

10、15 和 20 Hz, 加速度幅值分别为 10、20 以及 30 m/s^2 . 取离散信号序列的采样频率为 1 000 Hz, 加速度信号表示为

$$a(t) = 10\sin(20\pi t) + 20\sin(30\pi t) + 30\sin(40\pi t) \quad (15)$$

理论上的位移信号为

$$x(t) = -\frac{10}{(20\pi)^2}\sin(20\pi t) - \frac{20}{(30\pi)^2}\sin(30\pi t) - \frac{30}{(40\pi)^2}\sin(40\pi t) \quad (16)$$

对上述加速度信号积分 2 次得到位移信号, 并与标准位移信号作对比, 如图 4(a) 所示, 可以看出由于积分端点值不确定以及截断误差的影响, 在最初的 0.2 s 误差较大, 之后的整个时间段内积分与标准位移信号拟合程度较好. 然后, 对 1.175 ~ 1.190 s 区间内的位移信号局部放大, 如图 4(b) 所示, 可以看出积分位移信号与标准位移信号频率大小相同, 波形相似, 只是幅值略有差异. 对上述积分位移信号做 FFT, 得到如图 4(c) 所示的频谱图, 发现位移信号与加速度信号频谱成分也相同, 存在 3 个主要频率成分为 10、15 及 20 Hz, 但位移信号在小于 10 Hz 处存在干扰, 对其幅值有一定的影响.

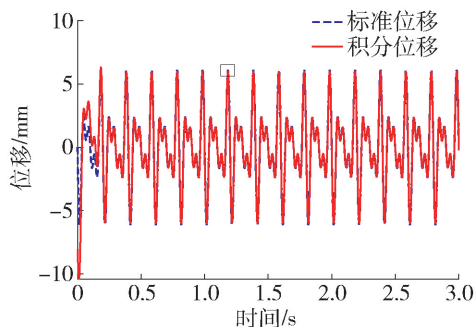
下面, 引入积分误差评价指标, 使误差图上的每个点为各个采样点上积分位移与标准位移的差与标准位移的比值, 反映了积分位移的可信程度, 为相对误差. 所定义的误差旨在研究每点的积分准确度, 从而客观评价积分位移波形与标准位移波形的相似度^[16]. 误差图定义为

$$\text{Err} = \frac{|d(t_i) - y(t_i)|}{\text{range}(d)} \quad (17)$$

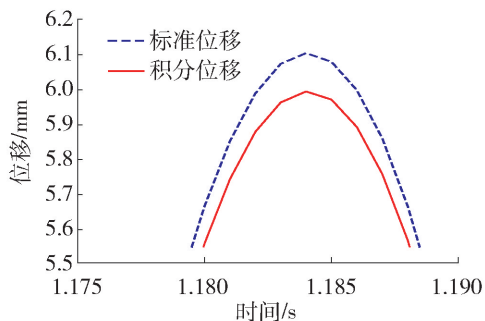
式中: $d(t_i)$ 为在时间 t_i 上的标准位移; $y(t_i)$ 为在时间 t_i 上的积分位移值; $\text{range}(d)$ 为标准位移在整个时间段上的极差, 大小为标准位移最大值和最小值的差.

位移信号误差图如图 4(d) 所示, 最初的 0.2 s 误差较大, 从 0.2 s 开始, 误差均维持在 0.02 以下, 证明积分效果良好.

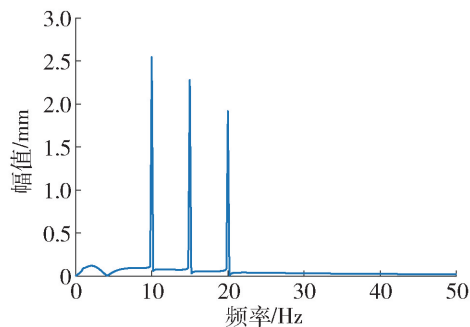
考虑随机干扰对积分结果的影响, 在原始加速度信号中分别加信噪比 (SNR) 为 5、10、20 dB 的高斯白噪声, 不同信噪比的情况下积分的位移结果如图 5(a) 所示, 可以看出添加白噪声后的积分位移仍保持较高的精度. 同样取 1.175 ~ 1.190 s 区间内的位移局部放大图, 如图 5(b) 所示, 发现添加不同白噪声只是影响位移幅值的大小. 误差图如图 5(c)



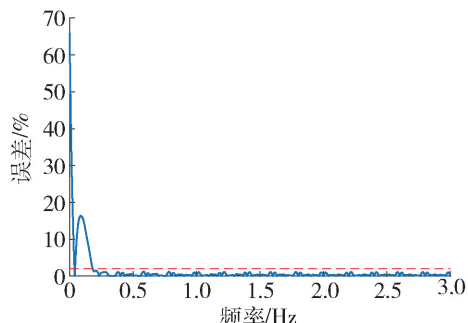
(a) 积分位移与标准位移对比



(b) 位移局部放大



(c) 积分位移频谱



(d) 误差图估计

图4 积分位移结果与误差

Fig. 4 Integrated results displacement, and the errors

所示, 信噪比为 5 dB 时, 对位移结果产生一定影响, 随着信噪比的增加, 误差减小, 信噪比为 10 dB 时, 误差保持在 0.02 之内. 对 SNR 为 5 dB 的加速度信号做 FFT, 频谱图如图 5(d) 所示, 可以看出添加高斯白噪声后, 虽然存在幅值比较小的干扰频率成分, 但对积分位移整体结果影响不大.