

the moving average method, high pass filter and frequency domain integration, the reconstructed displacement signal was obtained through multiple rounds of smoothing, filtering, and integration to avoid signal distortion. The main advantage of this method was that there was no long period drift in the reconstructed displacement. The accuracy and reliability of this method were verified by comparing with the measured data of shaking table.

Key words: track irregularity; acceleration integration; frequency domain integration; displacement reconstruction; 6-DOF vibration platform; low-frequency attenuation

轨道几何检测系统是检测轨道不平顺的重要设备,在实际动态检测过程中,车辆的振动和构架的运动姿态会对其所载的检测系统的检测精度造成一定的影响^[1-2]. 因此,需要对检测车辆运行过程中的构架姿态进行研究,测量并重构构架的运行姿态,从而评价检测系统性能,提高检测系统精度. 目前测量结构的位移大多是通过测量结构加速度数据转化获取振动位移响应^[3]. 但在实际采集加速度信号过程中,常常伴有各种噪声的干扰,会出现由低频噪声引起的趋势项干扰或漂移误差,并随着时间的积累对正确结果产生严重偏置,使位移结果完全失真^[4-5]. 因此,如何减少加速度积分中趋势项漂移误差和高频噪声误差的干扰一直是国内外学者研究的主要问题.

目前,加速度积分主要采用时域积分法和频域积分法,其中时域积分需要有效地拟合趋势项对结果的影响来消除积分误差,而通过快速傅里叶变换(FFT)和快速傅里叶逆变换(IFTT)能有效抑制一些积分误差,成为经典的频域积分方法. 陈太聪等^[6]根据频谱累积能量曲线拟合函数参数来提取主要积分频段信息,提高了积分精度和抗噪性. 张志等^[7]提出利用经验模态分解(EMD)方法消除趋势项干扰,但依赖最小截止频率的选取. Lee 等^[8]提出了一种适用于低频主导结构的加速度积分位移方案,引入了重叠时间窗来提高重建位移精度和抑制低频噪声,但当目标频率设置比较低时,在频域内容易发生振荡. Hong 等^[9]提出了两种基于测量加速度信号的有限脉冲响应(FIR)滤波器来重建动态位移,但低频噪声对积分精度的影响难以控制. Park 等^[10]将 FEM-FIR 滤波器用于对弹性固体的实测动态加速度积分位移及降噪,并且用于系统辨识等问题. Brandt 等^[11]提出了用低频截止算法对测量加速度进行位移重建,首先对加速度信号进行 FFT,然后将含噪声加速度频率范围内振幅的低频部分直接置零,根据加速度谱、速度谱和位移谱的比例关系得到位移的时域波形.

Zhu 等^[3]根据低频截止算法,提出了低频衰减算法,该算法依赖于目标频率的选择.

基于以上文献,发现相对于时域积分去趋势项的方法,频域积分避免了误差的累积,但目前频域积分大部分为舍弃低频部分来减少漂移误差,会造成有用低频信号的丢失. 本文采用频域积分法,根据低频衰减算法提出了一种基于滑动平均的低频衰减频域积分重构位移算法,能够在最大程度保留低频信息的同时,有效抑制实际测量过程中噪声的影响. 该方法首先对加速度信号进行预处理,包括去噪、平滑以及滤波,来去除低频噪声影响,然后在频域内积分,避免了频域振荡的发生. 利用标准正弦信号和加噪声的正弦信号对所提算法进行数值模拟验证,同时引入误差图判定积分位移的准确度. 最后,通过搭建实验平台,对本文提出的算法进行验证,并结合工程实例进行了应用特性研究.

1 频域积分原理

1.1 测量加速度的数学模型

对于车体构架姿态分析,需要将测量的加速度数据积分为位移数据,但在实际测量中,得到的加速度信号不可避免地会存在干扰项,包括随机干扰和直流分量. 随机干扰是随时间变化的量,可以认为是时间的函数,直流分量是加速度计在温度、气压等环境因素影响下而产生的相对于基线的漂移^[12]. 因此实际测量的加速度可以表示为

$$a(t) = a_s(t) + a_n(t) + C \quad (1)$$

式中: $a_s(t)$ 为实测加速度的结构信息; $a_n(t)$ 为测量加速度的随机干扰部分; C 为测量加速度的直流分量. 通常,对加速度二次积分得到结构位移信号,如果考虑初始速度和初始位移的影响,可写为

$$x(t) = \int v(t) + x(0) = \iint a_s(t) dt dt + \iint a_n(t) dt dt + \frac{1}{2} Ct^2 + \lambda t + v(0)t + \eta + x(0) \quad (2)$$