

图5 不同信噪比情况下信号的位移结果与误差  
Fig.5 Integrated results displacement plus white noise with different SNR, and the errors

3 实验研究及结果验证

3.1 实验方案

为了验证该算法的实用性,设计如图6所示的六自由度振动台,该振动台具有横向、垂向、转角运

动等功能,可模拟火车在铁轨上运行时轨道几何不平顺引起的构架位移变化.提供不同类型的运动位移和加速度输入信号给六自由度振动台,实验采用PCB M352C65 陶瓷剪切 ICP 型加速度计,固定在振动台上测量振动台中点的加速度,其灵敏度为100 mV/g,频率范围为0.5~10.0 kHz.

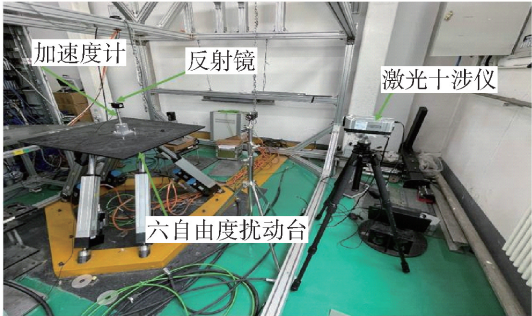


图6 振动台实验装置  
Fig.6 Devices for the shaking table test

同时采用高精度双频激光干涉仪进行振动台的位移测量,并将其位移测量结果作为标准数据,与加速度计测量得到的数据通过本积分算法后的位移信号进行比较.验证不同测试频率下,本算法对振动台垂向、横向数据积分的准确性.实验中采用正弦信号或多频率叠加正弦信号驱动振动台,同时记录加速度和位移信号,调整激光干涉仪的采样频率与加速度计采样频率相同,使数据具有可对比性.

3.2 标准正弦信号测试

首先采用频率为5 Hz、振幅为2 mm 的标准正弦信号驱动振动台,采样频率均为1 000 Hz,采集0~8 s内的实测加速度时程波形图如图7(a)所示.对采集的加速度信号做FFT,得到加速度信号的幅值谱如图7(b)所示,可以看出除激励频率5 Hz外,还存在着多种倍频干扰.将本文提出的频域积分方案应用于实测加速度数据,得到积分位移结果和实测位移结果作对比如图8(a)所示,图8(b)显示了1.5~2.5 s的对比结果局部放大图,积分位移信号与实测位移信号波形相似,只是幅值存在差异,其积分位移误差图如图8(c)所示.由于存在未知初始条件引起的不稳定状态,开始积分部分误差较高,但总体误差始终低于0.08,结果满足使用要求.

为了检验积分位移曲线和实测位移曲线的频谱特性,图8(d)中比较了积分位移和实测位移的频谱特性,通过对比发现5 Hz 的主要频率保留,而其他的频率成分则被大幅衰减,证明去噪声和滤波效果