘察;音频大地电磁法;岩溶;采空区;视电阻率
[中图分类号]P631.2;P631.8+2 [文献标识码]A [文章编号]1000-5943(2020)-02-209-05

1 引言

余庆至遵义高速公路是贵州省重点建设项目。公路穿越位置地形切割大,桥隧比超过 80%,地质构造复杂,地下水系发育,高速路横跨省内最大水系乌江,基岩以白云岩、灰岩为主,属于典型的喀斯特岩溶发育区,高速公路在如此复杂的地质环境中施工,勘察工作尤为重要。前期仅通过钻探施工进行勘察,施工慢、费时费力、质量不可预测,后引入音频大地电磁法(AMT),该方法解释深度和精度能满足施工需求,物探结果和钻孔岩性相互对比,以点带线,提高了工作效率和勘察质量。

在路基测量中目前常用的物探方法主要有高密度电法、瞬变电磁法、浅层地震法等,本次测量选用 EH-4 大地电磁测深系统进行测量,该方法有效探测深度在 1 000 m 以内,对陡立的条带状地质体有较好的反应(如断层、裂隙等),能满足隧道探测深度和目的体测量精度的要求,且该设备具有轻便、经济高效的优点(杨炳南等,2018)。文中列举了该方法在余遵高速两条具有代表性的隧道剖面上的勘察实例,通过分析对比和施工验证,表明该方法具有较好的勘察效果,通过总结,认为该方法在相似岩性地区具有普适性,值得推广。

2 方法原理

2.1 EH-4 音频大地电磁法的基本原理

大地电磁测深法(MT)是利用天然交变电磁场研究地球电性结构的一种地球物理勘探方法,它利用电磁感应的趋肤效应,在场源和接收点间距不变的条件下,改变电磁场的频率来达到测深的目的(汤井田等,2005)。一般大地电磁法(MT)的测量频率范围在 100 Hz 以下,勘探深度在数百

[收稿日期]2019-06-20 [修回日期]2019-12-31
[资助项目]遵义市交通局政府社会共同出资项目(PPP 项目)。
[作者简介]刘永锋(1985—),男,硕士、高级工程师,长期从事地球物理找矿和工程物探相关工作。电话:13885401367,E-mail:381449673@qq.com

米至数百公里。音频大地电磁法(AMT)的频率测量范围约为 0.1～100 kHz,勘探深度为几米至几公里,在矿产勘查和工程勘探中应用广泛(雷宛等,1990)。EH－4 是由美国 EMI 公司和 Geometrics 公司联合推出的新一代电磁观测系统,频率测量范围 10 Hz～100 kHz,其属于音频大地电磁法(AMT)的一种,能观测到地表几米至 1 500 m以内的地质断面的电性变化信息。基于对断面电性信息的分析研究,可以确定地电断面的性质。该系统适用于各种不同的地质条件和比较恶劣的野外环境,常用于矿产与地热勘查、环境监测以及工程地质调查(汤井田等,2008)。

其工作原理与大地电磁(MT)法一样,是利用宇宙中的太阳风、雷电等入射到地球上的天然电磁场信号作为激发场源,高频部分可借助人工发射场,由电磁场理论可知,大地介质中将产生感应电磁场,则此感应电磁场与一次场是同频率的,EH-4 系统观测的基本参数为正交的 2 个电场分量(Ex,Ey)和 2 个磁场分量(Hx,Hy),通过傅里叶变换将时间序列的数据转化为频率域数据,利用下式可求得 2 个不同方向上的视电阻率,进而计算张量阻抗,获取地层的电阻率值(卢卯等,2015):

$$\rho=\frac{1}{5f}\left|\frac{E}{H}\right|^2$$

式中 ρ 是电阻率,E 和 H 分别是一组电道和磁道的信号强度,f 是频率。

该方法以卡尼亚大地电磁理论为依据,假设场源位于高空,地面电磁波为平面电磁波,地下介质在水平方向上是均匀的。定义电磁波在地下介质传播中,振幅衰减到地面振幅的 1/e 深度为趋肤深度或穿透深度,用不同频率的阻抗计算视电阻率,便可达到测深目的(钟幼生等,2015)。

根据趋肤深度的概念,趋肤深度与电磁波的频率和介质的视电阻率呈如下的关系:

$$\sigma=\sqrt{\frac{2}{\omega\mu\delta}}\approx 503\sqrt{\frac{\rho}{f}}\,(\mathrm{m})$$

式中 σ 是趋肤深度,ω 是角频率,μ 是磁导率,δ 为电导率,ρ 是介质的电阻率,f 是电磁波的频率。

趋肤深度和电磁波在介质中的穿透深度有关,但它并不代表有效探测深度,有效探测深度 D 是指某种探测方法的体积平均探测深度。其经验公式为(万汉平等,2013):

$$D=\sigma/\sqrt{2}\approx 356\sqrt{\frac{\rho}{f}}\,(\mathrm{m})$$

上式表明,实际探测深度仅取决于大地电阻率 ρ 和使用的信号频率 f。随着测试区域电阻率的减小或者接收频率的升高,有效测量深度变浅,反之亦然。EH-4 的工作频率在 10-100 kHz,设大地平均电阻率为 100 Ω·m,则 EH-4 的有效探测深度为 11.5～1 154 m(严良俊等,2014)。所以使用 EH-4 进行隧道基底测量,完全满足深度要求,对深度要求较小的区域,可以仅测量高频信号,以达到提高工作效率的目的。

2.2　区内岩层物性特征

物探测量的目的是划分可溶岩与非可溶岩的分界线,找出隧道开挖面附近岩溶洞穴、暗河、软弱带、采空区及富水带的埋深和规模,找出隧道沿线断层破碎带的分布情况,为隧道定线提供依据、为隧道施工提供超前预报。物探测量主要依据工作区物性差异,区内多分布白云岩、石灰岩等可溶性岩体,该类完整岩体一般为高阻反应(ρs>1 000 Ω·m)。地表覆土、泥页岩、煤系地层一般为层状低阻反应(ρs<300 Ω·m)。断层、裂隙的发育一般在垂向上呈低阻条带状反应(ρs<200 Ω·m)。岩溶管道、岩溶一般发育在白云岩、灰岩地层中,形态一般呈圆形、椭圆形、纺锤形,岩溶边界视电阻率等值线分布密集。岩溶及岩溶管道根据其发育程度和填充物质不同视电阻率有所变化,一般空洞视电阻率最大(ρs>3 000 Ω·m),填充碎石、泥质、水等物质的岩溶视电阻率最小(ρs<200 Ω·m),半填充状态的岩溶视电阻率介于两者之间,可以通过视电阻率的形态、数值进行综合分析研判,大致确定岩溶性质位置、规模等参数(陈松等,2017)。

3　应用实例

3.1　污泥坝隧道勘察实例

该隧道为余遵高速控制性工程之一,属浅切低山溶蚀、侵蚀地貌类型,场区相对高差 175 m。进口位于陡坡体上,自然坡角为 23°;出口位于陡坡体上,自然坡角为 30°。地表多覆盖第四系残、坡积物,植被较发育,多为杂草、灌木,局部较茂

密,自然坡度一般 10°～40°,局部山坡陡峻。隧道下伏基岩为寒武系中统高台石冷水组白云质灰岩,寒武系下统清虚洞组白云岩,寒武系下统金顶山组及明心寺组泥质粉砂岩夹灰岩。

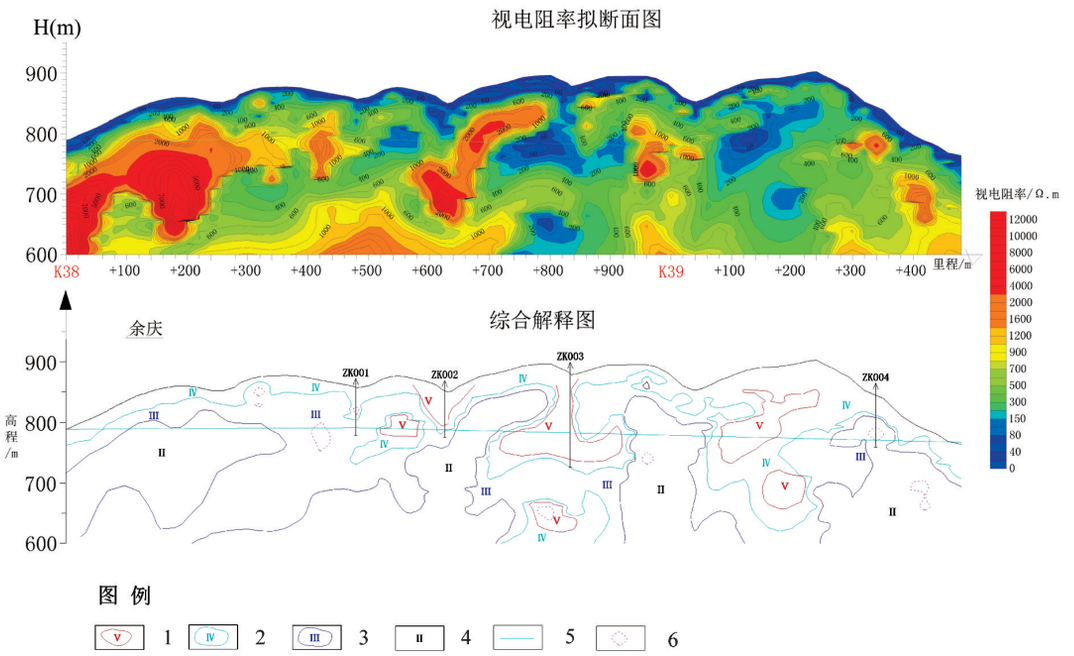


图 1　余遵高速污泥坝隧道音频大地电磁测深综合成果图

Table 1　The AMT sounding comprehensive results of Wuniba tunnel of Yuzun expressway

1—极破碎、极软弱、岩溶强烈发育或富水岩体;2—较破碎岩体或岩溶发育岩体;3—隧道轴线;4—破碎、软弱、岩溶中等发育或含水岩体;5—较完整岩体;6—推测岩深

通过视电阻率拟断面图中视电阻率等值线的分布特征可以对隧道沿线埋深 300 左右岩层地电性质进行大致的判断,根据视电阻率的数值大小对岩层的稳定性(破碎程度、含水状态等)进行判断;通过视电阻率等值线的圈闭形态、分布特征可以对岩溶、断层、软弱带的大小、埋深、性质进行大致的推测,为隧道开挖、工程勘察提供超前预报。如图示,K38+000—K38+500 段,地表出露寒武系中统高台石冷水组地层,基岩为白云质灰岩,该段电阻率分层明显,视电阻率以中-高阻为主,岩层厚度分布均匀,总体较完整。K38+300—K38+320 处,高程 820 m 和 850 m 处从上至下有一高阻和低阻圈闭体,推测高阻体为岩溶空洞,低阻体为填充型岩溶,两岩溶位置与隧道开挖面较远,故对隧道影响有限。K38+400—K38+420 之间,隧道开挖面附近有一高阻体沿垂向分布,规模较大,推测为岩溶空洞施工中加强了该处的超前预报和支护工作。K38+465—K38+490 之间,从地面向下有一漏斗状低阻体,低阻体中部有一低阻圈闭体,结合地形推测漏斗状低阻为裂隙发育带,低阻体为填充型岩溶,钻孔 ZK001 揭露该处岩体破碎,并在物探推测位置揭露一高度超过 8 m 的填充型岩溶。K38+500—K39+000 段,该段地表出露寒武系下统清虚洞组,白云岩为主,该段裂隙岩溶发育,推测 K38+620—K38+660 处视电阻率等值线呈“V”字状分布,中部视电阻率数值小于 200 Ω·m,推测为裂隙软弱带,结合地形推测该处为地下水下渗通道,ZK002 钻孔查明,该处岩层破碎、富水性好。K38+800 处有一倾斜的电阻率低阻条带,推测为断层或裂隙发育带,地表为沟谷,推测其为地表水排泄通道,其底部视电阻率较低,岩层较破碎,布设 ZK003 对其进行验证,由于该处岩层破碎、软弱,根据设计方要求施工多个钻孔对其进行揭露,隧道施工前经过专家论证,对其进行了加固处理。K39+000—K39+500 段,地表出露寒武系下统金顶山+明心寺组,泥质粉砂岩夹灰岩为主,视电阻率呈中-低阻,在 K39+360 附近,隧道开挖面处有一高阻圈闭,推测其为岩溶空洞,钻探 ZK004 验证结果和推测大致吻合。

3.2　平定安隧道勘察实例

该隧道地处贵州黔北山地,进口紧邻乌江,属浅切低山溶蚀地貌类型,相对高差约 200 m 左

右，隧道横穿过一山体，进口自然坡角为 35°，出口坡度较缓。地表多覆盖第四系残、坡积物，进口部分出露灰岩，中段及出口部分被田土杂木林覆盖。该剖面基岩为二叠系下统茅口组、二叠系上统长兴组和吴家坪组地层，其中二叠系下统茅口组以灰岩为主，靠近乌江河边，茅口组地层内岩溶暗河发育；二叠系上统长兴组和吴家坪组，为区内的煤系地层，岩性以泥岩、粉砂岩等低阻破碎岩体为主，且为隔水层，对隧道施工影响较大。本次勘察的目的一方面划分岩层完整性和稳定性，找出岩溶裂隙位置，另一方面是找出煤层采空区。

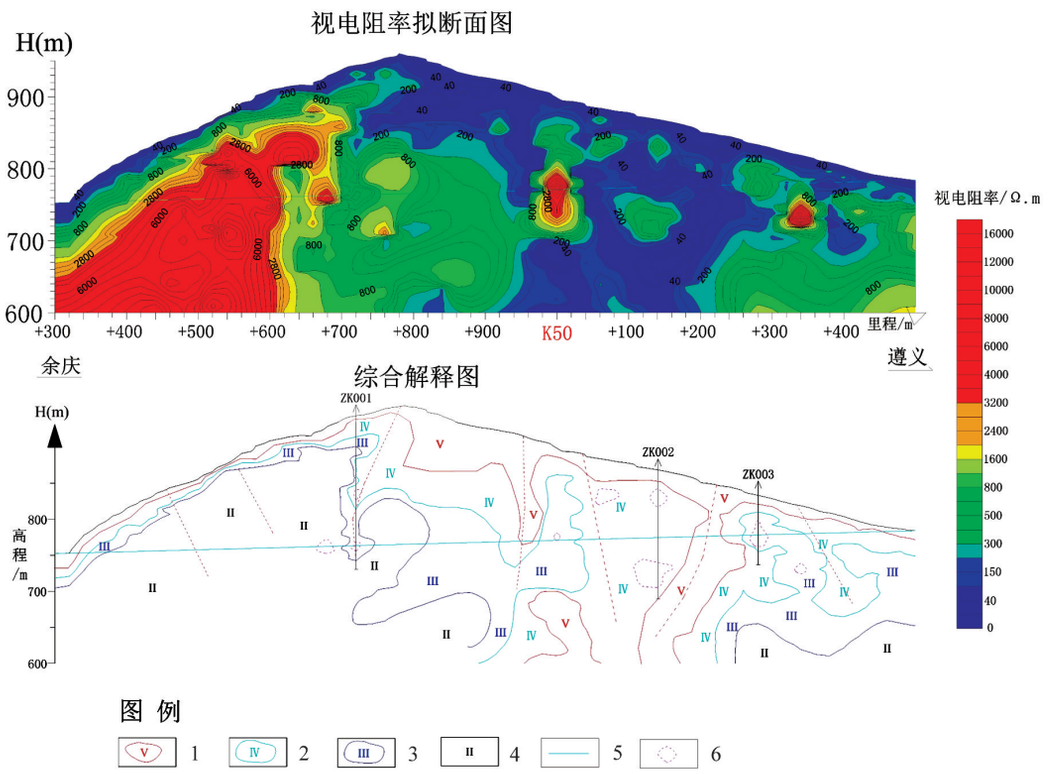


图 2　余遵高速平定安隧道音频大地电磁测深综合成果图

Table 2　The AMT sounding comprehensive results of Pingdingan tunnel of Yuzun expressway

1—极破碎、极软弱、岩溶强烈发育或富水岩体；2—较破碎岩体或岩溶发育岩体；3—隧道轴线；4—破碎、软弱、岩溶中等发育或含水岩体；5—较完整岩体；6—推测岩溶

如图 2 所示，K49+300—K49+800 段，地表出露二叠系下统茅口组灰岩，视电阻率为高值反应，岩层相对较稳定。K49+700—K49+740，从地表至深部 200 m 左右，有一倾斜状低阻带，推测为地表水下渗通道，且沿软弱带有两个相对低阻圈闭体，推测为填充型岩溶，该处施工钻孔 ZK001，揭露两个岩溶体，和物探推测大致吻合。K49+800—K50+600 段，地表出露二叠系上统长兴组和吴家坪组地层，为区内的煤系地层，岩性以灰岩、泥灰岩、泥岩、煤层为主，视电阻率为中到低值，岩层破碎、不稳定，隧道开挖面大部分区域通过低阻区域，岩性变化较大，为重点勘察区。通过视电阻率的变化，在该区划分了几处极破碎、极软弱、岩溶强烈发育的“Ⅴ”类区域，根据视电阻率的数值及形态划分出了 5 处疑似采空区的中高阻圈闭体，并布设钻孔 ZK002、ZK003 对其中的三处疑似采空区进行了验证，ZK002 经过的两处相对高阻体均为泥岩、粉砂岩地层中夹杂的灰岩岩体，ZK003 在隧道开挖面附近发现了残留煤层及采空区。

4　结论

通过余遵高速公路十余个隧道的物探施工对比，认为使用音频大地电磁法（AMT）结合钻孔地质资料，在隧道定测阶段进行线路岩溶勘察、基底稳定性探测、采空区划分等方面具有较好的实用效果。物探工作的展开使钻孔施工有迹可循、有的放矢，使勘察工作开展更具针对性和目的性，有效的节约了时间和施工成本，且取得了较好的施

工效果。

(1)音频大地电磁法(AMT)接收场源信号容易受人文干扰,隧道施工多处于山区,人文干扰较少,故有较好的外部施工环境。

(2)使用 EH-4 进行剖面测量,仪器轻便,地形地貌要求不高,可以在地形切割较大的沟谷山坡进行施工,相较其它物探方法施工便捷性较大。

(3)物探解释结合钻孔施工资料,一方面从已知推断未知,减少物探多解性影响,使物探解释更接近真实地质情况,另一方面物探解释可以指导钻孔施工,使钻孔施工更有针对性,提高工作效率。

(4)喀斯特地区岩溶发育位置、规模和地形地貌有一定的关联,负地形处多为地表泄水点,物探施工前通过水文地质资料和地形地貌特征在相应位置加密观测点,提高物探解释的精度。

(5)EH-4 测量的是岩层的相对视电阻率,数值大小受区域内岩层的综合地电性质影响,对不良地质体的判定定性为主,定量为辅。对不良地质体的判定主要以视电阻率等值线的的形态、相对大小结合钻孔资料、地层、地貌等进行综合研判。

(6)使用音频大地电磁法(AMT)在贵州山区及相似环境区域进行公路、铁路隧道前期勘察和超前预报具有成本低、效率高、施工方便等优点,具有可推广性。

[参考文献]

陈松. 陈长敬,李小彬,等 . 2017. 充电法和高密度电法在典型岩溶区勘察中的应用分析[J]. 工程地球物理学报,14(1):6-12.

卢卯,罗洪远,农观海 . 2015. 综合电法在贵州威宁县大箐脚铅锌矿勘查中的应用[J]. 贵州地质,32(4):277-284.

雷宛,周绵远 . 1990. 工程物探方法在隧道勘察中的应用[J]. 物探与化探,24(1):9-15.

汤井田,何继善 . 2005. 可控源音频大地电磁法及其应用[M]. 长沙:中南大学出版社,54-62.

汤井田,化希瑞,曹哲民,等 . 2008. Hilbert-Huang 变换与大地电磁噪声压制[J]. 地球物理学报,51(2):603-610.

万汉平,程纪星,周玉龙 . 2013. V8 多功能电法仪与 EH-4 连续电导率仪的对比[J]. 物探与化探,37(2):246-250.

杨炳南,胡祥云,周琦,等 . 2018. 华南南华纪古天然气渗漏沉积型锰矿 AMT 勘查技术方法研究[J]. 贵州地质,35(4):369-375.

严良俊,陈清礼 . 2014. 灰岩溶洞发育区浅层瞬变电磁法找水效果[J]. 工程地球物理学报,3(01):87-89.

钟幼生,韩自强,罗姣,等 . 2015. 关于可控源音频大地电磁法探测深度的探讨[J]. 物探与化探,39(4):768-774.

Application of Audio Magnetotelluric Method in Roadbed Investigation of Yuzun Expressway in Guizhou Province

LIU Yong-feng[1], YAN Wei-hua[1], YE Pei[2]

(1.104 *Geological Party*, *Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development*, *Guiyang* 558000, *Guizhou*, *China*; 2.*China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources*, *Beijing* 100083, *China*)

[**Abstract**] Yuqing to Zunyi expressway is located in the northeast of Guizhou province, the region with large terrain cut and complex geological structure. The use of conventional methods for measuring survey, it's too time consuming, high cost, long construction period and the effect is general. But combining the audio magnetotelluric method (AMT) and drilling, geophysical prospecting results and drilling lithology contrast each other, mutual verification, in point with line, can improve the work efficiency and reduce the exploration cost. The geophysical exploration results can guide the drilling construction, providing the advanced prediction for tunneling. The method has achieved good effect in the region, through summarizing the advantages and disadvantages of method, this method can be applied in similar area.

[**Key Words**] Tunnel investigation; Audio magnetotelluric method; Karst; Goaf ; Apparent resistivity