

## 轨道交通基础结构振动响应监测和分析

卢哲超<sup>1,2</sup>, 周宇<sup>1,2</sup>, 李骏鹏<sup>1,2</sup>, 王钲<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室; 2. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 依托某轨道交通线路结构监测系统的长期数据, 分析城市轨道交通基础结构在列车荷载作用下的振动加速度空间分布及其随时间的变化情况。同时, 提出一种基于能量谱密度的车致动力响应信号损伤敏感特征提取方法, 并采用累积和控制图及 Haar 滤波, 对上述特征的长期变化情况进行度量。结果表明: 对基础结构振动响应进行监测可以较好地实现其状态的长期监测和评价。在基础结构正常状态下, 车致振动响应数据的时、频特征值在一日之内具有随机性, 但均值较为稳定; 在监测期内, 以能量谱密度、累积和控制图及 Haar 滤波可以反映出基础结构在较长的监测时间内均处于正常的状态, 其年度频率特征值和最大值可以用于评价后续的基础结构状态情况。

**关键词:** 结构健康监测; 振动加速度; 频谱分析; 累积和控制图

**中图分类号:** U213

**文献标志码:** A

**本文引用格式:** 卢哲超, 周宇, 李骏鹏, 等. 轨道交通基础结构振动响应监测和分析[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(1): 41-46.

## Monitoring and Analysis of Rail Transit Infrastructure Vibration Response

Lu Zhechao<sup>1,2</sup>, Zhou Yu<sup>1,2</sup>, Li Junpeng<sup>1,2</sup>, Wang Zheng<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

2. Key Laboratory of Structural Durability and System Safety of Shanghai Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** With the support of an extensive dataset, the spatial distribution and temporal evolution of urban rail transit infrastructure vibration acceleration in the long term is analyzed. The dataset is collected by an infrastructure monitoring system deployed on a metro line, with the coverage of 1 year. An energy spectrum density (ESD) based method of damage-sensitive feature extraction, dedicated to the examination of the dynamic response caused by passing trains is designed. Meanwhile, cumulative sum (CUSUM) and haar filtering are applied to the measurement of long-term variation of feature value. The results show that the vibration monitoring system fits the demand of structural health monitoring well. When operational infrastructure is at a steady health state, its dynamic response excited by passing trains is to some extent randomly distributed whereas its mean value is stable. It shows that the proposed analysis methods can clearly characterize the well-operating infrastructure during a long service time. In addition, the calculated feature value and its CUSUM & the haar filtering value can be referred to, when the assessing of other track structures' health state is demanded in the future.

**Key words:** structural health monitoring; vibration acceleration; spectral analysis; cumulative sum

**Citation format:** LU Z C, ZHOU Y, LI J P, et al. Monitoring and analysis of rail transit infrastructure vibration response[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(1): 41-46.

在过去的十年间,我国已经有大量的城市轨道交通线路投入运行。随着列车荷载的反复作用,轨道基础结构的性能将逐步恶化,需要科学地掌握其状态及发展规律,从而合理安排养护维修。《中国城

收稿日期: 2020-11-02

基金项目: 教育部-中国移动科研基金项目(2018202004)

作者简介: 卢哲超(1997—),男,硕士研究生,研究方向为钢轨伤损和轨道结构。E-mail: mrluzhe@tongji.edu.cn。

通信作者: 周宇(1977—),男,副教授,博士,研究方向为轨道管理和轨道养护维修技术。E-mail: wqhuo2785@163.com。

市轨道交通智慧城轨发展纲要》<sup>[1]</sup>对荷载影响下的轨道交通基础结构提出数字化、感知化等目标和要求。对于轨道基础结构,首先就要以新兴信息技术,感知其在列车荷载影响下的状态信息和发展规律。需要合适的技术对这些结构在列车荷载作用下的长期状态进行监测和分析。

已有文献中,对于轨道交通结构健康监测技术的探讨并不少见。项瑞聪等<sup>[2]</sup>采用分层沉降仪,对路基填筑引起水泥搅拌桩复合地基变形进行了监测;刘磊<sup>[3]</sup>从新建线路、既有线路等不同角度,探讨了城市轨道交通主体结构位移监测的要点;张颜等<sup>[4]</sup>论述了光纤光栅应变计监测轨道交通桥梁结构变形的可行性;梅琴<sup>[5]</sup>则采用振弦传感器、RTD探头,对高速铁路轨道板进行了监测。孙茂棠等<sup>[6]</sup>开发了无缝线路轨温实时监测系统,并验证了其可行性。但对长期监测数据的分析及结构健康评价方法的讨论则较为少见。魏汉明等<sup>[7]</sup>、郑建颖等<sup>[8]</sup>分别基于多传感信息融合、频谱分析法,提出了长期监测数据处理的可能手段。但上述文献均未将其提出的分析方法运用于实测数据中。颜永逸等<sup>[9]</sup>研发了一套轨道交通基础结构安全检测与管养系统,但其采用的数据覆盖时间短,未见对长期监测数据的研究分析。因此,轨道基础结构监测数据在较长时间尺度内的分析方法及评价指标,仍需要进一步讨论与实证分析。

在我国某地铁线路的基础结构布置若干传感器,结合传感技术、数据处理技术、数据传输技术,建立自动远程监测系统,对运营线路基础结构振动响应进行长期监测,应用时频分析方法,选取损伤敏感特征,并对其在长期运营中随时间变化的趋势进行度量,进而为轨道交通基础结构的智能监测和评价提供参考。

## 1 监测系统构建

被布置于某地铁线路上的轨道交通基础结构的监测系统<sup>[10]</sup>,由现场端数据传感系统、数据采集系统、数据传输系统组成。现场监测线路为一段盾构圆形隧道-明挖矩形隧道和U型槽区段,长约300 m,坡度27.7‰,曲线半径350 m,轨道结构为双块式整体道床。

为尽量减少长期监测下的设备损耗,轨行区仅布设传感系统。数据采集系统布置在附近车站,与轨行区传感器通过光缆连接。车站采集系统与远端控制中心间以4G网络连接,该网络近期将被提升至5G。

轨行区传感系统<sup>[11]</sup>共采用两类传感器,分别为光纤光栅水准仪、光纤光栅加速度传感器。它们分别用于监测结构的沉降和振动响应。其中,加速度传感器分别被布置于3个线路横断面,它们分别位于盾构圆形隧道、明挖矩形隧道和桥-隧U型槽过渡段这3种轨道结构中。在每个断面上,轨枕块、整体道床轨道板和隧道管片各布置了1个加速度传感器,共计9个。主要分析加速度传感器的监测数据。监测系统采用的光纤光栅加速度传感器技术参数如下:量程为10 G,波长为1 525~1 565 nm,使用温度为-30~85 ℃,测量精度为3‰ F.S.,分辨率为0.1‰ F.S.。

目前,光纤光栅加速度传感器的测量精度较高,但其采样频率为100 Hz,相对较低,所以本系统中主要将其用于监测结构中低频振动响应。同时,较低的采样频率也避免了长期监测下,高频采样带来的数据存储空间紧张、数据传输带宽不够等问题。

## 2 基础结构振动响应的空间特征

如图1所示,加速度传感器监测了轨道结构在列车荷载作用下的振动响应情况。以矩形隧道断面为例,分析同一趟列车在不同部位处所引起的振动加速度。选取2019年2月5日某趟列车引起的振动响应。图1(a)所示为轨道板处传感器测得的数据。观察可知,加速度传感器在轨道板处测得的信号最大值约为1.2 m/s<sup>2</sup>。此外,加速度计在轨枕处测得的信号最大值与轨道板接近,而在隧道壁处测得的信号最大值约为0.9 m/s<sup>2</sup>。隧道壁离振源更远,因而振动传递至此应衰减。上述监测数据与文献[12]同类条件下的结构振动响应数据接近,可以认为该数据反映了基础结构振动响应的空间特征。选取2018年8月4日某趟列车产生的振动加速度信号,经傅里叶变换得到其频谱,如图1(b)所示。

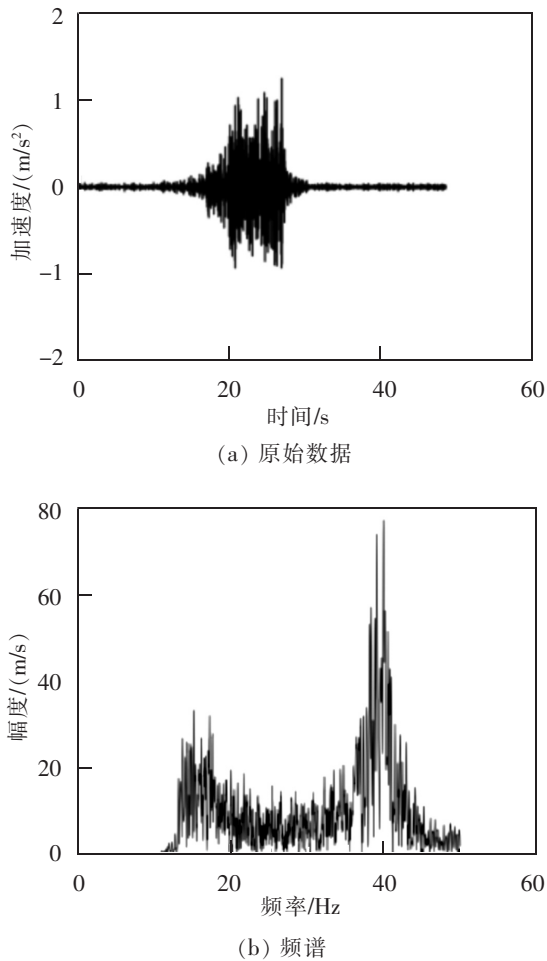


图 1 一趟列车产生的加速度响应

Fig.1 Acceleration signal for a passing train

由图 1(b)可知,轨道板处信号的频谱在 40 Hz 左右有明显的峰值。此外,轨枕处信号的频谱同样在 40 Hz 附近有峰值,而隧道壁处信号的频谱在 20~30 Hz 有较大强度。由于整体轨道板的参振质量小于隧道壁,故其振动能量集中在较高频率的频段,这与既有研究成果接近<sup>[13]</sup>。由上述振动响应分析可知,监测数据在合理范围内且与既有研究接近,系统和数据验证可信。

### 3 振动响应数据的时间特征

本节讨论振动加速度信号随时间变化的情况。按照时序,比较通过测点各趟列车产生的加速度响应,并分别分析单日、一年的结构振动响应监测数据。由图 1 可知,一趟列车经过测点后,会产生一段不规则的响应波形;因此,只有预处理后的信号是具有可比性的。

#### 3.1 单日数据

考察响应信号在一天内的变化情况。由于试验线路的每日 0:00 至 6:00 为天窗时间,没有列车通过,分析范围仅限于 6:00 至次日 0:00。取 2018 年 8 月 4 日全日监测数据,以矩形隧道测量断面为例,采用统计方法<sup>[14]</sup>分析轨枕、轨道板、隧道侧壁 3 个测点的响应信号特征值,结果如图 2 所示。

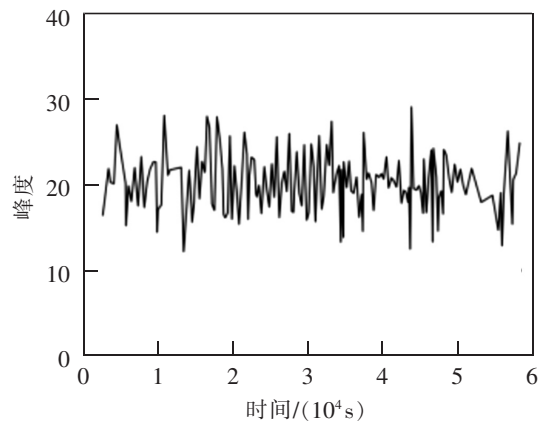


图 2 动力响应的峰度特征值

Fig.2 Kurtosis for the dynamic response

从图 2 可知,在单日内,传感器振动响应的峰度特征随时间的变化具有随机性,但其均值较稳定。其它特征值的规律与峰度特征类似。由此可知,同一处传感器在同一日测得的振动响应,其时域特征值均随着时间随机波动,且具有相对稳定的均值。其中数据的波动主要是因为列车通过所引起,但列车通过后,特征值基本能恢复至列车通过前水平,说明一天内结构的状态较稳定。

#### 3.2 年度数据

进一步考察试验段基础结构振动响应数据在全年内的变化情况。

##### 3.2.1 结构变化敏感特征

从 3.1 节可知,某一传感器的响应信号特征值在同一日内是波动随机、均值稳定的。但伤损生成、轨道结构养护均会影响轨道结构的状态,进而改变其物理参数,最终使得响应信号均值发生偏移。有必要采用损伤敏感特征确定轨道结构发生变化的时间。这里采用响应信号的能量特征<sup>[15]</sup>分析全年的数据。

图 3(a)为试验段某段响应信号的能量谱密度(energy spectrum density)。图中的数据仅包含

15~50 Hz 频率分量,这是因为 15 Hz 以下的频率分量在数据预处理时被过滤,且传感器的采样频率为 100 Hz。

但是,从动力响应数据的长期分析来看,能量谱密度上某频点处的谱强度值随机性太强,不易对比。将其按一定的带宽,积分为若干频段的能量值,同时考虑结构激励力对响应信号的影响。由于激励力变化不在本文的考察范围内,其影响需要被降到最低。由此,归一化处理能量谱密度数据,仅保留其频率分布信息,以此减小激励力变化对响应信号的影响。具体的处理方式如下

$$P(\omega) = \frac{\int_{\omega}^{\omega+\Delta\omega} |S(\omega)|^2 \cdot d\omega}{\int_{\omega} |S(f)|^2 \cdot df} \quad (1)$$

式中: $P$ 为能量谱比例,%; $|S(\cdot)|^2$ 为信号的能量谱密度, $m^2/s^2$ ; $\omega, f$ 为频率,Hz; $\Delta\omega$ 为能量谱比例计算邻域宽度,Hz。在不影响分析准确性的前提下, $\Delta\omega$ 的值被设为 1 Hz。

式(1)中的  $P(\omega)$ ,实际上是信号在  $\omega$  Hz 附近的能量占这段信号总能量的比例,简称为信号在  $x$  Hz 处的能量谱比例(energy spectrum proportion)。图 3(b)为图 3(a)中的能量谱密度计算得到的能量谱比例。

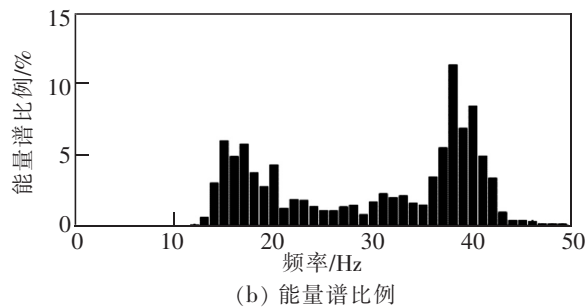
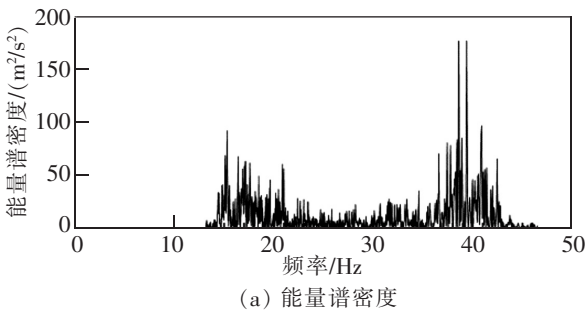


图3 某段车致动力响应信号频谱的能量特征  
Fig.3 Energy feature of the dynamic response for a passing train

图 3(b)中能量谱比例在各频段的分布与图 3(a)中能量谱比例在各频段的分布类似:15,40 Hz 处都存在较为明显的峰值。对单日内所有响应信号的能量谱比例进行聚合以分析年度数据。由 3.1 节可知,信号的特征值在单日内大都较平稳。某传感器一日内采集到的 ESP 值可按照式(2)进行处理

$$D(d, \omega) = \frac{1}{n_d} \sum_{i=1}^{n_d} P(i, \omega) \quad (2)$$

式中: $D$ 为能量谱比例日均值,%; $d$ 为当前监测日数, $d; n_d$ 为第  $d$  天通过传感器的列车数量; $P(i, \omega)$ 为某日第  $i$  趟列车通过时产生的加速度响应信号,在频率  $\omega$  Hz 附近的能量谱比例值; $D(d, \omega)$ 即为在第  $d$  日内,信号在  $\omega$  Hz 附近的能量,占第  $d$  日内这段信号总能量的比例。它实际上是  $P(\omega)$ 的日均值。将 2018 年 5 月 13 日定为第 1 日,将其后一年的能量谱比例日均值按时间顺序绘制成等高线图,如图 4 所示。图中的数字 4, 8, 12, 即该数字所在等高线对应的能量谱比例日均值。表 1 列出了监测年度内,部分频段的能量谱比例日均值的取值范围。

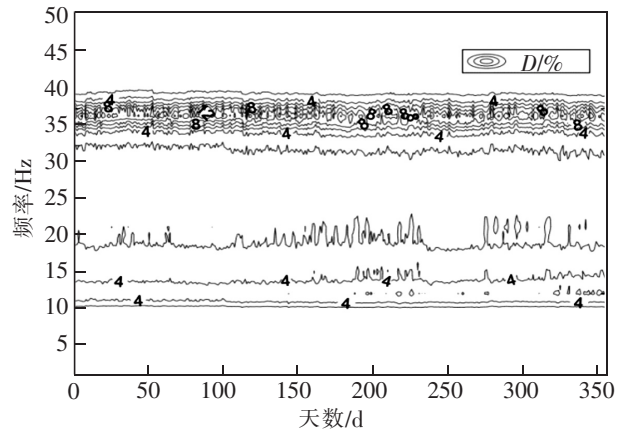


图4 矩形隧道断面轨道板处振动响应年度数据  
Fig.4 Annual dynamic response data of rectangular tunnel section

表1 结构 D 值在部分频段的取值范围

Tab.1 Range of D value in certain bands %

位置	频段/Hz	最大值	最小值
隧道壁	24~25	19.7	3.58
	39~40	2.12	0.36
轨道板	24~25	2.28	1.35
	39~40	13.93	5.19

根据工务台账,被测断面及其附近在本次分析的时间范围内没有进行维护工作。这些数据可以被认为是轨道基础结构正常状态的响应结果。但是,由于测量数据具有随机性,能量谱比例日均值的绝对量无法直接为结构损伤的判断提供参考,需要考察能量谱比例日均值随时间的变化特征。

### 3.2.2 振动响应与结构伤损、结构养护的关系

由 3.2.1 节的假设,可知  $D(d, x)$  值有如下性质:若结构没有发生显著变化,那么在某一频率  $x$  Hz 附近的  $D(d, x)$  值,其分布及数字特征不随时间  $d$  变化。

因此,考察能量谱上每一频率  $x$  Hz 附近的  $D(d, x)$  值均值随时间的变化,可为结构损伤的判断提供依据。分别采用累积和控制图<sup>[6]</sup>及 Haar 滤波<sup>[5]</sup>两种方法在时间序列上估计  $D$  平均能量谱比例日均值,并计算其变化趋势的特征值,由此度量其变化情况。

累积和控制图特征值  $C$  应由以下 3 式计算

$$\Theta(d, \omega) = \frac{1}{w_1 + 1} \sum_{k=d-w_1}^d D(k, \omega) \quad (3)$$

$$\Delta(d, \omega) = D(d, \omega) - \Theta(d, \omega) \quad (4)$$

$$C(d, \omega) = \sum_{i=1}^d \Delta(i, \omega) \quad (5)$$

式中: $\Theta(d, \omega)$ 为第  $d$  天,频率  $\omega$  处近期平均能量谱比例日均值,%; $w_1$ 为平均能量谱比例日均值计算窗宽, $d$ ,为 10 d; $\Delta(d, \omega)$ 为第  $d$  天,频率  $\omega$  处平均能量谱比例日均值与近期平均能量谱比例日均值之差,%; $C(d, \omega)$ 为第  $d$  天,频率  $\omega$  处累积和控制图特征值。可以看出,累积和控制图特征值其实是能量谱比例日均值与其历史均值间偏移量的累加。若能量谱比例日均值在一段时间内保持稳定,那么累积和控制图特征值应当接近 0;若能量谱比例日均值在一段时间内连续增加/减小,那么累积和控制图特征值的绝对值也将产生累积,意味着结构内部产生了变化。

Haar 滤波特征值  $H$  应由下式计算

$$H(d, \omega) = \sum_{m=d}^{d+w_2} D(m, \omega) - \sum_{m=d-w_2-1}^{d-1} D(m, \omega) \quad (6)$$

式中: $H(d, \omega)$ 为第  $d$  天,频率  $\omega$  处的 Haar 滤波特征值; $w_2$ 为 Haar 滤波特征值计算窗宽,为 15 d。可以看出,Haar 滤波特征值其实是能量谱比例日均值在某日前后两段时间内的均值之差。其变化规律与累积和控制图特征值类似。

部分传感器的累积和控制图特征值、Haar 滤波特征值年变化情况如图 5 所示。

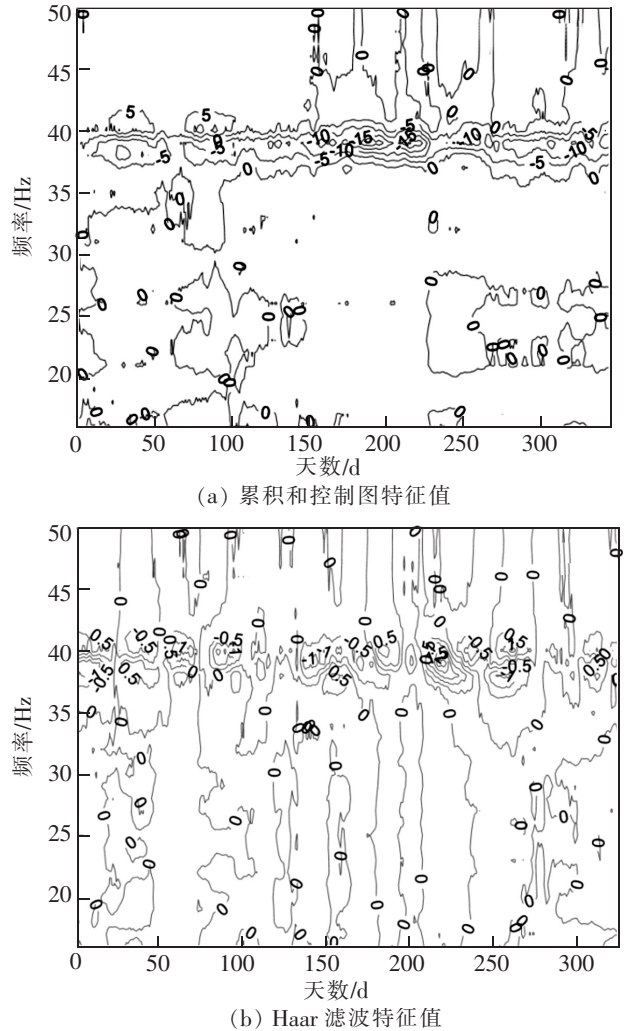


图 5 矩形隧道断面轨道板处动力响应数据年度变化特征值  
Fig.5 Variation feature value for annual dynamic response data of rectangular tunnel section

对比图 5、图 4 可知:振动响应数据变化特征值在信号能量集中的频段波动较大,如 40 Hz 附近的轨道板信号特征值。根据工务线路检修台账,被测断面及其附近的基础结构在本次分析的时间范围内没有经历过轨道结构的维护工作。这些数据可以被认为是轨道基础结构正常状态的响应结果。表 2 列出了监测年度内,部分频段的累积和控制图特征值、Haar 滤波特征值的取值范围。

若在未来的监测中,动力响应数据的变化特征值没有超过表 2 所示的取值范围,那么被测结构同样将处于正常状态,这将为工务部门评价轨道结构的正常状态,制定维修策略提供一定的参考。

表2 结构长期变化特征值在部分频段的取值范围  
Tab.2 Range of variation feature value in certain bands

位置	频段/Hz	特征值	最大值	最小值
隧道壁	19~20	C	26.65	-2.21
		H	1.68	-0.52
	39~40	C	3.32	-3.62
		H	0.37	-0.47
轨道板	19~20	C	3.20	-0.42
		H	0.39	-0.41
	39~40	C	12.69	-13.84
		H	2.00	-1.65

对于不同的测量断面、不同的轨道结构,均可通过此方法进行结构状态演化的测算。首先,在需要监测的结构物上安装相应的传感器;其次,在一定时间内,让传感器采集相应的数据,并于这段时间内的工务检修台账相比对。若这段时间内被测结构出现病害,则将病害出现前后的特征值标定为“异常”。若后续出现类似的异常特征值,即可认为结构再次出现病害,需要进行维护。长期积累数据可对结构病害的发生规律进行估计,并合理安排维护周期,实现轨道基础结构养护维修的精细化管理。

#### 4 结论

依托国内轨道交通某线路上长达一年的基础结构振动响应监测数据,分析了车致振动响应数据的特征,结论如下:

1) 随着传感器与振源距离增加,轨枕、道床和隧道管片3处的车致动力响应信号幅值相应减小。选择的振动响应监测及其传感器测量结果与既有研究相近,能较好地监测和评价轨道基础结构动态响应特征。

2) 在基础结构正常状态下,车致振动响应数据的时、频特征值具有平稳随机性,趋势基本稳定,可以用于分析结构的长期状态。

3) 基于谱分析方法,提出了以能量谱密度、累积和控制图及 Haar 滤波为基础的结构变化特征值计算方法。在监测期内,反映出基础结构处于正常的状态,其年度频率特征值和最值可以用于评价后续的基础结构状态情况。

目前安装的加速度计监测范围为 0~100 Hz。后续将在线路上安装采样率更高的传感器,并配备 5G 通信设备及高性能存储设备,以便对轨道基础结构中高频段响应的长期演化规律进行进一步分析。

#### 参考文献:

- [1] 中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要[R]. 北京:中国城市轨道交通协会,2020:21.
- [2] 项瑞聪,杨龙才,王炳龙. 路基填筑引起水泥搅拌桩复合地基变形监测分析[J]. 华东交通大学学报,2020,37(2):38-45.
- [3] 刘磊. 城市轨道交通运营期主体结构变形监测分析[J]. 工程建设与设计,2018(20):28-29.
- [4] 张颜,李素贞,张弛,等. 高速交通轨道梁高精度光纤变形监测[J]. 浙江大学学报(工学版),2018,52(2):325-332.
- [5] 梅琴. 郑徐高铁 CRTS III 型板式无砟轨道结构服役状态监测[J]. 铁道勘测与设计,2018(3):5-8.
- [6] 孙茂棠,雷晓燕,刘庆杰. 基于 LabVIEW 的无缝线路钢轨温度实时监测系统开发[J]. 华东交通大学学报,2014,31(3):50-54.
- [7] 魏汉明,赵靛. 基于多传感信息融合技术的城市轨道交通风险监控系统[J]. 山西电子技术,2019(2):6-7.
- [8] 郑建颖,王卿,孙荣川,等. 基于无线传感器网络的轨道交通结构健康监测系统[J]. 实验科学与技术,2016,14(2):72-74.
- [9] 颜永逸,翁顺,李鹏辉,等. 轨道交通地下结构安全监测与管养系统的实现[J]. 土木工程与管理学报,2018,35(4):152-157.
- [10] 许敏娟,周宇. 基于光纤光栅技术的城市轨道交通基础结构沉降实时监测研究[J]. 城市轨道交通研究,2017,20(3):63-67.
- [11] 许敏娟,顾修竹. 基于光纤光栅技术的轨道交通基础结构沉降实时监测系统应用分析[J]. 城市轨道交通研究,2016,19(11):68-72.
- [12] 冯青松,张运来,陈艳明,等. 减振扣件对地铁隧道-地表振动特性影响分析[J]. 铁道工程学报,2020,37(1):101-108.
- [13] 林渝轲,吴梦瑶,王平. 120 km/h 地铁多种减振轨道结构现场测试与分析[J]. 铁道标准设计,2018,62(2):67-71.
- [14] FARRAR C R, WORDEN K. Structural health monitoring: a machine learning perspective[M]. West Sussex: John Wiley & Sons, 2012: 173.
- [15] LEDERMAN G, CHEN S, GARRETT J, et al. Track-monitoring from the dynamic response of an operational train[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 87: 1-16.
- [16] 国家标准化管理委员会. GB/T 17989.4-2020 控制图第4部分:累积和控制图[S]. 北京:中国标准出版社,2020.