

大跨铁路桥梁动振幅提取方法探索

邓龙飞

湖南联智科技股份有限公司

摘要: 为准确获取大跨铁路桥梁的动振幅,提出了基于频域积分算法的动振幅提取方法。该方法是利用振动传感器测试的速度信号进行频域积分获取桥梁的动振幅。通过数值仿真和对铜陵长江大桥健康监测系统采集的振动速度信号分别采用时域积分算法联合小波分析去趋势的方法和本文设计的频域积分算法获取的桥梁动振幅进行比较。结果表明:对振动速度信号进行频域积分获取的动振幅是准确可信的,频域积分结果与理论积分结果的相关系数大于0.9,具有高度相似性。实测数据积分结果表明,频域积分算法在实测数据上处理有参数设置简单、稳定,积分结果准确、可靠的特点。本文设计的频域积分获取动振幅算法为铁路桥梁动载测试、检定测试和健康监测系统的动振幅获取提供了参考方法。

关键词: 铁路桥梁; 频域积分; 时域积分; 动振幅; 速度; 小波分析

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2021.22.057

一、引言

桥梁的振动一般由环境激励以及人为激励引起。铁路桥梁由于主要人为激励源是列车,不仅垂直方向振动大,而且蛇行波等引起的激励使水平方向的振动也非常大。铁路桥梁的振幅过大会影响乘客的舒适性甚至导致脱轨的严重后果,因此铁路桥梁动振幅是一个非常重要的参数。在很多情况下动振幅是无法直接进行测试的,例如大跨度桥梁,高楼的楼顶等直接测试动振幅几乎是不可能的。利用加速度信号或速度信号积分得到动振幅是一种行之有效的方法。

积分方法有硬件积分方法和数值积分方法,早期常采用硬件积分方法,但电子元器件的性能参数具有很大的离散性,若匹配不好,很容易使积分后的波形产生畸变,影响测量结果;而高性能的积分器价格十分昂贵,通道很多时会大幅度提高试验成本。随着计算机技术的发展、普及和应用,相对于硬件积分的不足,数值积分正越来越受到用户的重视,得到广泛的运用。数值积分方法有时域积分法和频域积分法,时域积分方法有梯形求积的数值积分法和辛普森数值积分法。

铁路桥梁动测试的加速度信号或速度信号夹杂着一定的趋势项、低频噪音、高频噪音、脉冲信号等干扰信号。信号处理中通常在积分前对加速度时域信号或速度时域信号用滤波、平滑、小波等方法去趋势项处理。但是趋势项不可能完全去除,结构本身因为受到静力作用产生的位移也无法去除,同时时域积分本身产生的常数项,因此积分处理的效果和精度都受到了一定影响,振幅响应曲线产生漂移。针对铁路桥梁动振幅测试的特点,本文提出了基于频域积分的速度信号处理方法,介绍了速度与位移两个振动参量在频域上的转换规律,该方法简单实用,对大跨铁路桥梁动振幅测试的精度提高起到很大的作用^[1-4]。

二、频域积分算法原理

数值数值积分算法的信号处理流程为:去均值-数字滤波-积分处理-标定系数。数值积分的关键在积分处理算法,选择何种积分算法对积分精度有很大的影响。频域积分算法是先对加速度信号或速度信号进行傅里叶变换,将时域信号转换为频域信号,然后将变换结果在频域里进行积分计算,最后将运算的结果再经傅里叶逆变换得到积分后的时域信号。

三、数值仿真

为了证明提出的频域积分在动振幅获取的数据处理方法的有效性,需要进行数值仿真。仿真原始速度信号是大跨铁路桥梁常规振动频率 $f=0.4\text{Hz}$ 的正弦波,即 $v=A\sin(\omega t)$,其中, $\omega=2\pi f$ 。测试系统和环境干扰的噪声以信噪比为20db的高斯白噪声进行模拟,由于列车荷载作用产生的静态变形以远低于大跨桥梁常规振动频率的低频正弦波模拟,由于桥梁构件局部振动响应等产生的高频干扰以高于桥梁激励荷载频率的高频正弦波模拟,信号离散后的模拟采样频率为200Hz。

原始速度信号的理论积分结果为 $s = \frac{-A}{\omega} \cos(\omega t)$,

加噪后的信号分别采用时域梯形积分、和按本文提出的频域积分方法进行积分。时域梯形积分和频域积分与理论积分结果对比如图1所示,梯形积分与理论积分结果的相关系数为0.008,频域积分与理论积分结果的相关系数是0.993。结果表明在有干扰的情况下,频域积分和理论积分相关系数大于0.9,具有高度相似性,而梯形积分与理论积分的相关系数小于0.1,没有相似性。

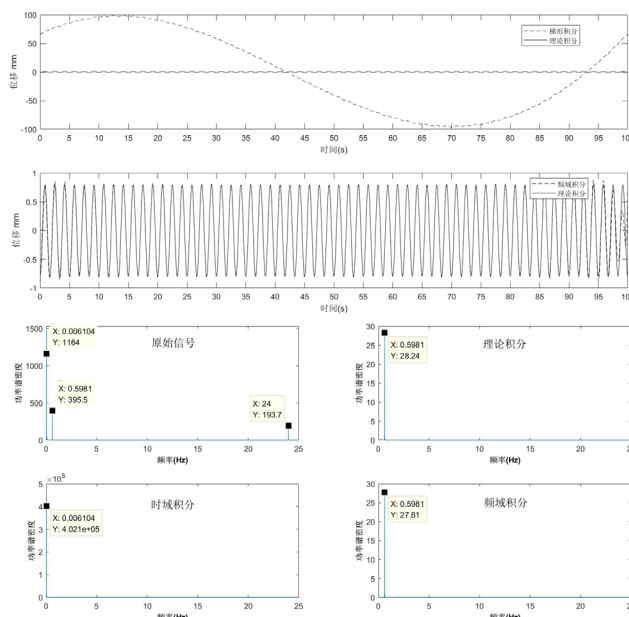


图1 时域梯形积分和频域积分与理论积分结果对比

从图1可以看出,相对与理论积分,由于低频干扰的放大,梯形积分中混入了由于静载作用混入的低频干扰。梯形积分经小波去趋势处理后的结果与理论积分的相关系数为0.923,具有高度相似性。以上结果表明,在混入了高斯白噪声、低频和高频干扰的情况下,时域梯形积分与理论积分结果没有相似性,时域梯形积分结果经小波去趋势后以及频域积分与理论积分结果具有高度相似性,其中频域积分结果优于经小波去趋势的时域梯形积分结果。

四、工程应用

铜陵长江大桥主桥全长1290m,为两塔五跨桁架公铁两用斜拉桥,主跨630m,跨径布置为90m+240m+630m+240m+90m。钢桁主梁为板桁结合结构,N型桁架。主桁宽度定为2×17.1m,横向采用三片主桁布置,桁高15.5m,节间长度15m。斜拉索为扇形三索面布置,共228根,主梁上拉索间距均为15m。采用抗拉强度标准值为1860MPa的镀锌钢绞线斜拉索(单股索股绞线直径为φ15.2mm),锚具采用夹片群锚。主塔为菱形钢筋混凝土结构,桥面以上呈倒“Y”形,塔高212m。成桥试验时测得的横向一阶自振频率为0.2686Hz。

铜陵长江大桥健康监测系统于2015年7月建成运营,该系统在主桥主梁四分点布置了横向振动测点,振动传感器为DH610型低频速度传感器,采集系统采用24位A/D低噪采集设备,采样频率200Hz。提取列车通过铁路桥梁时的主跨跨中横向传感器采集的速度信号进行分析,其典型时程和频谱如图2所示,由图2可以看出提取的铜陵长江大桥横向振动速度信号中既有0.006Hz的低频干扰又有高频噪声。

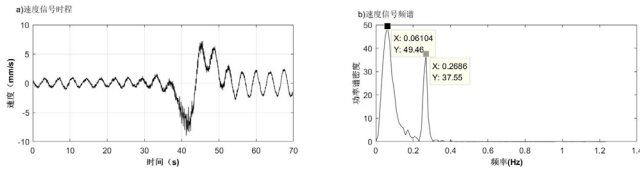


图2 铜陵长江大桥跨中测点横向振动速度时程及频谱典型图

按照前述设计的频域积分处理方法和梯形积分对提取的速度信号进行积分并对梯形积分后的结构进行小波分析去趋势,处理后的典型时程及频谱如图3所示,提取多次列车过桥时的振动信号积分处理结果如表1所示。

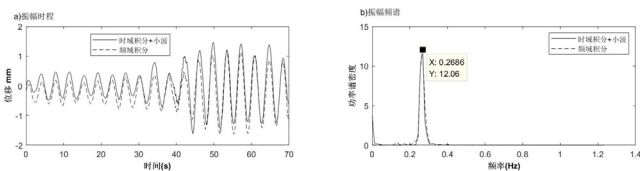


图3 铜陵长江大桥跨中测点横向动振幅时间及频谱典型图

由图4和表1可以看出两种积分方法计算的动振幅基本一致,动振幅的主频一致,相似程度均超过了0.9,具有高度相似性。总体上梯形积分+小波分析的动振幅结果较频域积分计算的动振幅偏大,频域积分的振幅时程曲线相对较光滑。两者差异来源主要是时域梯形积分

表1 铜陵长江大桥跨中测点动振幅获取结果

次序	时域积分+小波动振幅/mm	频域积分动振幅/mm	相关系数
第1次	1.5386	1.4056	0.95
第2次	2.4851	1.9208	0.96
第3次	1.9583	1.8829	0.92
第4次	1.1395	0.9748	0.94
第5次	1.0236	0.9198	0.95
第6次	2.3460	2.1099	0.91
第7次	2.0111	1.5935	0.94
第8次	1.0139	0.7712	0.95
第9次	0.8573	0.8104	0.96
第10次	1.0138	0.9669	0.92

法后利用小波分析去趋势时无法做到低频趋势项的完全去除。在实测信号情况下,相对于梯形积分+小波的积分方法,频域积分法在获取动振幅时,设置参数较为稳定,结果更为可靠。

五、结论

大跨铁路桥梁横向动振幅对铁路运营安全和乘客的舒适性具有重要的影响,准确获取桥梁动振幅是分析和评估铁路桥梁运营安全的基础。大跨铁路桥梁无法直接测试桥梁动振幅,本文通过数值仿真和实测数据对速度信号采用频域积分法获取桥梁的动振幅,结果表明:在混入了高斯白噪声、低频和高频干扰的情况下,时域梯形积分与理论积分结果没有相似性,时域梯形积分+小波结果及频域积分结果与理论积分结果具有高度相似性,频域积分结果优于经小波去趋势的时域梯形积分结果。通过实测振动速度信号积分获取动振幅的结果,相对于梯形积分+小波的积分方法,频域积分法获取动振幅时,设置参数较为稳定方便,结果更为准确可靠。频域积分算法在铁路桥梁检定及桥梁健康监测系统准确获取动振幅上具有很强的工程实用价值。

参考文献

[1] 刘汉夫.从系统的频响特性看桥梁振动测试中的幅值分析法[J].铁道工程学报,2002(02):25-29.
 [2] 卜建清,娄国充,罗永会.铁路桥梁横向振幅超限的原因及加固减振方法探讨[J].铁道工程学报,2000(01):45-48.
 [3] 卫星,刘名君,李俊,强士中.大跨度铁路无砟轨道桥梁动力性能试验研究[J].中国铁道科学,2008(05):40-45.
 [4] 李运生,阎贵平,王元清,张彦玲.铁路桥梁梁墩体系墩顶横向振幅的参数影响分析[J].铁道建筑,2007(03):21-24.
 [5] 王济,胡晓. MATLAB在振动信号处理中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,知识产权出版社.2006:104-107
 [6] 余萍,胡孝平. MATLAB在振动台试验数据处理中的应用[J].水利与建筑工程学报,2008.6(1):121-122
 [7] 范术娟,赵维刚.桥梁动位移测试的数字处理方法研究[J].国防交通工程与技术,2011(1):15-18.