

FIR 数字滤波器在振动测试系统中的应用

王金健, 杭柏林, 都 强

(青岛高校软控股份有限公司, 山东 青岛 266045)

摘要:使用 FIR 数字滤波原理设计通带范围为 0~10 Hz 的数字滤波器, 并采用 Blackman 窗函数分别以 199, 399, 599, 799, 1 199 阶对振动试验机采集的数据做滤波处理。结果表明, 当阶数大于 399 时, 滤波器可有效地滤除干扰噪声, 滤波后的信号曲线可很容易地确定出不平衡量幅度和相位。

关键词:FIR 数字滤波; 窗函数法; Blackman 窗

中图分类号:TP274+.2; TQ330.4+93 **文献标识码:**B **文章编号:**1000-890X(2004)08-0491-03

数字信号处理是利用计算机或专用设备(DSP)以数值方法对信号进行变换、综合、估值与识别等加工处理, 以达到提取信号和便于应用的目的。数字信号处理技术及设备具有应用灵活、精度高、抗干扰能力强和速度快等优点, 是模拟信号处理技术及设备所无法比拟的。

1 FIR 低通数字滤波器设计原理

1.1 FIR 数字滤波器系统及其特点

若一个离散系统的系统函数为

$$H(z) = b_0 + b_1 z^{-1} + \cdots + b_m z^{-m} = \sum_{n=0}^m b_n z^{-n}$$

那么该系统即为 FIR[Finite Impulse Response 系统的冲击响应 $h(n)$ 是有限长序列]系统。显然, 因数 $b_0, b_1, \dots, b_m$ 即是该系统的单位抽样响应, 且当 $n > m$ 时, $h(n) = 0$ 。

由于 FIR 系统不像 IIR 系统易取得较好的通带和阻带衰减特性, 因此要取得较好的衰减特性, 一般要求 $H(z)$ 的阶次要高, 即 m 要大。但 FIR 系统有自己突出的优点: 一是系统总是稳定的; 二是易实现线性相位; 三是允许设计多通带(或多阻带)滤波器。后两项都是 IIR 系统不易实现的。

1.2 FIR 低通数字滤波器窗函数设计

(1) 理想低通数字滤波器的时域模型

设理想低通数字滤波器单位抽样响应为

$$h_d(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H_d(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega = \frac{\sin(\omega_c n)}{n\pi}$$

式中, $h_d(n)$ 是以 $h_d(0)$ 为对称的 sinc 函数, $h_d(0) = \frac{\omega_c}{\pi}$, $j\omega_c$ 是频率的复数表示, n 为序列的长度, ω_c 是通带的截止频率。

$h_d(n)$ 是非因果的, 但若用一窗函数将 $h_d(n)$ 截短, 并将截短后的 $h_d(n)$ 移位, 可得

$$h(n) = h_d(n - \frac{m}{2})$$

$$n = 0, 1, \dots, m$$

$h(n)$ 是因果的且为有限长, 长度为 $(m+1)$ 。令

$$H(z) = \sum_{n=0}^m h(n) z^{-n}$$

即可得所设计的滤波器的转移函数。

(2) 窗函数的选择及设计

窗函数不仅影响原来信号在时域内的形状, 也影响其在频域内的形状。Blackman 窗的主瓣比 Hamming 窗、Hanning 窗和矩形窗宽, 但具有最小的边瓣和最大的衰减速率, 以克服滤波器频谱中的 Gibbs 现象, 而较宽的主瓣导致的较长滤波器频谱过渡带可通过增大阶数 m 来弥补。本设计采用 Blackman 窗, 其窗函数表达式如下:

$$W(n) = 0.42 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) +$$

$$0.08 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right)$$

$$0 \leq n \leq N-1$$

令 $h(n) = w(n)h_d(n)$, 截短后并右移, 则

$$h(n) = \frac{\sin[(n - \frac{m}{2})\omega_c]}{\pi(n - \frac{m}{2})} W(n)$$

式中, $h(n)$ 是以 $n = \frac{m}{2}$ 对称的具有线性相位且频谱逼近理想低通滤波器时域波形的频谱, 这样以有限长 $h(n)$ 代替无限长 $h_d(n)$ 可实现低通滤波。

2 低通数字滤波器的实现

将振动测试系统传感器得到的信号 $x(t)$ 放大后, 经 A/D 转换器变成离散信号 $x(n)$, 经过低通滤波器系统 $h(n)$, 滤波输出为 $y(n)$, 则

$$y(n) = x(n)h(n)$$

$y(n)$ 即为从 $x(n)$ 提取的有用信号。

2.1 原始信号的采集

将 $x(t)$ 经前置取样低通滤波器后变为截止频率 $\Omega_c = 2\pi f_c$ 的带限信号 (f_c 为信号频率), 以定时器控制 A/D 转换器采样频率。按照振动系统理论分析, 其有用信号为频率小于 10 Hz、振幅与系统不平衡量大小有关、初相位与系统不平衡点位置有关的正弦信号, 其实际信号中带有工频和其它随机噪声, 波形如图 1 所示。



图 1 现场采集的原始信号数据

2.2 滤波算法的实现和有用信号的恢复

设每周内 $x(n)$ 为 N 点, 一次采集 k 周期 $x(n)$ 共有 kN 点, 为使滤波输出的信号长度也为整数个周期 sN , $s \in [1, k-1]$, 则滤波器 $h(n)$ 的阶数为 m , 即 $h(n)$ 的长度为 $(m+1)$ 点, 且满足

$$(m+1) = (k-s)N$$

C 语言编写的重叠相加法卷积运算程序如下。

```
for(j=0;j<=m;j++)
```

```
{
```

```
h1[j]=h[m-j]
```

```
}
```

```
for(j=0;j<=k*N-m-1;j++)
```

```
{
```

```
y[j]=0.0;
```

```
for(i=0;i<=m;i++)
```

```
{
```

```
y[j]+=x[i+j]*h[i];
```

```
}
```

```
}
```

当阶数 m 为 999、每周采集 200 点, 共采集 8 周期时, 有用信号输出 3 个周期波形, 如图 2 所示。

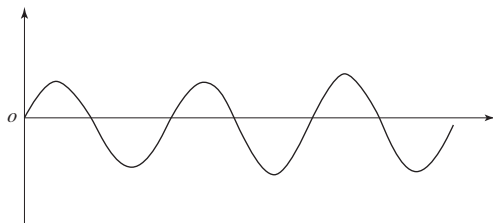


图 2 经 999 阶 FIR 低通滤波器提取的有用信号

比较图 1 和 2 可知, 直接利用振动测试系统采集的原始数据来度量系统的不平衡量和相位是很难的, 而一旦判断错误, 后续的工作将都是徒劳。经滤波后的曲线是规则的正弦信号, 很容易确定不平衡量的幅度和相位。

3 参数选择与滤波器频谱性能的改善

(1) 滤波器的阶数与滤波效果的关系

当选定一窗函数后 (本研究选 Blackman 窗函数), 增大滤波器的阶数 m 可以缩短滤波器的过渡带, 提高选频效果。对于图 1 的原始数据, 当阶数分别为 199, 399, 599, 799 和 1 199 时滤波效果分别如图 3~7 所示。

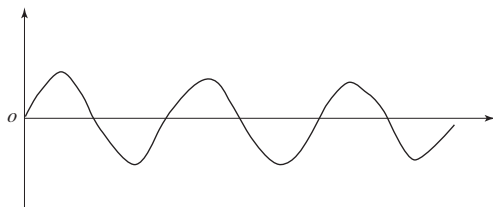


图 3 经 199 阶 FIR 低通滤波器提取的有用信号

由图 3~7 比较可见, 当滤波器阶数大于 399 以后, 增大阶数, 滤波效果提高并不明显, 因此阶数的选择应兼顾滤波效果、卷积计算时间和有效

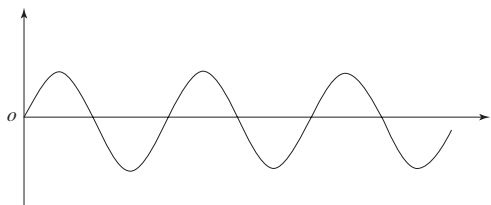


图 4 经 399 阶 FIR 低通滤波器提取的有用信号

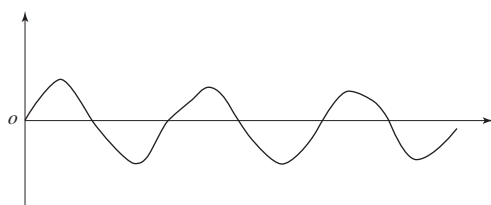


图 8 选用 Blackman 窗阶数为 199 时的滤波效果

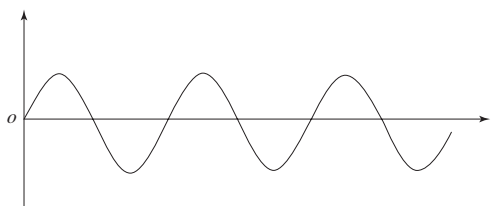


图 5 经 599 阶 FIR 低通滤波器提取的有用信号

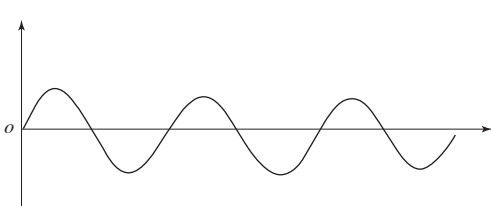


图 9 选用 Hamming 窗阶数为 199 时的滤波效果

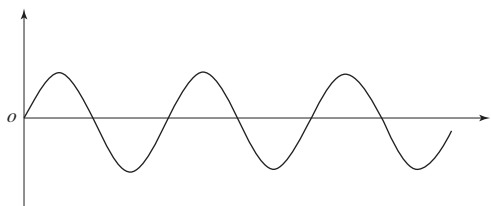


图 6 经 799 阶 FIR 低通滤波器提取的有用信号

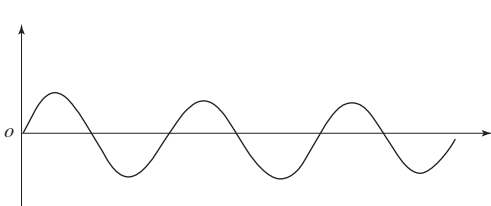


图 10 选用 Hanning 窗阶数为 199 时的滤波效果

要是由于 Blackman 窗具有比 Hanning 窗和 Hamming 窗更宽的主瓣 ($12\pi/N$), 而 Hanning 窗和 Hamming 窗的主瓣均为 ($8\pi/N$), 这会产生较长的过渡带, 但 Blackman 窗具有比 Hanning 窗和 Hamming 窗较小的边瓣, 能有效克服滤波器频谱的 Gibbs 现象, 因此选用了 Blackman 窗, 至于它较宽的主瓣对滤波器过渡带的影响则可以通过增大阶数来改善。

图 7 经 1 199 阶 FIR 低通滤波器提取的有用信号
字长效应三方面因素。本研究中为进一步克服 Blackman 窗主瓣宽的缺点, 选择阶数为 999 阶。

(2) 窗函数的选择对滤波性能的影响

窗函数的主瓣影响滤波器的过渡带, 其边瓣影响滤波器频谱的 Gibbs 现象, 即影响滤波器通带的平坦程度和阻带内的衰减速度。当滤波器的阶数为 199 时, 分别选用 Blackman 窗、Hamming 窗和 Hanning 窗, 其滤波效果如图 8~10 所示。

由图可见, Blackman 窗的滤波效果较差, 主

4 结语

振动系统中采集的原始数据混有噪声, 很难用于分析系统不平衡量和不平衡点的位置。

通过适当地选取 FIR 滤波器响应序列长度及窗函数对采集的数据进行滤波, 可以有效地滤除噪声和系统的共振现象, 可为系统分析提供真实可靠的有用信号, 进而为实现系统的控制和信息处理奠定良好的基础。