

如何用 Multi-Instrument 对人体感知的声音和振动进行频率计权



Rev: 01
May 16, 2024

注意：虚仪科技保留在任何时候无需预先通知而对本文进行修改的权利。本文可能包含文字错误

目录

一、简介.....	3
二、声音的频率计权.....	3
三、振动的频率计权.....	7
四、用于评估声音和振动的经频率计权的参数.....	15
4.1 经频率计权的有效值 (RMS)	15
4.2 经频率计权的移动有效值 (RMS)	15
4.3 经频率计权的分贝值.....	16
4.4 最大瞬态值	16
4.5 运动病剂量 (MSDV) 和声暴露量	16
4.6 振动剂量 (VDV)	17
4.7 峰值	17
4.8 振动总值	17
五、频率计权的实施.....	18
5.1 频域实施	18
5.2 时域实施	19
5.2.1 IIR 滤波器.....	20
5.2.2 FIR 滤波器.....	22
5.2.3 FFT 滤波器.....	23
5.3 测量的持续时间.....	24

一、简介

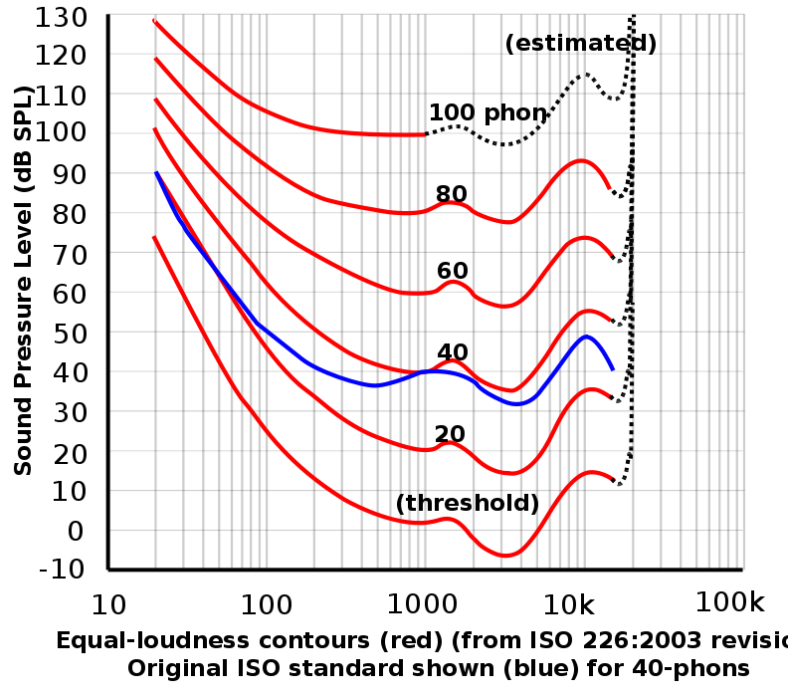
人总是暴露于各种声音和振动中，其来源包括家用电器、交通系统、机械设备、手持电动工具，以及打桩和爆破等工业活动。对噪声和振动的过度暴露可能引起身体不适或健康问题，例如听力丧失或脊柱疾病。因此，必须按照相关国际或国家标准，来正确地测量声音和振动，并评估其风险。

人对声音和振动的感知并不随频率呈线性变化。人耳对从 500Hz 到 8kHz 之间的声音频率最敏感，而对更低和更高的声音频率的敏感度较弱。为了将测得的声音与人耳对声音的响应关联起来，可采用频率计权。IEC 61672 定义了三种常用的计权函数：A、C 和 Z。相似地，人体也是对一些振动频率更为敏感，而对另一些振动频率则不那么敏感。因此，应对测得的数据进行“计权”，以给人更敏感的频率更高的权重。与声音不同，人体对振动的敏感度还取决于振动的方向和身体的姿势。因此，ISO 2631 和 ISO 5349 规定了多种频率计权函数，以将这些因素考虑在内。

二、声音的频率计权

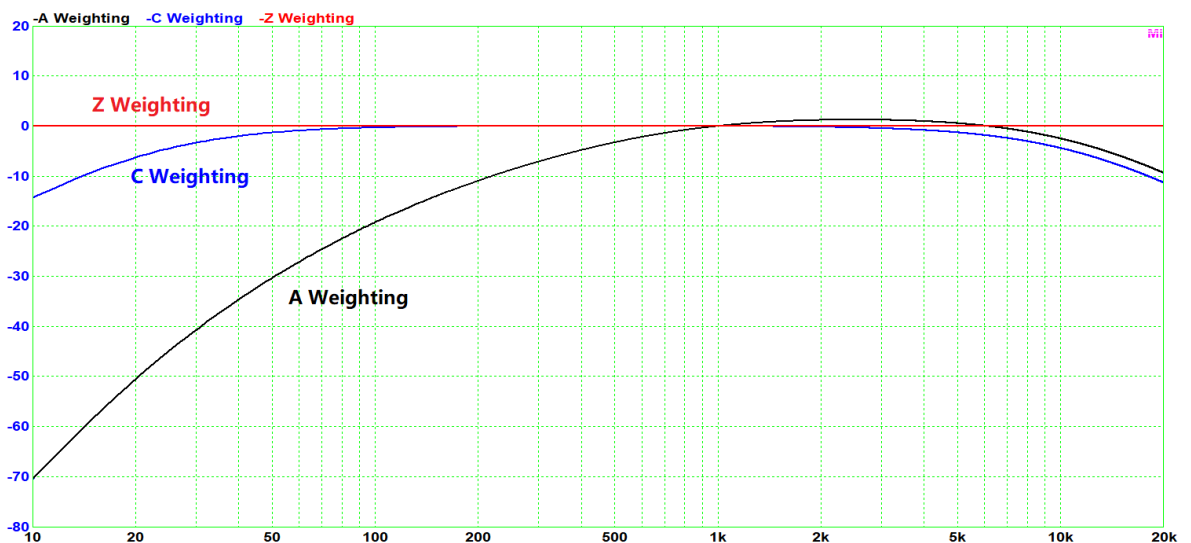


人对声压的主观感受可用响度来描述。人耳的敏感度不仅取决于声音频率，还取决于声级大小，如下图中的等响度曲线所示。总体上，随着声级的提高，等响度曲线变得更加平坦。



等响度曲线

A 计权大致是在 1 kHz 穿过 40 dB（即 40 phon 的响度级）的等响度曲线的倒置，通常用于测量环境噪音并评估其对人感知的影响；而 C 计权则基于在 1 kHz 穿过 100 dB（即 100 phon 的响度级）的等响度曲线，通常用于测量高声级的工业噪音。与 A 和 C 计权不同，Z 计权在 10 Hz 至 20 kHz 之间具有平坦的频率响应，它用于未计权的测量。还有一些其它的频率计权方案，例如 B、D、G 和 ITU-R 468 计权。B 计权基于 70 phon 的等响度曲线。D 计权专用于采用非旁路型喷气发动机的军用飞机。G 计权用于 8 Hz 到约 40 Hz 的次声波测量。ITU-R 468 噪声计权是为了能更准确地反映人耳对各种噪声而非纯音的主观感受而设计的，它在欧洲得到广泛采用，特别是在广播行业中。下图显示的是最常用的 A、C 和 Z 计权曲线。



A、C 和 Z 计权曲线

IEC 61672 和 ANSI S1.43 均提供了 C 和 A 频率计权的解析表达式，单位为 dB，如下所示。C 计权由频率为 f_L 的两个低频极点、频率为 f_H 的两个高频极点、和 0 Hz 的两个零点实现。通过这些极点和零点，相对于参考频率 $f_r = 1$ kHz，C 计权的功率响应将在 $f_L = 10^{1.5}$ Hz 和 $f_H = 10^{3.9}$ Hz 处下降 1/2（约为 -3 dB）。A 计权通过在 C 计权的基础上添加两个耦合的一阶高通滤波器来实现。这相当于在 0 Hz 处添加两个零点，并在频率 f_2 和 f_3 处各添加一个极点。对于每个高通滤波器，截止频率由 $f_A = 10^{2.45}$ Hz 给出。

$$C(f) = 10 \lg \left[\frac{f_4^2 f^2}{(f^2 + f_1^2)(f^2 + f_4^2)} \right]^2 \text{ dB} - C_{1000}$$

$$A(f) = 10 \lg \left[\frac{f_4^2 f^4}{(f^2 + f_1^2)(f^2 + f_2^2)^{1/2}(f^2 + f_3^2)^{1/2}(f^2 + f_4^2)} \right]^2 \text{ dB} - A_{1000}$$

其中：

$$f_1 = \left(\frac{-b - \sqrt{b^2 - 4c}}{2} \right)^{1/2} \quad f_2 = \left(\frac{3 - \sqrt{5}}{2} \right) f_A$$

$$f_4 = \left(\frac{-b + \sqrt{b^2 - 4c}}{2} \right)^{1/2} \quad f_3 = \left(\frac{3 + \sqrt{5}}{2} \right) f_A$$

$$b = \frac{1}{1 - \sqrt{0.5}} \left[f_r^2 + \frac{f_L^2 f_H^2}{f_r^2} - \sqrt{0.5} (f_L^2 + f_H^2) \right] \quad c = f_L^2 f_H^2$$

$f_r = 1000$ Hz, $f_A = 10^{2.45}$ Hz, $f_L = 10^{1.5}$ Hz, $f_H = 10^{3.9}$ Hz。 A_{1000} 和 C_{1000} 为归一化常数，分别用于将 A 和 C 计权在 1000Hz 处的增益置于 0dB。由上面的公式可计算出 $f_1 = 20.60$ Hz, $f_2 = 107.7$ Hz, $f_3 = 737.9$ Hz, $f_4 = 12194$ Hz, $C_{1000} = -0.062$ dB, $A_{1000} = -2.000$ dB。

ANSI S1.42 提供了 s 域传递函数，以用模拟方法实现 C 和 A 计权的上述幅频响应。

$$H_C(s) = G_C \frac{\omega_4^2 \cdot s^2}{(s + \omega_1)^2 \cdot (s + \omega_4)^2}$$

$$H_A(s) = G_A \frac{\omega_4^2 \cdot s^4}{(s + \omega_1)^2 \cdot (s + \omega_2) \cdot (s + \omega_3) \cdot (s + \omega_4)^2}$$

其中： $\omega_1 = 2\pi f_1$, $\omega_2 = 2\pi f_2$, $\omega_3 = 2\pi f_3$, $\omega_4 = 2\pi f_4$, $G_C = 10^{0.062/20}$, $G_A = 10^{2/20}$ 。

下表列出了按前面公式计算出来的在 10Hz 到 20kHz 之间的 1/3 倍频带中心频率处 ($f = f_r \times 10^{(n-30)/10}$, $n = 10, 11, \dots, 43$) 的 A、C、Z 计权值。

Nominal frequency Hz	Frequency weightings dB		
	A	C	Z
10	-70,4	-14,3	0,0
12,5	-63,4	-11,2	0,0
16	-56,7	-8,5	0,0
20	-50,5	-6,2	0,0
25	-44,7	-4,4	0,0
31,5	-39,4	-3,0	0,0
40	-34,6	-2,0	0,0
50	-30,2	-1,3	0,0
63	-26,2	-0,8	0,0
80	-22,5	-0,5	0,0
100	-19,1	-0,3	0,0
125	-16,1	-0,2	0,0
160	-13,4	-0,1	0,0
200	-10,9	0,0	0,0
250	-8,6	0,0	0,0
315	-6,6	0,0	0,0
400	-4,8	0,0	0,0
500	-3,2	0,0	0,0
630	-1,9	0,0	0,0
800	-0,8	0,0	0,0
1 000	0	0	0
1 250	+0,6	0,0	0,0
1 600	+1,0	-0,1	0,0
2 000	+1,2	-0,2	0,0
2 500	+1,3	-0,3	0,0
3 150	+1,2	-0,5	0,0
4 000	+1,0	-0,8	0,0
5 000	+0,5	-1,3	0,0
6 300	-0,1	-2,0	0,0
8 000	-1,1	-3,0	0,0
10 000	-2,5	-4,4	0,0
12 500	-4,3	-6,2	0,0
16 000	-6,6	-8,5	0,0
20 000	-9,3	-11,2	0,0

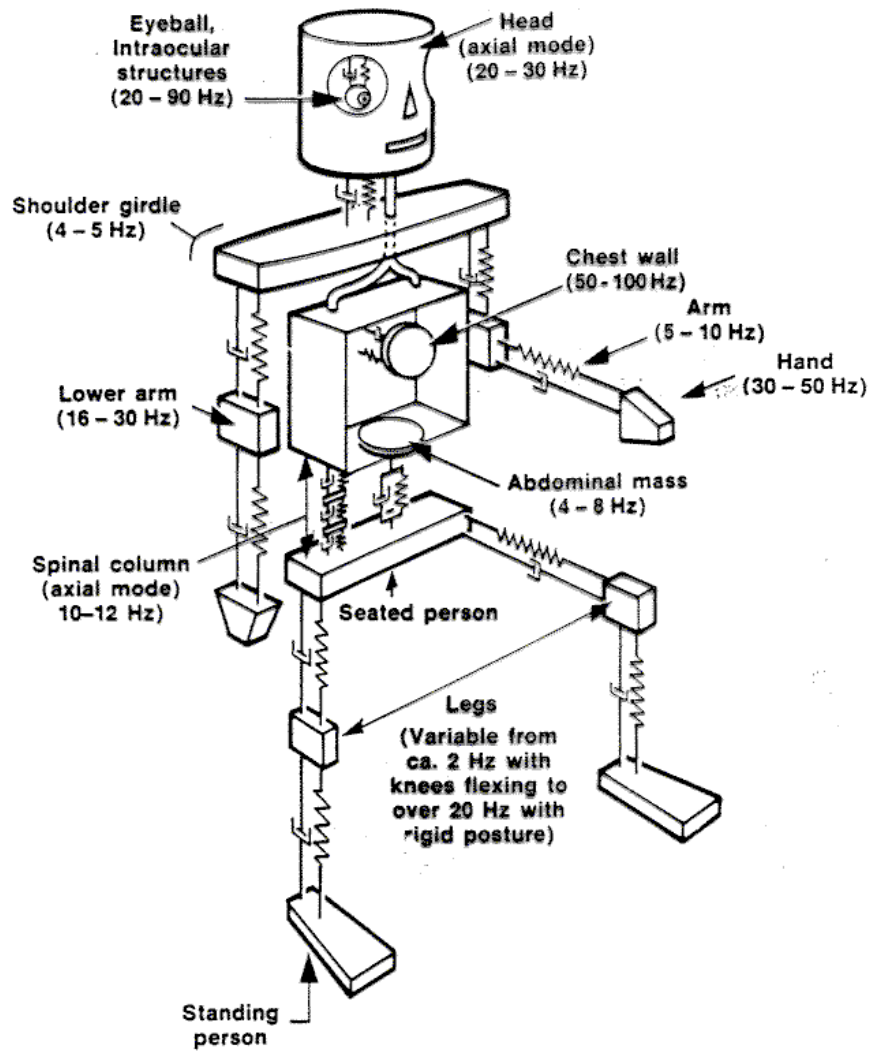
1/3 倍频带的 A、C 和 Z 计权值

需要注意的是，上面提及的每种频率计权方案只是频率的函数，并未考虑到听觉灵敏度随声级变化的特性以及听觉掩蔽效应。这些频率计权函数相对较容易实现，在各种标准中有明确定义，因此得到了广泛应用。然而，长期以来人们知道，这些传统的声学度量指标并不能很好地反映人耳感觉到的声音品质。这里说的声音品质指的是人们听到声音后舒服或不舒服的整体感觉，或者对发出这种声音的设备的声学品质以外的质量的感觉，例如对引擎的功率、结构的稳定性的感觉等等。对于一些要求严格的应用场景，需要更高级的声音品质度量指标，例如响度、响度级、尖锐度和语言清晰度指数等。这些指标基于更复杂的心理声学模型，将另行讨论。

三、振动的频率计权



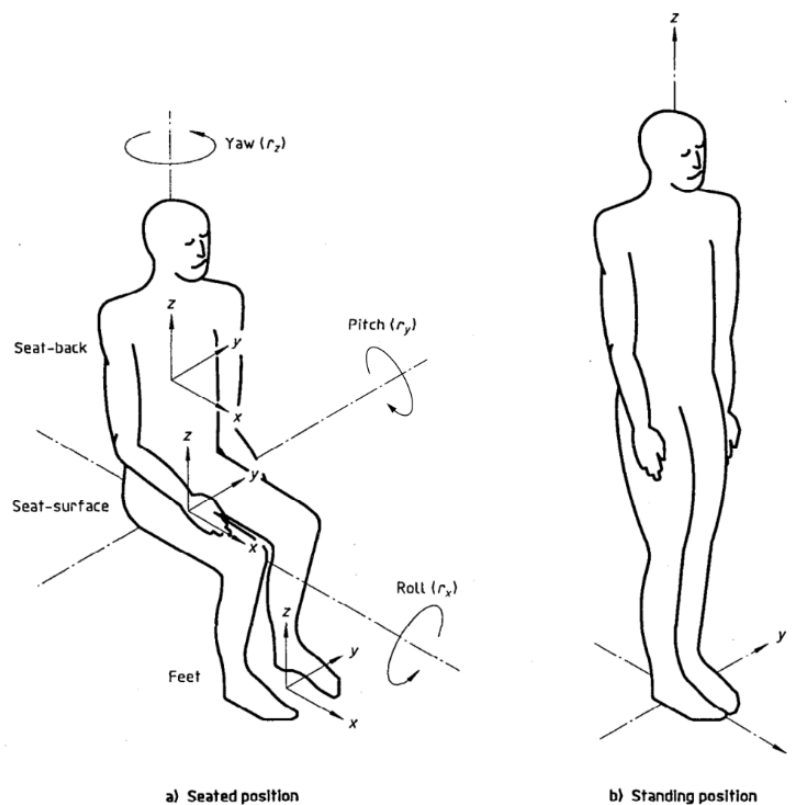
人体振动关注的是机械振动对人体的影响。人体振动主要分为两种类型：全身振动和手传振动。全身振动以整个人体为传导对象，通常通过支撑表面传输：站者的脚部、坐者的臀部、背部和脚部，或躺者的支撑区域。这种振动常见于车辆、机械设备、建筑物内部以及工作机械周边环境。最突出的例子包括越野车、喷气艇、直升机和喷气式飞机。手传振动传输到手和手臂，常见于手持电动工具的操作者。全身系统和手臂系统“在机械特性上有所不同”，因此需分别研究。人体可视为由一系列的弹簧-质量-阻尼系统构成，每个系统具有自身的固有频率。下图是一个人体的简化机械模型。



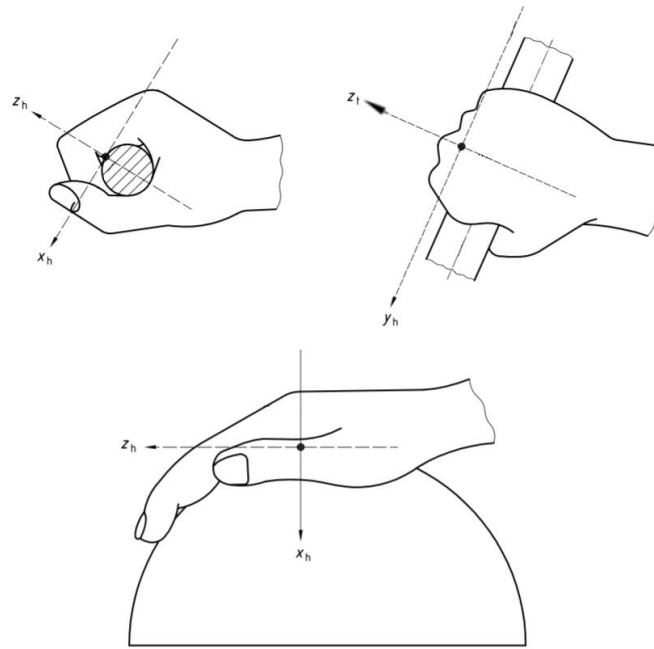
人体的机械模型及各部位的共振频率范围

该模型显示人体的不同部位具有不同的共振频率。某些振动频率可能对某些身体部位造成的损害更大。例如，20Hz 到 30Hz 之间的振动可能会引起头部和肩部之间的共振，而振动可被放大至 350%！人体是一个有强大阻尼的系统，因此，当其某部分被激发到其固有频率时，它将在一个频率范围内共振，而不是在单一频率上。

人体对机械振动的敏感度取决于振动频率、人体暴露位置、平移或直线振动的方向、旋转振动的轴以及人体的姿势。人们设计了各种频率计权函数来将这些因素考虑在内。下图显示了人体和手部的基本中心坐标系。



人体的基本中心轴



手的基本中心轴

在评估振动对健康、舒适度、感知和运动病的影响时，根据不同位置、姿势和方向，应采用不同的计权函数，见下表。

频率计权	健康	舒适度	感知	运动病	名义频率范围 Hz	标准
W_k	Z 轴，座面	Z 轴，座面 Z 轴，站立 躺姿竖直向（头部除外） X、Y、Z 轴，脚底（坐姿）	Z 轴，座面 Z 轴，站立 躺姿竖直向（头部除外）	—	0.5~80	ISO 2631-1
W_d	X 轴，座面 Y 轴，座面	X 轴，座面 Y 轴，座面 X、Y 轴，站立 躺姿水平向 Y、Z 轴，靠背	X 轴，座面 Y 轴，座面 X、Y 轴，站立 躺姿水平向	—	0.5~80	ISO 2631-1
W_f	—	—	—	竖直	0.1~0.5	ISO 2631-1
W_c	X 轴，靠背	X 轴，靠背	X 轴，靠背	—	0.5~80	ISO 2631-1
W_e	—	r_x 、 r_y 、 r_z 轴，座面	r_x 、 r_y 、 r_z 轴，座面	—	0.5~80	ISO 2631-1
W_j	—	躺姿竖直向（头）	躺姿竖直向（头）	—	0.5~80	ISO 2631-1
W_m	—	建筑内无指定姿势的全身振动，所有方向		—	1~80	ISO 2631-2
W_b	—	在有固定导轨的运输系统中的全身振动，Z 轴	—	—	0.5~80	ISO 2631-4
W_h	手传振动，所有方向		—	—	8~1000 Hz	ISO 5349-1

全身振动有三种主要的频率计权： W_k 、 W_d 和 W_f 。 W_k 适用于 Z 方向和躺姿的竖直向（头部除外），而 W_d 适用于 X 和 Y 方向以及躺姿的水平向。这两种计权都用于评估与健康、舒适度和感知相关的全身振动。然而，对于与运动病相关的评估，应该采用 W_f ，它侧重于低频全身振动。

W_c 、 W_e 和 W_j 是针对全身振动的特殊情况的附加计权，分别适用于座椅靠背振动、旋转振动和躺姿的头下振动。

W_m 是针对建筑物中全身振动和冲击的频率计权，涉及到居住者的舒适感和烦扰感，无需定义居住者的姿势。

W_b 是用于评估具有固定导轨的运输系统中乘客和机组人员舒适度的全身振动频率计权。

W_h 是用于评估振动工具、机械或工件的操作者的舒适感、熟练度和健康状况的手传振动频率计权。

总体来说，上面提到的所有频率计权都可以通过级联四个模拟滤波器来实现：一个高通滤波器、一个低通滤波器、一个加速度-速度过渡滤波器和一个向上阶跃滤波器。这些在相应的 ISO 标准以及 ISO 8041 中有定义。

带限是通过高通滤波器和低通滤波器的组合来实现的。它们都是二阶 Butterworth 滤波器，其传递函数如下。

高通滤波器：

$$H_h(s) = \frac{1}{1 + \frac{\omega_1}{Q_1 s} + \left(\frac{\omega_1}{s}\right)^2}$$

低通滤波器：

$$H_l(s) = \frac{1}{1 + \frac{s}{Q_2 \omega_2} + \left(\frac{s}{\omega_2}\right)^2}$$

加速度-速度过渡滤波器在低频时与加速度成正比，在高频时与速度成正比。其传递函数如下。

加速度-速度过渡滤波器：

$$H_t(s) = \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_3}\right) K}{1 + \frac{s}{Q_4 \omega_4} + \left(\frac{s}{\omega_4}\right)^2}$$

注意：当 f_3 和 f_4 (ω_3 和 ω_4) 为无穷大时， $H_t(s) = K$ 。

向上阶跃滤波器的斜率大约为每倍频程 6 dB，与加速度变化率成正比。其传递函数如下。

向上阶跃滤波器：

$$H_s(s) = \frac{1 + \frac{s}{Q_5\omega_5} + \left(\frac{s}{\omega_5}\right)^2}{1 + \frac{s}{Q_6\omega_6} + \left(\frac{s}{\omega_6}\right)^2} \left(\frac{\omega_5}{\omega_6}\right)^2$$

注意：当 f_5 和 f_6 (ω_5 和 ω_6) 为无穷大时， $H_s(s) = 1$ 。

总的频率计权传递函数是以上四个传递函数的乘积，即：

$$H(s) = H_h(s) \cdot H_l(s) \cdot H_t(s) \cdot H_s(s)$$

其中： s 为拉普拉斯变换的变量。 $H_h(s) \cdot H_l(s)$ 代表带限传递函数，除 W_f 、 W_h 和 W_m 之外，其余的计权皆采用相同的带限设置。 $H_t(s) \cdot H_s(s)$ 代表某应用的实际的频率计权传递函数。 W_j 的 $H_t(s) = 1$ ，而 W_c 、 W_d 、 W_e 、 W_m 、 W_h 的 $H_s(s) = 1$ 。令 $s = j\omega = j2\pi f$ ，可得总的频率响应如下：

$$H(j\omega) = H_h(j\omega) \cdot H_l(j\omega) \cdot H_t(j\omega) \cdot H_s(j\omega)$$

则幅频响应为：

$$\begin{aligned} |H(j\omega)| &= |H_h(j\omega)| \cdot |H_l(j\omega)| \cdot |H_t(j\omega)| \cdot |H_s(j\omega)| \\ &\text{或} \\ |H(f)| &= |H_h(f)| \cdot |H_l(f)| \cdot |H_t(f)| \cdot |H_s(f)| \end{aligned}$$

可推得：

$$\begin{aligned} |H_h(f)| &= \sqrt{\frac{f^4}{f^4 + f_1^4}} \\ |H_l(f)| &= \sqrt{\frac{f_2^4}{f^4 + f_2^4}} \\ |H_t(f)| &= \sqrt{\frac{f^2 + f_3^2}{f_3^2}} \times \sqrt{\frac{f_4^4 Q_4^2}{f^4 Q_4^2 + f^2 f_4^2 (1 - 2Q_4^2) + f_4^4 Q_4^2}} \times K \end{aligned}$$

$$|H_s(f)| = \frac{Q_6}{Q_5} \times \sqrt{\frac{f^4 Q_5^2 + f^2 f_5^2 (1 - 2Q_5^2) + f_5^4 Q_5^2}{f^4 Q_6^2 + f^2 f_6^2 (1 - 2Q_6^2) + f_6^4 Q_6^2}}$$

上述传递函数的参数列于下表。

计权	带限				加速度-速度过渡			向上阶跃				增益 K
	f_1 Hz	Q_1	f_2 Hz	Q_2	f_3 Hz	f_4 Hz	Q_4	f_5 Hz	Q_5	f_6 Hz	Q_6	
W_k	0.4	$2^{-1/2}$	100	$2^{-1/2}$	12.5	12.5	0.63	2.37	0.91	3.35	0.91	1
W_d	0.4	$2^{-1/2}$	100	$2^{-1/2}$	2	2	0.63	∞	1	∞	1	1
W_f	0.08	$2^{-1/2}$	0.63	$2^{-1/2}$	∞	0.25	0.86	0.0625	0.80	0.10	0.80	1
W_c	0.4	$2^{-1/2}$	100	$2^{-1/2}$	8	8	0.63	∞	1	∞	1	1
W_e	0.4	$2^{-1/2}$	100	$2^{-1/2}$	1	1	0.63	∞	1	∞	1	1
W_j	0.4	$2^{-1/2}$	100	$2^{-1/2}$	∞	∞	1	3.75	0.91	5.32	0.91	1
W_m	$10^{-0.1}$	$2^{-1/2}$	100	$2^{-1/2}$	$1/(0.028 \times 2\pi)$	$1/(0.028 \times 2\pi)$	0.5	∞	1	∞	1	1
W_b	0.4	$2^{-1/2}$	100	$2^{-1/2}$	16	16	0.55	2.5	0.9	4	0.95	1.024
W_h	$10^{8/10}$	$2^{-1/2}$	$10^{31/10}$	$2^{-1/2}$	$100/(2\pi)$	$100/(2\pi)$	0.64	∞	1	∞	1	1

振动频率计权的传递函数的参数

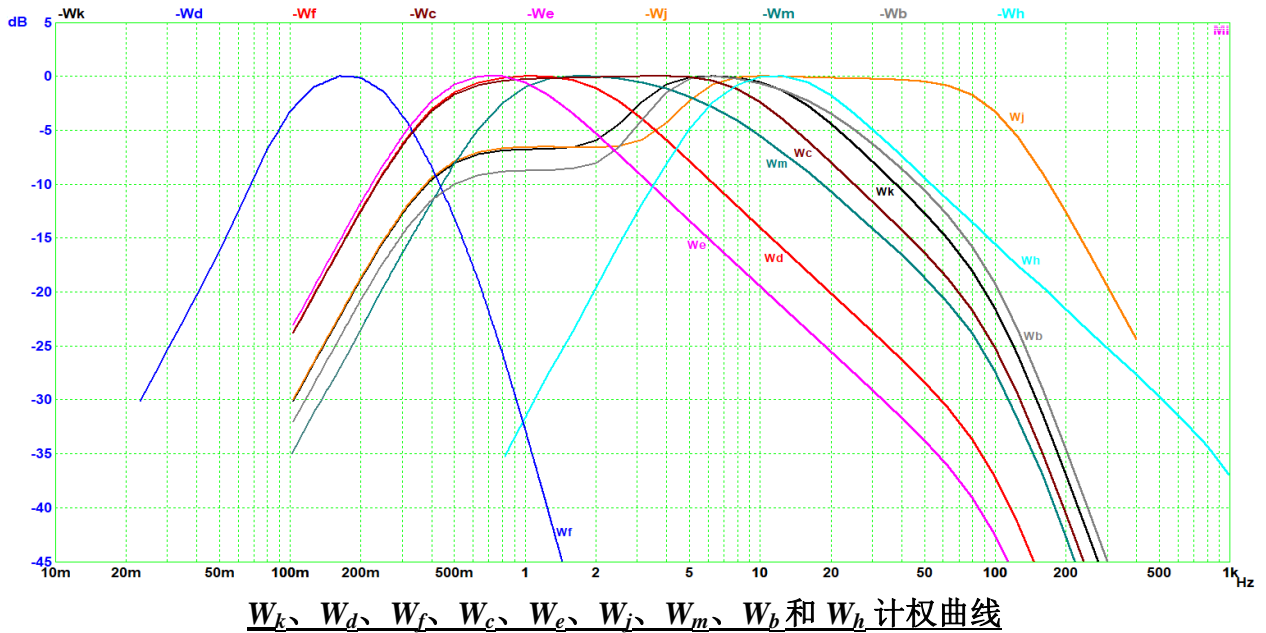
下表列出了按前面公式计算出来的在 0.02Hz 到 4kHz 之间的 1/3 倍频带中心频率处的频率计权值。

标称 频率 f Hz	W_k dB	W_d dB	W_f dB	W_c dB	W_e dB	W_j dB	W_m dB	W_b dB	W_h dB
0.02			-32.33						
0.025			-28.48						
0.0315			-24.47						
0.04			-20.25						
0.05			-16.1						
0.063			-11.49						
0.08			-6.73						
0.1	-30.11	-24.09	-3.16	-24.11	-24.08	-30.18	-36	-32.04	
0.125	-26.26	-20.24	-0.96	-20.25	-20.22	-26.32	-32	-28.2	
0.16	-22.05	-16.01	0.05	-16.03	-15.98	-22.11	-28.01	-23.98	
0.2	-18.33	-12.28	-0.07	-12.3	-12.23	-18.38	-24.02	-20.23	
0.25	-14.81	-8.75	-1.37	-8.78	-8.67	-14.86	-20.05	-16.71	
0.315	-11.6	-5.52	-4.17	-5.56	-5.41	-11.65	-16.12	-13.51	
0.4	-9.07	-2.94	-8.31	-3.01	-2.81	-9.1	-12.29	-10.98	
0.5	-7.57	-1.38	-13	-1.48	-1.29	-7.6	-8.67	-9.53	
0.63	-6.77	-0.5	-18.69	-0.64	-0.55	-6.78	-5.51	-8.71	
0.8	-6.43	-0.07	-25.51	-0.24	-0.53	-6.42	-3.09	-8.38	-36
1	-6.33	0.1	-32.57	-0.08	-1.11	-6.3	-1.59	-8.29	-31.99
1.25	-6.29	0.07	-40.02	0	-2.25	-6.28	-0.85	-8.27	-27.99
1.6	-6.12	-0.28	-48.47	0.06	-3.99	-6.32	-0.59	-8.07	-23.99
2	-5.49	-1.01	-56.19	0.1	-5.82	-6.34	-0.61	-7.6	-20.01
2.5	-4.01	-2.2	-63.93	0.15	-7.77	-6.22	-0.82	-6.13	-16.05
3.15	-1.9	-3.85	-71.96	0.19	-9.81	-5.62	-1.19	-3.58	-12.18
4	-0.29	-5.82	-80.26	0.2	-11.93	-4.04	-1.74	-1.02	-8.51
5	0.33	-7.76		0.11	-13.91	-2.01	-2.5	0.21	-5.27

6.3	0.46	-9.81		-0.23	-15.94	-0.48	-3.49	0.46	-2.77
8	0.31	-11.93		-1	-18.03	0.15	-4.7	0.21	-1.18
10	-0.1	-13.91		-2.2	-19.98	0.26	-6.12	-0.23	-0.43
12.5	-0.89	-15.87		-3.79	-21.93	0.22	-7.71	-0.85	-0.38
16	-2.28	-18.03		-5.82	-24.08	0.16	-9.44	-1.83	-0.96
20	-3.93	-19.99		-7.77	-26.02	0.1	-11.25	-3	-2.14
25	-5.8	-21.94		-9.76	-27.97	0.06	-13.14	-4.44	-3.78
31.5	-7.86	-23.98		-11.84	-30.01	0	-15.09	-6.16	-5.69
40	-10.05	-26.13		-14.02	-32.15	-0.08	-17.1	-8.11	-7.72
50	-12.19	-28.22		-16.13	-34.24	-0.24	-19.23	-10.09	-9.78
63	-14.61	-30.6		-18.53	-36.62	-0.62	-21.58	-12.43	-11.83
80	-17.56	-33.53		-21.47	-39.55	-1.48	-24.38	-15.34	-13.88
100	-21.04	-36.99		-24.94	-43.01	-3.01	-27.93	-18.72	-15.91
125	-25.35	-41.28		-29.24	-47.31	-5.36	-32.37	-23	-17.93
160	-30.91	-46.84		-34.8	-52.86	-8.78	-37.55	-28.56	-19.94
200	-36.38	-52.3		-40.26	-58.33	-12.3	-43.18	-34.03	-21.95
250	-42.04	-57.97		-45.92	-63.99	-16.03	-49.02	-39.69	-23.96
315	-48	-63.92		-51.88	-69.94	-19.98	-54.95	-45.65	-25.97
400	-54.2	-70.12		-58.08	-76.14	-24.1	-60.92	-51.84	-28
500									-30.07
630									-32.23
800									-34.6
1000									-37.42
1250									-40.97
1600									-45.42
2000									-50.60
2500									-56.23
3150									-62.07
4000									-68.01

1/3 倍频带的 W_k 、 W_d 、 W_f 、 W_c 、 W_e 、 W_j 、 W_m 、 W_b 和 W_h 的计权值

下图显示的是相应的计权曲线。



四、用于评估声音和振动的经频率计权的参数

4.1 经频率计权的有效值（RMS）

经频率计权的有效值（Root-Mean-Square, 或称 RMS 或均方根值）由线性时间平均公式定义如下：

$$A_w = \left(\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right)^{\frac{1}{2}}$$

其中： $a_w(t)$ 为振动测量中经频率计权后的沿某一指定方向或绕某一指定轴的平移或旋转加速度，或为声音测量中经频率计权后的声压。它是时间 t 的函数，而 T 表示测量的持续时间。

此数值是振动的基本评估标准。但是，当经频率计权后的振动峰值因数超过 9 时，它可能会低估振动对人体的影响。这时应采用下述的替代指标之一作为附加评估参数 - 移动有效值或四次方振动剂量 (Vibration Dose Value, VDV)。

4.2 经频率计权的移动有效值（RMS）

经频率计权的移动有效值由线性时间平均公式定义如下：

$$A_{wT}(t) = \left(\frac{1}{T} \int_{t-T}^t a_w^2(\xi) d\xi \right)^{\frac{1}{2}}$$

其中： T 为移动平均的积分时间， ξ 为积分时间哑变量， t 为观测时间（瞬时时间）。上述的线性时间平均可由下面的指数时间平均（时间计权）来近似。

$$A_{w\tau}(t) = \left(\frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^t a_w^2(\xi) \exp\left(\frac{\xi - t}{\tau}\right) d\xi \right)^{\frac{1}{2}}$$

其中： τ 为时间常数。当应用于与远小于 τ 的短时冲击时，二者结果的差异非常小；而当应用于较长时间的冲击和瞬态信号时，则差异稍大（可达 30%）。

4.3 经频率计权的分贝值

经频率计权的分贝值可计算如下：

$$L_w = 20 \lg \left(\frac{A_w}{A_0} \right) \text{ dB}$$

其中： A_0 为振动测量的参考加速度（ISO1683 定义为 10^{-6} m/s^2 的平移加速度），或者为声音测量的参考声压（空气中 $20 \mu\text{Pa}$ ，水中 $1 \mu\text{Pa}$ ）。

在声级测量中，当 A_w 为线性时间平均值时， L_w 称为等效连续声级，通常在下标的权重符号后加上“T”或“eq”来表示。例如， L_{AT} 和 L_{Aeq} 都表示 A 计权的等效连续声级。 A_w 也可以是带时间常数的指数时间平均（或时间计权）值，即 $A_{w\tau}$ 。通常有三种标准的时间计权：I（冲击）、F（快速）和 S（慢速），其时间常数分别为 35 ms、125 ms 和 1 s。在这种情况下，应在 L_w 上加上时间计权符号。例如， L_{AF} 表示 A 计权“快速”时间计权声级。

4.4 最大瞬态值

最大瞬态振动值(Maximum Transient Vibration Value, MTVV)定义为振动加速度的移动有效值的最大值，即： $MTVV = \max[A_{wT}(t)]$ 或 $MTVV = \max[A_{w\tau}(t)]$ ，其积分时间 T 或 τ 为 1 s（对应于声级测量中的“慢速”积分时间。当 $MTVV/A_w > 1.5$ 时， $MTVV$ 应作为附加评估参数报告。

作为比较，在声音测量中，通常会测量最大的时间平均声级或时间计权声级，例如 L_{AFmax} 、 L_{ASmax} 、 L_{CFmax} 和 L_{CSmax} 。

4.5 运动病剂量（MSDV）和声暴露量

运动病剂量(Motion Sickness Dose Value, MSDV)和声暴露量都可由下式定义：

$$\text{MSDV 或 声暴露}(E_{wT}) = \left(\int_0^T a_w^2(t) dt \right)^{\frac{1}{2}}$$

其中： T 为运动或声暴露持续的总时间。

在声音测量中，声暴露量常常通过下式转化为声暴露级：

$$L_{wET} = 10 \lg \left(\frac{\int_0^T a_w^2(t) dt}{A_0^2 T_0} \right) \text{ dB}$$

其中： A_0 为参考声压（空气中为 $20 \mu\text{Pa}$ ）， $T_0 = 1 \text{ s}$ 。

4.6 振动剂量（VDV）

振动剂量(Vibration Dose Value, VDV)由下式定义：

$$\text{VDV} = \left(\int_0^T a_w^4(t) dt \right)^{\frac{1}{4}}$$

其中： T 为振动暴露的总时间。当 $\text{VDV}/(A_w T^{1/4}) > 1.75$ 时，VDV 应作为附加评估参数报告。

振动剂量 VDV 可通过如下线性时间平均得到经频率计权后的均四次方根值(Root-Mean-Quad, RMQ)：

$$\text{RMQ} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T a_w^4(t) dt \right)^{\frac{1}{4}}$$

RMQ 对峰值比有效值 RMS 更灵敏。

4.7 峰值

这里的峰值指的是经过频率计权后的加速度或声压的瞬时值（或正或负）的绝对值的最大值。

在声音测量中，峰值声压常常通过参考声压转化为峰值声级，例如 L_{Cpeak} 表示 C 计权的峰值声级。

4.8 振动总值

振动总值汇总了平移振动的三个轴向振动，由下式定义：

$$A_{wv} = \sqrt{k_x^2 A_{wx}^2 + k_y^2 A_{wy}^2 + k_z^2 A_{wz}^2}$$

其中： A_{wx} 、 A_{wy} 和 A_{wz} 分别为三个相互垂直的轴 x 、 y 和 z 上的经过频率计权的加速度有效值； k_x 、 k_y 和 k_z 为乘数因子，其值取决于具体的测量应用。例如，在手传振动中， $k_x = k_y = k_z = 1$ ；在评估振动对坐者的健康影响时，

X 轴： W_d ， $k_x = 1.4$ ，

Y 轴： W_d ， $k_y = 1.4$ ，

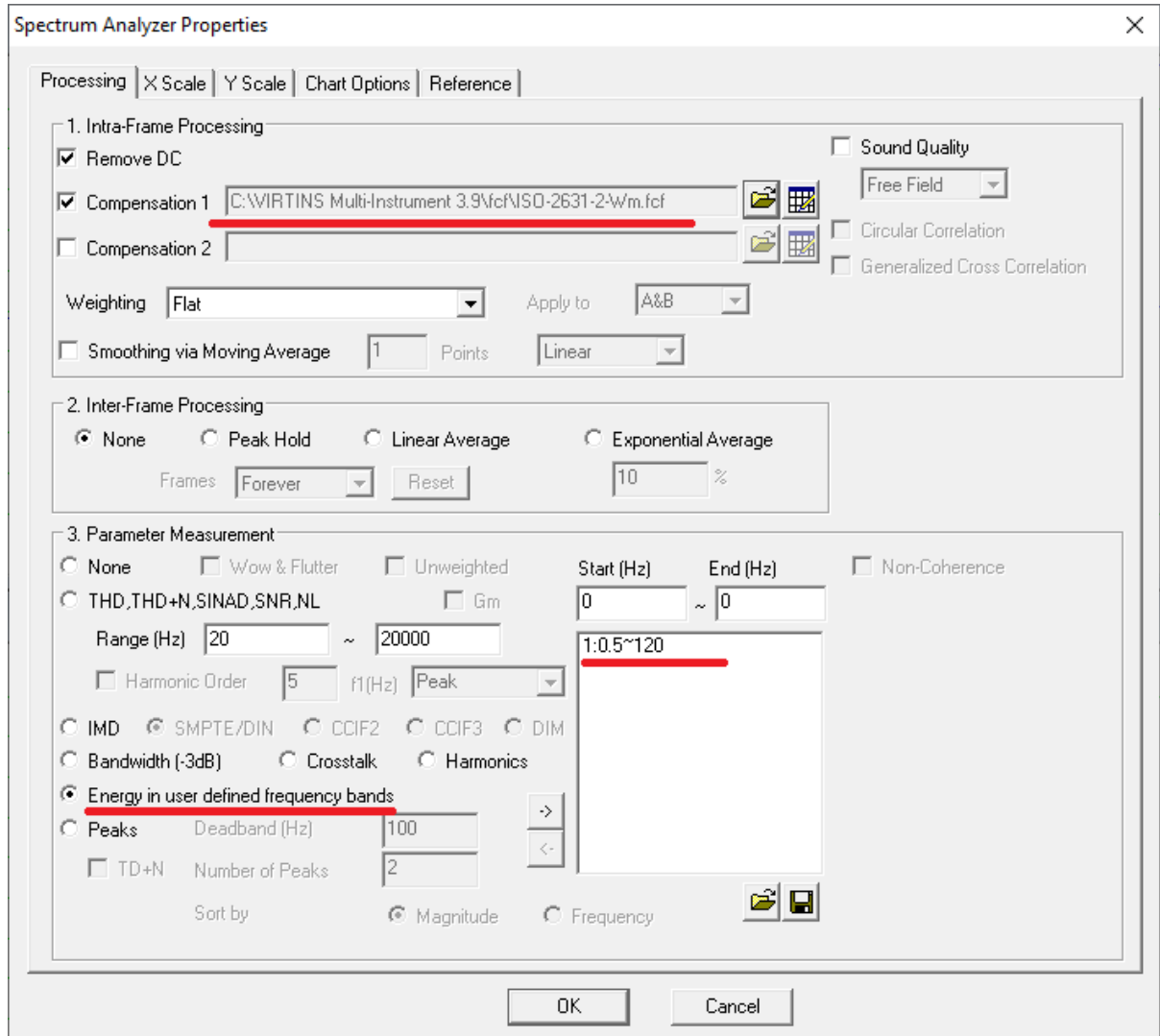
Z 轴： W_k ， $k_z = 1$ 。

五、频率计权的实施

5.1 频域实施

经频率计权的有效值是声振评估的基本指标。它在时域中定义，但也可以根据 Parseval 定理从频域计算得出。运动病剂量(MSDV)和声暴露量可根据测量的持续时间从有效值中推导出来。如果只关注这些与有效值(RMS)相关的数值，那么直接在频域的频谱数据上施加频率计权将更容易。

在 Multi-Instrument 中，可以通过右击频谱分析仪窗口，选择[频谱分析仪处理]>[补偿 1]，然后加载相应的频率计权文件来实现频率计权。软件提供了前述所有频率计权的幅频响应数据 CSV 文本文件（在这里称为频率补偿文件，*.fcf）。可以使用“用户定义频带内的能量”功能来显示经频率计权后的有效值，如下图所示。



Multi-Instrument 在频域施加频率计权的设置

运动病剂量(MSDV)和声暴露量可以通过将测得的经频率计权的有效值乘以测量的持续时间的平方根来计算。在 Multi-Instrument 中，可用该公式定义一个用户自定义数据点(User Defined Data Point, UDDP)，以便直接显示计算结果。

将 Multi-Instrument 的示波器帧宽设置为与移动平均的积分时间匹配，并保持数据采集和分析过程运行，可获得移动有效值随时间的变化过程。最大瞬态值可通过软件的 DDP 查看器的峰值保持功能获得。以上分析也可以在原始数据记录为 WAV 文件后进行。与实时分析不同，事后分析使用[文件]>[逐帧打开]功能，并可指定帧重叠百分比。重叠百分比越高，移动有效值越接近理想情形。

需要注意的是，瞬时峰值、振动剂量(VDV)以及峰值因数(Crest Factor = 峰值 / 有效值)不能通过在频域实施频率计权来获得，而只能在时域实施。

5.2 时域实施

在时域，频率计权可以通过模拟或数字滤波器来实现。按前述的拉普拉斯域（s 域）中的模拟传递函数可方便地设计出相应的模拟滤波器。但是，现代用于声音和振动记录的系统几乎都是数字的，因此通过数字滤波器进行频率计权自然成为优先选项，从而免除了成本偏高且占位置的模拟滤波器。数字滤波器有三种类型：IIR、FIR 和 FFT。

在时域中实施频率计权时，所有前面提到的经频率计权的参数都可以直接从时域计算。在 Multi-Instrument 中，峰值和有效值会自动计算出来，并显示在示波器窗口中。振动剂量(VDV)可以根据以下公式从自动计算出来的峰度(Kurtosis)和经频率计权的有效值中推导出来：

$$VDV = (Kurtosis \times T)^{\frac{1}{4}} \times A_w$$

其中： T 为振动暴露的总时间，而峰度由下式定义：

$$Kurtosis = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} a_w^4[i]}{A_w^4}$$

注意：这里假定 $a_w(t)$ 的时均值为 0，即：不含直流成分。否则应勾选软件的[示波器处理]页上的“除去直流”选项。

在 Multi-Instrument 中，以上公式可用来定义一个用户自定义数据点(User Defined Data Point, UDDP)，以便直接显示振动剂量值。

5.2.1 IIR 滤波器

无限冲激响应（Infinite Impulse Response, IIR）滤波器是模拟滤波器在数字域的对物，具有无限长度的冲激响应。它是一个递归滤波器，其输出由当前和先前的输入以及先前的输出来决定。在时域中，它具有以下形式：

$$y[n] = \sum_{i=0}^M b_i x[n-i] - \sum_{j=1}^N a_j y[n-j]$$

其中：

$x[n]$ 为输入信号，

$y[n]$ 为输出信号，

b_i 为所谓的前馈滤波器系数，

a_i 为所谓的反馈滤波器系数，

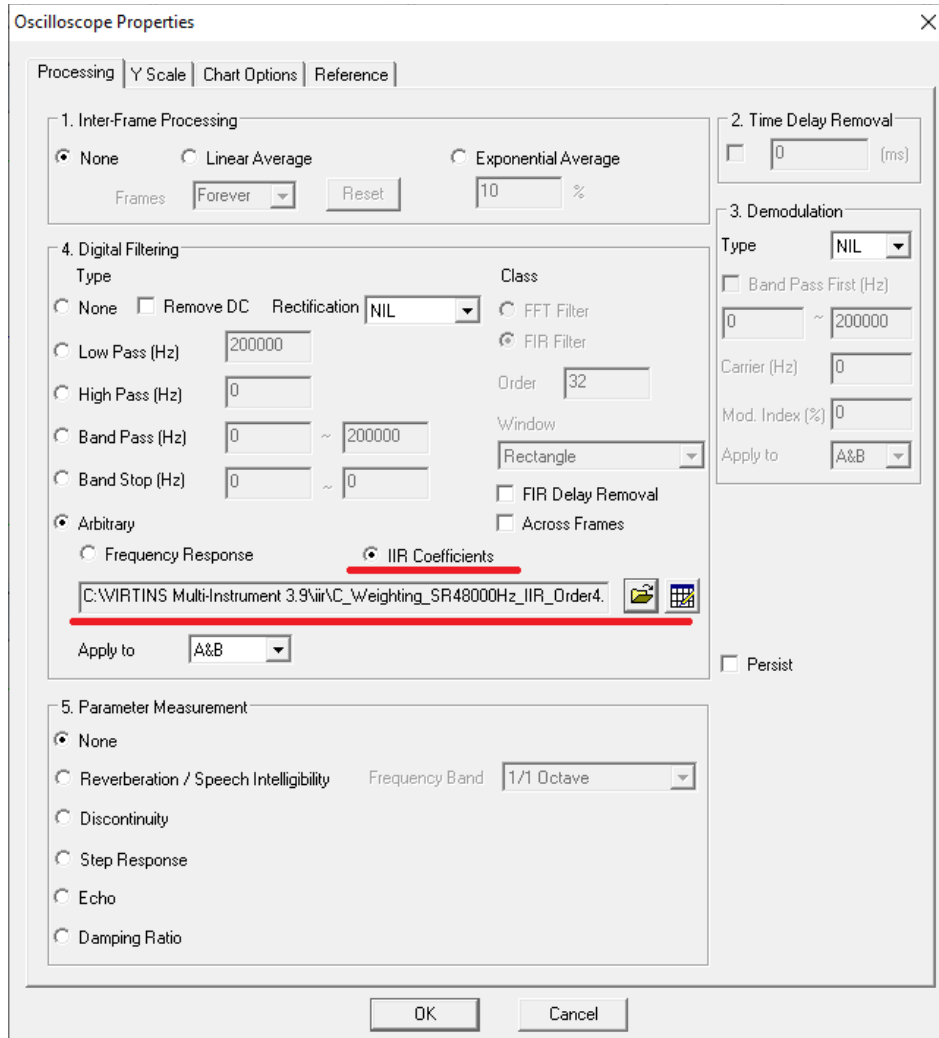
M 为前馈滤波器的阶数，

N 为反馈滤波器的阶数。

将上式做 z 变换可得其传递函数：

$$H[z] = \frac{\sum_{i=0}^M b_i z^{-i}}{1 + \sum_{j=1}^N a_j z^{-j}}$$

从给定的 S 域模拟传递函数推导出等效的 IIR 滤波器有多种方法，包括双线性变换、冲激响应不变法和匹配 Z 变换等。许多研究文章已经给出了各种频率计权函数的 IIR 系数。Multi-Instrument 可通过加载一个包含 IIR 系数的 CSV 文本文件来实现 IIR 滤波，如下所示。当使用[文件]>[逐帧打开]进行后期分析时，应勾选“跨帧(Across Frames)”选项，以确保帧间的连续性。



Multi-Instrument 在时域施加频率计权的 IIR 滤波器设置

IIR 滤波器所需的滤波器系数远少于等效的 FIR 滤波器。然而，它将滤波器的输出反馈到滤波器的输入，可能导致不稳定。其相频响应是非线性的，会导致滤波后的波形出现失真，使得那些非 RMS 参数，例如峰值因数、峰值和振动剂量值(VDV)，出现误差。需要注意的是，前述标准中规定的模拟传递函数也没有线性相频响应。这些标准仍然倾向于传统的模拟滤波器，这些滤波器实现线性相频响应极其困难，甚至是不可能的。

5.2.2 FIR 滤波器

有限冲激响应滤波器(Finite Impulse Response, FIR)具有有限长度的冲激响应。它没有反馈，因此总是稳定的。在时域中，它具有以下形式：

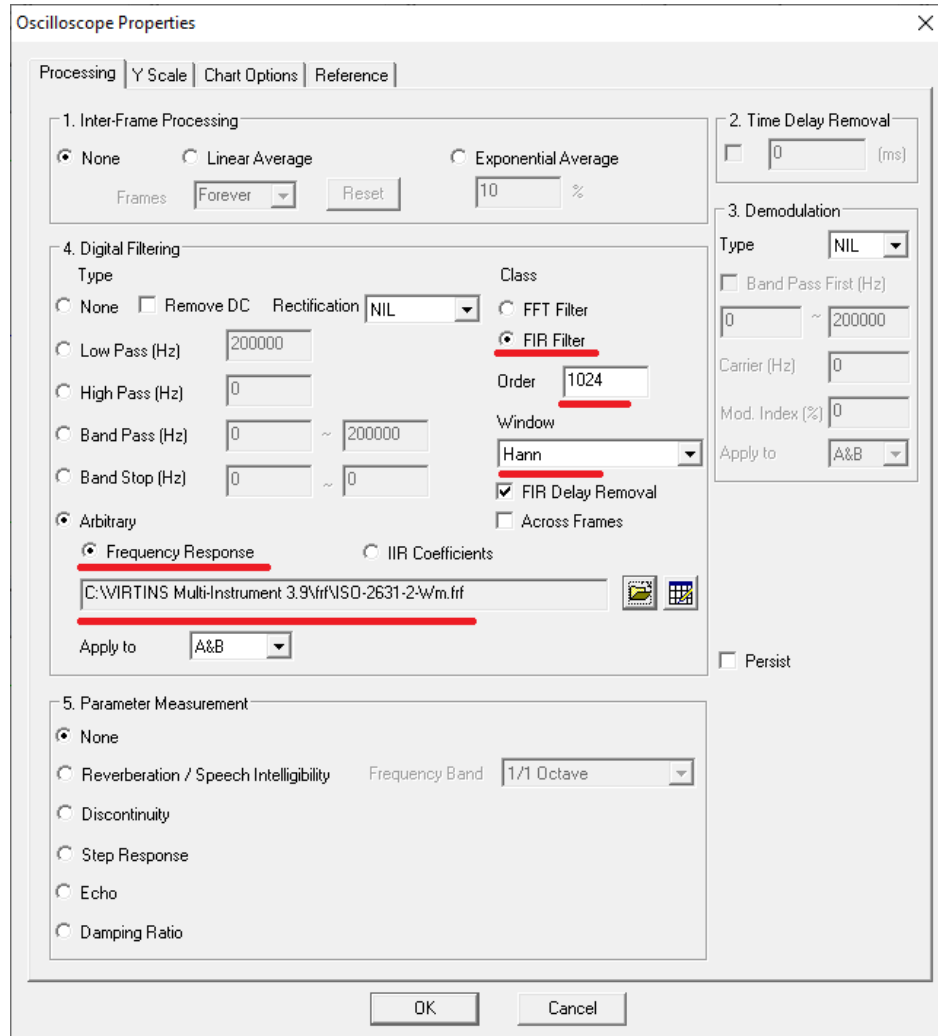
$$y[n] = \sum_{i=0}^M b_i x[n - i]$$

其传递函数为：

$$H[z] = \sum_{i=0}^M b_i z^{-i}$$

FIR 滤波器的主要缺点是需要大量系数才能实现标准中所规定的计权滤波器的幅频响应。FIR 滤波器通常设计为具有对称的滤波器系数，以实现线性相频响应。由已知的幅频响应设计 FIR 滤波器有几种方法，例如窗函数法。

Multi-Instrument 支持五种类型的 FIR 滤波器设计：低通、高通、带通、带阻和任意，可基于指定的截止频率或 CSV 文本文件中提供的幅频响应。如果 FIR 滤波器系数为已经，则可以使用前述的 IIR 系数法将它们输入到软件中。频率计权应采用任意 FIR 滤波器，如下所示。软件提供了包含所有前述频率计权的幅频响应数据的 CSV 文本文件（称为频率响应文件，*.fir），可直接调用。



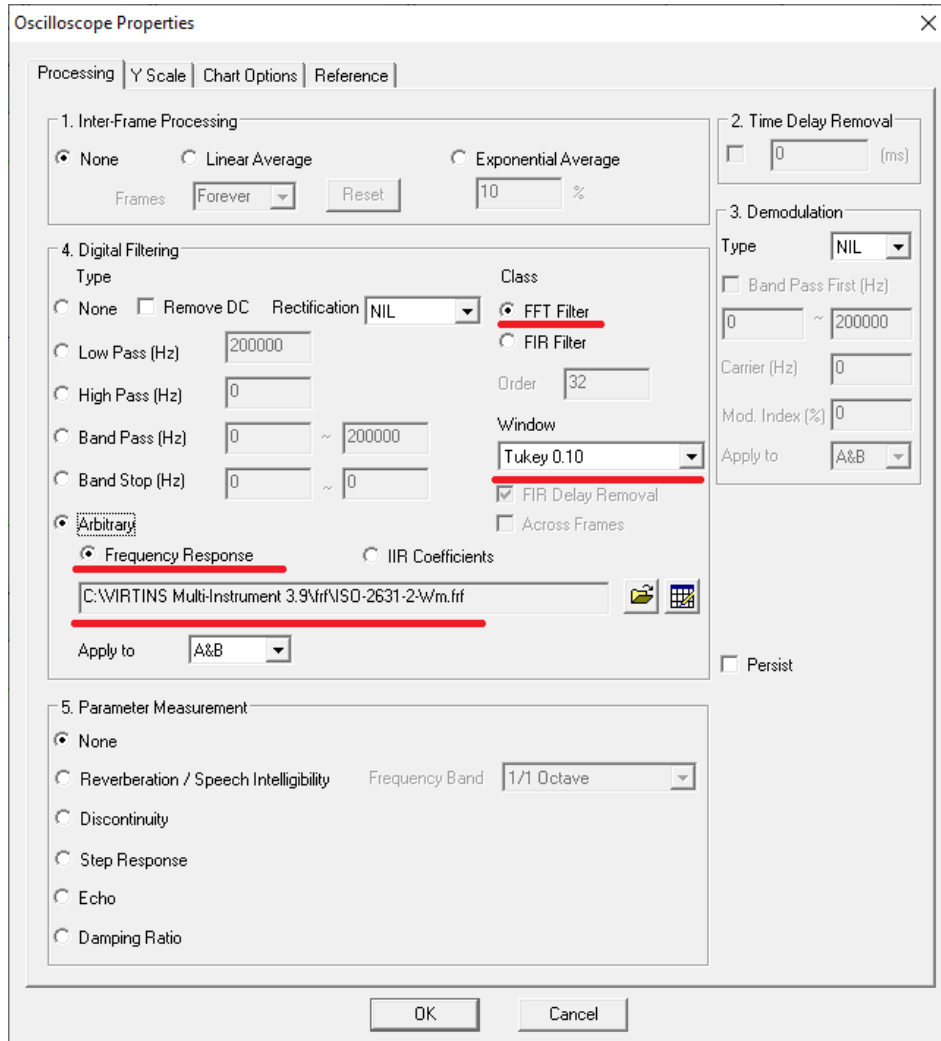
Multi-Instrument 在时域施加频率计权的 FIR 滤波器设置

同样地，当使用[文件]>[逐帧打开]进行后期分析时，应勾选“跨帧”选项，以确保帧间的连续性。

5.2.3 FFT 滤波器

与 FIR 和 IIR 滤波器不同，FFT 滤波器不是直接在时域进行滤波处理的，而是先用 FFT 将输入信号从时域转换到频域，然后其频谱与滤波器的幅频响应相乘，最后把结果通过 FFT 反变换转换回时域。FFT 滤波器具有线性相频响应，更准确地说，是零相位响应。

与 FIR 滤波器的情况类似，Multi-Instrument 支持五种类型的 FFT 滤波器：低通、高通、带通、带阻和任意。频率计权应采用任意 FFT 滤波器，如下所示。软件提供了包含所有前述频率计权的幅频响应数据的 CSV 文本文件（称为频率响应文件，*.frf），可直接调用。



Multi-Instrument 在时域施加频率计权的 FFT 滤波器设置

通常在 FFT 滤波器中应采用矩形窗。如果需要抑制边界效应（例如：由于 FFT 周期延拓假设的固有问题所引起的波形两端的过冲），可选择七个 Tukey 窗函数之一。

需要注意的是，当使用[文件]>[逐帧打开]进行后期分析时，FFT 滤波器不能提供帧间的连续性，这与 IIR 和 FIR 滤波器不同。

5.3 测量的持续时间

测量的持续时间应足够长，以确保合理的统计精度，并确保所评估的声音和振动具有典型性。对于平稳随机信号，测量精度取决于滤波器带宽和测量持续时间。例如，在采用 1/3 倍频带进行的振动评估时，要在 90% 的置信水平下获得小于 3 dB 的测量误差，对于下限频率（LLF）为 1Hz 的情况，最小测量持续时间为 108 秒，而对于下限频率（LLF）为 0.5Hz 的情况，最小测量持续时间为 227 秒。