

TST 超前地质预报技术在贵州岩溶地区的应用实例

张卿 罗宗帆

中铁二十局沪昆客专

摘要 隧道地质超前预报技术是保障隧道施工安全的有效技术，我国在铁路、公路隧道与引水隧洞施工中普遍应用。基于地震反射理论的超前预报技术对于断层、岩性界面等延伸较大的地质体，预报难度相对较小；对于岩溶等孤立、不规则地质体的预报难度大。为寻找岩溶地区有效的超前预报技术方案，本文总结岩溶区的地震波场特征：1、岩溶形态复杂，展布不规则，难于形成有效的反射波；2、地震波主要以散射形式传播，且能量弱。结合岩溶区的地震波场特征，笔者尝试使用基于散射、反射混合模型的 TST 隧道超前预报技术进行地质超前预报。经过后期开挖验证，证实 TST 超前地质预报技术能够在岩溶地区进行准确的预报。TST 超前预报技术在沪昆高铁贵州岩溶地区的应用中取得了良好的效果。

关键词：岩溶；隧道地质超前预报；TST；速度扫描；方向滤波；偏移成像；

The application of TST system in exploration of Karst areas

Zhang Qing, Luo Zongfan

Hukun Passenger Special Line, China Railway 20th Bureau

Abstract Tunnel geological prediction technology is effective in the protection of tunnel construction, widely used in construction of China's railways tunnels, highways tunnels and diversion tunnels. Using Tunnel geological prediction technology based on seismic reflection theory, it's easy to find faults and the other wide extended Geological body, but hard to find isolated irregular geological body such as karsts. in order to find effective prediction technology fit for karsts area, this article summarizes the seismic wave characteristics of seismic wave at karsts area:1, karsts with complex irregular morphology is difficult to the format an effective reflection wave;2, seismic waves mainly spread in the form of scattering with weak energy. Taking into account the seismic wave field characteristics at the karsts area, I try using the TST tunnel geological prediction technology that is based on the mixed model of scattering, reflection to forecast. By the post-excavation verification, we confirm that TST tunnel geological prediction technology can accurately forecast in karsts areas. TST tunnel geological

prediction technology has achieved good results in the application of Hukun high-speed rail in Guizhou karsts region.

Key words: Karsts; Tunnel geological prediction; TST; Velocity scan; Directional filter; Migration

一、引言

新建沪昆铁路是我国交通网中“五纵五横”运输大通道的重要组成部分，是长三角、珠三角等沿海经济发达地区向西南内陆地区进行经济辐射的主要轴线，在区域综合交通运输体系中作用巨大。沪昆线西段主要位于云贵高原及其边缘过渡地带，区域范围内地质构造复杂，构造线密集，断层发育，有岩溶、煤层瓦斯和采空区、液化砂石、软质岩风化剥落等不良地质条件。

在隧道施工过程中超前地质预报技术对于查清隧道不利地质条件、预报掌子面前方的地质构造和含水性、保障施工安全具有重要作用，已成为隧道施工必要的技术环节^{[1][2]}。基于地震反射理论的隧道超前地质预报技术预报长度大，工作效率高，得到了较广泛的应用，但也存在一定的技术缺陷。对于大型断裂带和岩性分界面等地质对象，因其物性差异大故反射信号强，使用基于反射理论的地质超前预报技术开展工作，难度相对较小。对于岩溶、围岩裂隙等小型地质构造的预报基于反射理论的地质超前预报技术则难以发挥作用，误报率高^{[3][4]}。在我国西南的岩溶区，大部分岩溶是以构造裂隙岩溶为主，沿断裂与构造裂隙发育。由于溶蚀、崩塌、冲蚀作用，岩溶形态复杂，多有部分填充。管道岩溶也较发育，其埋深大，形成地下暗河。这些岩溶形态复杂，体积小，表面极不规则，展布规模小于地震波长，对地震波难于形成有效的反射，地震波主要以散射形式传播。针对岩溶区地震场波的特征，利用散射波进行地质超前预报势在必行。散射波的传播规律、波场特征与反射波不同，不能应用地震反射资料处理技术处理，需要应用针对散射波的专有的处理技术^[5]。TST地质超前预报系统就是基于散射地震成像技术的地质超前预报系统^{[6][7]}。本文利用基于散射理论的TST超前预报系统并综合地质雷达等其他预报方法成功解决了岩溶地区地质超前预报的难题。

二、TST 隧道地质超前预报技术

2.1 散射扫描成像技术

超前预报时在隧道围岩中使用人工源激发地震波，地震波向四面八方传播，遇到岩性变化界面、地质构造、岩溶、地表面等波阻抗变化界面时发生反射、散射与折射。当地质界面尺度远大于地震波波长时，地震波传播遵从层状介质中的反射理论，反射波能量大，并沿着反射角等于入射角的方向传播。

当地质界面的尺度小于地震波长时，地震回波的传播遵从散射理论，散射波不再具有单一的方向，而是以散射点为中心向四面八方传播。与反射波相比，散射波的能量较弱，频率偏高。在实际地质条件下，既有像岩性界面、断层、地表面等这样的大尺度的反射界面，也有像岩溶、采空区、孤石等这样的小尺度离散地质体（图 1）。

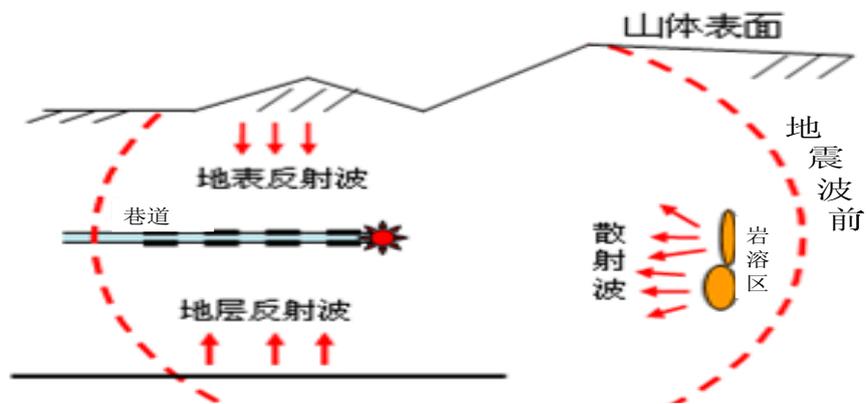


图 1 隧道地质超前预报观测模型 (Tunnel geological prediction model)

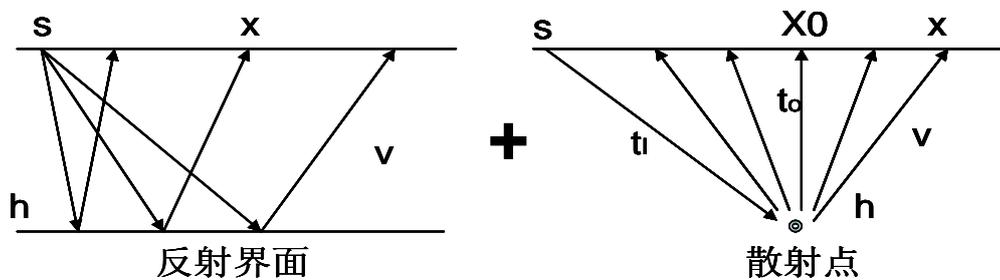


图 2 反射与散射混合理论模型 (Mixed model of scattering and reflection)

采用反射与散射的混合模型（图 2），根据反射波以及散射波的传播规律，分别将散射波和反射波进行偏移归位，得到隧道掌子面前方的真实地质情况，这就是 TST 散射扫描技术的基本思想。关于 TST 地质超前预报系统数据处理的具体技术措施，如方向滤波、围岩速度分析、扫描成像等以及在数据采集时的观测系统要求赵永贵、蒋辉等已经多次论述，此处不再介绍^[6]。

2.2 TST 数据处理结果的解释原理

TST 的波速图像与偏移图像的地质解释遵从如下原理：波速的分布可用于掌子面前方岩体的力学性状的推断，岩体波速高表示岩体结构完整致密，弹性模量高；波速低代表岩体破碎，裂隙含水；构造偏移图像表示地质结构的组合图像和地层性质的变化。构造偏移图像中反射条纹密集的地段，结构复杂、构造发育，在波速图像中对应位置为低波速带；构造条纹少的地段，围岩均匀致密，波速图像中对应高波速带。对岩体含水性的预报要结合水文地质资料，如果隧道标高在地下水位之下，则可判断断裂带和破碎岩体富含地下水，如果隧道标高在地下水位之上，则断裂带和破碎岩体仅可能含少量水或季节性含水。偏移图用色彩分明的蓝红分别表示软硬岩体界面，红色线条代表正的波速异常，表示波速由低变高、岩体由软变硬的界面；蓝色线条代表负的波速异常，表示波速由高变低、岩体由硬变软的界面；先蓝后红线条的组合代表存在一个断裂带。红蓝条纹密集出现区域代表地质现象中的断裂带或溶洞。断裂的展布范围大，体现在偏移图像上是较大范围的红蓝条纹延伸；溶洞的反射面不规则，在偏移图像上显示为红蓝条纹的延伸长度短。

三、应用实例

3.1 斗磨隧道进口平导

斗磨隧道位于贵州省关岭自治县境内，地处云贵高原构造剥蚀中低山区，区内地形波状起伏，隧址区内最高点位于隧道轴线南侧的山顶，海拔高程 2454.3m；最低点位于隧道出口南侧的河谷中，海拔高程 1142m，相对高差 1312.4m。隧道穿越区域以碳酸盐、含煤地层分布为主要特征，具有剥蚀~溶蚀槽谷地貌特点。地表分布有大多裸露，溶槽、溶蚀地貌景观。

隧址区基岩大多裸露，隧道进出口及缓坡地带分布有少量覆土，隧道区地表水以山间沟水为主，水量较小，雨季时沟内水量明显增加。地下水类型主要为第四系松散土层空隙水、基岩裂隙水、岩溶水。不良地质现象主要为岩溶及岩溶水、煤层瓦斯及采空区、危岩落石等，特殊岩土为石膏，斗磨隧道因高含量的瓦斯层，被列为沪昆全线的一级风险隧道，是铁道部重点工程。本次预报斗磨隧道进口平导 D1K841+495 掌子面前方 150m 的地质情况。

3.1.1 TST 数据处理结果及地质解释

通过 TST 数据处理中地震数据导入、坏道剔除、带通滤波、干扰信号消除、观测坐标编辑、二维方向滤波等步骤，经全局扫描和分段扫描，得到预报地段围岩的速度分布，见图 3 所示。

斗磨进口平导D1K841+495

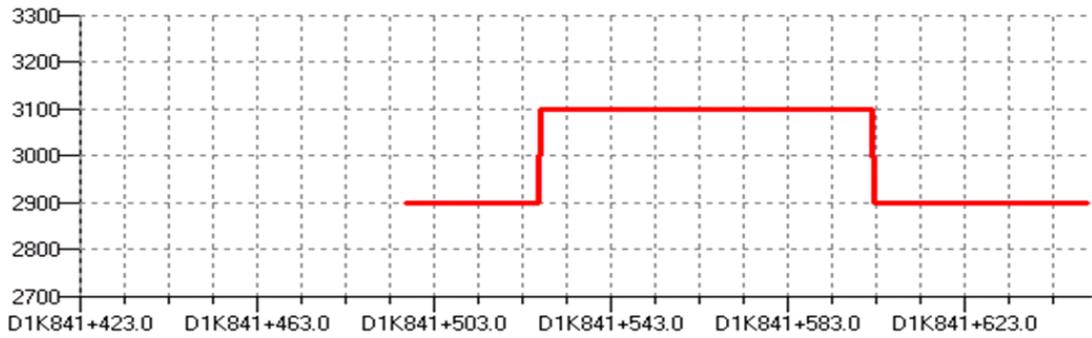
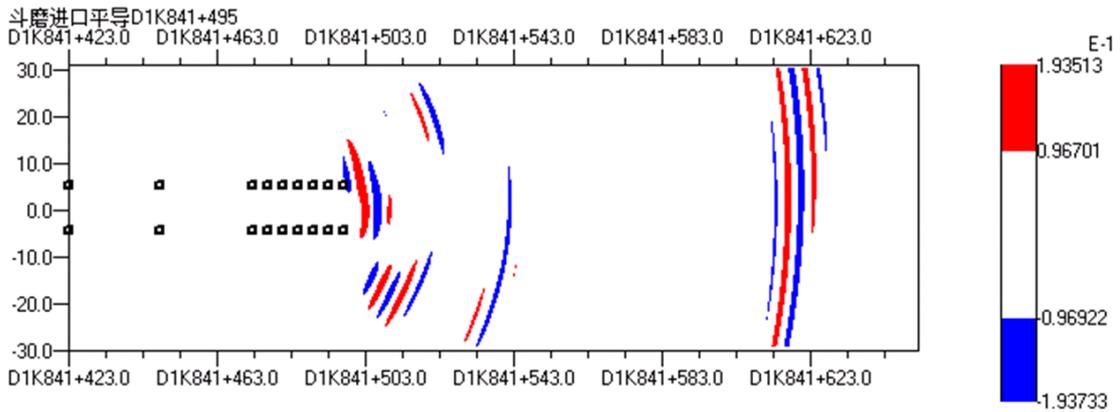


图 3 斗磨隧道进口平导速度曲线 (Velocity curve of the entrance of Doumo Tunnel)

使用前方回波地震数据和分析得到的速度分布，进行深度偏移成像，得到如图 4 所示的 TST 构造深度偏移成像，它反映了掌子面前方的地质构造特征。



注：图中黑色小框为检波器孔和爆破孔布置点 (Black box is receiver and shot points)

图 4 斗磨隧道进口平导地质构造偏移成像 (Migration image of the entrance of Doumo Tunnel)

利用图 3、图 4 并结合地质资料分析得出斗磨隧道进口平导 D1K841+495 掌子面前方 150m 内地质情况，可划分为 3 段（如表 1）：在 D1K841+495~D1K841+526 段附近围岩稳定性和完整性较差，裂隙较发育，岩体较破碎，分析存在溶洞或破碎带；在 D1K841+526~D1K841+603 段围岩稳定性和完整性较好，裂隙稍发育；在 D1K841+603~D1K841+645 段附近围岩稳定性和完整性较差，裂隙较发育，岩体较破碎，分析存在断层或软弱夹层。

表 1 斗磨隧道进口平导 TST 地质超前预报结果 (The prediction result of the entrance of Doumo Tunnel)

里程	长度 (m)	波速(VP) km/s	探测结果推断

D1K841+495~ D1K841+526	31	2.9	该段围岩在构造偏移图上呈现红蓝组合，围岩稳定性和完整性较差，裂隙较发育，岩体较破碎，分析存在溶洞或破碎带。围岩为IV级。
D1K841+526~ D1K841+603	77	3.1	围岩稳定性和完整性较好，裂隙稍发育。围岩为III级。
D1K841+603~ D1K841+645	42	2.9	该段围岩在构造偏移图上呈现红蓝组合，围岩稳定性和完整性较差，裂隙较发育，岩体较破碎，分析存在断层或软弱夹层。围岩为IV级。

根据以上预报结果，建议在施工的过程中，对围岩稳定性和完整性较差~差的地段，应加强支护。建议在 D1K841+495~D1K841+526、D1K841+603~D1K841+645 段采用地质雷达、红外探水仪或加深炮眼方法对掌子面前方地质灾害体分布和地下水情况进行探测。有必要时，采用多功能钻机进行超前钻探。

3.1.2 超前水平钻探测结果与 TST 结果对比验证

根据超前地质预报结果，施工方在掌子面进行了超前水平钻探测，探测结果为：里程 D1K841+506~D1K841+517，此处存在较大溶洞，且有粘土、淤泥等填充物；里程 D1K841+517~D1K841+538，此处钻杆推进速度忽快忽慢，钻孔处水为黑色，且带煤气味，初步判断此区段可能存在煤层^[8]。

通过 TST 预报结果与超前水平钻探测结果相互对比验证，说明我们所作的建议是合理的，而在 D1K841+495~D1K841+526 段附近围岩稳定性和完整性较差，裂隙较发育，岩体较破碎，分析存在溶洞或破碎带，与超前水平钻探测结果基本符合。

3.2 大独山隧道 1#横洞

大独山隧道全长 11882m，进口里程 DK852+772，出口里程 DK864+654，为单洞双线隧道，隧道可能溶岩长度为 9063m，占全隧长度的 76%。大独山隧道位于地处黔西高原向黔中丘陵过渡地带，属构造剥蚀、溶蚀中低山地貌，总体来看，地势北西高南东低，具构造剥蚀~溶蚀地貌特点。

大独山隧道洞身断层破碎带发育，区域断层 7 处，物探解译断层 11 处，下穿 1 处暗河（位于隧道拱顶上约 43m），部分段落隧道处于水平循环带内，部分段落处于季节交替带，洞内为人字坡。该隧道地质复杂，为 I 级风险隧道。

3.2.1 TST 数据处理结果及地质解释

按 TST 数据处理流程处理后得到大独山隧道 1#横洞 H1D1K0+808 掌子面前方 150m 内的地质体围岩波速曲线图、偏移图像如图 5:

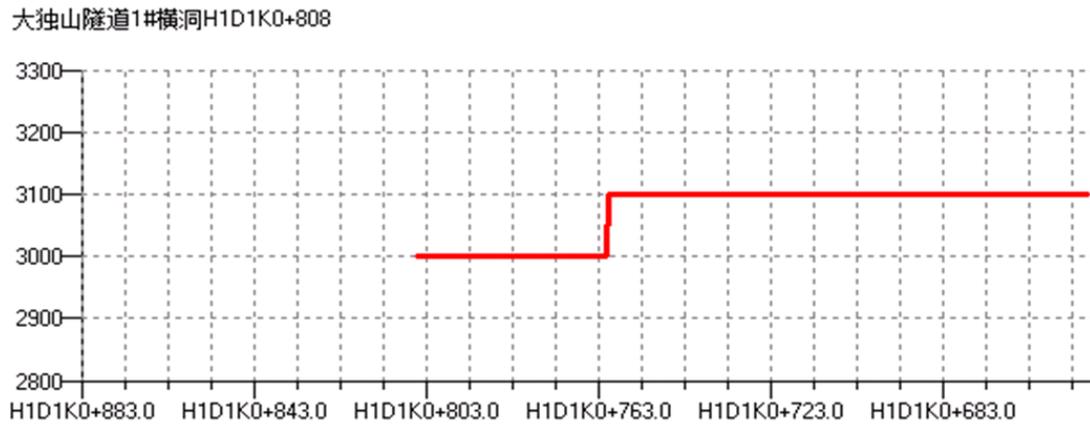
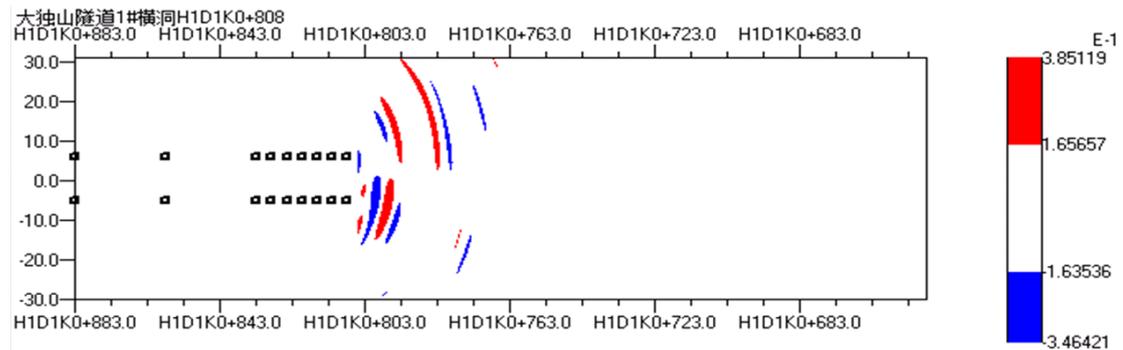


图 5 大独山隧道 1#横洞速度曲线 (Velocity curve of the entrance of Dadushan Tunnel)

使用前方回波地震数据和分析得到的速度分布，进行深度偏移成像，得到如图 6 所示的 TST 构造深度偏移成像，它反映了掌子面前方的地质构造特征。



注：图中黑色小框为检波器孔和爆破孔布置点 (Black box is receiver and shot points)

图 6 大独山隧道 1#横洞地质构造偏移成像 (Migration image of the entrance of Dadushan Tunnel)

对比图 5、图 6，结合掌子面开挖情况和地质资料综合分析，得到如下结论：在 H1D1K0+808~H1D1K0+760 附近围岩稳定性和完整性较差，岩溶裂隙较发育，岩体较破碎，有水，在隧道中轴线右侧，疑存在充填型岩溶裂隙；在 H1D1K0+760~H1D1K0+658 段围岩稳定性和完整性好，裂隙稍发育。详见表 2

表2 大独山隧道1#横洞TST地质超前预报结果 (The prediction result of the entrance of Dadushan Tunnel)

里程	长度 (m)	波速(VP) km/s	探测结果推断
H1D1K0+808~ H1D1K0+760	48	3.0	该段围岩在构造偏移图上呈现红蓝组合, 围岩稳定性和完整性较差, 岩溶裂隙较发育, 岩体较破碎, 有水, 在隧道中轴线右侧, 疑存在充填型岩溶裂隙。围岩为IV级。
H1D1K0+760~ H1D1K0+658	102	3.1	围岩稳定性和完整性好, 裂隙稍发育, 围岩整体为III级。

根据以上预报结果, 建议施工方在 H1D1K0+808~H1D1K0+760 段应加强支护并采用地质雷达、红外探水仪或加深炮眼方法对掌子面前方地质灾害体分布和地下水情况进行探测。

3.2.2 地质雷达探测结果与 TST 结果对比验证

根据超前地质预报结果, 施工方采用短进尺向前开挖, 发现向前开挖岩体逐渐破碎并有裂隙水出现。开挖到 H1D1K0+784, 施工方在掌子面进行了地质雷达探测, 探测结果为: 在掌子面前方 0~10m 深度范围内: 电磁波反射信号较强, 频率中等, 同相轴较为连续, 有断续。判断此区段内岩层较破碎, 岩层含水, 可能有夹层。在掌子面前方 10~30m 深度范围内电磁波反射信号较强, 频率中等, 同相轴较为连续, 有断续, 初步判断此区段内岩层裂隙发育, 局部为破碎带或填充物, 岩层含水, 可能有夹层^[9]。

通过 TST 预报结果与实际开挖情况、地质雷达探测结果相互对比印证, 可以看出我们所做的预报结果与地质雷达结果基本符合, 说明 TST 预报结果是准确的, 建议是合理的。

四、结论与讨论

不同于基于反射理论的 TSP 等技术, 在岩溶发育等地质构造复杂地区, 利用 TST 超前地质预报技术能够对掌子面前方地质情况有效、准确的进行预报。克服了基于反射方法的

超前预报技术,如 TSP 技术造成的误报、漏报问题。本次在岩溶区铁路隧道超前地质预报中采用基于散射理论的 TST 技术,基本查明了斗磨隧道进口平导、大独山隧道 1#横洞掌子面前方 150m 内地质情况预报范围内的地质情况,探明了隧道掌子面前方岩溶裂隙的分布范围和规模以及发育情况,预报的结果与实际情况基本一致,为施工方提前采取支护措施提供了准确的地质依据,避免了工程事故的发生。本文应用基于散射理论的 TST 技术为岩溶发育地区开展超前地质预报提供了成功经验。同时笔者在实践过程中体会到 TST 技术处理手段多,方法灵活,需要较多实践经验,人机交互过程中人为因素会影响预报结果。进一步研究中应建立标准化的数据处理流程,减小人为因素对预报结果的影响。基于散射理论的超前预报技术应用实例较少,希望同行加强交流,不断丰富应用实例。

参考文献

- [1] 赵永贵. 中国工程地球物理研究的进展与未来[J] .地球物理学进展,2002 ,17 (2) :301~304.
- [2] 肖宽怀. 隧道地质超前预报研究进展[J] . 地球物理学进展,2003 ,18 (3) :460~464.
- [3] 钟宏伟, 赵凌. 我国隧道工程超前预报技术现状分析[J] . 人民长江,2004 ,35(9) :15~17.
- [4] 李志祥, 何振起, 刘国伍. TSP_203 在大支坪隧道超前预报中的应用[J] . 地球物理学进展,2005 ,20 (2) :465~468.
- [5] 赵永贵, 蒋辉. 隧道地质超前预报技术现状分析与新进展[J] . 公路隧道. 2010 ,69 (1) :1~7.
- [6] 赵永贵, 蒋辉. TSP203 超前预报技术的缺陷与 TST 技术的应用[J] . 工程地球物理学报,2008 ,5(3) :266~273.
- [7] 肖启航, 谢朝娟. TST 技术在贵州高速公路顶效隧道超前地质预报中的应用[J] . 工程勘察,2010, (7) :89~94.
- [8] 中铁二十局集团沪昆客专贵州段工程指挥部地质信息部, 斗磨隧道进口平导超前水平钻探成果报告[R].
- [9] 中铁二十局集团沪昆客专贵州段工程指挥部地质信息部, 大独山隧道 1#横洞掌子面地质雷达超前地质预报[R].