

# 铁路路基激振动力在工程施工中的应用

刘庆贺

中铁建设集团有限公司西南分公司, 中国·四川 成都 610051

**摘要:** 通过构建动态响应监测系统, 对试验路基在不同深度位置的加速度响应进行了实时监测和数据采集。基于采集到的加速度时程数据, 运用功率谱分析方法, 深入分析了路基在激振荷载作用下的动力响应特性。研究发现, 路基各层在不同频段内呈现出不同的功率谱特征, 反映了路基结构的动力性能和施工质量。通过对比不同测点的功率谱, 可以准确识别出路基中的潜在问题, 为施工质量的评估和优化提供有利依据。

**关键词:** 铁路路基; 激振; 动力特性; 工程施工

## Application of Railway Subgrade Excitation Force in Engineering Construction

Qinghe Liu

China Railway Construction Group Co., Ltd. Southwest Branch, Chengdu, Sichuan, 610051, China

**Abstract:** By constructing a dynamic response monitoring system, real-time monitoring and data collection of the acceleration response of the test roadbed at different depth positions were carried out. Based on the collected acceleration time history data, the power spectrum analysis method was used to deeply analyze the dynamic response characteristics of the roadbed under excitation loads. Research has found that each layer of the roadbed exhibits different power spectrum characteristics in different frequency bands, reflecting the dynamic performance and construction quality of the roadbed structure. By comparing the power spectra of different measuring points, potential problems in the roadbed can be accurately identified, providing a strong basis for evaluating and optimizing construction quality.

**Keywords:** railway subgrade; excitation; power characteristics; engineering construction

## 0 前言

随着铁路交通的快速发展, 对路基施工质量的要求也日益严格<sup>[1,2]</sup>。路基作为铁路线路的重要组成部分, 其施工质量直接关系到列车运行的平稳性和安全性。因此, 如何科学、有效地评价路基施工质量, 成为铁路工程领域亟待解决的关键问题<sup>[3,4]</sup>。传统的路基施工质量评价方法主要依赖于静载试验和外观检测等手段, 这些方法虽然简单易行, 但难以全面反映路基在动态荷载作用下的真实性能。近年来, 随着振动测试技术的发展, 路基施工质量评价方法逐渐受到关注<sup>[5]</sup>, 其中功率谱分析作为一种有效的信号处理方法, 能够揭示振动能量在不同频率上的分布情况, 从而更深入地了解路基的动力特性。

目前, 路基施工质量评价方法在国内外已有一定的研究基础。然而, 这些研究大多集中在理论分析和模拟实验方面, 对实际工程应用的指导意义有限。因此, 论文旨在通过实际工程监测, 探讨基于功率谱的铁路路基施工质量评价方法的应用效果。本研究首先叙述了基于功率谱的路基激振施工质量评价方法, 对试验路基在激振荷载作用下的加速度响应进行了实时监测和数据采集。然后, 运用功率谱分析方法, 对采集到的加速度时程数据进行了深入处理和分析。通过对比不同测点的功率谱特征, 揭示了路基各层在动态荷载作用

下的动力响应规律。

## 1 基于功率谱的路基激振施工质量评价方法

为了实现路基振动功率谱的计算和施工质量的评价, 需要通过以下几个步骤展开:

①数据采集: 在铁路路基上布置加速度传感器, 实时采集激振时路基的加速度信号。为了获得准确的振动特性, 应确保传感器的布置位置合理, 能够反映出路基振动的关键信息。

②信号预处理: 对采集到的加速度信号进行预处理, 包括去噪和基线校正等操作。这些操作有助于消除信号中的干扰成分, 提高功率谱计算的准确性。

③傅里叶变换: 对预处理后的加速度信号进行傅里叶变换, 将其从时域转换到频域。傅里叶变换可以采用快速傅里叶变换 (Fast Fourier transform, 简称 FFT) 算法, 以提高计算效率。

④功率谱计算: 根据傅里叶变换的结果, 计算振动功率谱密度函数。功率谱密度函数可以通过对变换后的频域信号进行平方和积分得到。在实际计算中, 可以采用离散化的方法, 将连续的频域信号划分为若干个频率区间, 计算每个区间内的平均功率谱密度。

⑤结果分析: 根据计算得到的功率谱密度函数, 分析

路基振动的频率成分和能量分布。通过对比不同条件下的功率谱,可以揭示路基振动特性的变化规律,为铁路路基的施工质量评价提供依据。

## 2 路基激振工程监测及其动力特性分析

### 2.1 工点概况

试验段位于京雄城际铁路霸州车站 DK61+000 路基断面。试验段路基底面宽约 40m, 顶面宽约 30m, 填筑高度约为 4.5m, 采用 A、B 组粗角砾料进行填筑。通过在前期试验中对该填料进行颗粒级配和含水率测试, 其结果表明该段路基填料颗粒级配良好, 在实际工程中被广为采用, 具有较好代表性。在未铺轨的路基上路基单侧行车线路放置一块 2.8m × 1.2m × 0.4m, 激振器位于混凝土板的中心位置。在混凝土板正下方路基基床内部埋设有加速度计, 激振体采用双轴惯性激振原理, 两个输出轴以相同的转速反向运动。通过惯性力的合成, 在竖直方向产生需要的激振力, 而在水平方向的惯性合力为零。通过组合不同的配重块改变偏心动量距, 再配合不同的加载频率, 就会产生相应的激振力。现场激振试验主要探讨不同激振频率、动应力水平下路基动力响应及传播规律。为模拟不同轴重列车、不同车速动载, 本次

试验根据日本新干线简化计算方法计算设备激振力, 其动轮载  $P_d$  可表示为:

$$P_d = P_s(1 + 0.3v/100)$$

式中:  $P_s$  为静轴重;  $v$  为列车运行速度。

为分析路基不同位置的动力响应特性, 于试验路基中布置了动态响应监测系统, 分别在埋深 0.20m (第一层), 1.60m (第二层), 4.30m (第三层) 处布置了加速度传感器, 其中第一层加速度计 2 个, 第二层 1 个, 第三层 2 个, 激振荷载为扭力 1022.6kg · cm, 频率为 8Hz。

### 2.2 振动加速度特征分析

加速度传感器采用东华测试生产的 1C303 型三向加速度传感器, 量程为 ±16.0g, 灵敏度为 0.57mV/g。数据采集仪采用东华测试 32 通道的 DH5230 动态数据采集分析仪, 采样频率为 5000Hz, 能完整的记录路基动态响应的波形, 并同步监测动土压力、加速度等多个指标。该采集系统具有对动态应变信号进行实时示波、采集、信号电压与应变折算, 信号回放及频谱分析等功能, 可与电脑相连接, 对动态信号进行实时采集、存储、显示。经过去噪和基线矫正后, 三层土体的不同测点加速度时程见图 1~ 图 3 所示。

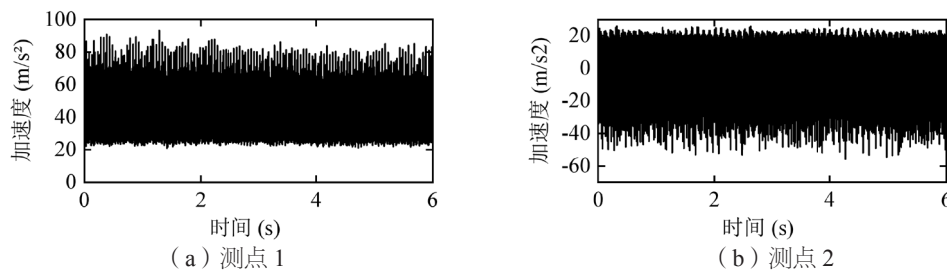


图 1 第一层加速度测点的时程

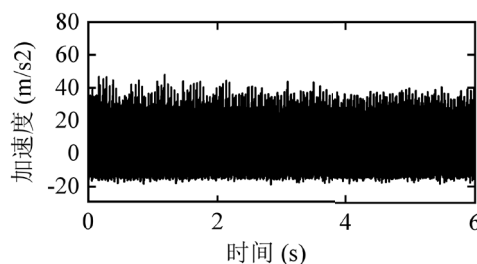


图 2 第二层加速度测点 (测点 3) 的时程

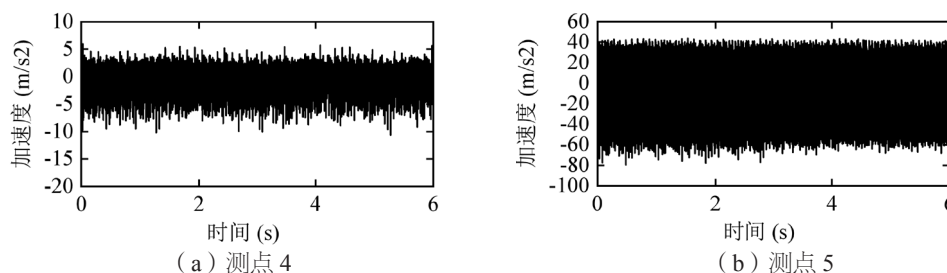


图 3 第三层加速度测点的时程

综合分析图 1~ 图 3 可知,从加速度波动幅值来看,第一层加速度测点的测点 1 和测点 3 加速度波动幅值较大,分别为  $100\text{m/s}^2$  和  $60\text{m/s}^2$ ,第二层加速度测点的测点 3 加速度波动幅值中等,约为  $60\text{m/s}^2$ ,而第三层加速度测点的测点 4 和测点 5 加速度波动幅值较小,分别为  $15\text{m/s}^2$  和  $100\text{m/s}^2$ 。结果表明,在激振荷载作用下,路基上层的振动响应较为剧烈,振动能量较大;而随着深度的增加,振动能量逐渐衰减,路基下层的振动响应相对较弱,主要是由于振动波在路基中的传播过程中受到材料的阻尼作用,导致能量逐渐耗散。

对比第一层测点 1 和测点 2 的加速度波动幅值,发现测点 1 的幅值明显大于测点 2,可能是由于测点 1 和测点 2 在路基中的具体位置、周围土质条件或传感器安装等因素的差异所致,此外,第三层测点 4 和测点 5 的加速度波动幅值也存在较大差异,这同样可能与路基内部的非均匀性、传感器布置位置等因素有关。

从加速度时程曲线来看,各测点的振动波形均呈现出一定的周期性,这与激振荷载的频率 ( $8\text{Hz}$ ) 相吻合。同时,波形中还存在一些随机波动成分,这可能是由于列车行驶过程中的不稳定性、路基材料的非线性等因素引起的。这些随机波动成分对于路基的长期稳定性和安全性具有潜在影响,

因此在动力特性分析中应予以关注。

相比于功率谱分析,加速度时程在动力特性分析中存在一定的不足。第一,加速度时程只能反映路基在某一时刻的振动状态,而无法揭示振动能量在不同频率上的分布情况。而功率谱分析则可以通过对加速度信号进行频谱转换,得到振动能量随频率的变化规律,从而更全面地了解路基的动力特性。第二,加速度时程对于非周期性振动信号的分析能力有限,难以准确提取出信号中的特征频率成分。而功率谱分析则可以通过对信号进行傅里叶变换,将时域信号转换为频域信号,从而更准确地识别出振动信号中的频率成分。

### 2.3 功率谱规律特征分析

本次计算基于试验路基中采集的加速度时程数据,通过快速傅里叶变换 (FFT) 算法,将时域信号转换为频域信号,从而得到各测点的振动功率谱,其中 FFT 算法具有高效性和精确性,适用于处理大量数据。在计算过程中,首先对每个测点的加速度时程数据进行预处理,包括去噪、基线矫正等操作,以消除信号中的干扰成分并提高信噪比。然后,应用 FFT 算法对预处理后的数据进行频谱分析,得到各测点的功率谱密度函数。在计算完成后,通过对比各测点的功率谱特征,可以分析路基不同位置的动态响应特性,见图 4~ 图 6 所示。

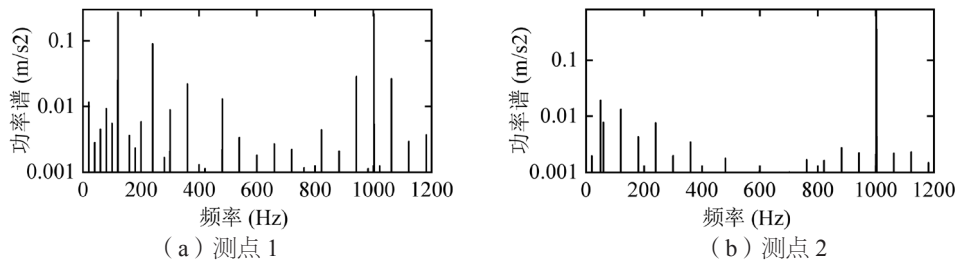


图 4 第一层加速度测点的功率谱

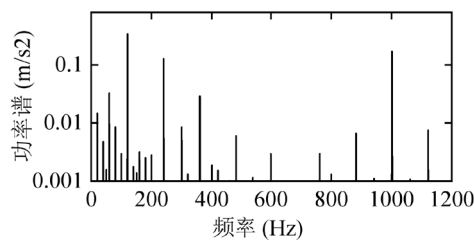


图 5 第二层加速度测点 (测点 4) 的功率谱

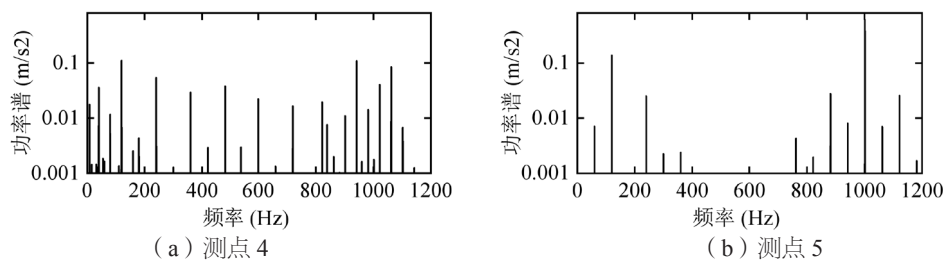


图 6 第三层加速度测点的功率谱

综合分析图 4~图 6 可知,可以发现以下主要特征:

①第一层、第二层和第三层加速度测点的功率谱在 100~300Hz 和 900~1100Hz 频段内均存在明显的能量分布,反映了路基在这些频段内对激振荷载的响应较为敏感,可能与路基材料的固有频率以及激振荷载的特性有关。

②随着路基深度的增加,各频段内的功率谱密度值呈现出逐渐减小的趋势,主要是由于振动波在路基中传播时受到材料的阻尼作用,导致能量逐渐耗散。

③第三层测点 4 的功率谱在 100~1100Hz 范围内相对均匀分布,这可能意味着该深度处的路基结构对振动能量的分布具有较好的均匀性,反映了施工质量的均匀性。

因此,相比于加速度时程分析,功率谱在铁路路基施工质量评价中具有以下优势:

①功率谱能够直观地展示振动能量在不同频率上的分布情况,从而揭示路基结构的固有频率和振动特性,这有助于更深入地了解路基的动力性能,进而评估施工质量。

②通过频谱分析,可以消除加速度时程中的噪声成分,提高信号分析的准确性,对于在复杂环境下进行路基施工质量评价具有重要意义。

③功率谱分析可以提取出振动信号中的特征频率成分,有助于识别路基结构的潜在问题和优化设计方案,通过对比不同测点的功率谱特征,可以发现施工质量问题所在,为后续的改进提供依据。

### 3 结论

通过布置动态响应监测系统,对试验路基在激振荷载作用下的加速度响应进行了全面分析,结合加速度时程和功率谱分析,深入探讨了路基不同位置的动力响应特性,并基于功率谱分析提出了铁路路基施工质量的评价方法。

①铁路路基在激振荷载作用下的动力响应特性呈现出明显的随深度衰减规律,路基上层的振动响应较为剧烈,下层则相对较弱。②功率谱分析是评价铁路路基施工质量的有效方法,通过功率谱分析可以全面了解路基结构的动力特性,揭示振动能量在不同频率上的分布情况,进而评估施工质量。③在铁路路基施工质量评价中,应综合考虑加速度时程和功率谱分析的结果,以更准确地识别路基结构的潜在问题,为后续的改进提供依据。

#### 参考文献:

- [1] 卢星宇,王虹,杨浩然.公路工程路基施工质量控制的关键技术研究[J].城市建设理论研究(电子版),2023(26):103-105.
- [2] 孙健.公路工程路基施工质量控制技术探讨[J].中小企业管理与科技(下旬刊),2021(4):148-149.
- [3] 曹秀蒙.铁路路基施工质量控制要点分析[J].山东农业工程学院学报,2020,37(7):32-35.
- [4] 李书博.广佛肇高速花岗岩残积土路基湿度平衡规律与施工质量控制研究[D].重庆:重庆交通大学,2018.
- [5] 宋营军,唐建亚,黎享.基于数字化的高速公路路基施工过程质量评价方法研究[J].现代交通与冶金材料,2023,3(1):71-75.