

文章编号: 1001-1749(2023)06-0757-09

直线型台阵微动技术在隧道勘察中的应用研究

傅庆凯

(福建省交通规划设计院有限公司, 福州 350004)

摘要: 微动探测技术具有高效、无损、环保、经济效益好等特点, 为克服传统微动技术的不足, 通过开发软件, 不断优化迭代解译算法、外业工作流程等措施, 开发出一套新型微动探测系统, 提高了微动技术使用范围和解译精度。该技术是基于拓展空间自相关(ESPA)和 H/V 谱比法的理论算法, 采用直线型台阵滚动重复采集方式, 得到相速度、 H/V 谱比值、峰值频率等核心参数, 经过综合分析, 能够快速、直观地获取异常体的地空间分布信息, 从而配合地质测绘与钻探查明隧道工程沿线场地工程地质条件, 为线路设计与施工提供必要的工程地质资料。这里以某隧道勘察为例, 运用直线型台阵微动技术和高密度电法等综合物探方法, 结合地质情况对该隧道异常体进行了解释推断, 划分了若干异常带和岩性接触带, 结论与钻孔、现场地质调绘相符合。理论和实践表明, 直线型台阵微动技术在隧道勘察中取得较好的效果, 可推广应用。

关键词: 直线型台阵微动技术; H/V 谱比法; 综合物探方法; 隧道工程

中图分类号: P 624 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.06.08

0 引言

近年来, 铁路、公路建设飞速发展, 其中隧道作为关键控制工程, 其勘探质量直接影响工程的施工安全, 因此加强隧道地质勘察是施工建设的重点, 具有十分重要的意义。

我国对隧道的探测目前仍以钻探方法为主, 但钻探不仅具有成本高、工期长等特点, 还会对环境有影响。随着节能减排, 低碳环保制度的深入贯彻, 绿色地质勘察代替传统地质勘察工程, 其中地球物理方法发挥的作用越来越大。常用的物探方法有: 地震波法、电磁测深法、弹性波 CT 法、高密度电法、瞬变电磁场法等^[1-7]。其中, 微动探测技术易实施、高精度、不需要人工震源等优势使其在探测地下空间

结构, 了解岩土层的基本构成等方面发挥了重要作用, 不仅能够节约高额的钻探费用, 还能明显地缩短工期, 降本增效, 绿色低碳环保, 具有重大的经济和社会效益。

我国的微动探测技术起步比较晚, 上世纪八九十年代, 王振东和冉伟彦才^[8]第一次将这种方法引进到中国; 徐佩芬等^[9]论述微动探测作为地层分层和隐伏断裂构造探测的物探新方法; 刘宏岳等^[10]介绍其在福州地铁 1 号线多个盾构区间孤石探测的成功案例, 说明微动探测方法在城市复杂的环境条件下孤石探测方面具有良好的应用效果; 李文倩等^[11]利用 H/V 谱比法计算各场点场地卓越频率, 成功回归拟合了场地卓越频率与覆盖层厚度的关系; 张若晗等^[12]对济南中心城区的土石分界面展开研究, 说明微动 H/V 谱比法在城市强干扰环境中确定土

收稿日期: 2022-10-12

第一作者: 傅庆凯(1987-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事物探地质工程勘察工作及其相关研究, E-mail: fuqingkai113@163.com。

石分界面深度提供了快速准确的解决方案。

现在微动探测技术更多是用于探测地下横波速度结构^[13-15]和预测覆盖层厚度^[16-20],但我国目前在隧道勘察领域微动探测技术的研究上整体比较落后,生产单位则更加薄弱,尤其是 H/V 谱比法方向没有什么进展。

1 直线型台阵微动技术

直线型台阵微动技术是基于 ESPAC 法和 H/V 谱比法的方法理论,通过直线型台阵滚动重复采集方式,获取频散曲线和 H/V 曲线等剖面数据,进行联合解译,获得地下地质结构。

1.1 拓展空间自相关法的基本原理

拓展空间自相关法(ESPAC: Extended spatial autocorrelation)的原理与传统的空间自相关法(SPAC)基本一样,它是基于阵列设备采集地面微动信号,通过数学计算及相关的数字处理技术提取其垂直分量中面波信号(主要为瑞雷波)的相速度频散曲线,进而推断其地质结构的一种地球物理探测方法。

根据 Aki 的理论假设,推导出空间自相关系数可以用零阶贝塞尔函数表示,即:

$$\rho(r, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\text{Re}[S_{12}(r, \theta, \omega)]}{\sqrt{S_{11}(0, \omega) S_{22}(r, \omega)}} d\theta = J_0\left(\frac{\omega}{c(\omega/2\pi)} r\right) \quad (1)$$

式中: ρ 为自相关系数; r 为两个检波器的距离; ω 为角速度; $\omega = 2\pi f$; S_{12} 为两个检波器的互功率谱; S_{11} 与 S_{22} 分别为两个检波器的自功率谱; c 为瑞雷波相速度; J_0 为第一类零阶贝塞尔函数。

1.2 H/V 谱比法的基本原理

如果场地为坚硬平坦(或基岩)的理想场地,理论上可以认为该场地并不会在某一频段或某一方向上放大地震反应,即每一个频段,每一个方向上的振动应该是大致相同的。但对于存在覆盖层的一般场地而言存在波阻抗界面,界面水平方向地震动存在放大效应,竖向地震动并没有显著放大,那么通过水平和竖向地震动的功率谱之比,则可以实现场地地层地划分。

微动数据的 H/V 谱为水平方向的功率谱与垂直方向的功率谱之比,即:

$$\frac{H}{V}(\omega) = \frac{P_{NS}(\omega) + P_{EW}(\omega)}{P_{UD}(\omega)} \quad (2)$$

式中: $P_{NS}(\omega)$ 和 $P_{EW}(\omega)$ 分别是水平方向两个分量的功率谱; $P_{UD}(\omega)$ 代表垂直方向的功率谱。

典型的 H/V 谱比法曲线具有一个明显的峰值频率 F_0 ,大量研究表明, H/V 谱比法曲线的峰值频率与土石分界面深度 H 之间存在一定的函数关系,从统计学角度分析,根据大量的调研以及工程实例,可以认为,当样本越多,越靠近真实情况,可拟合出二者的函数关系。据此,可根据 H/V 谱比法曲线峰值频率估算土石分界面深度^[11]。

H/V 峰值频率与松散沉积层的共振频率相吻合,这和很多应用结果相符。 H/V 曲线中的频率峰值 F_0 与松散覆盖层的平均剪切波速度和覆盖层厚度相关。通过 H/V 谱比法获得频率峰值 F_0 以及 V_s , 可以用公式(3)获得覆盖层厚度。

$$Dov = \frac{V_s}{4F_0} \quad (3)$$

式中: Dov 为松散覆盖层厚度; V_s 为覆盖层加权平均剪切波速度(m/s)。

2 野外工作方法及数据处理

ESPAC 法精度虽然略微逊色于 SPAC 法,但它克服了 SPAC 法台阵布设受限的缺点。因此,我们采用基于 ESPAC 方法理论的直线型台阵滚动重复采集方式,不仅台阵布设方式简单,外业效率明显提高,横向分辨率也大大提高,而且更符合公路线路勘察的需求。与传统的 SPAC 法不同的是:需要将直线型台阵按一定规则,抽道、组合成若干个小排列,同时保证每个小排列均是相同时间序列。

假设单个排列的检波器数量为 n ,滚动检波器数为 m ,抽道、组合得到小排列数为 m ,每个小排列检波器数量为 $k(k = n - m + 1)$,再将每个小排列单独采用 ESPAC 方法进行数据处理,获得小排列中心点的频散曲线,最后将每个小排列获得的 m 条频散曲线按坐标组合成剖面,而传统的 SPAC 法仅能获得单点频散曲线。因此,通过直线型台阵滚动重复采集方式,创新的由剖面代替单点,横向分辨率显著提高,同时类似高密度电法一样,排列越长,检波器越多,解译深度大大提高。具体工作装置布置图见图 1,以单个排列有 12 个检波器,每次滚动 5 个检波器为例。数据处理流程见图 2。

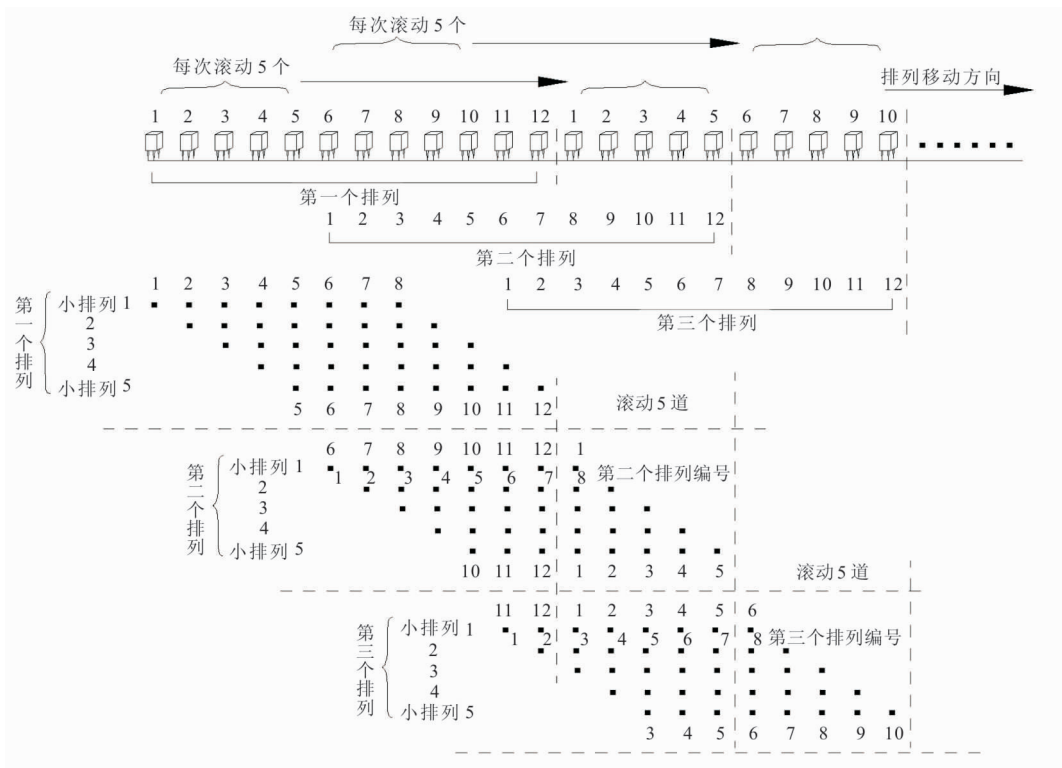


图 1 工作装置布置图

Fig. 1 Work device layout

3 工程概况

笔者以德化县某项目隧道勘察为例,论述直线型台阵微动技术在隧道勘察中的应用研究。该隧道位于泉州市德化县城郊,隧道长为 1.85 km,属于长隧道,地貌上总体属于低山丘陵地貌区,海拔高度一般 500 m~800 m 不等,坡地天然坡度一般在 20°~45°,山坡植被发育。低山丘陵地貌中多夹有河流阶地、山间谷地及小盆地等,沿线高差变化较大,地形较复杂。山间谷地地形呈阶梯状分布,现状多水田、村庄分布。

德化县属中亚热带季风气候区,场区上广泛覆有第四系全新统人工填土、冲洪积层、残坡积层,沿线基岩主要为燕山早期侵入的花岗岩(γ_3^2)、侏罗系南园组的凝灰熔岩(J_{3n})。

从物性特征来看,测区覆盖层与下伏中风化基岩的瑞雷波相速度差异较明显,且存在明显的波阻抗界面。因此,本场地具备开展微动测试的物理前提。通过 H/V 谱比法,则可以实现场地地层的

划分。

4 物探工作布置及异常成果解释

4.1 物探工作布置

本次任务主要是运用综合物探与钻孔验证相结合,查明隧道沿线可能存在的不良地质情况。在选择物探方法时,因隧道沿线分布三条高压线,且隧道最大埋深约 180 m,不宜采用电磁类的物探方法,所以采用抗干扰的直线型台阵微动技术,同时在部分浅埋段采用高密度电法,相互验证,共布置三条物探测线(L1~L3),具体地形、物探布置平面如图 3 所示,各测线采用的物探方法、测点范围、长度、工作参数情况见表 1。

4.2 异常成果解释

4.2.1 直线型台阵微动技术物探成果

纵观 L1 ~ L3 测线直线型台阵微动技术物探成果剖面,发现测线间相速度分布情况基本一致,说明数据的可靠性。

1) 节理裂隙密集带。相速度分布整体呈现上低

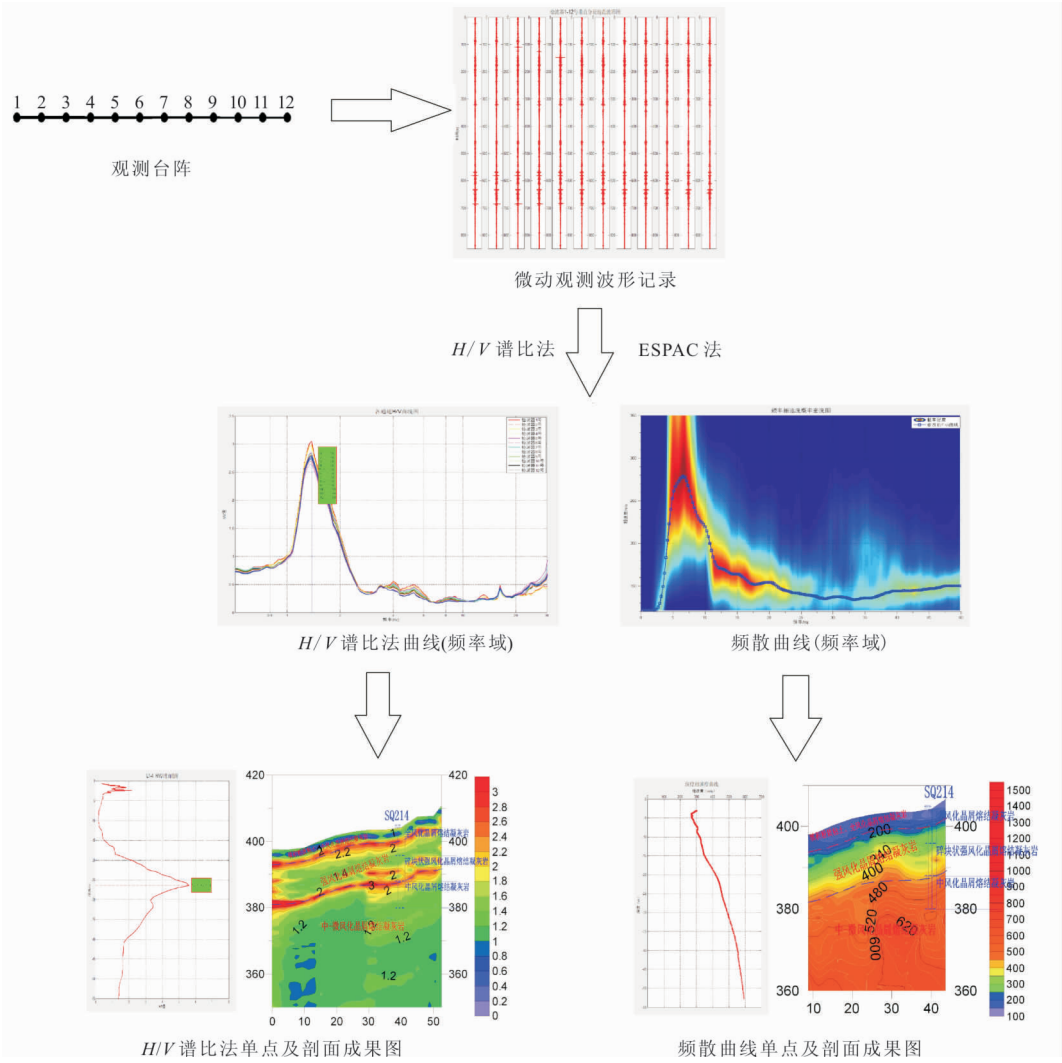


图 2 工作流程图

Fig.2 System work flow chart

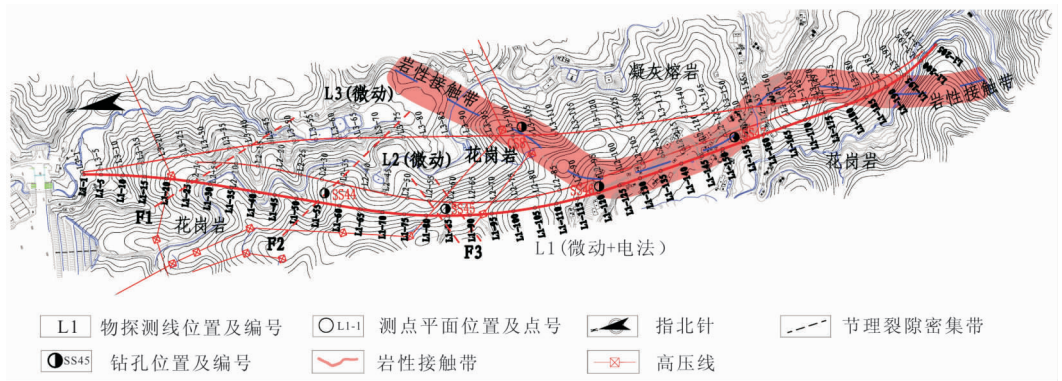


图 3 物探测线平面图

Fig.3 Geophysical line work layout

表 1 物探工作量表

Tab. 1 Geophysical design work scale

构筑物名称	测线编号	物探方法	测点范围	长度/m	道间距/电极距/m
隧道	L1	直线型台阵微动技术	L1-1~L1-122	1210	10
		高密度电法	L1-55~L1-205	1490	10
	L2	直线型台阵微动技术	L2-1~L2-149	1480	10
	L3	直线型台阵微动技术	L3-1~L3-197	1960	10

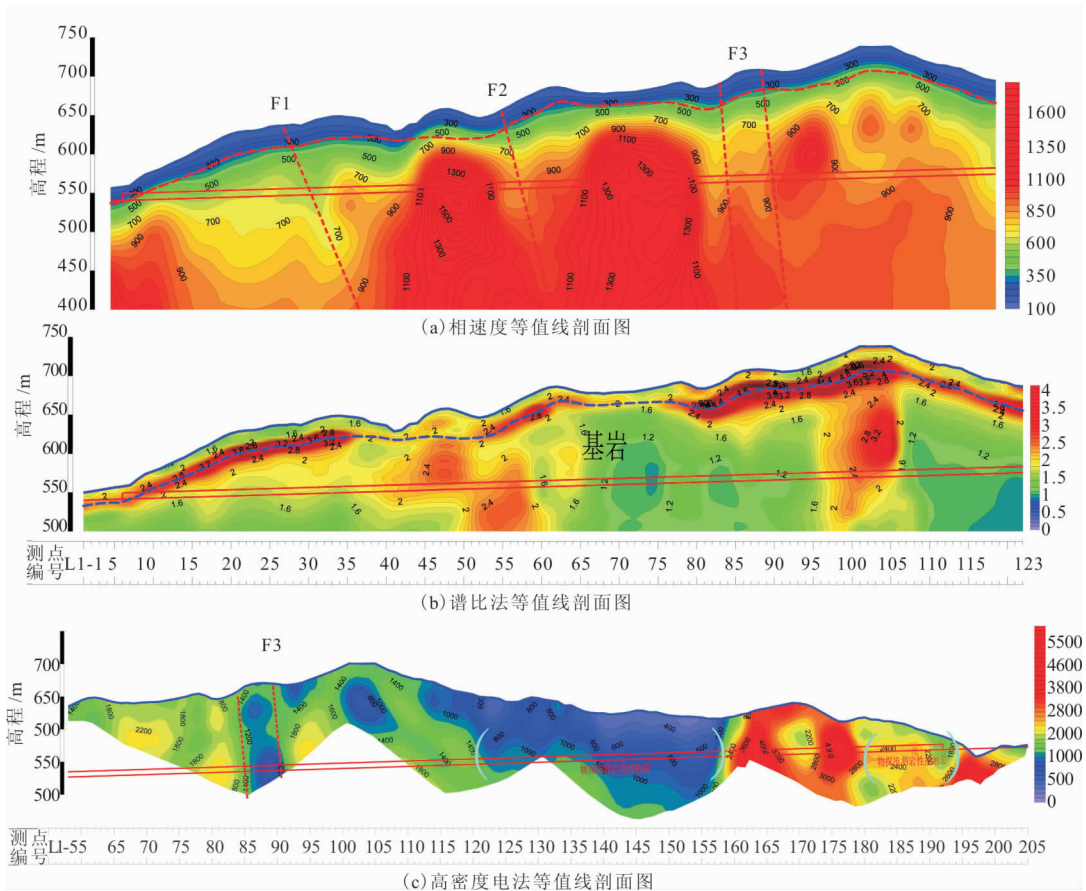


图 4 L1 测线物探成果剖面

Fig. 4 Geophysical prospecting result profile for L1 survey line

下高的趋势,依据相速度大小、等值线下凹等情况,结合地形、地质调绘和测线间的相对位置,物探推测了三条节理裂隙密集带 F1~F3,具体异常空间展布和物探成果见图 3~图 6。

2) 岩性接触带。L2 测线物探成果剖面中 L2-93~L2-133 段(400 m)、L3 测线物探成果剖面中 L3-93~L3-111 段(180 m)和 L3-152~L3-187 段(350 m)相速度整体明显偏低,异常范围较大,而区域地质显示在该异常附近存在花岗岩与凝灰熔岩的岩性接触带,结合 L1 测线高密度电法成果,综合分析,物探推测存在条带状岩性接触带,在

岩性接触带附近岩石较破碎、富水,导致该处物探成果呈现低速、低阻的异常形态,具体异常空间展布和物探成果见图 3~图 6。

3) 土石界面。对于隧道土石界面的划分,主要是通过 H/V 谱比法来推断,以微动谱比法峰值频率与土石界面的关系以及峰值非连续的断点异常为依据,一般认为谱比法值频率通过深度转换后,对应的深度即土石界面的深度。因此,采用连续追踪谱比法最大值的方式(类似地震法追踪同相轴),均存在一条比值大于 2 的连续层位,在图 4(b)、图 5(b)、

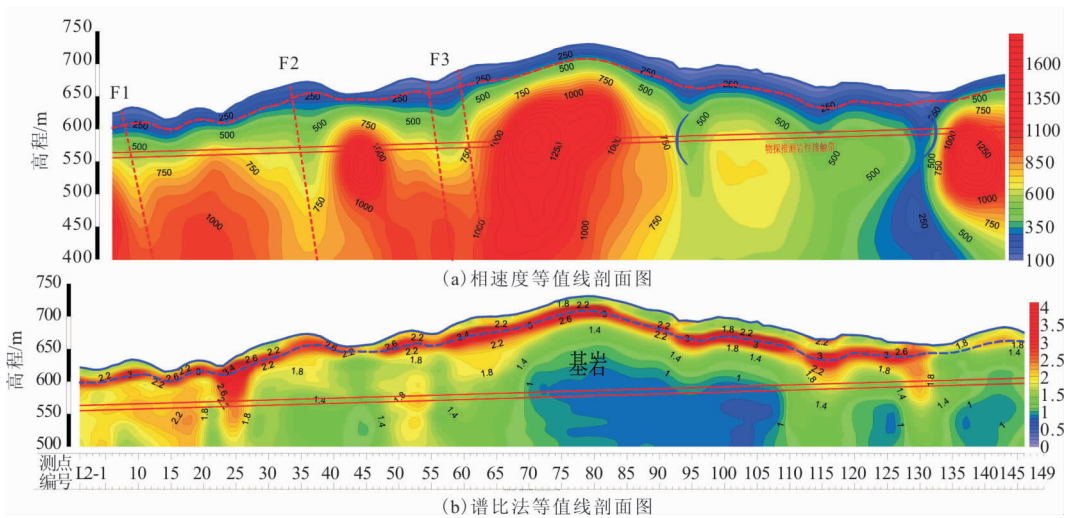


图 5 L2 测线物探成果剖面

Fig. 5 Geophysical prospecting result profile for L2 survey line

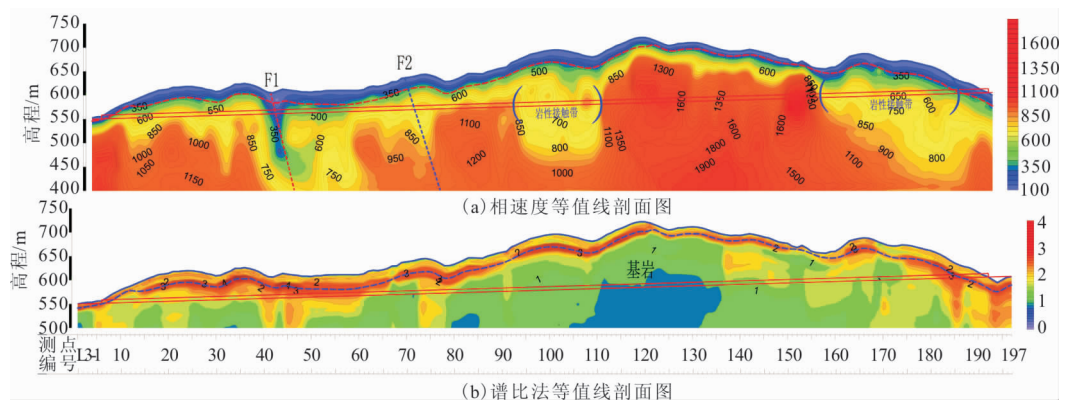


图 6 L3 测线物探成果剖面

Fig. 6 Geophysical prospecting result profile for L3 survey line

图 6(b) 谱比法等值线剖面图中用连续虚线表示, 即土石界面, 埋深约 5 m~30 m, 具体地层划分见图 4~图 6。

4.2.2 高密度电法物探成果

高密度电法勘探深度虽然有限, 但在浅层分辨率高, 能够准确快速地探测一定深度范围内的节理裂隙密集带、岩性接触带等不良地质体。L1 测线高密度电法物探成果剖面中 L1-84~L1-96 段 (80 m) 视电阻率呈现近垂直条带状低阻异常, 结合其他物探测线异常, 推测为 F3 节理裂隙密集带; L1-120~L1-158 段 (380 m)、L1-180~L1-194 段 (140 m) 视电阻率相对两侧偏低, 异常范围较大, 结合其他物探测线成果, 物探推测存在条带状岩性接触带; L1-103 和 L1-170 处附近存在两个相对低阻的圈闭异常体, 由于均处于山顶正下方, 物探推

测为地形引起的假异常, 具体异常空间展布和物探成果见图 3~图 4(c)。

4.3 钻孔对照与分析

根据物探解译成果以及现场地质调绘、区域地质等资料, 在隧道沿线共布置五个钻孔 (CS8、SS44~47) 进行验证, 部分钻孔岩芯照片见图 7。

根据 SS44 钻孔揭示, 该钻孔 45 m~60 m 段岩芯破碎, 发育有节理密集带, 与物探推测的 F2 节理裂隙密集带位置和埋深相符, 见图 7(a)。

根据 SS45 钻孔揭示, 岩芯整体较破碎, 与物探推测的 F3 节理裂隙密集带范围相符 (图 7(b))。

根据 CS8、SS46、47 钻孔揭示, 岩芯局部较破碎, 花岗岩与凝灰熔岩呈交互状发育, 存在明显的岩性接触带, 与物探推测的条带状岩性接触带范围相符 (图 7(c)~图 7(h))。以上钻孔揭露的异常情况与物探推测的结果基本一致, 充分说明了直线型台



图7 钻孔岩芯照片(部分)
Fig. 7 Borehole core photos(part)

阵微动技术的有效性。

由于钻孔位置与物探测线存在一定的距离(10 m~30 m),无法直接验证 H/V 谱比法推测的基岩面埋深的准确性,但根据以往经验以及钻孔揭示,基岩面起伏与物探推测的成果基本一致。

5 结论及建议

笔者以德化县某项目隧道勘察为例,介绍了直线型台阵微动技术的原理、野外工作方法及数据处理流程,同时论述其良好的应用效果。具体结论及

建议如下:

1) 通过多条平行测线以及综合物探方法,得到的物探成果具有高度相似性,说明方法和数据是可靠、有效的。

2) 物探成果表明节理裂隙密集带和岩性接触带由于破碎、富水,导致与围岩的相速度、电阻率有明显差异,在成果剖面图(图4~图6)中表现为低速、低阻异常区,经钻孔、地质调查验证,不良地质体展布情况与物探解译成果一致。

3) 对于隧道土石界面的划分,主要是通过 H/V 谱比法来推断,结果与钻孔、地质调查基本一致,

能够基本满足勘探精度要求。

4) 通过算法的优化、对地形突变地把控, 直线型台阵微动技术基本能够克服高压线、地形等影响, 探测深度与排列长度成正比。

5) 直线型台阵滚动重复采集方式符合线路勘察的特点, 仅需通过采集排列数据, 就能获取该排列下方的频散曲线和 H/V 曲线等多个核心参数剖面数据, 进行联合解译, 获得地下地质结构和土石界面成果。

因此, 直线型台阵微动技术具有较高的勘察效率和较低的勘探成本, 结合工程实例, 说明其在隧道勘察中能够取得较好的地质效果, 可推广应用。

参考文献:

- [1] 李建国, 蔡林根, 吕秀杰. 综合物探在孟良山隧道勘察中的应用[J]. 勘察科学技术, 2006(4): 57-60.
LI J G, CAI L G, LV X J. Application of comprehensive geophysical prospecting in Mengliangshan Tunnel investigation[J]. Reconnaissance Science and Technology, 2006(4): 57-60. (In Chinese)
- [2] 许广春, 习铁宏, 段洪芳. 可控源音频大地电磁法 CSAMT 在隧道勘察中的应用[J]. 工程勘察, 2008(6): 234-247.
XU G C, XI T H, DUAN H F. Application of CSAMT in tunnel investigation[J]. Engineering Investigation, 2008(6): 234-247. (In Chinese)
- [3] 孙英勋. EH4 与地震反射法在高速公路长大深埋隧道勘察中的联合应用研究[J]. 公路交通技, 2005, 22(6): 144-146.
SUN Y X. Study on the joint application of EH4 and seismic reflection method in long and deep buried tunnel survey of Expressway [J]. Road transportation technology, 2005, 22(6): 144-146. (In Chinese)
- [4] 王焯. 大长隧道的电磁测深法应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005.
WANG Y. Study on the application of electromagnetic sounding in long tunnels[D]. Changsha: Central South University, 2005. (In Chinese)
- [5] 孙英勋. CSAMT 法在水麻高速公路箭竹塘深埋隧道地质勘察中的应用[J]. 现代隧道术, 2006, 43(1): 32-37.
SUN Y X. Application of CSAMT method in geological investigation of Jianzhutang deep-buried tunnel of shui-ma Expressway[J]. Modern Tunneling, 2006, 43(1): 32-37. (In Chinese)
- [6] 赵虎. 物探技术在川内高速公路深埋隧道勘察中的应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.
ZHAO H. The application of geophysical prospecting technology in the exploration of deep-buried tunnel of sichuan-inner Expressway[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008. (In Chinese)
- [7] 赵虎, 王玲辉, 李瑞. 综合电法在深埋隧道勘查中的应用研究[J]. 勘察科学技术, 2008, 152(2): 61-563.
ZHAO H, WANG L H, LI R. Study on application of integrated electrical method in deep-buried tunnel exploration[J]. Reconnaissance Science and Technology, 2008, 152(2): 61-563. (In Chinese)
- [8] 冉伟彦, 王振东. 长波微动法及其新进展[J]. 物探与化探, 1994, 18(1): 28-34.
RAN W Y, WANG Z D. Long wave fretting method and its new development[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1994, 18(1): 28-34. (In Chinese)
- [9] 徐佩芬, 李世豪, 杜建国, 等. 微动探测: 地层分层和隐伏断裂构造探测的新方法[J]. 岩石学报, 2013, 29(5): 1841-1845.
XU P F, LI S H, DU J G, et al. Fretting detection: a new method for stratigraphic stratification and detection of concealed fault structures[J]. Journal of Petrology, 2013, 29(5): 1841-1845. (In Chinese)
- [10] 刘宏岳, 黄佳坤, 孙智勇, 等. 微动探测方法在城市地铁盾构施工孤石探测中的应用——以福州地铁 1 号线为例[J]. 隧道建设, 2016, 36(12): 1500-1506.
LIU H Y, HUANG J K, SUN Z Y, et al. Application of micro-motion detection method in the detection of isolated rock in shield tunnel construction of urban subway —— taking the Line 1, Fuzhou Metro as an example[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(12): 1500-1506. (In Chinese)
- [11] 李文倩, 何金刚, 朱皓清. 基于 H/V 谱比法的场地卓越频率研究[J]. 内陆地震, 2019, 33(4): 314-320.
LI W Q, HE J G, ZHU H Q. Study on site predominant frequency based on H/V spectral ratio method [J]. Inland Earthquake, 2019, 33(4): 314-320. (In Chinese)
- [12] 张若晗, 徐佩芬, 凌甦群, 等. 基于微动 H/V 谱比法的土石界面探测研究——以济南中心城区为例[J]. 地球物理报, 2020, 63(1): 339-350.
ZHANG R H, XU P F, LING S Q, et al. Study on soil-rock interface detection based on fretting H/V spectral ratio method: a case study of Jinan central urban area[J]. Geophysical Journal, 2020, 63(1): 339-350. (In Chinese)
- [13] 王伟君, 陈棋福, 奇诚, 等. 利用噪声 HVSR 方法探测近地表结构的可能性和局限性: 以保定地区为例[J]. 地球物理学报, 2011, 54(7): 1783-1797.

- WANG W J, CHEN Q F, QI C, et al. The possibility and limitations of using noise HVSR to detect near-surface structures; a case study of the Baoding region [J]. *Geophysics*, 2011, 54(7): 1783—1797. (In Chinese)
- [14] 徐佩芬, 李世豪, 杜建国, 等. 微动探测: 地层分层和隐伏断裂构造探测的新方法[J]. *岩石学报*, 2013, 29(5): 1841—1845.
- XU P F, LI S H, DU J G, et al. Fretting Detection: a new method for stratigraphic stratification and detection of concealed fault structures[J]. *Journal of Petrology*, 29(5)2013: 1841—1845. (In Chinese)
- [15] 刘庆华, 鲁来玉, 何正勤, 等. 地脉动空间自相关方法反演浅层 S 波速度结构[J]. *地震学报*, 2016(1): 86—95.
- LIU Q H, LU L Y, HE Z Q, et al. Inversion of velocity structure of shallow s-wave by spatial autocorrelation method of ground pulsation[J]. *Journal of Seismology*, 2016(1): 86—95. (In Chinese)
- [16] SEHT I V, WOHLBERG J. Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1999, 89(1): 250—259.
- [17] DELGADO J, CASADO C L, ESTEVEZ A, et al. Mapping soft soils in the Segura river valley (SE Spain): a case study of microtremors as an exploration tool[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2000, 45(1): 19—32.
- [18] GOSAR A, LENART A. Mapping the thickness of sediments in the Ljubljana Moor basin(Slovenia) using microtremors[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2010, 8(3): 501—518.
- [19] 张伟, 甘伏平, 梁东辉, 等. 利用微动法快速探测岩溶塌陷区覆盖层厚度研究[J]. *人民长江*, 2016, 47(24): 51—54.
- ZHANG W, GAN F P, LIANG D H, et al. Study on rapid detection of overburden thickness in karst collapse area by micro-motion method[J]. *People's Yangtze River*, 2016, 47(24): 51—54. (In Chinese)
- [20] LIANG D, GAN F, ZHANG W, et al. The application of HVSR method in detecting sediment thickness in karst collapse area of Pearl River Delta, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(6): 25.

Research and application of engineering geological microtremor survey technology in tunnel investigation

FU Qingkai

(Fujian Communications Planning and Design Institute Co., Ltd, Fuzhou 350004, China)

Abstract: Microtremor survey technology has the characteristics of high efficiency, non-destructive, environmental protection, and good economic benefits. In order to overcome the shortcomings of traditional microtremor technology, a new engineering geological microtremor survey system has been developed by developing software, continuously optimizing iterative interpretation algorithm, field workflow, and other measures, so as to improve the application range and interpretation accuracy of microtremor technology. This technology is based on the extended spatial autocorrelation (ESPAC) theoretical algorithm and the H/V spectral ratio method. It uses a linear array to obtain core parameters such as phase velocity, H/V spectral ratio, peak frequency, etc. Through comprehensive analysis, it can quickly and intuitively obtain the geospatial distribution information of abnormal bodies, cooperate with geological mapping and drilling to find out the engineering geological conditions of sites along the tunnel project, and provide necessary engineering geological data for line design and construction. Taking a tunnel survey as an example, this paper interprets and infers the abnormal body of the tunnel by using the microtremor survey technology by linear array, high-density electrical method, and other comprehensive geophysical methods, combined with the geological conditions, and divides several abnormal zones and lithologic contact zones. The conclusion is consistent with the drilling and field geological mapping. Theory and practice show that the engineering geological microtremor survey technology has achieved good results in tunnel investigation and can be popularized and applied.

Keywords: microtremor survey technology by linear array; H/V spectral ratio method; integrated geophysical method; tunnel project