

盾构开挖不同特性围岩振动特征分析

金杨文润¹, 刘长春^{2*}, 张 鸿², 刘 军¹, 徐泽全¹, 甄梦阳¹

(1. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 中铁二十四局集团有限公司, 上海 200040)

摘要: 为深入了解盾构掘进振动对不同地层的影响, 选择盾构机在软岩地层、中硬岩地层、硬岩地层掘进的典型工况进行现场振动信号监测。在对振动信号进行分析时, 针对盾构施工中振动信号瞬时非平稳性的特点, 结合希尔伯特黄变换分析法的自适应优势, 运用经验模态分解方法(EMD)深入分析了3种地层的测点振动信号。分析结果显示: 盾构施工在三种岩层的振动信号频率主要集中在0~185 Hz范围内, 且信号EMD分量中, 本征模态函数中2~4频段成分占据主导地位, 涵盖了信号的绝大部分能量, 盾构掘进过程中各地层瞬时能量主要范围和主要振动频带近似, 随着地层类型从软岩逐渐过渡到硬岩, 地层的剪切波速逐渐增大, 地层振动的瞬时能量峰值也逐渐变大, 3个地层中硬岩地层能量最大, 中硬岩地层能量次之, 软岩地层能量最小。

关键词: 盾构施工; 振动响应; HHT变换; EMD分析

中图分类号: TU443

文献标识码: A

Analysis of Vibration Characteristics of Surrounding Rock with Varied Properties During Shield Tunnel Excavation

JIN Yangwenrun¹, LIU Changchun^{2*}, ZHANG Hong², LIU Jun¹, XU Zequan¹, ZHEN Mengyang¹

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. China Railway 24th Bureau Group Corporation Limited, Shanghai 200040, China)

Abstract: To gain a deeper understanding of the influence of shield tunneling vibration on different strata, on-site vibration signal monitoring was conducted under typical working conditions of shield machines in soft strata, strata with soft upper and hard lower layers, and medium-hard sandstone strata, taking a certain shield construction project as an example. When analyzing the vibration signals, considering the instantaneous non-stationarity of the vibration signals during shield construction and the adaptive advantages of the Hilbert-Huang Transform analysis method, the Empirical Mode Decomposition (EMD) method was used to deeply analyze the vibration signals at the measurement points in the three strata. The analysis results show that the vibration signal frequencies of shield construction in the three rock strata mainly concentrate in the range of 0 to 185 Hz, and in the EMD components of the signals, the Intrinsic Mode Function (IMF) 2 to 4 frequency band components dominate, covering the majority of the signal energy. During the shield tunneling process, the instantaneous energy range and the main vibration frequency band of each stratum are approximately the same. As the stratum type gradually changes from soft rock to hard rock, the shear wave velocity of the stratum gradually increases, and the peak value of the instantaneous energy of the stratum vibration also gradually increases. Among the three strata, the hard rock stratum has the largest energy, the medium-hard rock stratum has the second largest energy, and the soft soil stratum has the smallest energy.

Key words: shield construction; vibration response; HHT transformation; EMD decomposition

收稿日期: 2024-06-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51874118)

第一作者: 金杨文润(1999—), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 主要从事基坑与地铁工程方面的研究。

* 通信作者: 刘长春(1973—), 男, 山东菏泽人, 硕士, 高级工程师, 主要从事基坑与地铁工程方面的研究。

在盾构掘进过程中,盾构机对岩土层的掘进工作会在地层中产生剧烈振动,这种振动会对隧道周围岩土体产生影响。Clarke 等^[1]针对盾构在城市地区挖掘浅层隧道时对建筑物可能产生的影响,提出了建筑物风险评估的整体方法。Rallu 等^[2-4]则分别监测盾构机内部、盾构施工洞内管片、地表的振动响应,从而将施工振动沿地表的传播规律表现出来。针对振动对隧道内部的影响,Tang 等^[5-6]通过建立用于数值模拟的盾构隧道有限元模型,分别研究了盾构隧道装配形式引起的节点及管片节理开口对振动波传递的影响。孙佳程等^[7]针对不同地层环境建立有限元模型数值模拟,研究了盾构滚刀的振动响应。朱建才等^[8]针对盾构机在不同地层环境中的掘进工况进行了深入分析,探讨了主要施工参数和地层条件等关键因素对盾构机体振动响应的影响。目前,振动传播研究成果多集中于环境振动影响及地质条件对机体振动反馈,而对不同特性围岩在施工过程中的动态响应缺乏系统性研究。需要深入研究盾构掘进过程中,不同特性围岩的振动响应特征,以深入理解不同地层对盾构施工引发的环境振动的影响。

在对振动信号的研究中,傅里叶变换^[9]无法捕捉到特定时间段内的局部频率变化。这导致了时域和频域之间的局部化矛盾,在时域上缺乏精确定位的能力。此外,傅里叶变换要求输入的数据具有周期性和平稳性,并且所分析的系统需要具备线性特征,因此,适合分析稳态信号,而不适合非稳态信号,在盾构施工中,受多种复杂环境条件的影响,振动信号中含有噪声等干扰的同时,又呈现出瞬时性和非平稳性。且信号中的干扰信号对振动信号的关键分析会造成障碍,从而增加信号处理的复杂性和难度。为了解决传统傅里叶变换对非稳态信号分析的局限性,张声辉等^[10]提取与分析崇礼国家跳台滑雪中心边坡爆破振动信号的主成分,研究表明:经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)可以去除高频噪声和低频趋势项,从而重点提取振动信号的主成分。张义平等^[11]将 EMD 引入爆破信号处理中,并与快速傅里叶变换对比,展示了该算法的优越性。曹晓立等^[12]运用 EMD 算法提取并分析了爆破信号的主要特征,对爆破振动效应进行了客观评价。杨智广等^[13]通过 EMD 和希尔伯特黄变换对隧道掘进爆破振动信号进行处理后,根据振动信号的主要特征对振动能量在时域和频域的分布规律进行了深入的剖析。

因此,本文通过现场监测得到振动信号,并依据希尔伯特黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)分析方法,结合盾构在软岩地层、中硬岩地层、硬岩地层掘进时的振动信号,对现场测得的振动信号进行 EMD 分析,研究盾构掘进时不同特性围岩的振动特征,为有关项目提供参考。

1 振动信号采集

1.1 信号采集场地

本文以某车站盾构区间为例,开展盾构施工振动监测。监测时选取区间内 5 个断面,共涵盖 3 种岩层,其中 1#断面开挖范围是粉质黏土地层,2#、3#断面开挖范围是上软下硬复合地层,4#、5#断面开挖范围是中风化砂岩地层,见图 1。各主要地层的相关物理力学参数,见表 1。

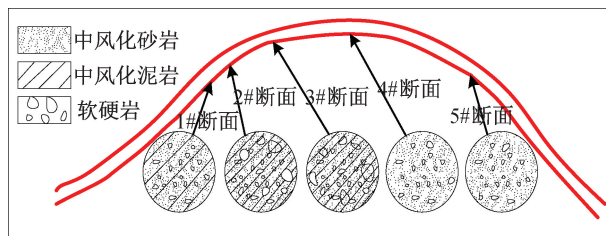


图 1 不同断面掌子面地质图

Fig. 1 Geological maps of different cross-sections of the tunnel face

表 1 各地层土介质的基本参数

Tab. 1 Basic parameters of soil media in various strata

名称	深度 /m	剪切波速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	泊松 比	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
杂填土	0~2.9	140	0.35	1 600
素填土	1.4~2.9	180	0.38	1 650
粉质黏土	13.2~22.4	214	0.33	1 840
中风化砂岩	—	980	0.18	2 500

1.2 信号采集方案

在盾构施工振动试验中,布设测点具有极其重要的地位,监控点布设按最近原则和重点原则进行,所选测点应尽量与盾构开挖掌子面处于同一断面,应根据不同地质条件,选择不同断面布设测点并进行振动监测。

此次选择 5 个开挖断面,分 5 次进行振动监测,每个开挖断面对应 1 个振动监测断面。盾构机掘进到所选 5 个断面附近时,开展对应断面现场振动测量。每个振动监测断面布设 2 个测点,分别布设在距离盾构机左侧 5 m(测点 a)、右侧 10 m(测点 b)位置处的管片上,测点布置图如图 2 所示。

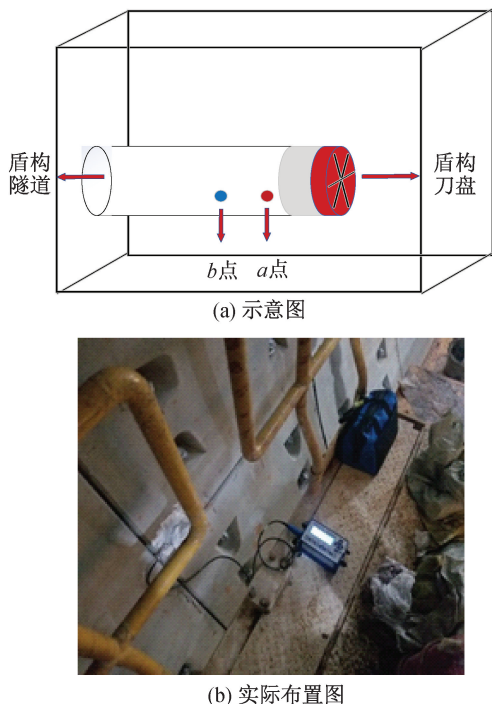


图2 断面测点布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the layout of cross-sectional measurement points

2 振动信号 EMD 分析

2.1 EMD 原理

盾构掘进过程中,不同特性的围岩产生的振动信号具有随机性和非平稳性,这类信号实质上是由幅值、频率和相位持续变化的谐波构成的复杂波形,这些特性为振动信号的分析解读带来了不小的挑战,因此,需借助先进的技术手段。Huang 等^[14]开创性地提出了经验模态分解(EMD)这一新的自适应信号时频处理方法。该方法是一种数据驱动的信号分析方法,它拥有自适应分解的特性,基于信号的时间尺度特征进行操作,完全摒弃了预设基函数的需求,从而解决了傅里叶变换和小波变换中需要依赖先验知识建立基函数的局限性。在随机和不稳定的振动信号分解中,EMD 能够得到更好的应用。

EMD 方法的核心价值在于能够将原始信号分解为本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF),反映不同时间尺度下信号的局部振荡特性。该过程实质上是将非平稳信号平稳化,有助于我们更深入地洞察信号的本质和变化规律。经过 EMD 分析后,每个 IMF 都具有正交性和独立性,且其瞬时频率具有实际意义,这为我们对每个分量进行独

立的时频分析提供了便利。通过对每个 IMF 分析,我们能够提取出关于信号局部动态和瞬时频率变化的关键信息,并获得非平稳信号的完整时频描述。EMD 方法的优点是适应能力强,具有高解析度,同时具有局部性和高分辨率性,EMD 在处理非平稳和非线性数据时显示出了它的优势。此外,EMD 方法凭借其独特的分解机制,能够在复杂信号中提取出高信噪比的分量,且其分解过程直观简单,能够按照固有的模式自动进行层次化分解,无须人为干预和设置,这为信号分析提供了极大的便利。

2.2 EMD 分析方法

EMD 方法将信号 $x(t)$ 分解为多个 IMF 分量时,需要考虑信号相邻顶点的时间间隔,并符合特定的限制条件。具体而言,EMD 的分解流程大致如下:

(1)按原信号 $x(t)$ 上下极值点分别勾画上、下包络线;

(2)求上、下包络线的均值 $m_1(t)$,画出均值包络线;

(3)原信号减去均值包络线,得到中间信号 $h_1(t)$;

(4)判断该中间信号 $h_1(t)$ 是否满足 IMF 的 2 个条件:整个时程内,极值点个数与零点个数相等或者最多相差 1 个;在任一点处,上下包络线的均值为 0。如果满足,该信号就是 1 个 IMF 分量;如果不是,以该信号 $h_1(t)$ 为基础,重复步骤(1)—(4)的分析。IMF 分量的获取通常需要若干次的迭代,循环 k 次,直到 $h_1(t)$ 能够满足 IMF 的条件,则 $c_1(t) = h_{1k}(t)$ 。然后得到剩余信号 $r_1(t) = x(t) - c_1(t)$,把 $r_1(t)$ 作为新的原始信号,即 $x(t) = r_1(t)$ 。

(5)重复步骤(1)—(4),直到完成设定的 n 阶分量,或残余函数 $r_n(t)$ 小于设定阈值,或 $r_n(t)$ 成为单调函数,EMD 过程结束。分解后的 $x(t)$ 可以表示为

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r(t) \quad (1)$$

EMD 分解后的各分量承载不同的物理含义。在分解过程中,IMF 分量常被视为高频噪声成分,中间分量呈现出双重特性:前半部分为信号的核心频带信息,即信号的优势频带分量;而后半部分则与信号的低频成分相关。在处理过程中,我们应特别关注并优化信号的优势频带分量,以确保信息的准确性和完整性。

3 不同特性围岩振动特征分析

3.1 不同特性围岩振动时域分析

本次盾构施工振动监测采用最新的 Series IV-高级振动和过压监测仪,利用 Blastware10 数据分析软件,对速度、加速度及位移进行监测和分析。在盾构施工过程中产生的振动可以表示为振动位移、振动速度和振动加速度,本文主要对振动速度进行监测。

从振动监测仪中导出测得的爆破振动信号,利用 MATLAB 软件对每次测量得到的振动信号进行频谱分析,深入研究不同方向信号的波形图,即平行洞轴向、铅垂向、垂直洞轴向的波形图。通过

这种方式,我们成功获得了对应的频谱图。由于篇幅限制,仅展示各断面监测点 a 的各方向测振波形及频谱图,如图 3 所示。

经对图 3 分析可知,现场施工振动的具体测试结果汇总于表 2。从表 2 中我们可以观察到:在涉及的 3 类地层中,各测点的垂直洞轴向的振动峰值明显超过了平行洞轴向和铅垂向的振动速度,而后两者振动速度则大致相当。以垂直洞轴向的振动峰值为例,通过对比不同测点的垂直洞轴向振动峰值,可进一步分析振动特性:5 m 处的垂直洞轴向振动峰值普遍比 10 m 处的大,硬岩地层中垂直洞轴向振速峰值是 3 个地层中的最高值,为 11.9 mm/s;中硬岩地层次之,为 7.05 mm/s;软岩

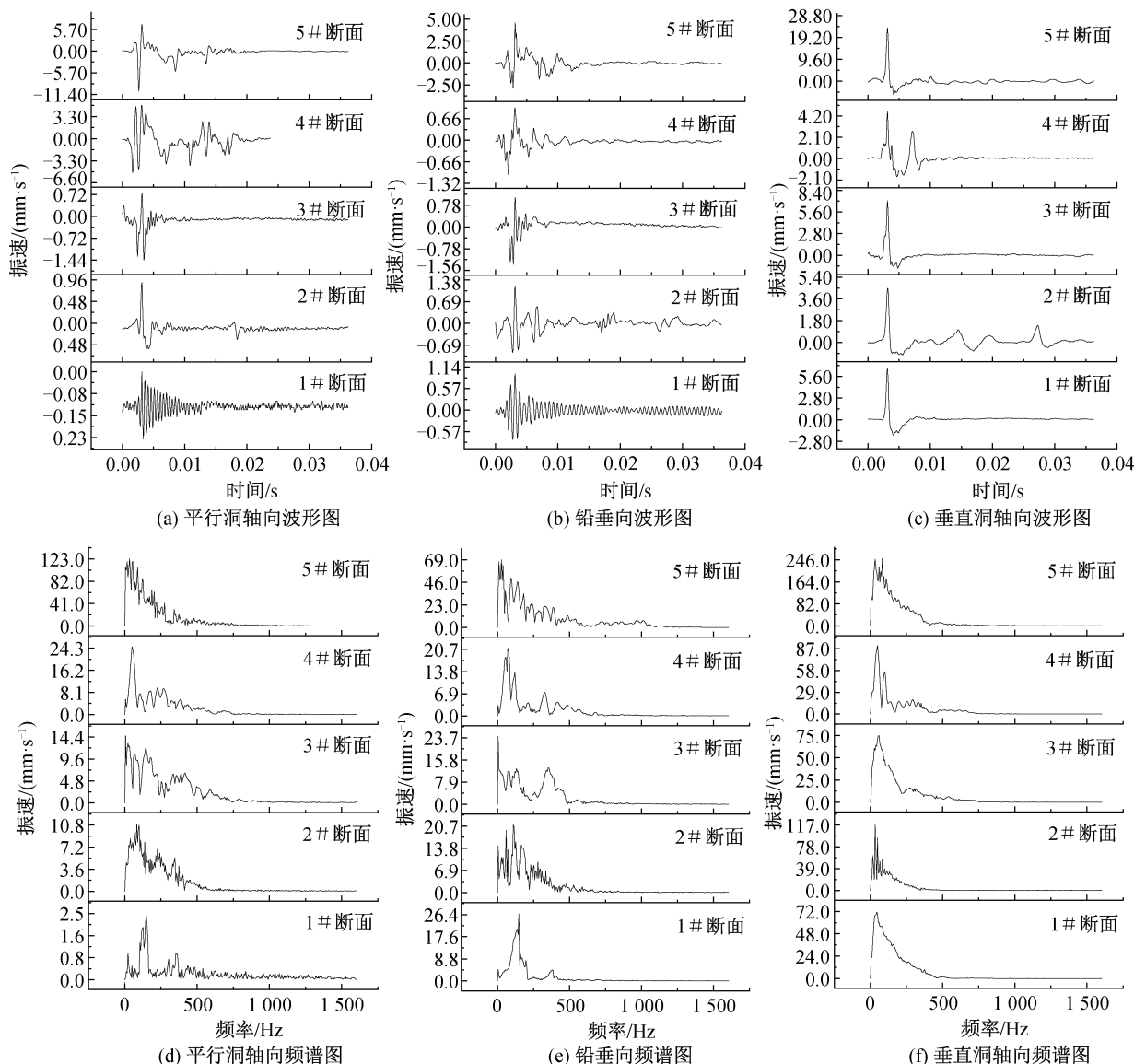


图 3 1#—5#断面 a 点测振信号的波形及频谱图

Fig. 3 Waveform and spectrogram of vibration signals measured at point a of section 1# to 5#

表 2 盾构管片振动监测结果

Tab. 2 Vibration monitoring results of shield tunnel segments												
地层类型	地层	断面编号	断面至监测点距离/m	平行洞轴向			铅垂向			垂直洞轴向		
				最大振速 /(mm·s ⁻¹)	主频 /Hz	频率主要分布/Hz	最大振速 /(mm·s ⁻¹)	主频 /Hz	频率主要分布/Hz	最大振速 /(mm·s ⁻¹)	主频/ Hz	频率主要分布/Hz
软岩	粉质黏土	1#	5	0.00	148	100~160	0.96	138	50~185	6.64	44	20~140
			10	0.34	100	10~120	0.65	336	286~369	2.85	55	10~120
中硬岩	上软下硬地层	2#	5	0.82	82	20~160	1.19	110	0~170	4.47	33	10~180
			10	1.14	99	10~130	0.73	55	20~110	3.06	55	20~110
		3#	5	0.73	6	0~180	1.01	24	0~160	7.05	61	0~145
			10	1.01	33	0~120	0.43	61	20~100	3.56	33	0~105
硬岩	中风化砂岩	4#	5	0.68	50	30~180	0.99	72	25~130	4.65	50	0~120
			10	1.09	49	10~170	0.67	44	30~170	2.63	49	0~140
		5#	5	7.04	33	30~180	4.59	28	25~130	11.9	83	0~120
			10	0.98	23	0~80	0.71	94	30~170	3.18	49	0~140

地层最小,为 6.64 mm/s。软岩地层的测振信号频率主要分布在 20~185 Hz,中硬岩地层主要分布在 0~170 Hz,硬岩地层主要分布在 0~180 Hz。

3.2 振动信号 EMD 分析

利用 MATLAB 平台将每个断面的各方向测振信号进行了 EMD 分析,得到了各个信号的 IMF 分量。

在进行 1#断面 a 点测振信号垂直洞轴向的 EMD 分析时,如图 4 的 IMF 分量图包含了 6 个 IMF 分量和 1 个余量的时间-振幅图,其中 IMF1 分量因其频率值相对较高,被初步判定为高频噪声;IMF2 分量占据了大部分能量,为原始信号的优势频带分量;在振动强度上 IMF2—3 分量是原始信号的主要成分;IMF4 分量是原始信号的次要成分;IMF5—6 分量是原始信号的低频成分。最后 1 个余量为分解后的余项,是表示原始信号整体走势的单调函数,在 HHT 处理中可以忽略。

根据各点测振信号的 IMF 分量图可以得出 3 种地层的信号优势频带分量。具体数据如表 3 所示。

在先前通过 EMD 得到的 IMF 成分基础上,对提取振动信号主成分后的效果进行了深入探究。在此过程中,我们剔除了高频噪声 IMF1 和余量,以确保分析结果的准确性。随后,利用 HHT 求解信号能量与时间或频率的对应关系,以求得瞬时能量和边际能量的分布特征。这样,便能更全面地理解振动信号的特性,为相关工程提供参考。

以 1#断面 a 点测振信号垂直洞轴向的瞬时能量

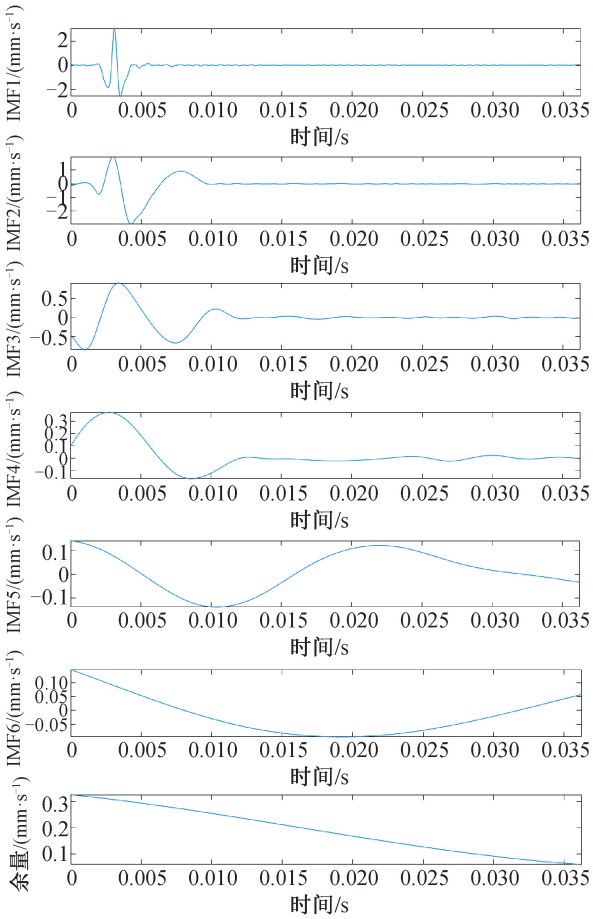


图 4 1#断面 a 点测振信号垂直洞轴向的 IMF 分量图
Fig. 4 IMF component diagram of vibration signals at point a of section 1 perpendicular to the axial direction of the tunnel

谱和边际能量谱为例,如图 5 所示。瞬时能量谱主要出现在 0.001 8~0.004 8 s,峰值为 19.56 (mm/s)²,边际能量谱表明主要振动频带在 10~80 Hz,边际能量峰值为 236 (mm/s)²。

表 3 信号能量分析结果

Tab.3 Signal energy analysis results

地层类型	地层	断面	剪切波速 /(m·s ⁻¹)	断面至监 测点距离/m	方向	优势频带 分量	瞬时能量 主要范围/s	瞬时能量峰值 /(mm·s ⁻¹) ²	主要振动 频带/Hz
软岩	粉质 黏土	1#	214	5	T	IMF2	0.002 7~0.005 1	0.016	100~150
					V	IMF2—3	0.002 0~0.004 0	0.884	80~160
					L	IMF2	0.001 8~0.004 8	19.560	20~80
				10	T	IMF2—3	0.002 7~0.003 6	0.059	50~110
					V	IMF2	0.002 1~0.004 4	0.003	60~100
					L	IMF2—4	0.001 8~0.007 8	3.650	80~120
中硬岩	上软 下硬 地层	2#	525	5	T	IMF2—3	0.002 3~0.004 6	0.451	40~120
					V	IMF2—4	0.002 7~0.006 4	1.610	50~170
					L	IMF2—3	0.000 6~0.004 2	8.310	10~80
				10	T	IMF2—3	0.001 4~0.003 8	0.510	10~100
					V	IMF2	0.001 4~0.003 4	0.290	30~90
					L	IMF2	0.000 6~0.005 0	8.470	60~110
		3#		5	T	IMF2—3	0.002 3~0.003 7	1.190	50~110
					V	IMF2—4	0.002 3~0.003 6	1.310	60~120
					L	IMF2—3	0.001 9~0.004 3	14.300	80~145
				10	T	IMF2—3	0.002 9~0.006 1	0.366	60~120
					V	IMF2	0.002 8~0.005 0	0.361	20~85
					L	IMF2	0.002 8~0.006 9	0.370	15~80
硬岩	中风化 砂岩	4#	980	5	T	IMF2—4	0.001 1~0.005 8	0.660	40~160
					V	IMF2—3	0.001 1~0.002 3	0.710	30~115
					L	IMF2—3	0.001 0~0.006 0	6.620	20~65
				10	T	IMF2—4	0.002 5~0.003 3	1.580	20~130
					V	IMF2—3	0.003 2~0.004 3	0.440	75~150
					L	IMF2—3	0.002 9~0.003 7	3.910	50~140
		5#		5	T	IMF2—4	0.002 3~0.003 3	64.730	60~165
					V	IMF2—3	0.001 3~0.003 5	12.860	40~110
					L	IMF2—3	0.001 5~0.004 5	286.500	40~120
				10	T	IMF2—4	0.001 5~0.003 5	0.570	20~60
					V	IMF2—3	0.001 9~0.003 4	0.630	50~120
					L	IMF2—3	0.002 8~0.005 1	4.320	100~150

注:方向中 T 为铅锤向,V 为垂直洞轴向,L 为平行洞轴向。

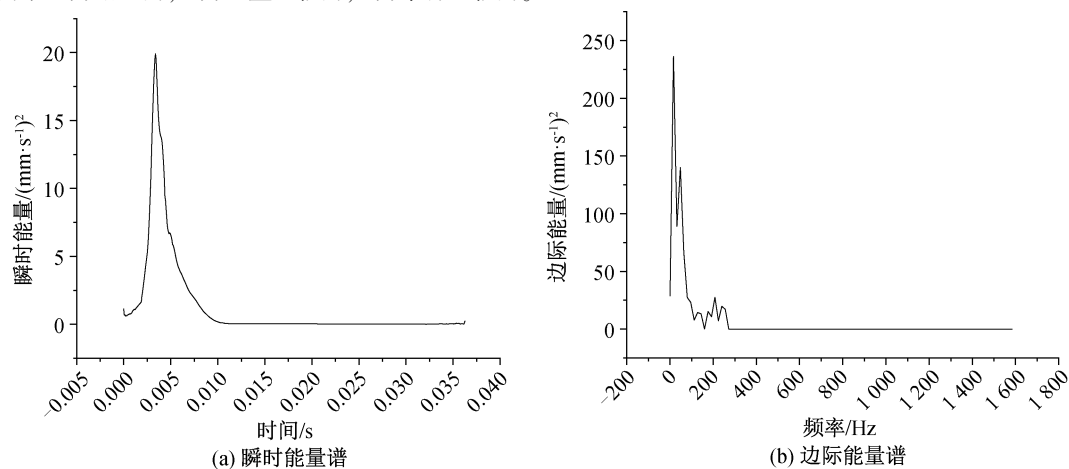


图 5 1#断面 a 点测振信号垂直洞轴向瞬时能量和边际能量谱

Fig. 5 Instantaneous energy and marginal energy spectrum of vibration signals at point a of section 1 perpendicular to the axial direction of the tunnel

时间-频率-信号幅值三维图是信号能量谱的另一种表示,它表明了信号能量随着时间和频率的分布。图6为1#断面a点测振信号垂直洞轴向的三维图。图中色彩的冷暖代表能量大小,越暖的色彩能量越大,越冷的色彩能量越小。

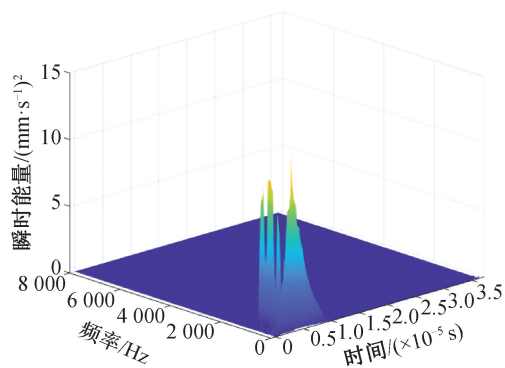


图6 1#断面a点测振信号垂直洞轴向三维能量谱
Fig. 6 Vertical hole axis three-dimensional energy spectrum of vibration signals measured at point a of section 1#

由图6可知:能量主要集中在100 Hz以内;0.003 4~0.004 5 s,12 Hz处的能量高;0.003 1~0.003 3 s,30 Hz处的能量次之;0.002 6~0.003 6 s,65、75 Hz处的能量相对较低。

结合瞬时能量谱、边际能量谱和三维能量谱可以得到3种地层的能量分布情况,具体测试结果汇总于表3。由表3可知,3种地层的信号EMD分量均以IMF2—4为优势频带分量,涵盖了信号的绝大部分能量,这些分量对周边岩土体会产生相当程度的扰动,因此不能简单地与其他分量相提并论,应给予重点关注。

分析表3还可知,盾构掘进过程中各地层瞬时能量分布范围和主要振动频带近似,对比各个点位3个方向的能量峰值可知,随着地层的变化,剪切波速也随之变化,当剪切波速在214 m/s左右时,地层类型为软岩,能量峰值为 $19.560(\text{mm/s})^2$;当剪切波速在525 m/s左右时,地层类型为中硬岩地层,能量峰值为 $14.300(\text{mm/s})^2$;当剪切波速在980 m/s左右时,地层类型为硬岩,能量峰值为 $286.500(\text{mm/s})^2$ 。

综上所述,在盾构掘进过程中,随着地层类型由软变硬,剪切波速逐渐增大,地层振动的瞬时能量峰值也逐渐变大。

4 结论

1)在盾构掘进过程中,发现软岩地层、中硬岩

地层和硬岩地层振动时程曲线和频谱特性近似,通过比较各个测点3个方向振速可知,垂直洞轴向振速普遍比平行洞轴向、铅垂向振速要大。从整体来看,软岩地层的振速在0~6.64 mm/s,中硬岩地层的振速在0.43~7.05 mm/s,硬岩地层的振速在0.67~17.9 mm/s,各地层测点频域峰值低频段在0~55 Hz,高频段在60~85 Hz。

2)对实测爆破振动信号进行经验模态分解(EMD)后,得到3种地层信号EMD分量的优势频带分量均为IMF2—4,覆盖了信号的绝大部分能量,对周围岩土体会造成一定程度的扰动。因此,应该更加关注它们,以确保对潜在风险的全面评估和有效控制。

3)通过希尔伯特黄变换,各个IMF分量可以求解得到瞬时能量谱、边际能量谱和三维能量谱。希尔伯特黄能量谱能直观体现信号能量与时频之间的关系,3种地层信号能量主要在100 Hz以下的低频段,在0.001~0.008 s时间段,且随着地层类型由软岩到硬岩,振动的瞬时能量峰值也逐步增大。

参考文献:

- [1] CLARKE J A, LAEFER D F. Evaluation of risk assessment procedures for buildings adjacent to tunnelling works [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 40: 333-342.
- [2] RALLU A, BERTHOZ N. Vibrations induced by tunnel boring machines in urban areas: Dataset of synchronized in-situ measurements inside the shield and on the surface [J]. Data in Brief, 2022, 41: 107826.
- [3] 李红岩,李文博. 盾构掘进振动对既有隧道结构的动力影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(7): 2005-2014.
- [4] 陶连金,郭飞,黄俊,等. 砂卵石地层盾构施工诱发振动环境影响试验研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(16): 213-218.
- [5] TANG S L, JIN H, MA X F, et al. Vibration wave propagation differences in straight assembled shield tunnels under different deformation conditions [J]. Structures, 2023, 57: 105065.
- [6] JIN H, TANG S L, ZHAO C, et al. Study on vibration propagation characteristics caused by segments joints in shield tunnel [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2023, 23(14): 2350156.

(下转第66页)

- 中位置优化以及减震分析[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(2): 69-78.
- [8] 陈水生. 高架桥梁地震响应磁流变阻尼器(MR)半主动控制[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2003, 23(6): 40-43.
- [9] 陈水生. 大跨度斜拉桥拉索的振动及被动、半主动控制[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- [10] 雷海涛. 偏心结构基于 EIMD 的半主动控制研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2019.
- [11] 孙洪鑫, 罗一帆, 杨国松, 等. 电磁集能式调谐质量阻尼器的结构减震及能量收集分析[J]. 振动与冲击, 2017, 36(15): 51-56.
- [12] 李志军, 张 猛, 雷海涛, 等. 不规则高层结构基于新型电磁惯性质量阻尼器的半主动控制[J]. 地震工程学报, 2021, 43(1): 205-212+250.
- [13] 沈文爱, 朱宏平, 孙子航. 电磁惯性质量阻尼器的自供能半主动控制电路及控制方法: CN112596368A [P]. 2021-04-02.
- (责任编辑 王利君)

(上接第 59 页)

- [7] 孙佳程, 廖少明, 孙连勇, 等. 土岩复合地层盾构滚刀冲击荷载及振动响应分析[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(5): 167-176.
- [8] 朱建才, 邓智宝, 袁逢逢, 等. 盾构穿越复合地层机体振动影响因素研究[J]. 浙江工业大学学报, 2022, 50(4): 435-443.
- [9] 李舜酩, 郭海东, 李殿荣. 振动信号处理方法综述[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(8): 1907-1915.
- [10] 张声辉, 高文学, 刘江超, 等. 基于 EMD 分解的爆破振动信号主成分提取与分析[J]. 工程爆破, 2022, 28(6): 8-14.
- [11] 张义平, 李夕兵, 赵国彦. 基于 HHT 方法的爆破地震信号分析[J]. 工程爆破, 2005, 11(1): 1-7.
- [12] 曹晓立, 高文学, 吕洪涛, 等. 爆破振动信号的 Hilbert-Huang 变换分析与应用研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(S2): 107-113.
- [13] 杨智广, 费鸿禄, 胡 刚. 隧道掘进爆破振动对围岩影响的 HHT 分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(9): 121-127.
- [14] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series, 1998, 454(1971): 903-995.
- (责任编辑 王利君)