

文章编号: 1001-1749(2023)01-0046-07

地震映像高精度时频分析方法在铁路隧底隐伏岩溶识别中的应用研究

魏栋华

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要: 铁路岩溶隧道隧底隐伏岩溶危及列车行车安全,为了彻底消除安全隐患,保证运营安全,在新建铁路工程静态验收前须完成隧底隐伏岩溶探测、整治设计、整治施工等工作。岩溶探测手段以物探为主钻探为辅,地震映像法作为成熟的物探方法得到了大量应用。地震映像剖面包括时域和频域信息,由于目前用于地震映像时频分析方法计算过程较繁琐、精度不高,实际生产中并未得到广泛应用,资料分析仍以时域的波形特征识别为主,而波形特征具有复杂性、多解性,资料解释准确度不高。这里引入 Wigner-Ville 改进方法对地震映像剖面进行时频分析,得到高精度的瞬时频率属性剖面,综合利用地震映像剖面的时域和频域信息进行解释,减少了多解性,提高了判释的准确度。本新方法在铁路隧底隐伏岩溶探测中得到了成功验证,对类似岩溶勘探具有重要的借鉴作用。

关键词: 岩溶识别; 地震映像; 时频分析; 瞬时频率; Wigner-Ville 改进方法

中图分类号: P 631.4 **文献标志码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-1749.2023.01.06

0 引言

在铁路运营期间,因岩溶问题引起隧道的衬砌开裂、变形及涌水突泥等,带给我们沉痛的教训^[1]。为了消除影响行车安全的隧底隐伏岩溶,在隧道施工铺底完成后,须根据施工进度分段开展隧底隐伏岩溶探测工作。岩溶区勘察首先采用物探手段进行普查,在代表性物探异常点布置验证钻孔,依据钻探验证资料对物探成果资料进行修正,并指导物探资料的解释。隧道内物探方法的选择需要考虑隧道工程空间狭小、隧底仰拱中布设钢筋网等场地条件以及经济、工期多种因素,对比分析常规物探方法的适宜性,地震映像法由于不受钢筋网的影响,且以非常成熟的地震反射波法勘探成套技术作为支撑,成为

首选方法,它具有采集速度较快^[2],资料处理简单,结果图示直观的特点,在沪昆高铁、贵南高铁、成昆铁路等长大铁路干线的隐伏岩溶探测中得到了广泛地应用。

地震映像法在 20 世纪 90 年代被提出,经过大量的工程实践,该方法得到不断地发展和完善^[3]。在野外数据采集方面,开展了野外数据采集参数对比试验,总结出针对不同的地下目标体,合理选择检波器型号、偏移距及道间距等的工作方法,还提出了多偏移距地震映像法,开展多偏移距联合勘探,解决了野外实测时难以确定最佳偏移距的难题;在数据处理方面,开展了地震映像资料的时频分析,为资料解释提供了频率域参数^[4-8];在资料解释方面,分析研究典型岩溶形态在地震映像波形图上的反映特征,为使用时间域波形异常识别岩溶提供了参考范

例^[9]。

地震映像资料解释中,综合利用时间域和频率域资料可以得到更多地质信息,岩溶识别更为准确。然而,目前一般采用短时傅立叶变换、小波变换、S变换等进行时频变换,这些方法获得的瞬时频率精度较低,对地下异常体的响应并不明显,难以在频率域内有效开展岩溶识别工作^[10]。所以目前地震映像法资料解释仍以时域的波形异常识别为主。由于岩溶的波形特征与岩溶带顶界面埋深、形状以及地震映像剖面的偏移距等多个因素有关,再迭加上施测时受到振动干扰,各种岩溶形态的波性特征具有多样性,故仅靠波形异常识别岩溶,存在多解性,难以获得良好的地质效果,改进地震映像时频分析方法,提高时频分析精度,在岩溶识别中加入频率参数是当务之急。

基于以上问题分析,笔者在地震映像时频分析计算问题中引入 Wigner-Ville 分布改进方法,获得地震剖面对应的时频特征,较大程度降低了解释的多解性;时频分析得到的瞬时频率数据以彩色影像图的形式展示,便于资料对比分析。结合地震映像法在铁路隧底隐伏岩溶探测中的实际应用,讨论了岩溶带在地震映像时频域图上的反映特征与识别方法,并使用钻孔资料进行对比,验证了 Wigner-Ville 分布改进方法在地震映像法数据处理中的有效性和先进性。

1 Wigner-Ville 分布改进方法

魏格纳-威尔分布(WVD)定义^[11]为

$$W(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} z(t + \frac{\tau}{2}) z^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (1)$$

其中: $z(t)$ 为原始信号 $x(t)$ 的解析信号; t 为时间; f 为频率; $z^*(t)$ 为 $z(t)$ 的共轭复数,WVD 的离散的核函数为式(2)。

$$\begin{cases} \tilde{k}_n(l) = z^*(n-l)z(n+l) \\ \tilde{k}(-l) = \tilde{k}_n^*(l) \end{cases} \quad (2)$$

利用最大熵方法对 Wigner-Ville 分布中的核函数序列 $\tilde{k}_n(l)$ 进行外推:

$$\tilde{k}_n(l) = - \sum_{i=1}^M a_M(i) \tilde{k}_n(l-i) \quad (3)$$

其中: a_M 为最大熵法获得的滤波器系数;外推从 $\tilde{k}_n(0) = k_n(0) = z(n)z^*(n)$ 开始,通过式(2)外推核

$\tilde{k}_n(l), l=1, 2, \dots$ 。依据外推的 $\tilde{k}_n(l)$ 进行离散傅里叶变换得到高精度的时频谱 $W(t, f)$ 即改进 Wigner-Ville 分布。

由于通过这种改进方法获得时频谱的分辨率很高,采用一阶矩积分方法求取瞬时频率仍然精度很高,同时也可对噪声有一定的压制作用。瞬时频率的计算公式为式(4)。

$$\tilde{f}(t) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} f(\omega * t, f) df}{\int_{-\infty}^{+\infty} \omega(t, f) df} \quad (4)$$

其中: $\tilde{f}(t)$ 表示瞬时频率; f 为频率。

2 应用实例

某高速铁路隧道已完成隧底的铺底施工,隧底设计结构从上到下为素混凝土填充层、钢筋混凝土仰拱及初喷混凝土,总厚度约 2 m。为查明可溶岩段隧底隐伏溶洞及岩溶裂隙的发育情况,使用地震映像法进行探测,野外数据采集使用“单点激发、2道接收”的观测系统,偏移距分别为 4 m、12 m。在数据处理中,采用 Wigner-Ville 分布改进方法进行时频分析,得到高精度的地震映像瞬时频率属性剖面。结合波形图和瞬时频率剖面进行资料解释,物探结果采用钻探进行验证。这里选取了具有代表性的溶洞、岩溶裂隙(破碎带)的识别进行研究。

2.1 基岩的反映特征

图 1(a)及图 1(b)分别为某隧道 CDP210~310 段 4 m、12 m 偏移距地震映像波形图。对图 1(a)及图 1(b)时间剖面利用改进 Wigner-Ville 方法进行时频分析,得到瞬时频率属性剖面,使用 SURFER 软件绘制成等值线剖面图,并将等值线填充着色,色谱设置为以蓝-绿-黄-红的渐变顺序代表瞬时频率值从大到小的变化,成果见图 1(c)和图 1(d),为消除时频分析计算时窗的边界效应,从 2 ms 开始显示图像。岩溶带的频率响应异常表现为低频特征,借助时频特征来识别岩溶,关注的重点是低频信息,为凸显低频异常,对图 1(c)和图 1(d)中的图像作了简化处理,其结果分别见图 1(e)和图 1(f)。

从图 1(a)和图 1(b)中可见 2 个强振幅波组,其中第 1 个波组由直达波、侧反射波等组成,波形均匀整齐,同相轴呈直线型;第 2 个波组主要成分由地层反射波组成,作为探测岩溶带的有效波。对比第 2

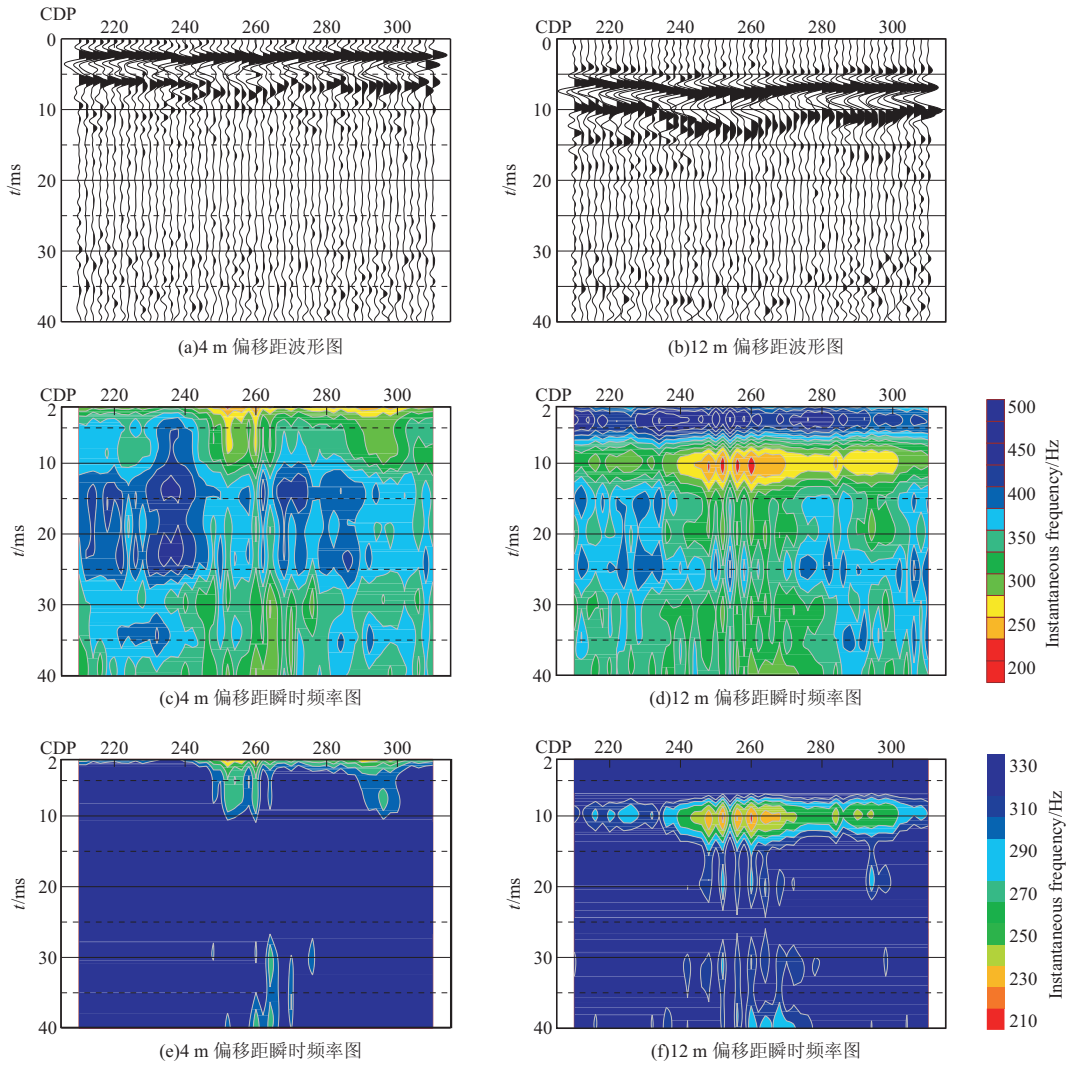


图 1 基岩在地震映像时频域图上的特征

Fig. 1 The bedrock characteristics in the time—frequency domain of seismic mapping

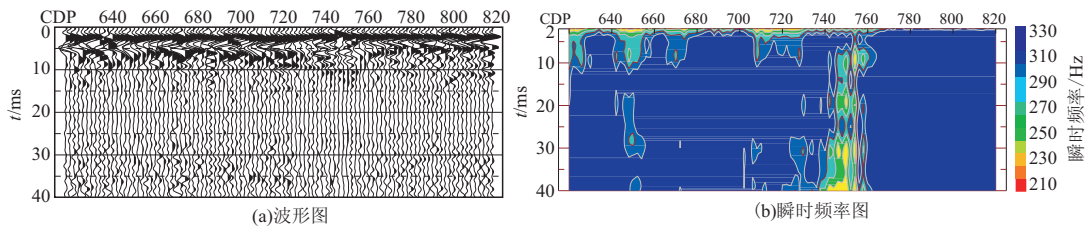


图 2 溶洞在 4 m 偏移距地震映像时频域剖面上的反映

Fig. 2 The representation of karst cave in time—frequency domain section of 4 m offset seismic image

个波组,发现两处地震波走时异常,在 CDP240~270 段出现波至滞后,同相轴呈轻微下凹的特征;另在 CDP270~310 段地震波旅行时较 CDP210~230 段滞后。从图 1(e)和图 1(f)可见,在 CDP240~310 段、地震波旅行时分别在 2 ms 及 10 ms 左右,有一个水平串珠状的中低频异常带,与图 1(a)和图 1(b)中波形异常对应一致。

在图 1 中均显示在 CDP240~310 段存在异常。据 CDP210~310 段隧道开挖地质描述,在施工中未揭示岩溶现象。在 CDP256 处钻探结果为:0 m~2.2 m 混凝土,2.2 m~17.0 m 灰岩,岩体节理裂隙较发育。说明地层中节理裂隙发育,破坏了地层的完整性,致使地震波旅行时延后、瞬时频率降低,且在图 2 中均有较明显地反映。地层中存在的节理裂隙

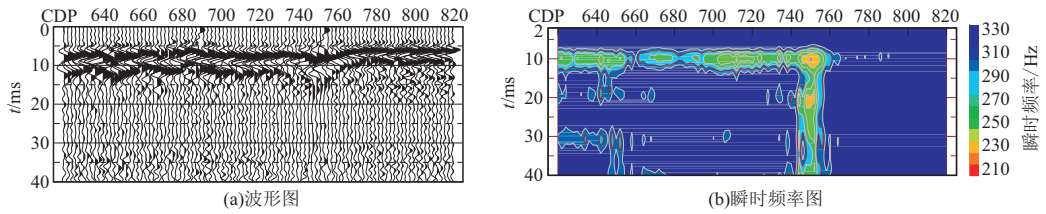


图 3 溶洞在 12 m 偏移距地震映像时频域剖面上的反映

Fig. 3 The representation of Karst cave in time—frequency domain section of 12 m offset seismic image

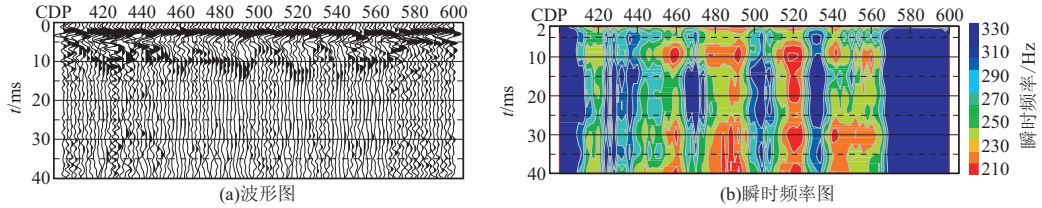


图 4 破碎带在 4 m 偏移距地震映像时频域剖面上的反映

Fig. 4 The representation of fracture zone in time—frequency domain section of 4 m offset seismic image

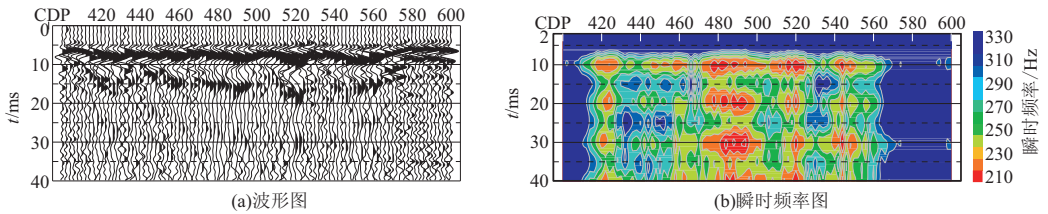


图 5 破碎带在 12 m 偏移距地震映像时频域剖面上的反映

Fig. 5 The representation of fracture zone in time—frequency domain section of 12 m offset seismic image

并非物探的侧重点,而是作为背景存在,分析认识含有节理裂隙的较完整基岩的时频域响应特征,为识别岩溶带提供了基础。

2.2 溶洞的反映特征及识别

岩溶带特别是岩溶化地层中存在的充水溶洞、充填黏土溶洞或空溶洞,由于波速明显降低、密度突变,为地震映像法探测提供了较好的物性条件。

图 2(a)和图 3(a)为某隧道 CDP620~820 段 4 m、12 m 偏移距地震映像波形图,图 2(b)和图 3(b)分别是图 2(a)和图 3(a)的时频分析结果。

在图 2 和图 3 中,可发现 CDP740~760 段存在明显的波组形态突变、同相轴明显下凹以及垂向的低频异常带等特征。根据地震映像法理论,在溶洞的边缘、角点处会产生绕射波,顶界面无规则的起伏处会产生散射现象,在地震映像波形图上则呈现同相轴错断或弧形下凹等特征亦或出现双曲线型同相轴特征;岩溶带对地震波高频成分具有很强的吸收作用,使反射波主频急剧降低,在瞬时频率图上出现超低频、低频异常带^[10]。基于地震映像法理论和本

例地震映像剖面图中的异常特征,推测该处中心位置发育有溶洞。在 CDP746 处钻探揭示:0 m~2.2 m 混凝土,2.2 m~7.7 m 石灰岩,7.7 m~9.9 m 空溶洞,9.9 m~20.5 m 灰岩。物探结果与钻探结果吻合。

在图 2(b)和图 3(b)中,除以 CDP746 处为中心出现竖向低频异常之外,在 CDP620~740 段还有伴生异常,地震波旅行时分别位于 2 ms、10 ms 左右出现水平状中低频异常。与之相对应,在图 2(a)和图 3(a)中可见 CDP620~740 段第 2 个波组的旅行时相较 CDP760~820 段稍许滞后。结合隧道工程地质条件分析,该类异常可由隧道开挖造成的围岩损伤扰动带,围岩节理裂隙发育,仰拱中混凝土的施工缺陷,如层间不良、结构松散、有空隙等多种因素引起。在 CDP642.5 处的验证钻探结果为:0 m~2.0 m 混凝土,2.0 m~16.2 m 灰岩,岩体较破碎。钻探资料验证了物探推断结果。

在地震映像波形图上,由于地震波主频不同,溶洞顶界面埋深、形状不同,隐伏溶洞并不全部具有标

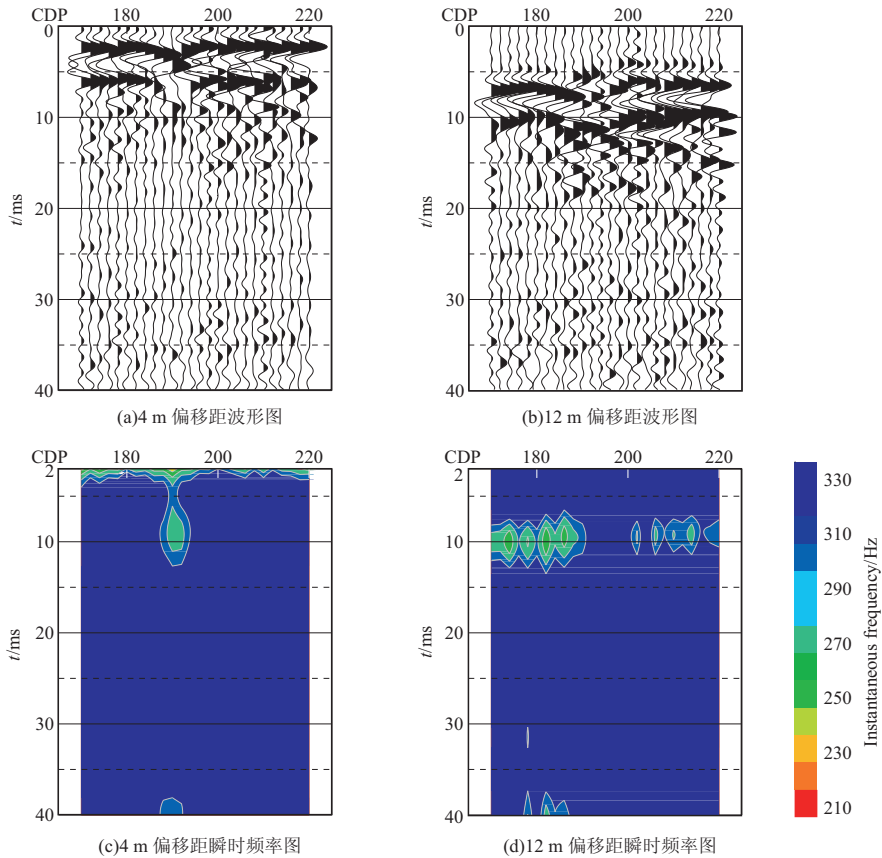


图 6 假异常在地震映像时频域图上的反映

Fig. 6 The representation of false anomaly in time—frequency domain of seismic image

志性的双曲线型同相轴异常特征,如本例中呈弧形下凹特征,因此对溶洞异常的判释标准存在多样性;而地震映像剖面的高精度瞬时频率属性弥补了这一不足,地震波穿过溶洞会产生明显的频率响应,引起瞬时频率急剧降低,地震波频率属性不受溶洞顶界面的埋深、形状及充填物性质的影响,为识别溶洞提供了一个重要的可靠依据,结合高精度的瞬时频率属性剖面来分析有利于溶洞的有效识别。

2.3 岩溶裂隙(破碎带)的反映特征及识别

图 4(a)及图 5(a)是某隧道 CDP400~600 段 4 m 及 12 m 偏移距的地震映像波形图,图 4(b)和图 5(b)是时频分析结果。

在图 4 和图 5 中,可发现 CDP410~570 段存在异常反映,特别在 CDP480~540 段波形图上波组呈现波状起伏的特征,“波谷”处(CDP488、521)异常表现为地震波旅行时严重滞后、频率响应为低频特性,推测是岩溶发育的反映;而“波峰”处(CDP503、532)地震波旅行时基本正常,频率响应为高频属性,应是较完整岩层的反映。

物探后,在 CDP488、503、521、532 四处位置布置了钻探验证。CDP488 处(波谷)钻探结果为:0 m~2.3 m 混凝土,2.3 m~4.5 m 灰岩破碎带,4.5 m~15.4 m 灰岩较破碎,15.4 m~26.2 m 灰岩。CDP503 处(波峰)钻探结果为:0 m~2.2 m 混凝土,2.2 m~2.6 m 灰岩破碎带,2.6 m~26.3 m 灰岩。CDP521 处(波谷)钻探结果为:0 m~2.2 m 混凝土,2.2~4.4 m 灰岩破碎带,4.4 m~26.1 m 灰岩。CDP532 处(波峰)钻探结果为:0 m~2.0 m 混凝土,2.0 m~26.2 m 灰岩。

上述钻探结果总体上与物探推断一致,同时发现当地层岩溶发育且形状复杂时,由于地震波传播路径复杂化导致地震映像波形图形态复杂,瞬时频率剖面图像也随之变得复杂,对岩溶的分辨率都会受到影响,这时需要结合钻探资料进一步确定岩溶形态。本例中波形图上的“波峰”形态特征与溶洞异常的双曲线型同相轴特征相类似,若仅利用波形特征判释容易误判为溶洞。然而,加入瞬时频率属性分析发现“波峰”处对应瞬时频率图上的高频区,表明该处岩层相对较完整,避免了资料误判。

3 利用时频域资料识别假异常

在波形图上出现同相轴错断或者呈双曲线型等,可能是由地下岩溶发育引起,也可能是由排水沟、地面积水、混凝土施工接缝或受到外界噪音干扰引起,消除物探假异常是资料解释中常常面临的难题。

图 6(a)及图 6(b)是某隧道 CDP170~220 段 4 m 及 12 m 偏移距的地震映像波形图,从图 6 中可见 CDP192 处出现异常,图 6(a)中第 2 个波组相位产生畸变、同相轴缺失,图 6(b)中波组增多,还出现双曲线型同相轴异常。

图 6(c)和图 6(d)是图 6(a)和图 6(b)的时频分析结果。图 6(c)中,在 CDP192 处有一个孤立的中频封闭圈,而图 6(d)中对应位置未见异常反映,该处瞬时频率属性异常特征并不明显。

结合图 6 时频域资料分析,CDP192 处的波形异常是由于干扰因素引起,推测该处地层完整。在 CDP192 处钻探验证结果为:0 m~2.2 m 混凝土,2.0 m~11.9 m 灰岩,岩层完整。物探结果与钻探结果吻合。

野外数据采集中,由于受到外界因素的干扰,在时间域的波形图上形成具有岩溶异常典型图像特征的假异常,容易引起资料误判;而频率域信息受到的影响较小,对岩溶具有较高的分辨率,借助瞬时频率属性可以有效减少资料的多解性。

4 结论

这里将地震映像资料高精度时频域分析方法,应用到铁路隧道隧底隐伏岩溶探测中,通过物探成果与验证钻探资料进行对比,得出如下结论:

1)基于 Wigner-Ville 改进方法对地震映像时间剖面进行时频变换,求取精度高、速度快,简单易行;瞬时频率属性对岩溶带分辨率高,图示直观。在不增加外业勘探成本的情况下,通过数据处理手段得到高精度的地震映像剖面频率域基础资料,在生产实践中应用前景广阔。

2)岩溶化地层中的溶洞、裂隙在地震映像波形图上的特征具有多样性,而在瞬时频率剖面图上仅呈低频或超低频特征,且分辨率高;结合二者进行解释,可减少不确定因素,消除假异常,更好地识别岩溶的发育情况。

3)在分析地震映像时频域剖面图及钻探验证资料的基础上,总结了溶洞、岩溶裂隙(破碎带)等在地震映像时频域剖面图上的特征,对隧底隐伏岩溶探测资料解释具有一定的借鉴作用。

参考文献:

- [1] 何省,余大龙,康芮. 隧道施工大型岩溶整治探讨[J]. 高速铁路技术,2019,10(3):10-15.
HE X, YU D, KANG R. Discussion on large-scale Karst treatment tunnel Construction[J]. High Speed Railway Technology,2019,10(3):10-15. (In Chinese)
- [2] 单娜琳,程志平. 地震映像方法及其应用[J]. 桂林工学院学报,2003,23(1):36-40.
SHAN L N, CHENG Z. Seismic imaging profiling method and application[J]. Journal of Guilin Institute of Technology,2003,23(1):36-40. (In Chinese)
- [3] 张继龙,蒋正红,刘洪瑞,等. 地震映像法在隧底岩溶探测中的应用效果研究[J]. 工程地质学报,2016,24(Suppl.):927-932.
ZHANG J, JIANG ZH, LIU H, et al. An effect analysis of the seismic imaging method in the karst exploration of tunnel[J]. Journal of Engineering Geology,2016,24(Suppl.):927-932. (In Chinese)
- [4] 姜贤斌. 地震映像工程探测中的野外工作方法试验及应用[J]. 物探化探计算技术,2009,31(2):91-95.
JIANG X B. Test and application on field work method of seismic imaging in engineering surveying[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration,2009,31(2):91-95. (In Chinese)
- [5] 徐涛,许顺芳. 多偏移距地震映像法应用技术研究[J]. 工程地球物理学报,2009,6(3):273-276.
XU T, XU SH F. A study of multi-offset seismic imaging method[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics,2009,6(3):273-276. (In Chinese)
- [6] 李明,雷宛,陈宁,等. 多偏移距地震映像法与瞬态瑞雷波法在隧底岩溶探测中的综合应用[J]. 物探化探计算技术,2017,39(5):663-668.
LI M, LEI W, CHEN N, et al. The integrated application of multi-offset seismic image method and the transient rayleigh wave in the bottom of the tunnel in Karst detection[J]. Computing Technique Geophysical and Geochemical Exploration,2017,39(5):663-668. (In Chinese)
- [7] 单琳娜,程志平,丁彦礼. 地震映像数据的时频分析方法及应用[J]. 地球物理学进展,2007,22(6):1740-1745.

- SHAN L N, CHENG ZH P, DING Y L. Application of time-frequency analysis method for seismic imaging data[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(6): 1740-1745. (In Chinese)
- [8] 赵思为, 余年, 曹云勇, 等. S变换数据重构地震映像
在六威线六盘水车站煤窑采空区勘探中的应用[J].
地球物理学进展, 2016, 31(4): 1885-1888.
ZHAO S W, YU N, CAO Y Y et al. Applicatio of s-
transform data-reconstruction in seismic imaging to
coalfield mined-out areas under Liupanshui station a-
long high-speed railway from Liupanshui to Weining
[J]. Progress in Geophysics), 2016, 31(4): 1885-
1888. (In Chinese)
- [9] 牟元存, 蒋良文, 王光权, 等. 复杂干扰环境下的地震
映像法基底隐伏岩溶探测图像特征分析[J]. 工程地
球物理学报, 2017, 14(3): 320-325.
- MU Y C, JIANG L W, WANG G Q, et al. Analysis
of seismic image method in prospecting image feature
of basement concealed karst in complex interference
environment [J]. Chinese Journal of Engineering Geo-
physics, 2017, 14(3): 319-325. (In Chinese)
- [10] 魏栋华, 许多, 曹云勇. 识别隐伏岩溶的魏格纳-威
尔分布改进方法[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(6):
2397-2401.
WEI D H, XU D, CAO Y Y. Hidden karst identifica-
tion with modified Wigner-Ville distribution method
[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(6): 2397-
2401. (In Chinese)
- [11] BOASHASH B. Estimating and interpreting the in-
stantaneous frequency of a signal-Part 2: algorithms
and applications [J]. Proceedings of the IEEE, 1992,
80(4): 540-568.

Application of seismic image high-precision time-frequency analysis method in identification of hidden karst at the bottom of railway tunnel

WEI Donghua

(China Railway Eryuan Engineering Group Co. LTD, Chengdu 610031, China)

Abstract: he hidden karst at the bottom of the railway karst tunnel endangers the safety of trains. In order to completely eliminate the potential safety hazards and ensure the safety of operation, the detection of the hidden karst at the bottom of the tunnel, the renovation design, and the renovation construction must be completed before the static acceptance of the new railway project. The karst detection method is supplemented by geophysical exploration, and the seismic image method has been widely used as a mature geophysical method. The seismic image profile includes time domain and frequency domain information. Due to the complicated calculation process and low precision of the current seismic image time-frequency analysis method, it has not been widely used in actual production. The data analysis is still based on the waveform characteristics of the time domain. However, the waveform features are complex and multi-solved, and the data interpretation accuracy is not high. This paper introduces the improved Wigner-Ville method to analyze the seismic image profile in time and frequency, and a high-precision instantaneous frequency attribute profile is obtained. The extensive use of the time domain and frequency domain information of the seismic image profile is used for interpretation, which reduces the multi-solution and improves the interpretation accuracy. The new method has been successfully verified in exploring hidden karst at the bottom of railway tunnels and has an essential reference for similar karst exploration.

Keywords: karst identification; seismic image; time-frequency analysis; instantaneous frequency; Wigner-ville improved method