

如何用 Multi-Instrument 进行冲击试验 - 经典冲击脉冲和冲击响应谱



Rev: 01
Jan. 25, 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。本文可能包含有文字错误。

目录

一、简介	3
二、经典冲击脉冲	3
2.1 基本脉冲波形	3
2.1.1 半正弦脉冲	3
2.1.2 后峰锯齿脉冲	4
2.1.3 梯形脉冲	5
2.2 试验机械	5
2.3 测量硬件	7
2.3.1 IEPE 加速度传感器+ IEPE 数据采集硬件	7
2.3.2 电荷模式加速度传感器 + 电荷数据采集硬件	7
2.3.3 一体化数字加速度传感器	8
2.4 测量软件	8
2.4.1 低通滤波	8
2.4.2 容差极限检查	9
2.4.2.1 基本脉冲波形	9
2.4.2.2 速度变化量	11
2.4.2.3 垂直于冲击方向的运动	13
三、冲击响应谱	13
3.1 冲击响应谱模型	14
3.1.1 绝对加速度冲击响应谱	15
3.1.2 相对速度冲击响应谱	16
3.1.3 相对位移冲击响应谱	16
3.1.4 伪速度冲击响应谱	16
3.1.5 等效静态加速度冲击响应谱	17
3.2 冲击响应谱的计算	17
3.2.1 斜坡响应不变法	17
3.2.2 采样频率的考量	17
3.3 冲击响应谱例子	18
3.3.1 Multi-Instrument 中冲击响应谱的配置	18
3.3.2 半正弦脉冲	19
3.3.2.1 绝对加速度冲击响应谱	19
3.3.2.2 相对速度冲击响应谱	21
3.3.2.3 相对位移冲击响应谱	21
3.3.2.4 伪速度冲击响应谱	22
3.3.2.5 等效静态加速度冲击响应谱	23
3.3.3 汽车与摩托车相撞试验	24
3.3.3.1 绝对加速度冲击响应谱	25
3.3.3.2 伪速度冲击响应谱	25
3.3.3.3 速度变化量	26
3.3.4 舰船冲击试验	27
3.3.4.1 绝对加速度冲击响应谱	27
3.3.4.2 伪速度冲击响应谱	28
3.3.5 神户大地震信号	28
3.3.5.1 绝对加速度冲击响应谱	29
3.3.5.2 伪速度冲击响应谱	30

一、简介

机械冲击试验用于评估产品（或结构）在受到突发机械冲击或震动时的耐受能力。很多产品在其生命周期中都可能经历装卸、运输、现场使用以及其它突然加速或减速的情况。对于这些产品，尤其需要进行冲击试验。通过冲击试验，可发现设计和制造过程中的弱点、潜在的失效点以及可改进的地方，并保证产品的机械耐用性和可靠性符合相应的工业标准或法规。冲击试验是产品开发和质量保证过程中的一个重要环节，在航空航天、汽车、电子和军工等方面有广泛的应用。

机械冲击可以由撞击、碰撞、坠落、颠簸、地震或爆炸等情况引起。虽然这些冲击的加速度随时间变化过程可以在现场录制，但其中只有一部分情形可以通过实验室的冲击设备重现出来。传统上的冲击试验，通常采用指定了峰值加速度和持续时间的三种“经典”冲击脉冲：半正弦脉冲、后峰锯齿脉冲和梯形脉冲，来模拟真实场景下的冲击效果（例如运输过程中常遭遇到的冲击）。这些脉冲的形状在时域上相对简单，而且可方便地在实验室中生成，但它们并不一定能代表真实的冲击环境。对于那些在时域上很难用简单的数学函数来描述、且难以在实验室中复现的冲击信号（例如火工冲击），如何生成在一定程度上与其等效的动态冲击环境是一个棘手的问题。解决方案就是引入冲击响应谱（Shock Response Spectrum, SRS）的概念。冲击响应谱可用来表征任意一个冲击信号、估计其损害潜力、并指定试验强度。真实场景中的冲击信号的冲击响应谱可以从其时域波形唯一地推导出来。该冲击响应谱可以作为后续在受限的实验室环境中合成一个新的冲击波形的基本要求。

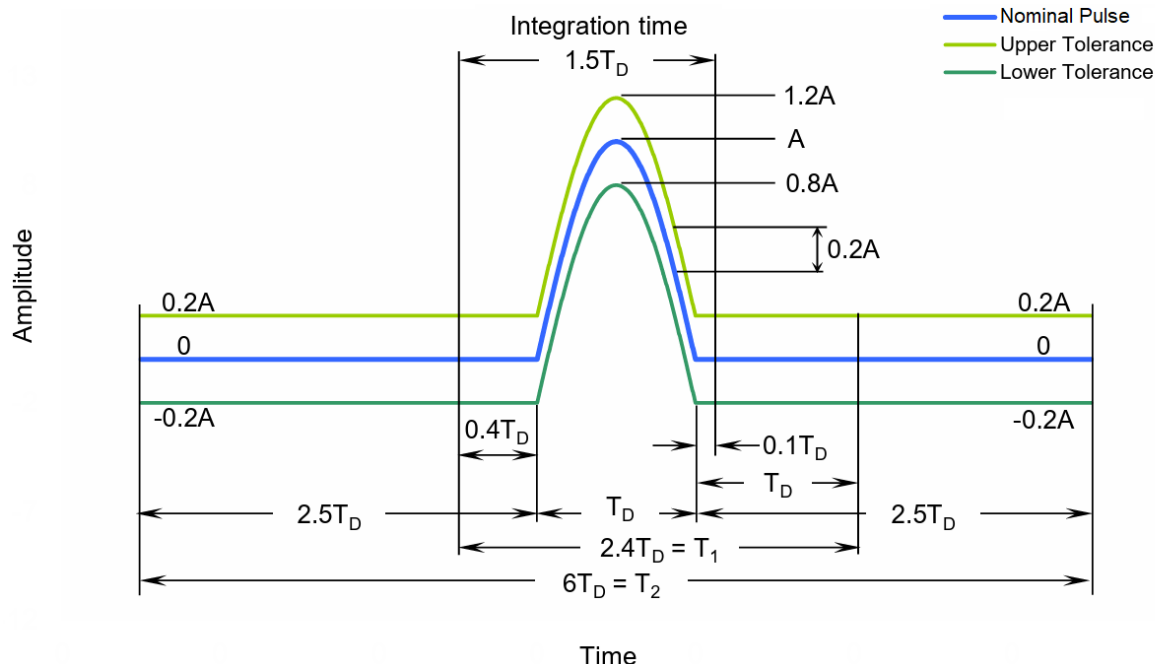
二、经典冲击脉冲

2.1 基本脉冲波形

IEC 60068-2-27 标准定义了用于经典冲击试验的三种基本脉冲波形。

2.1.1 半正弦脉冲

半正弦脉冲只含有半个周期的正弦波，是最普遍适用的冲击脉冲形式。它可用于重现与线弹性系统撞击或被其缓冲造成的冲击效果，例如与一个弹性结构碰撞。下图显示的是一个标称的半正弦脉冲及其容差的上下限。



半正弦脉冲及其容差范围

其中：

A = 标称脉冲的峰值加速度

T_D = 标称脉冲的持续时间

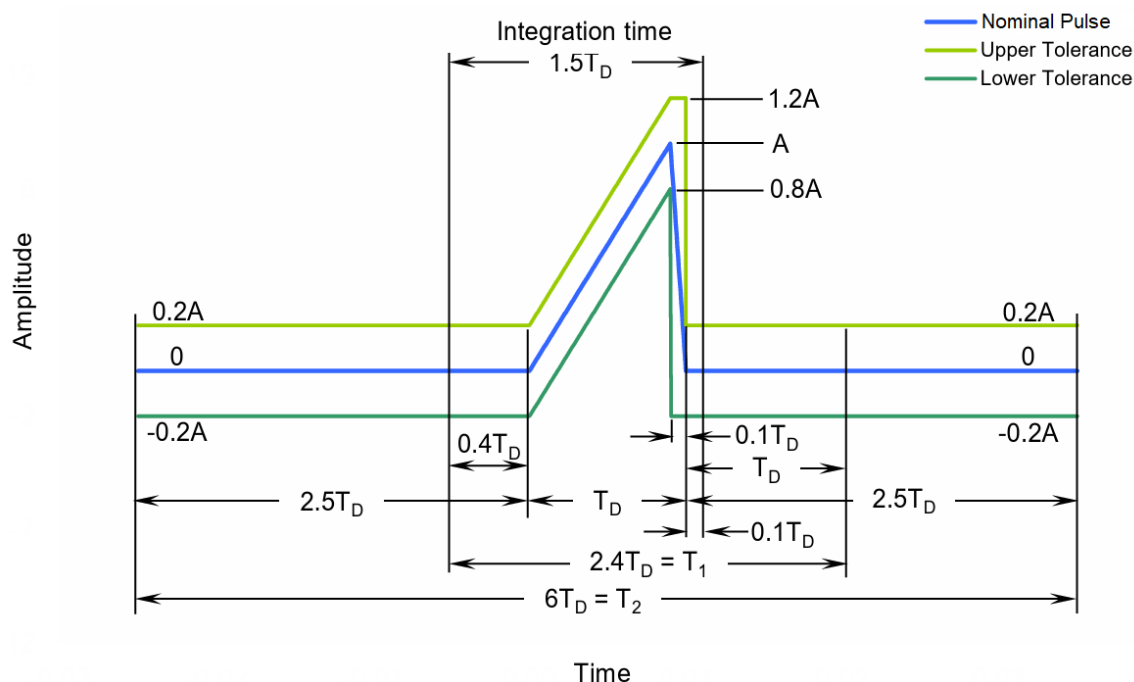
T_1 = 传统冲击试验台上冲击脉冲的最小监测时间

T_2 = 振动台上冲击脉冲的最小监测时间

积分时间：用于将加速度转换为速度。速度变化量的理论值为： $2/\pi A T_D$ 。实测值与理论值的偏差应在 $\pm 15\%$ 以内。

2.1.2 后峰锯齿脉冲

后峰锯齿脉冲包含一个周期的非对称的三角波，其上升沿长而下降沿短，如下图所示。它比半正弦脉冲和梯形脉冲有更平坦的加速度冲击响应谱。



后峰锯齿脉冲及其容差范围

其中：

A = 标称脉冲的峰值加速度

T_D = 标称脉冲的持续时间

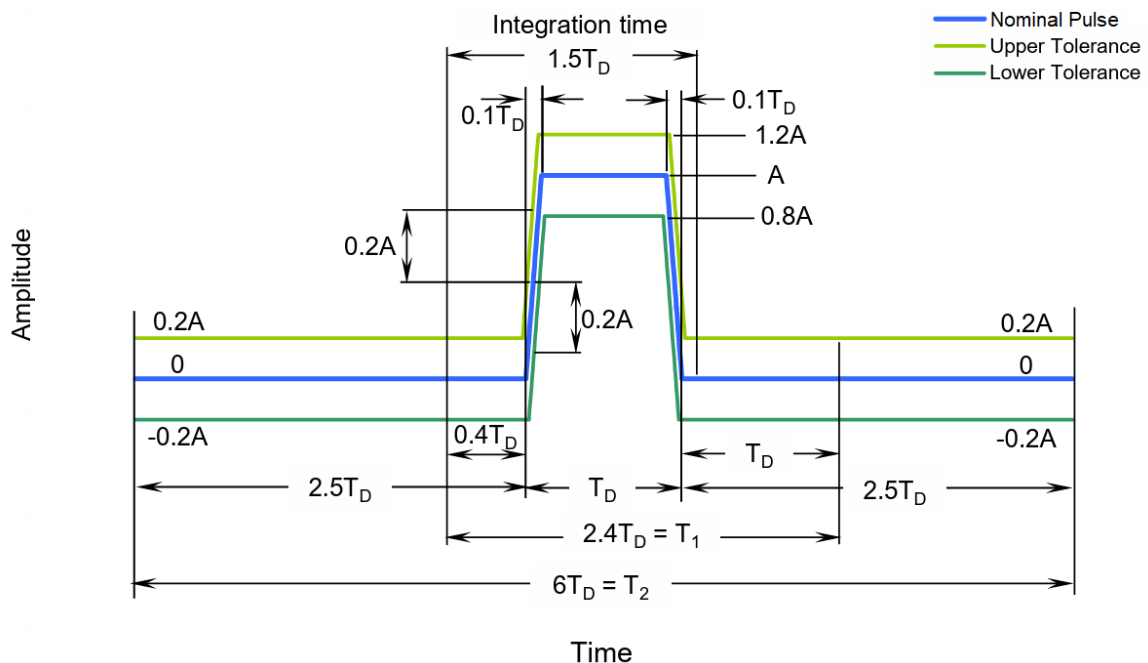
T_1 = 传统冲击试验台上冲击脉冲的最小监测时间

T_2 = 振动台上冲击脉冲的最小监测时间

积分时间：用于将加速度转换为速度。速度变化量的理论值为： $1/2AT_D$ 。实测值与理论值的偏差应在 $\pm 15\%$ 以内。

2.1.3 梯形脉冲

梯形脉冲含有一个周期的对称的梯形波，其上下沿皆短，如下图所示。它提供比半正弦脉冲具有更高更宽的加速度冲击响应谱。当模拟诸如太空探测器或卫星发射的“爆炸螺栓”阶段的冲击环境时，可采用此脉冲。



梯形脉冲及其容差范围

其中：

A = 标称脉冲的峰值加速度

T_D = 标称脉冲的持续时间

T_1 = 传统冲击试验台上冲击脉冲的最小监测时间

T_2 = 振动台上冲击脉冲的最小监测时间

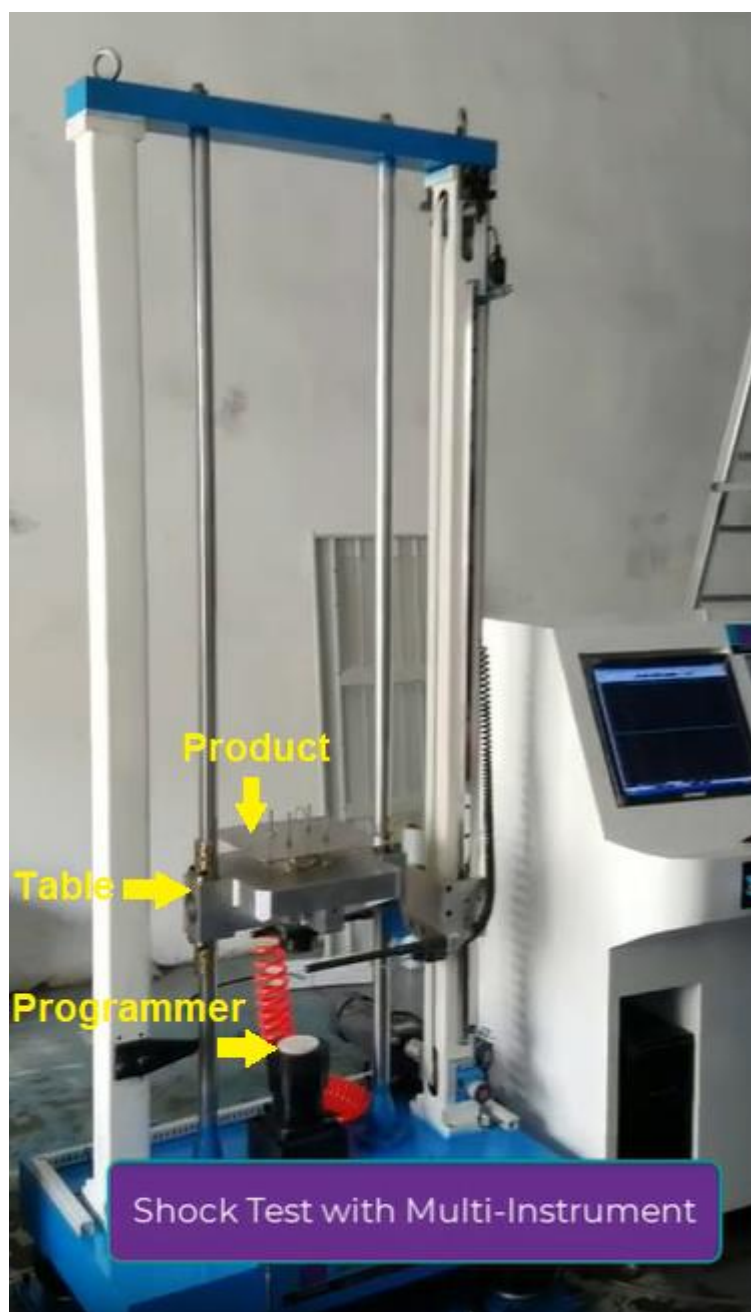
积分时间：用于将加速度转换为速度。速度变化量的理论值为： $0.9AT_D$ 。实测值与理论值的偏差应在 $\pm 15\%$ 以内。

2.2 试验机械

经典的冲击试验可以在机械冲击试验台、电动振动台、或伺服液压振动台上进行。与常见的振动台不同，机械冲击试验台不具有闭环控制器。而振动台更具可控性，能够产生更复杂的冲击和振动信号。在振动台上进行经典冲击试验，脉冲在开始和结束时

都必须处于零加速度、零速度和零位移。因此必须添加预补偿和/或后补偿脉冲，以使振动台返回到这些零参数。

最常见的机械冲击试验台是自由落体式垂直冲击试验台，参考下图。在进行自由落体冲击试验时，先将产品固定于台面上，然后将台面提升至与目标峰值冲击加速度相对应的高度处，再让其自由坠落到“地面”。脉冲形状和持续时间可以通过不同的脉冲波形发生器（Programmer，或称为缓冲器）来控制。诸如橡胶或毛毡等弹性垫子，通常用于产生半正弦脉冲。压扁的铅锥可用于生成后峰锯齿脉冲，而铝质蜂房材料或气体弹簧则可用于产生梯形脉冲。



自由落体式垂直冲击试验台

2.3 测量硬件

冲击试验用的测量系统硬件通常包括压电加速度传感器和数据采集硬件，可分为以下三类。

2.3.1 IEPE 加速度传感器+ IEPE 数据采集硬件

IEPE (Integrated Electronics Piezo-Electric)指的是集成了电子电路的压电传感器。IEPE 传感器内置有将压电传感器输出的高阻抗电荷信号转换为低阻抗电压信号的电路，以便让信号能在电缆中低损耗高质量地传输。传感器的电路由恒流源供电，其特点是供电电流与传感器电压信号仅仅通过一条屏蔽的单芯线传送。IEPE 的其它专有名称包括：ICP、CCLD、IsoTron 和 DeltaTron。

虚仪科技生产的 VT IEPE-2G05 系列是 IEPE 数据采集硬件的一个典型例子。其 BNC 输入口可直接与 IEPE 传感器相连，而且它以常见的 USB 声卡方式工作，只是具备有额外的输入电压范围切换和数字滤波功能。



一个典型的 IEPE 数据采集系统例子

2.3.2 电荷模式加速度传感器 +电荷数据采集硬件

与 IEPE 传感器不同，电荷模式传感器不具有内置电子电路，因此更能有效地抵抗高温和冲击。为了减小摩擦电噪声，必须采用专用于连接这种传感器和电荷放大器的低噪声电缆。

虚仪科技生产的 VT CAMP-2G05 系列是电荷数据采集硬件的一个典型例子。其 BNC 输入口可直接与电荷模式传感器相连，而且它以常见的 USB 声卡方式工作，只是具备有额外的输入电荷范围切换和数字滤波功能。



一个典型的电荷数据采集系统例子

2.3.3 一体化数字加速度传感器

USB 数字加速度传感器是集所有硬件功能为一体的设备。典型的例子包括：Digiducer 333D01 和 333D04。它们也按 USB 声卡方式工作。



一个典型的一体化数字加速度传感器例子

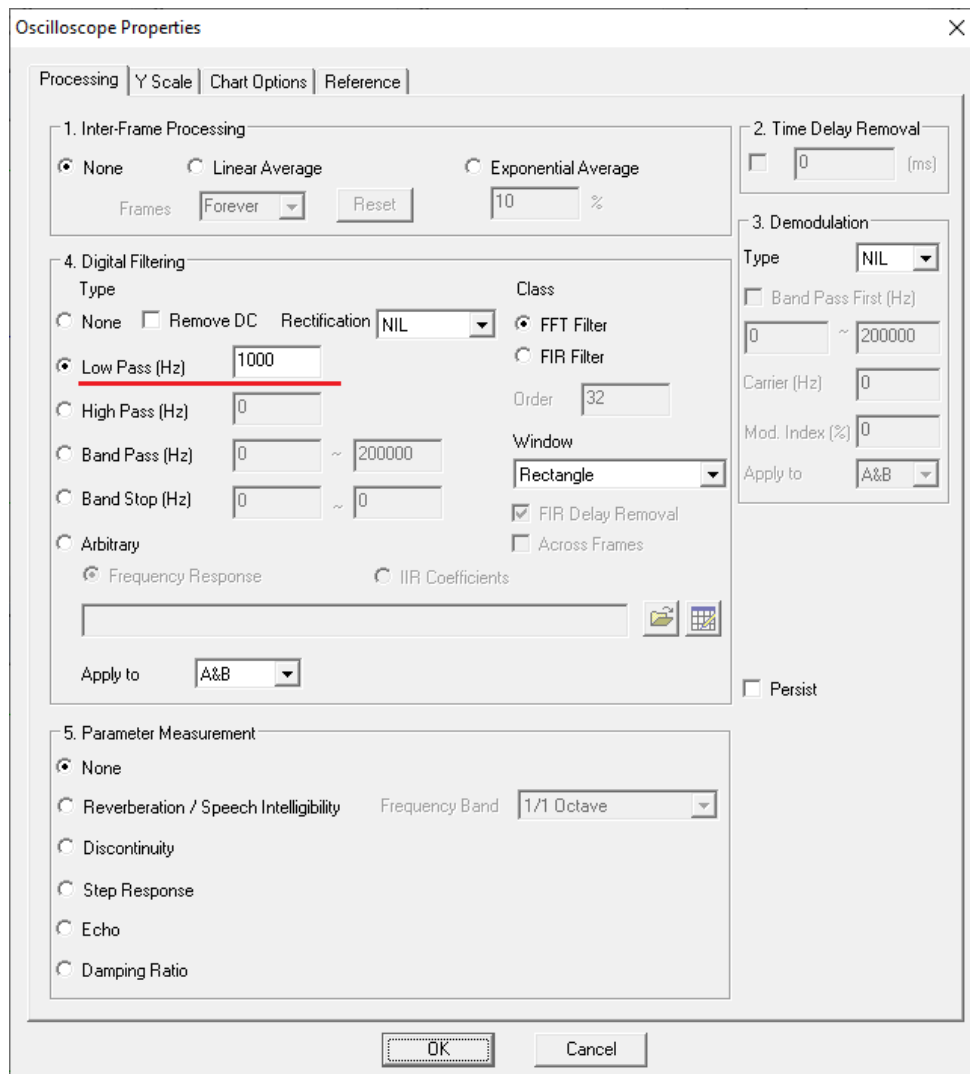
2.4 测量软件

虚仪科技开发的 Multi-Instrument（万用仪）是测量软件的一个典型例子。Multi-Instrument 是一款功能强大的多功能虚拟仪器软件，是集时域、频域、时频域和调制域分析为一体的专业分析工具。它支持多种硬件，从几乎所有电脑都配备了的声卡到专用的 ADC 和 DAC 硬件，例如 NI DAQmx 卡、VT DSO、VT RTA、VT IEPE、VT CAMP、RTX6001 等。可从官网：www.multi-tech.cn或 www.virtins.com免费下载 21 天全功能试用版。

2.4.1 低通滤波

在冲击试验中测得的加速度数据常常在标称波形上叠加有高频噪声。在执行容差上下限检查前应先通过低通滤波来平滑波形。低通滤波的-3dB 截止频率不应低于 $1.5/T_D$ ，而且其相频响应应尽量保持线性，以使由其引入的基本脉冲波形变形可忽略不计。

Multi-Instrument 支持三种数字滤波：FFT、FIR 和 IIR。这里推荐采用 FFT 滤波，因为其具有零相位响应的特点。下图是一个 FFT 低通滤波器的配置例子。



Multi-Instrument 的数字滤波配置界面

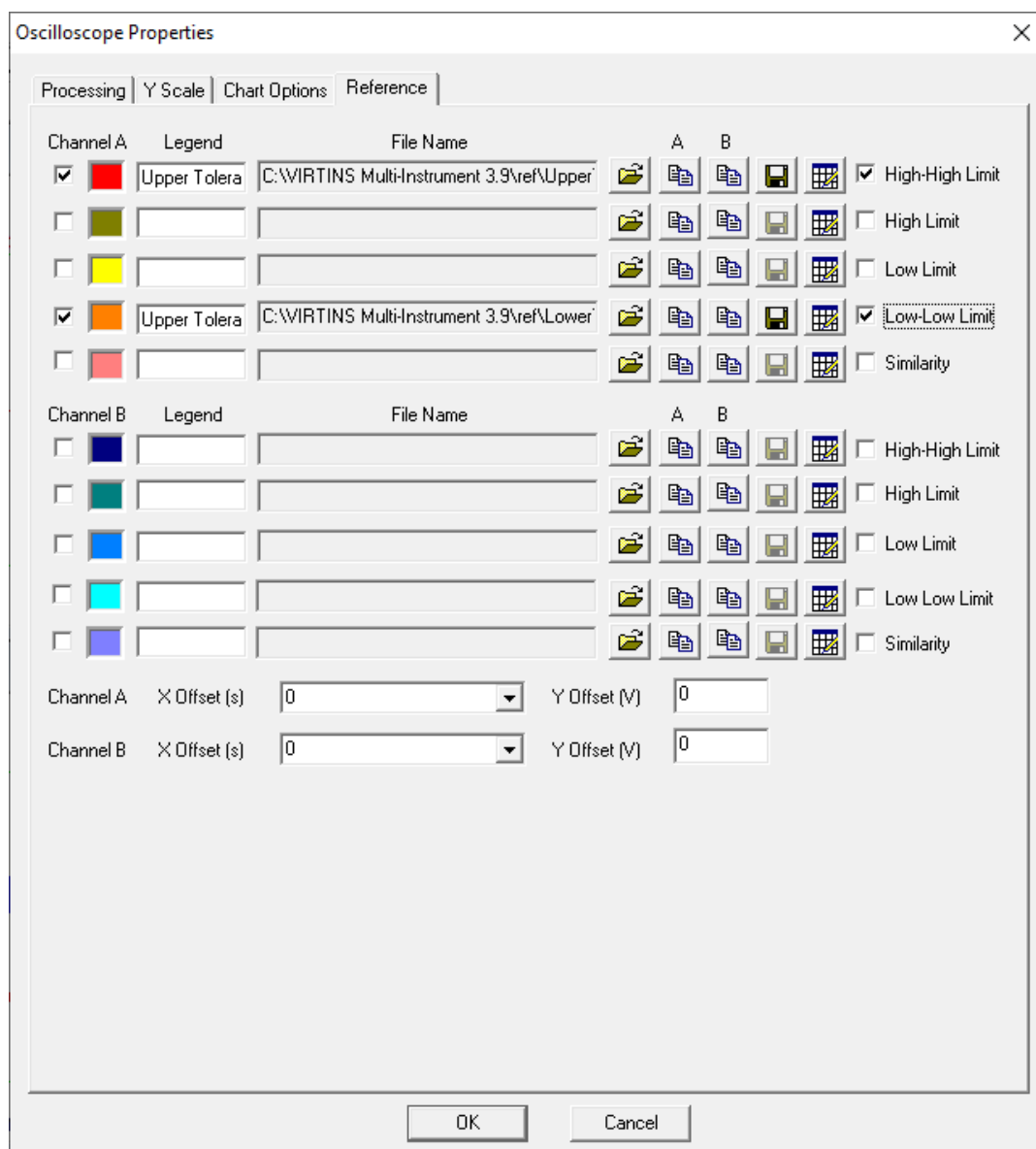
2.4.2 容差极限检查

冲击的严重程度由峰值加速度、标称脉冲的持续时间和冲击次数决定。对试件施加的冲击脉冲的严重程度和形状应该尽量能够重现其在实际运输或工作环境中所遭受到的冲击。如果试验目的是评估试件的结构完整性，则应满足相应的设计要求。为了确保冲击试验的高度可重复性，应对基本脉冲波形、速度变化和垂直于冲击方向的运动进行容差极限检查。

2.4.2.1 基本脉冲波形

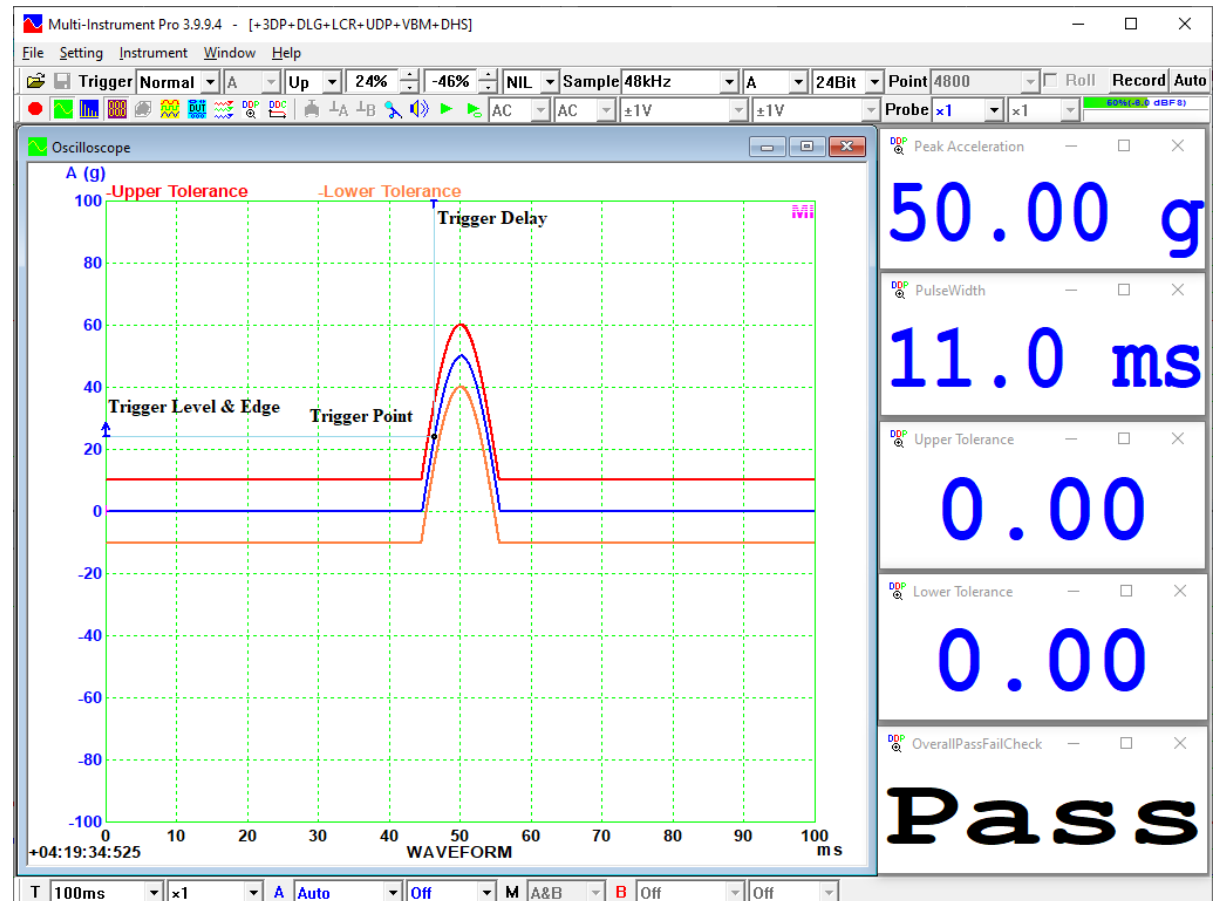
在 Multi-Instrument 中，可通过调节触发模式、触发源、触发沿、触发电平、触发延迟和触发频率抑制，来定位所采集到的冲击波形在示波器窗口横轴 X 上的位置（比如：

中心)。基本脉冲波形的容差上下限可通过 CSV 文本文件来定义,并配置为参考曲线,如下图所示。可手动设定参考曲线在 X 轴上的偏移量(X Offset)。也可选择“Align to Peak (对齐波峰)”或“Align to Trough (对齐波谷)”,以使参考曲线与所采集到的波形在 X 轴上自动对齐。



Multi-Instrument 中参考曲线（容差上下限）的配置

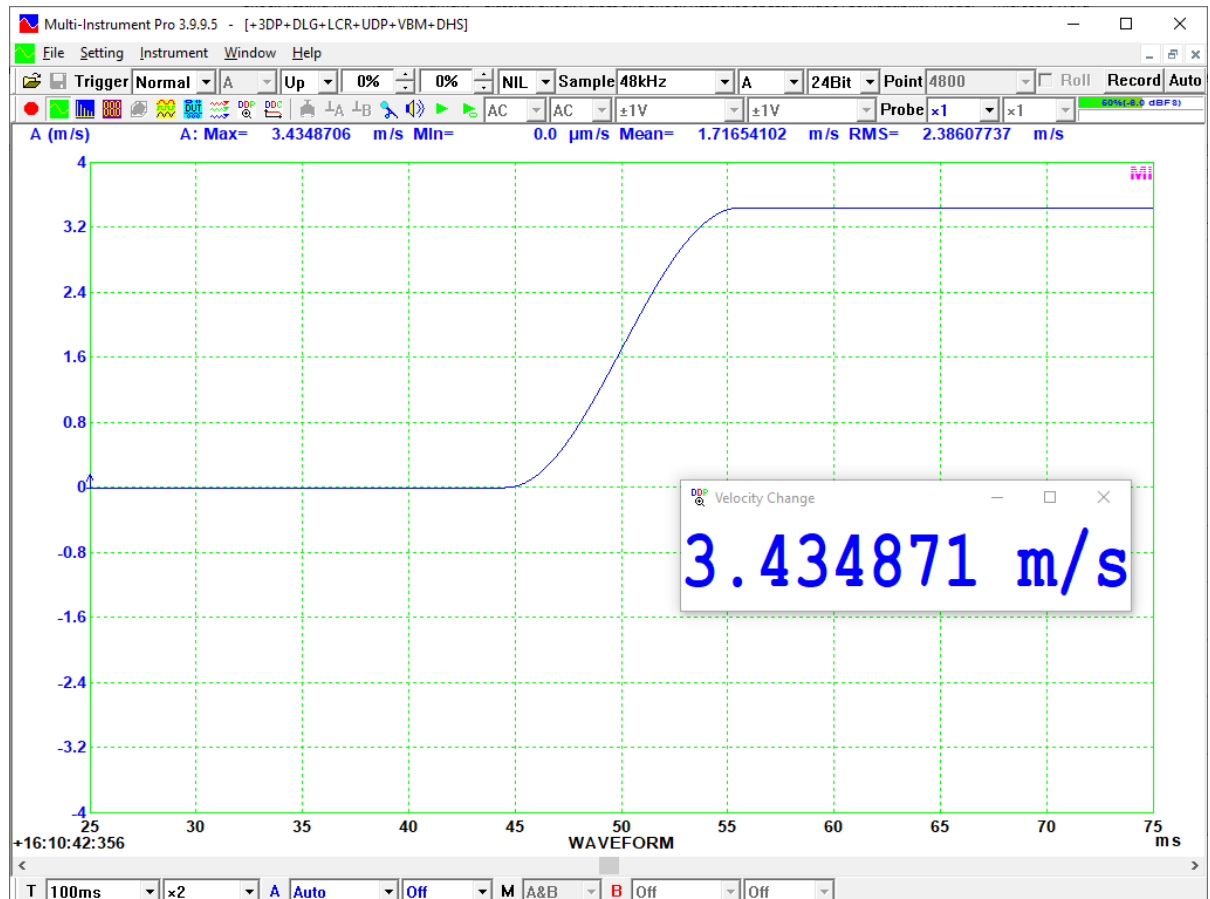
下图是在 Multi-Instrument 中进行波形定位及容差上下限检查的例子。



Multi-Instrument 中的波形定位与容差上下限检查

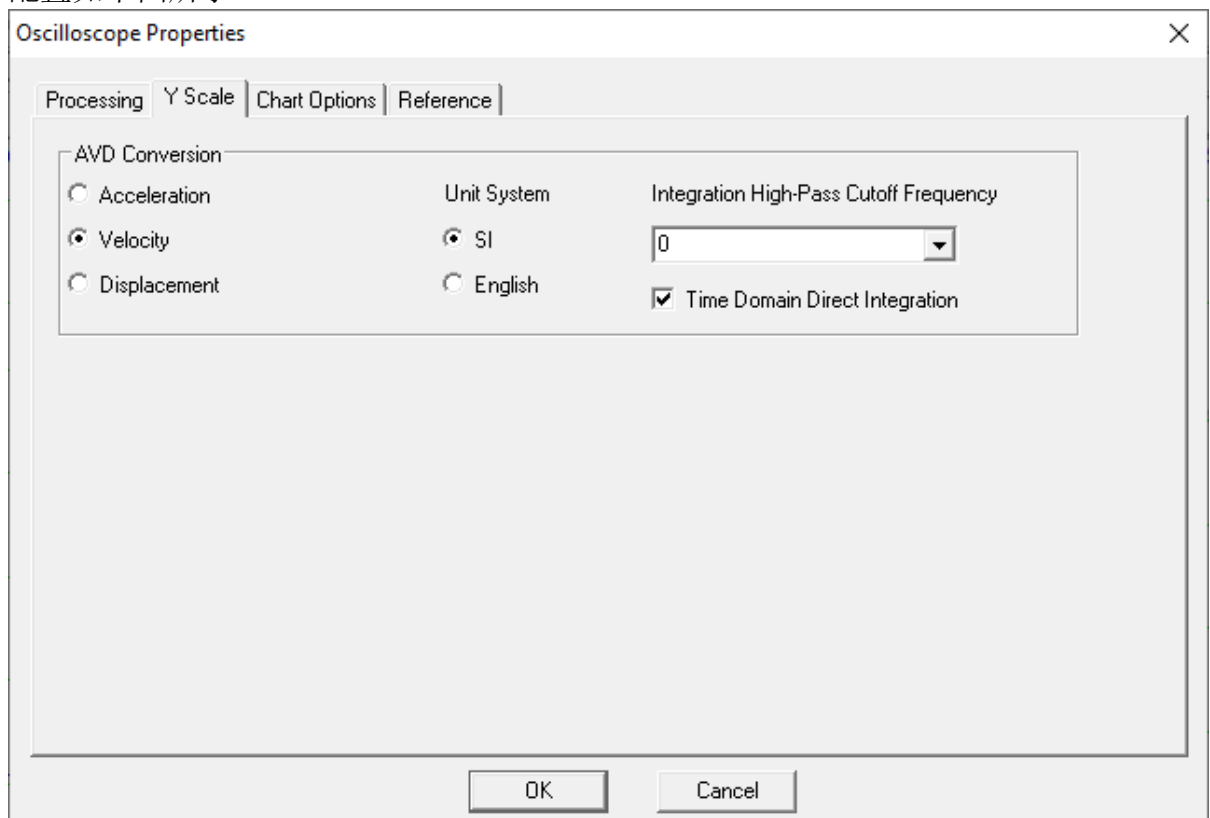
2.4.2.2 速度变化量

如前所述，实测的速度变化量应在标称脉冲所对应的理论值的 $\pm 15\%$ 以内。下图是一个脉宽为 11ms、峰值为 50g 的半正弦脉冲（即：上图显示的冲击脉冲）的速度（变化量）随时间变化曲线。



Multi-Instrument 中通过时域直接积分所得到的速度变化曲线

将加速度转换为速度，再转换为位移需要分别进行积分和二次积分。Multi-Instrument 支持时域积分和频域积分。上图显示的速度变化曲线是通过在时域直接积分而得，其配置如下图所示。



Multi-Instrument 中加速度、速度和位移转换的配置界面

2.4.2.3 垂直于冲击方向的运动

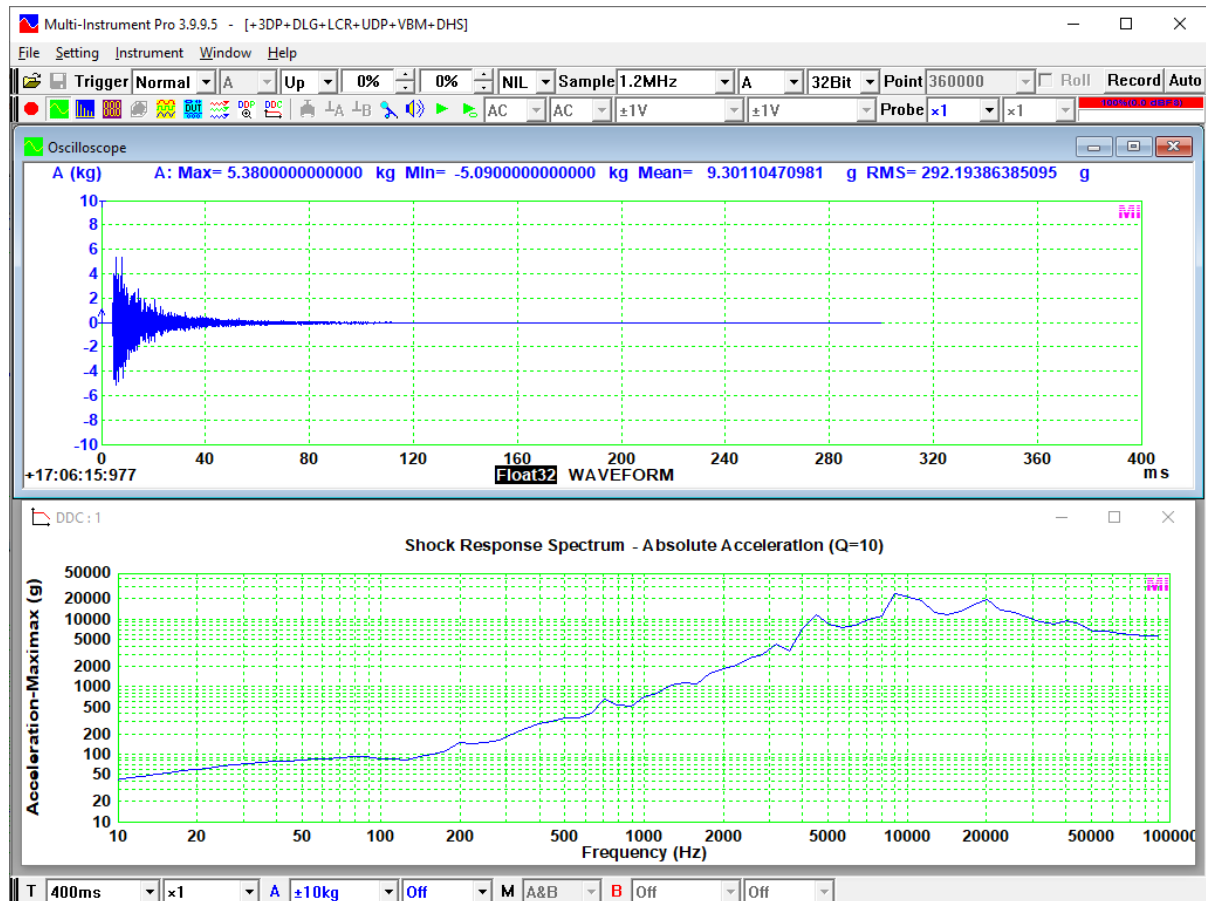
垂直于冲击方向的加速度不应超过所施加的冲击脉冲的峰值加速度的 30%。

三、冲击响应谱



火箭热分离阶段

冲击响应谱（Shock Response Spectrum, SRS）是描述一系列具有不同固有频率和相同阻尼比的单自由度(Single Degree Of Freedom, SDOF)系统（例如：质量-弹簧系统）在一个给定的具有任意波形的瞬态加速度输入的激励下的最大响应。其横轴显示的是虚构的单自由度系统的固有频率，而纵轴显示的是该单自由度系统在该冲击下的加速度、速度或位移的最大响应值。下图是一个典型的火工冲击脉冲及其绝对加速度冲击响应谱（品质因数 $Q=10$ ，或阻尼比 $\xi=0.05$ ）。

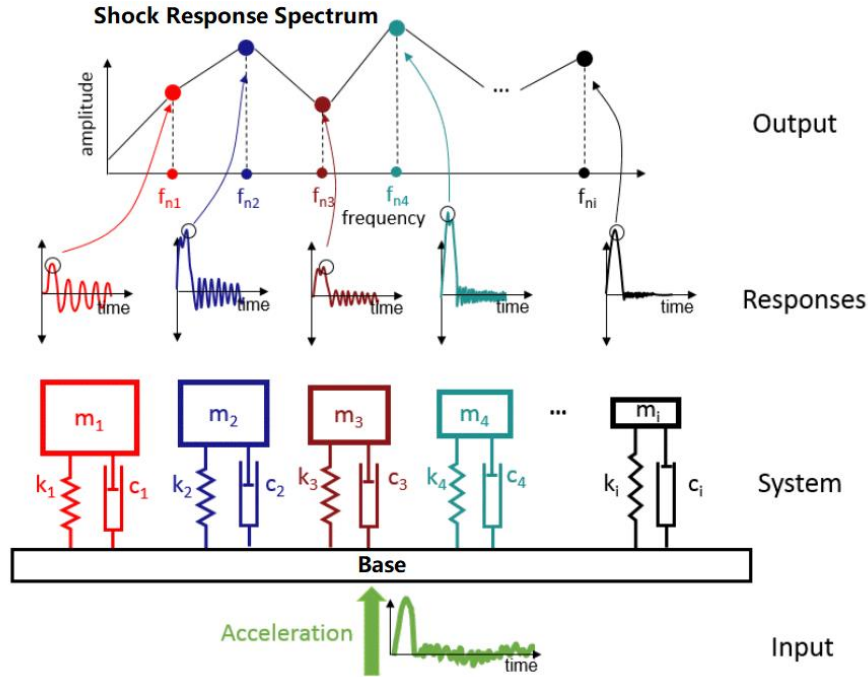


一个火工冲击脉冲及其绝对加速度冲击响应谱

上图中的火工脉冲具有非常复杂的波形，其加速度瞬时值基本上是在零点附近做大约对称的上下振荡，总体包络线呈指数衰减。实验室的机械设备几乎无法重现这种火工脉冲来进行产品的合格测试。为了解决这个难题，通常的行业做法是采用火工脉冲的冲击响应谱而非波形来作为测试指标，从而合成具有大约相似破坏潜力的波形。这一过程称为冲击响应谱的合成。有无数个具有相同冲击响应谱的波形，而冲击响应谱的合成需要在实验室设备的限制条件下找到一个适合的波形方案。

3.1 冲击响应谱模型

当给定了一段瞬态加速度输入信号后，冲击响应谱可通过计算一系列的具有不同固有频率和相同阻尼比的单自由度系统对其的响应得到，如下图所示。



冲击响应谱模型

将已知的加速度输入信号 a_1 施加于一系列相互独立的单自由度系统的公共基座上。每个单自由度系统包括一组独有的质量 m 、阻尼常数 c 和弹性系数 k 。其无阻尼固有频率 f_n 、共振增益（或品质因数） Q 和阻尼比 ζ 分别由以下三式给出：

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$Q = \frac{\sqrt{km}}{c}$$

$$\zeta = \frac{1}{2Q} = \frac{c}{2\sqrt{km}}$$

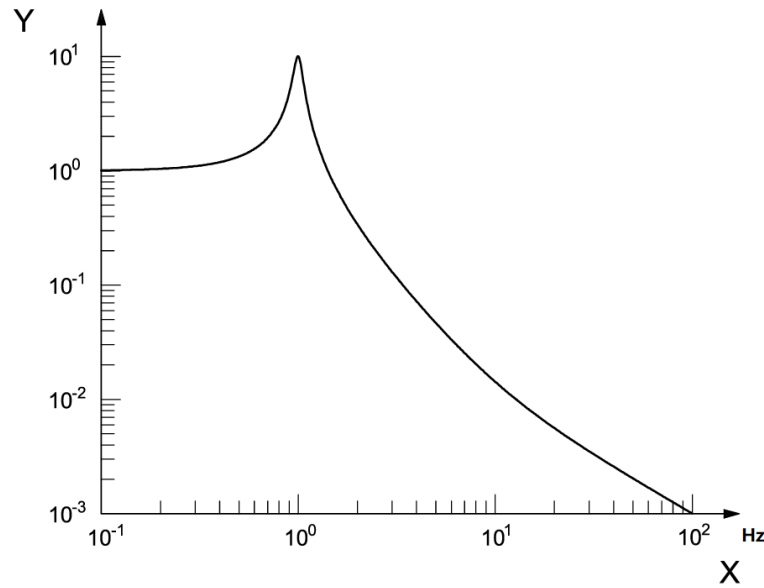
冲击响应谱由各单自由度系统的最大响应与其所对应的固有频率构成。受到不同行业关注的冲击响应谱大体上包括以下五种：绝对加速度、相对速度、相对位移、伪速度和等效静态加速度。例如在航空航天和国防工业中，常常采用绝对加速度冲击响应谱进行产品合格测试；而在海军冲击测试中，相对速度冲击响应谱更受关注。单自由度系统对加速度输入信号的响应可以从相应的传递函数中推导出来。

3.1.1 绝对加速度冲击响应谱

对于一个单自由度系统，其基座加速度输入 a_1 与其加速度响应 a_2 之间的传递函数 $G(s)$ 由下式给出：

$$G(s) = \frac{a_2(s)}{a_1(s)} = \frac{cs + k}{ms^2 + cs + k} = \frac{\frac{\omega_n s}{Q} + \omega_n^2}{s^2 + \frac{\omega_n s}{Q} + \omega_n^2}$$

其中 s 为拉普拉斯变量（复数频率），以弧度/秒表示； $\omega_n=2\pi f_n$ 为角固有频率，也以弧度/秒表示。下图是一个单自由度系统的传递函数曲线例子，其固有频率为 1Hz（即： $f_n=1\text{Hz}$ ），共振增益为 10（即： $Q=10$ ）。请注意：传递函数是激励信号频率的函数，而非系统固有频率的函数，这与冲击响应谱不同。



一个单自由度系统的输入加速度与输出加速度之间的传递函数

3.1.2 相对速度冲击响应谱

对于一个单自由度系统，其基座加速度输入 a_1 与其相对速度响应 V_2-V_1 之间的传递函数 $G(s)$ 由下式给出：

$$G(s) = \frac{v_2(s) - v_1(s)}{a_1(s)} = \frac{-ms}{ms^2 + cs + k} = \frac{-s}{s^2 + \frac{\omega_n s}{Q} + \omega_n^2}$$

3.1.3 相对位移冲击响应谱

对于一个单自由度系统，其基座加速度输入 a_1 与其相对位移响应 d_2-d_1 之间的传递函数 $G(s)$ 由下式给出：

$$G(s) = \frac{d_2(s) - d_1(s)}{a_1(s)} = \frac{-m}{ms^2 + cs + k} = \frac{-1}{s^2 + \frac{\omega_n s}{Q} + \omega_n^2}$$

3.1.4 伪速度冲击响应谱

将相对位移响应乘以角固有频率 ω_n 可得伪速度响应，相应的传递函数为：

$$G(s) = \frac{d_2(s) - d_1(s)}{a_1(s)} \cdot \omega_n = \frac{-m\omega_n}{ms^2 + cs + k} = \frac{-\omega_n}{s^2 + \frac{\omega_n s}{Q} + \omega_n^2}$$

3.1.5 等效静态加速度冲击响应谱

将相对位移响应乘以角固有频率的平方 ω_n^2 可得等效静态加速度响应，相应的传递函数为：

$$G(s) = \frac{d_2(s) - d_1(s)}{a_1(s)} \cdot \omega_n^2 = \frac{-m\omega_n^2}{ms^2 + cs + k} = \frac{-\omega_n^2}{s^2 + \frac{\omega_n s}{Q} + \omega_n^2}$$

3.2 冲击响应谱的计算

3.2.1 斜坡响应不变法

前述单自由度系统的五种传递函数在数字域可由相应的数字滤波器来近似地实现。将数字化后的加速度输入信号送入这些数字滤波器，即可得到五种响应。有多种方法可用于按照已知的模拟传递函数，设计出相应的数字滤波器。其中，以斜坡响应不变法使用最为广范，且符合 ISO 18431-4 标准。在此算法下，前述五种响应的二阶无限冲激响应（Infinite Impulse Response, IIR）滤波器具有以下通用的 z 变换形式：

$$H(z) = \frac{\beta_0 + \beta_1 \cdot z^{-1} + \beta_2 \cdot z^{-2}}{1 + \alpha_1 \cdot z^{-1} + \alpha_2 \cdot z^{-2}}$$

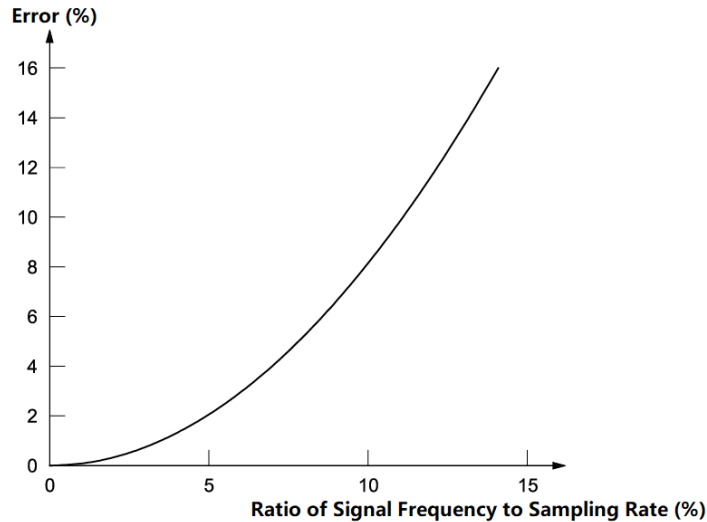
在时域可表示为：

$$y_n = \beta_0 \cdot x_n + \beta_1 \cdot x_{n-1} + \beta_2 \cdot x_{n-2} - \alpha_1 \cdot y_{n-1} - \alpha_2 \cdot y_{n-2}$$

其中 x_n 为输入的加速度时间序列， y_n 为输出的响应时间序列， β_n 为前馈滤波系数， α_n 反馈滤波系数。滤波系数由单自由度系统的响应种类、采样频率 f_s 、固有频率 f_n 和共振增益 Q 决定。

3.2.2 采样频率的考量

斜坡响应不变法存在着一个随信号频率与采样频率之比增加而增大的偏差。另一项误差是对响应信号采样造成的，因为响应信号的“真实”峰值可能存在于采样点之间而非采样点上。这两种误差叠加起来会导致在采样频率的 5% 处的总误差约为 2%，在其 10% 处的总误差约为 8%，如下图所示。



冲击响应谱计算的总最大误差

因此为了保证计算精度，采样频率应至少等于输入信号中最高频率的 10 倍。Multi-Instrument 内含一个特别的算法，能够在软件内部先将输入信号的采样频率提高至其原来的 32 倍，然后再计算其冲击响应谱。这样计算出来的冲击响应谱即使在奈奎斯特频率处（即：采样频率的一半处），也能维持非常高的精度。此算法非常精准，尤其是在数据采集硬件设备具有陡直的抗混滤波器的情形下，例如 VT IEPE-2G05 系列和 VT CAMP-2G05 系列。

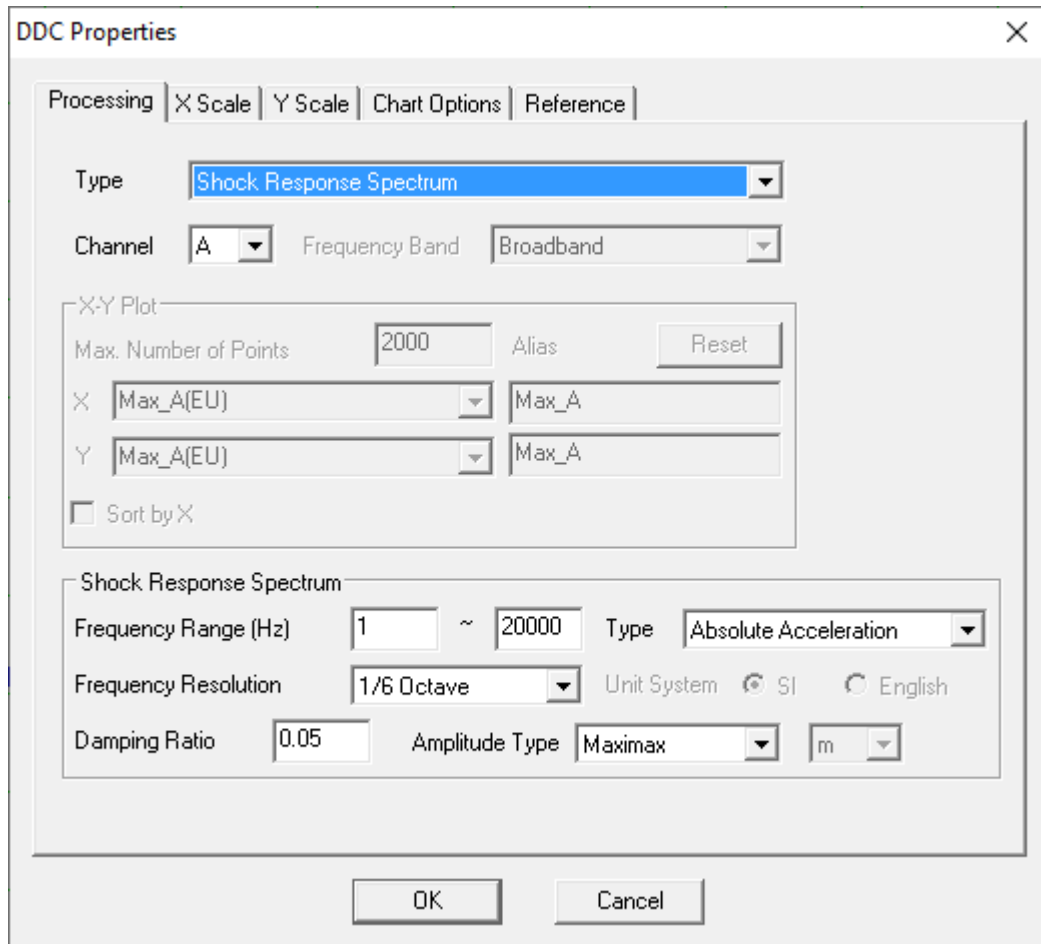
3.3 冲击响应谱例子

以下例子中的加速度数据可从：

<https://www.multi-tech.cn/doc/ShockResponseSpectrumAccelerationData.zip> 下载。它们的格式为 CSV 文本格式。可通过[文件]>[输入]调入 Multi-Instrument。

3.3.1 Multi-Instrument 中冲击响应谱的配置

在 Multi-Instrument 中，可通过导出曲线（Derived Data Curves, DDC）来显示冲击响应谱。下图是冲击响应谱的配置界面。



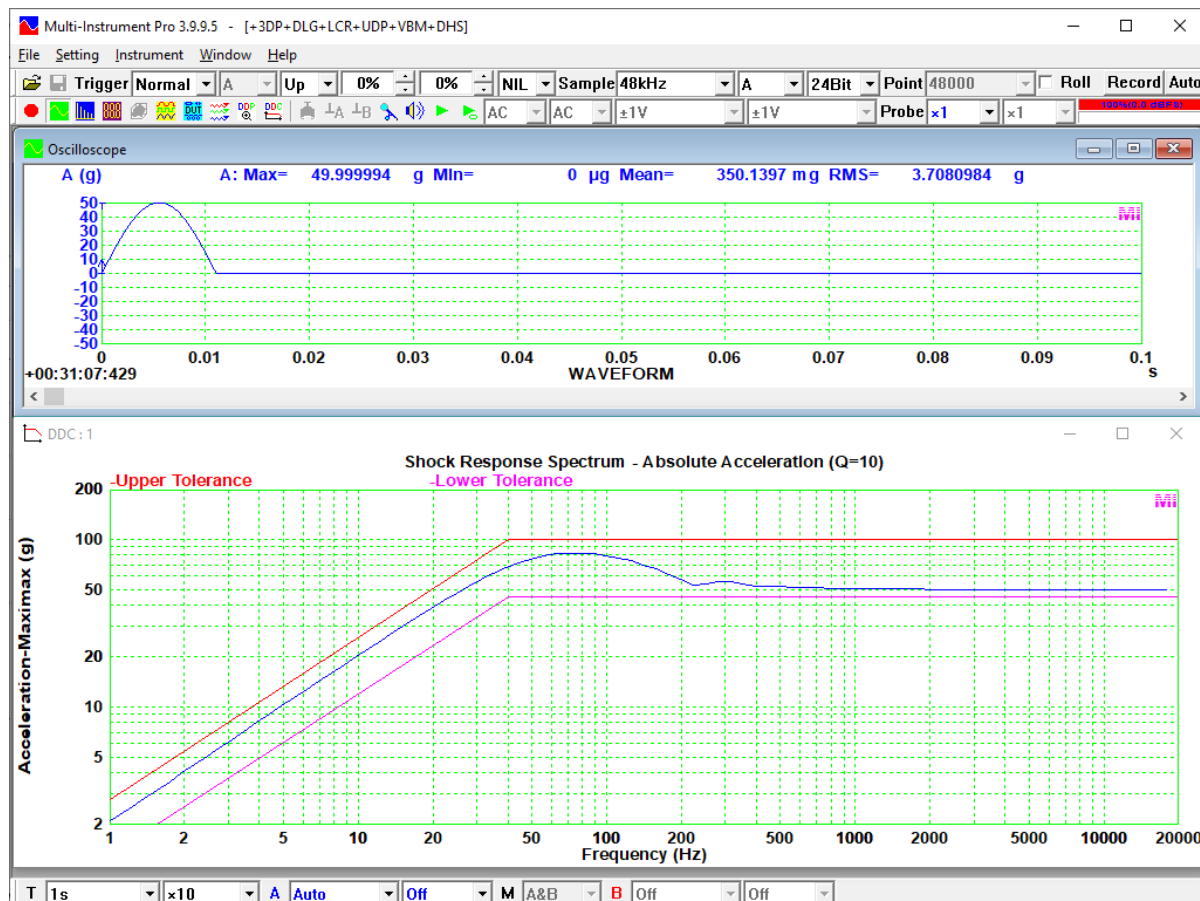
Multi-Instrument 中冲击响应谱的配置界面

Multi-Instrument 采用斜坡响应不变法，可计算五种冲击响应谱：绝对加速度、相对速度、相对位移、伪速度和等效静态加速度。支持国际单位制和英制显示。在国际单位制下，有四个选项可控制速度和位移的显示尺度：m（米）、dm（分米）、cm（厘米）、mm（毫米）。用于冲击响应谱计算的固有频率是在指定的频率范围内、按指定的倍频程或分数倍频程间隔选定的。阻尼比也可配置，常用 5%（即： $Q=10$ ）。Multi-Instrument 还支持冲击响应谱的幅度类别选择：最大绝对值、最大值+（最大正向值）和最大值-（最大反向值）。瞬时加速度输入信号的记录时间长度应足够，以容纳用于计算的任何一个单自由度系统的响应中的主要部分（即：包含最大正向值和最大反向值）。通常，当阻尼比在 0.02~0.1 区间时，固有频率采用 1/6 倍频程间隔；当阻尼比低于和高于该区间时，则分别采用 1/12 和 1/3 倍频程间隔。

3.3.2 半正弦脉冲

3.3.2.1 绝对加速度冲击响应谱

下图是一个脉宽为 11 ms、峰值加速度为 50g 的半正弦脉冲的绝对加速度冲击响应谱。计算所用的阻尼比为 5%（即： $Q=10$ ）。图中还设置了容差的上下限。



半正弦脉冲的绝对加速度冲击响应谱

从上图可以看出，该冲击响应谱可按固有频率分为三个部分：

(1) 固有频率 $f_n < 26\text{Hz}$

峰值加速度响应低于峰值加速度输入（50g）。这表明输入冲击被衰减了或者说“隔离”了。冲击响应谱的斜率为+6dB/倍频程，也就是说，峰值加速度响应随着固有频率的倍增而倍增，它代表了一条等速线。

(2) $26\text{Hz} \leq$ 固有频率 $f_n \leq 225\text{Hz}$

峰值加速度响应高于峰值加速度输入（50g）。这表明输入冲击被放大了。谱线最高点位于大约 75Hz 处，对应的峰值加速度大约为 83g。

(3) 固有频率 $f_n > 225\text{Hz}$

峰值加速度响应约等于峰值加速度输入（50g）。这表明单自由度系统是“硬固定”于基座上的，并跟随其运动。

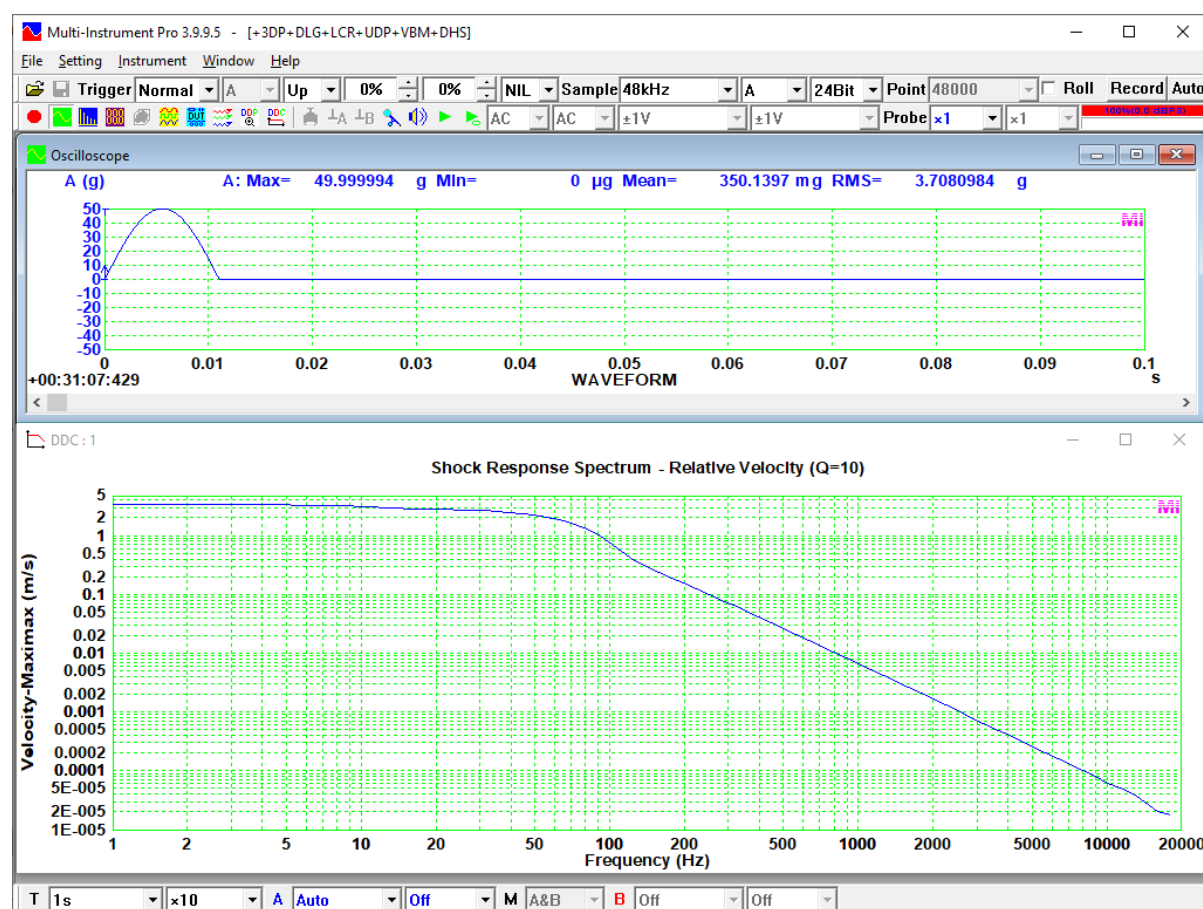
下表以更通用的方式总结了三种经典脉冲的冲击响应谱的以上三个部分的分界及特点。

	衰减	放大	硬固定（跟随）
半正弦	$f_n < 0.3/T_D$	$0.3/T_D \leq f_n \leq 3/T_D$ (最大放大倍数 1.7 @ $0.8/T_D$)	$f_n > 3/T_D$
后峰锯齿	$f_n < 0.4/T_D$	$0.4/T_D \leq f_n \leq 1.2/T_D$	$f_n > 1.2/T_D$

		(最大放大倍数 1.3 @ $0.65/T_D$)	
梯形	$f_n < 0.2/T_D$	$0.2/T_D \leq f_n \leq 10/T_D$ (最大放大倍数 2.0 @ $0.55/T_D$)	$f_n > 10/T_D$

3.3.2.2 相对速度冲击响应谱

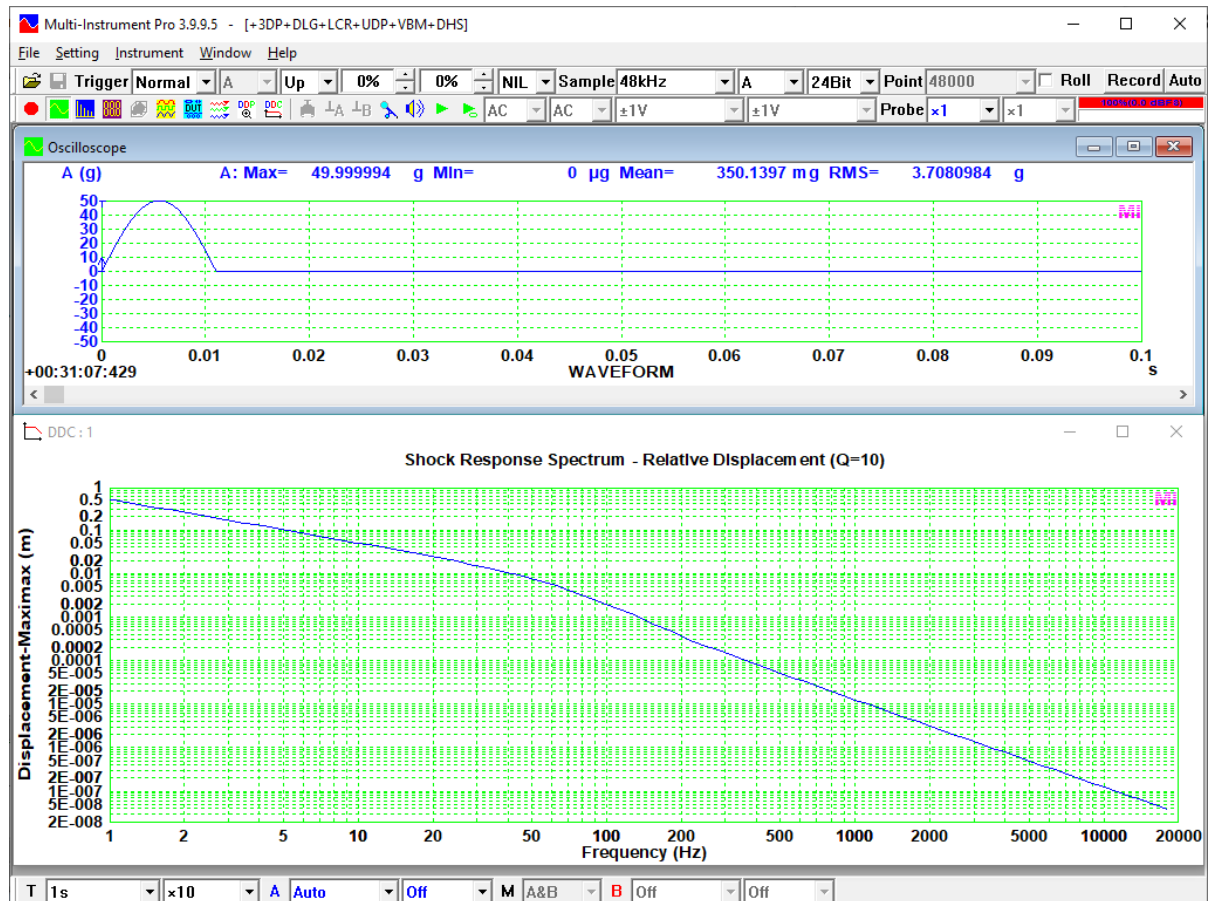
下图是一个脉宽为 11 ms、峰值加速度为 50g 的半正弦脉冲的相对速度冲击响应谱。计算所用的阻尼比为 5%（即：Q=10）。



半正弦脉冲的相对速度冲击响应谱

3.3.2.3 相对位移冲击响应谱

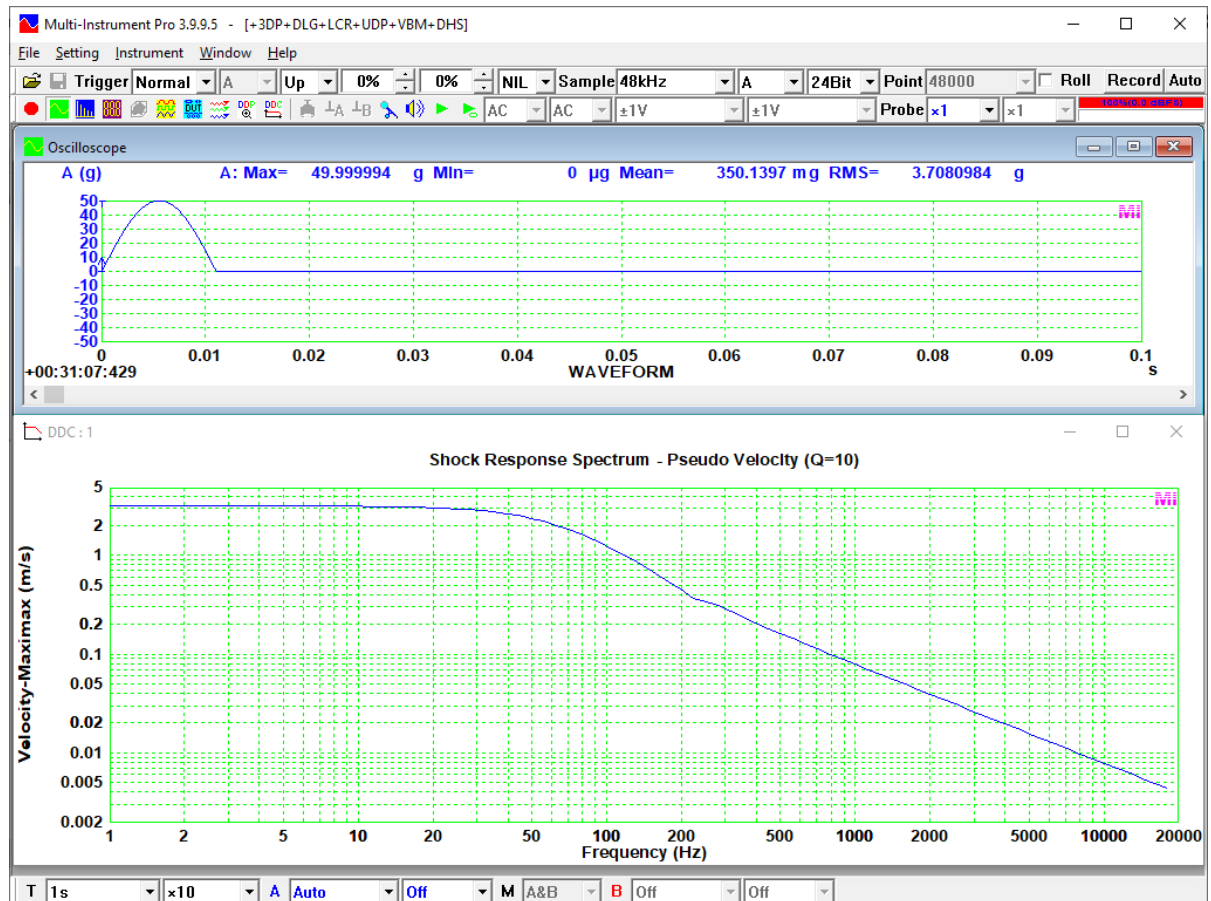
下图是一个脉宽为 11 ms、峰值加速度为 50g 的半正弦脉冲的相对位移冲击响应谱。计算所用的阻尼比为 5%（即：Q=10）。



半正弦脉冲的相对位移冲击响应谱

3.3.2.4 伪速度冲击响应谱

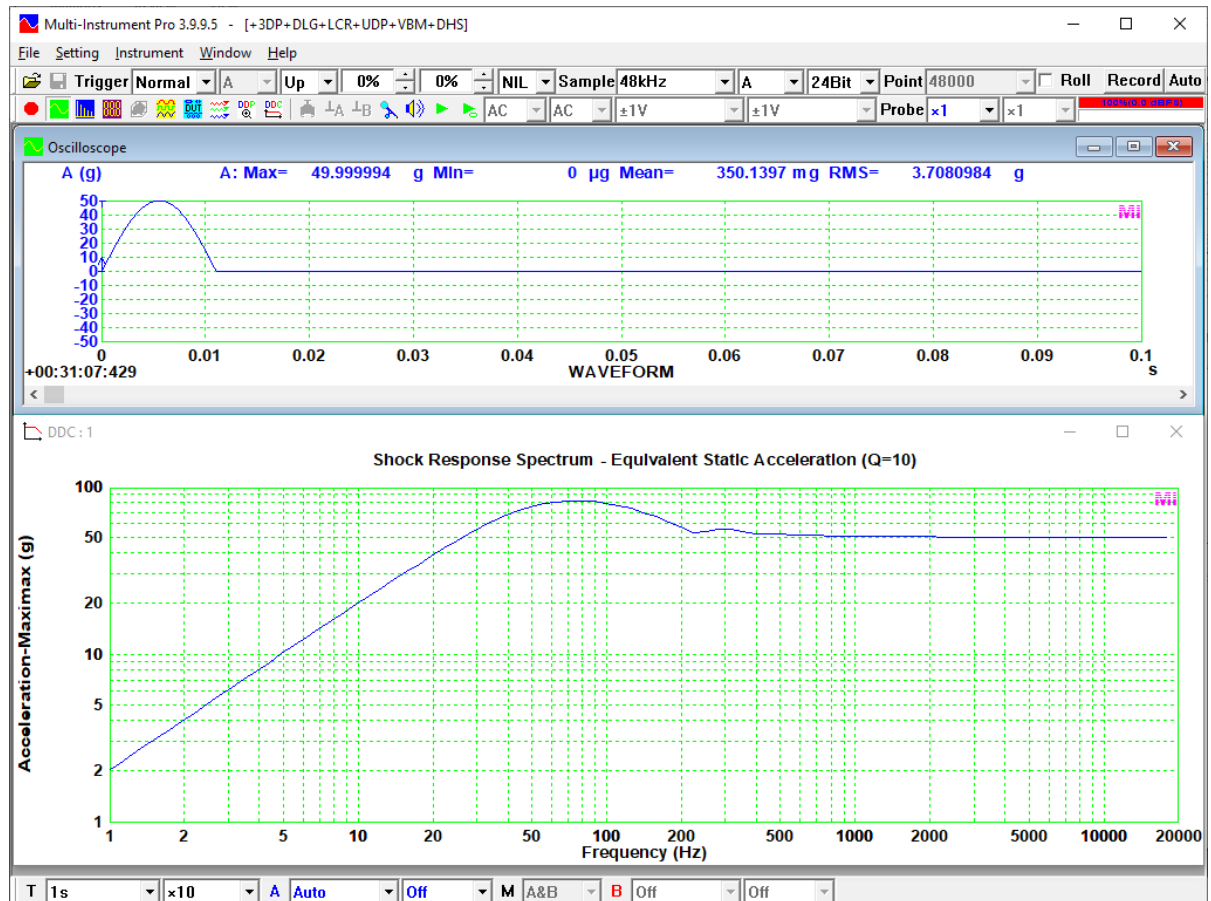
下图是一个脉宽为 11 ms、峰值加速度为 50g 的半正弦脉冲的伪速度冲击响应谱。计算所用的阻尼比为 5%（即：Q=10）。



半正弦脉冲的伪速度冲击响应谱

3.3.2.5 等效静态加速度冲击响应谱

下图是一个脉宽为 11 ms、峰值加速度为 50g 的半正弦脉冲的等效静态加速度冲击响应谱。计算所用的阻尼比为 5%（即：Q=10）。



半正弦脉冲的等效静态加速度冲击响应谱

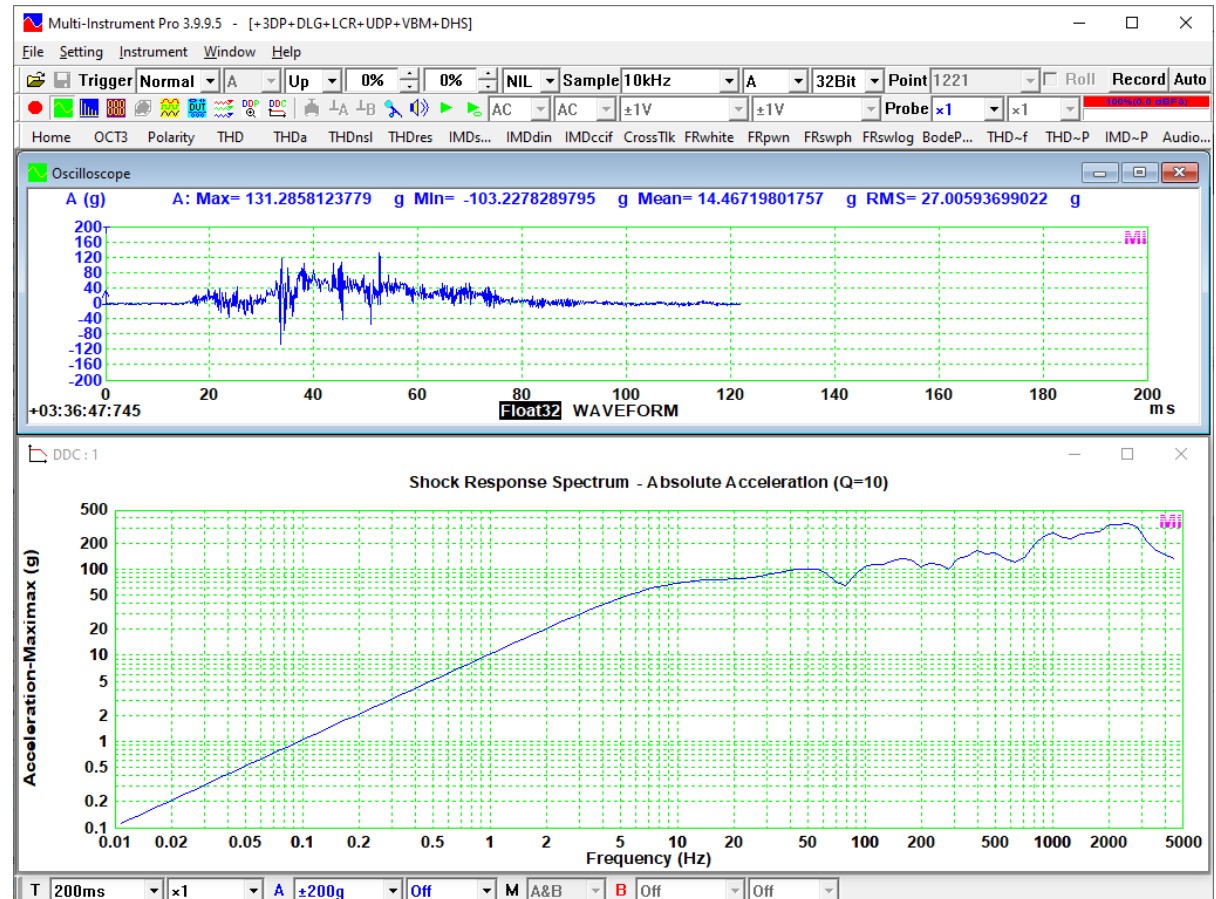
3.3.3 汽车与摩托车相撞试验



一次汽车与摩托车相撞试验

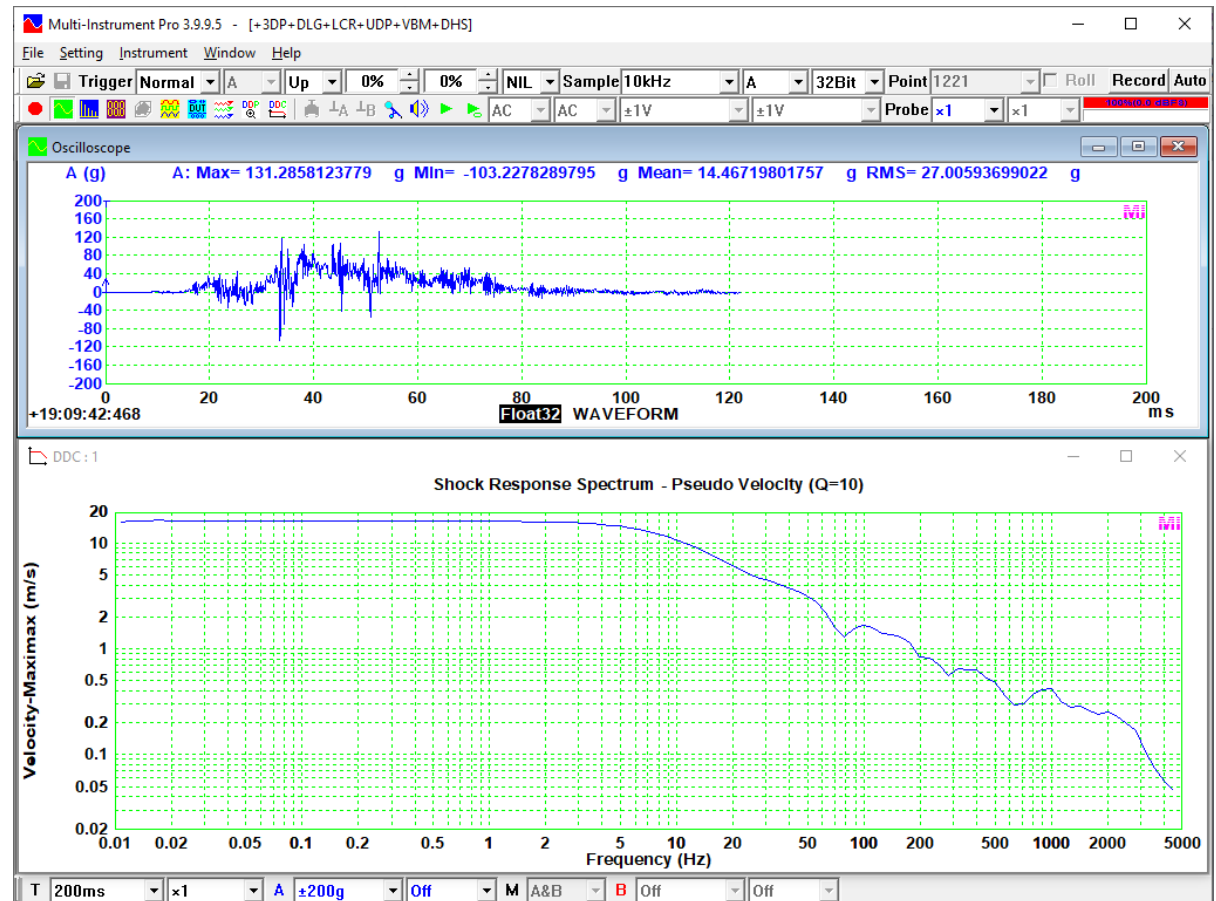
在汽车与摩托车相撞试验中，加速度数据记录于摩托车的质心位置。加速度数据的采样频率为 10kHz，单位为 g。

3.3.3.1 绝对加速度冲击响应谱



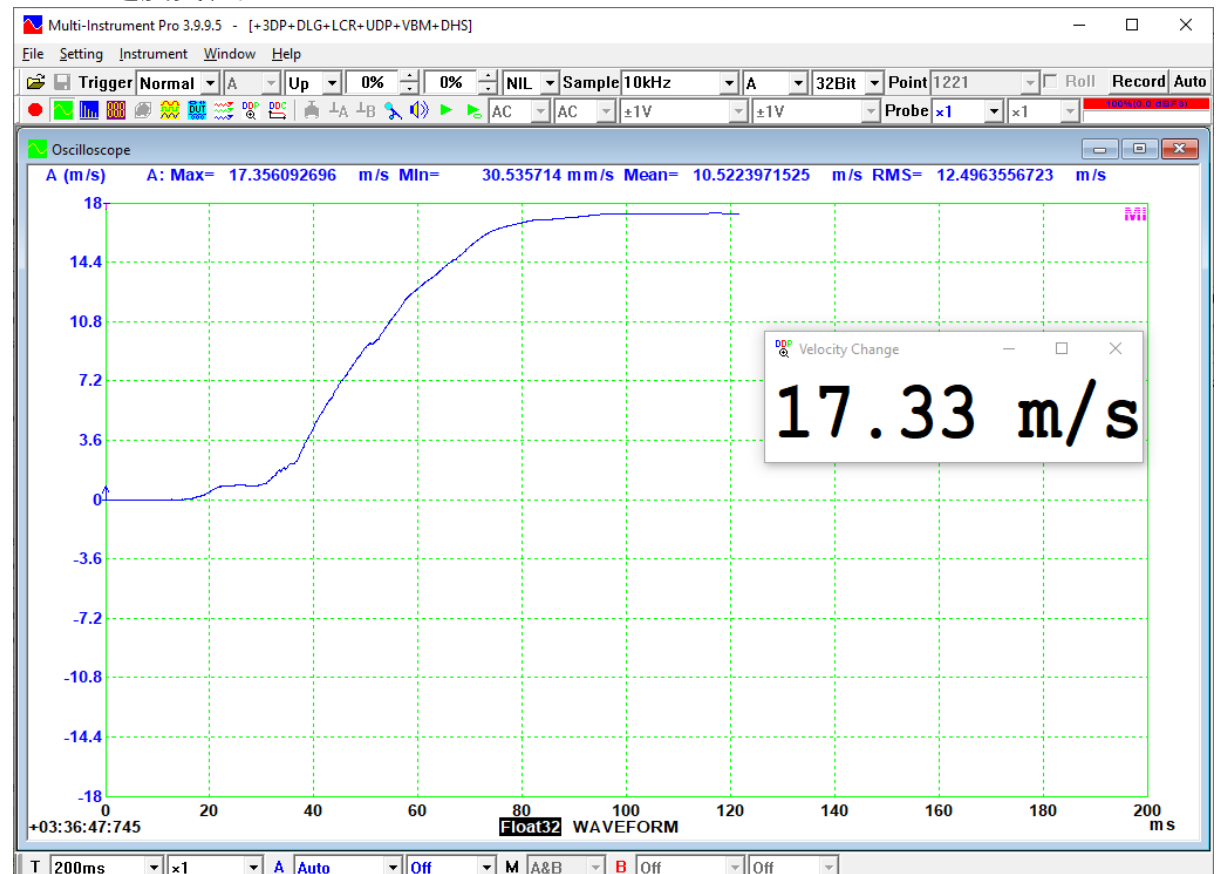
一次汽车与摩托车相撞试验的绝对加速度冲击响应谱

3.3.3.2 伪速度冲击响应谱



一次汽车与摩托车相撞试验的伪速度冲击响应谱

3.3.3.3 速度变化量



一次汽车与摩托车相撞试验的速度变化量

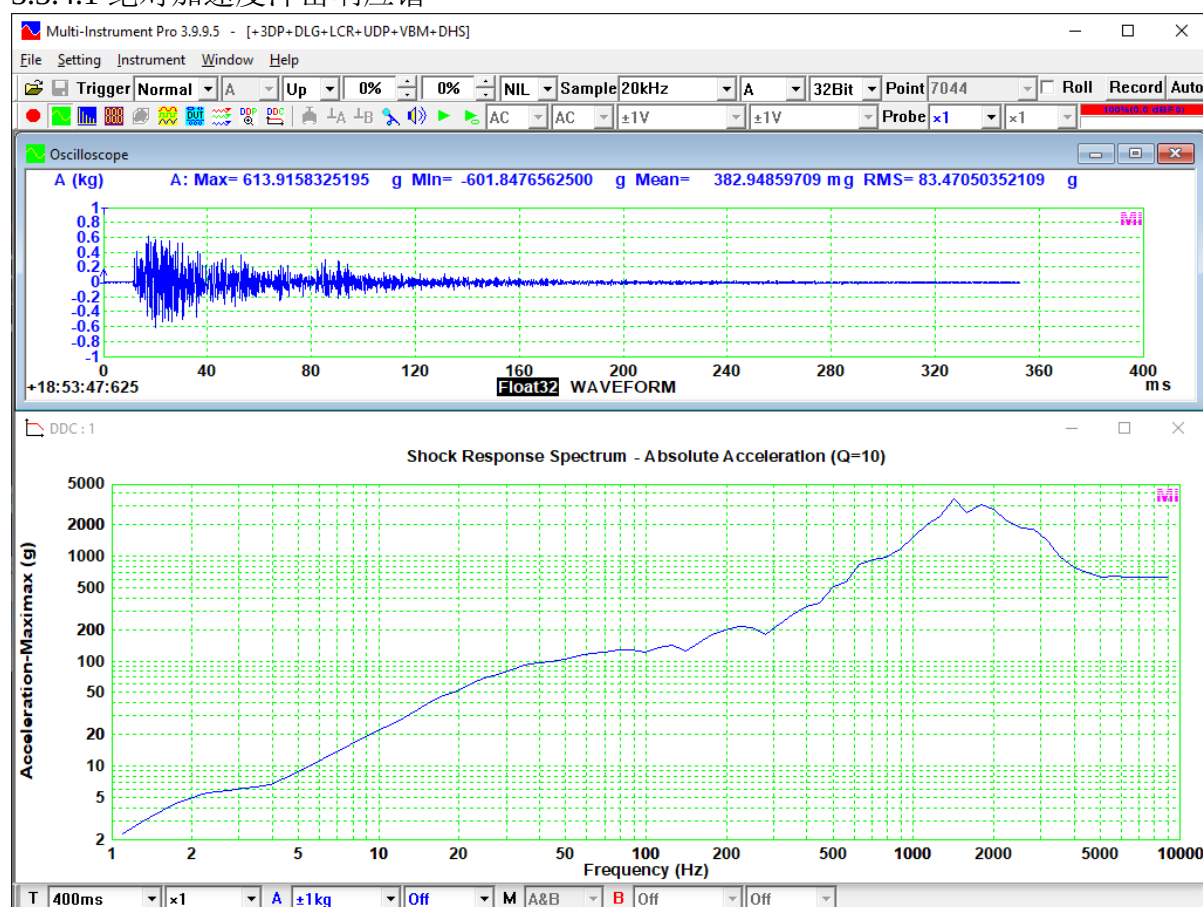
3.3.4 舰船冲击试验



一次舰船冲击试验

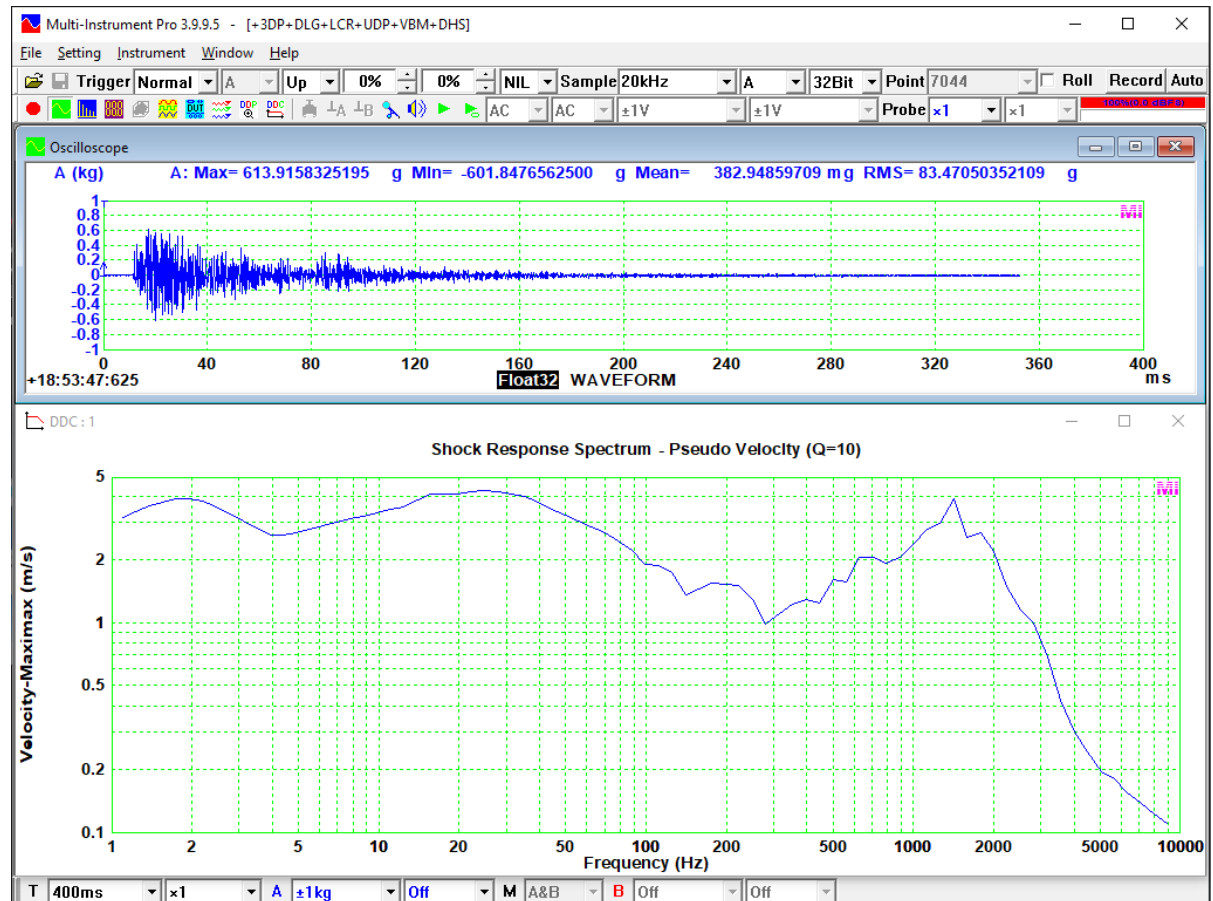
这里的加速度数据记录于一次军标 MIL-S-901D 舰船冲击试验。该试验用于评估舰载设备承受高机械冲击（例如鱼雷爆炸）的能力。加速度数据的采样频率为 20kHz，单位为 g。

3.3.4.1 绝对加速度冲击响应谱



一次舰船冲击试验的绝对加速度冲击响应谱

3.3.4.2 伪速度冲击响应谱



一次舰船冲击试验的伪速度冲击响应谱

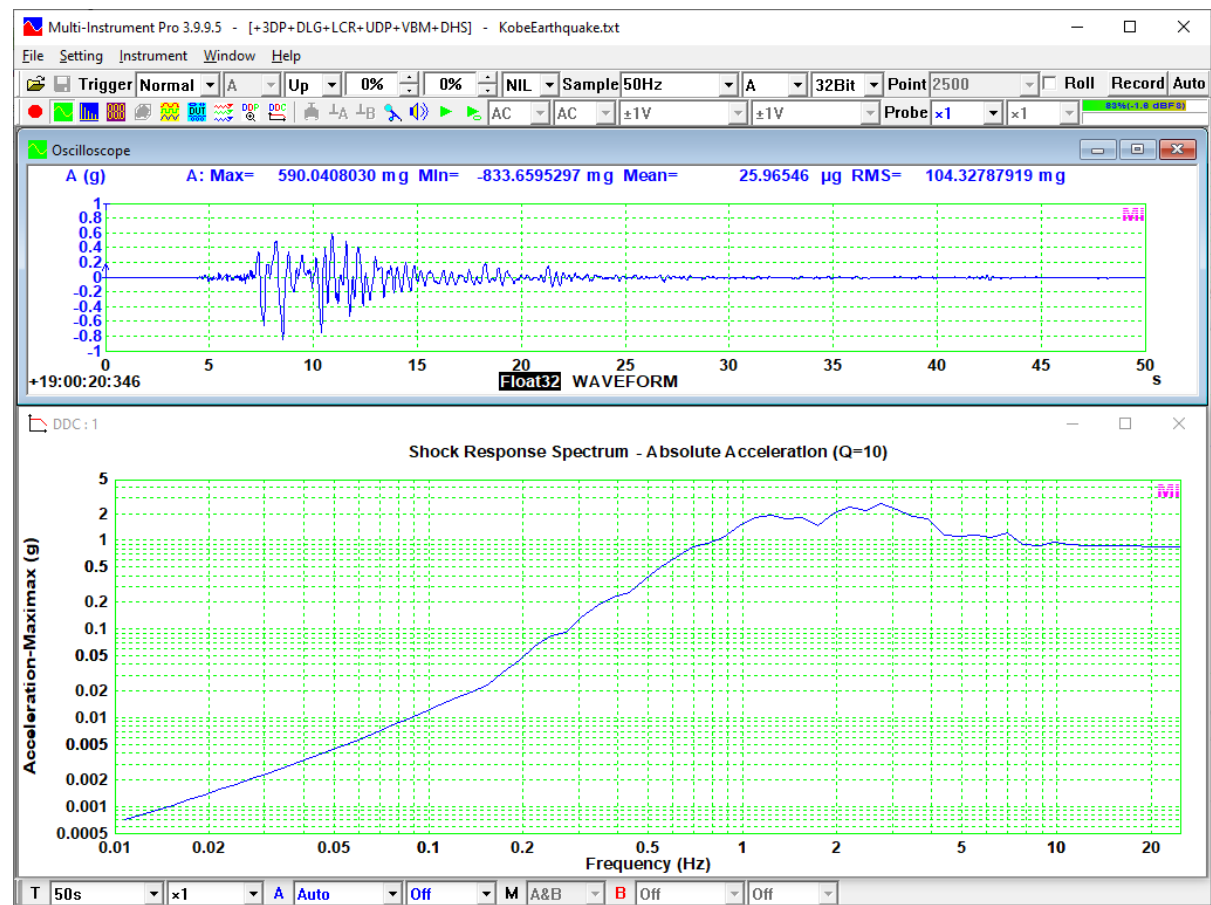
3.3.5 神户大地震信号

此南北方向的地震信号分量由日本神户气象站记录于 1995 年 1 月 17 日日本兵库县南部大地震期间，震级为 7.2。加速度数据的采样频率为 50Hz，单位为 g。



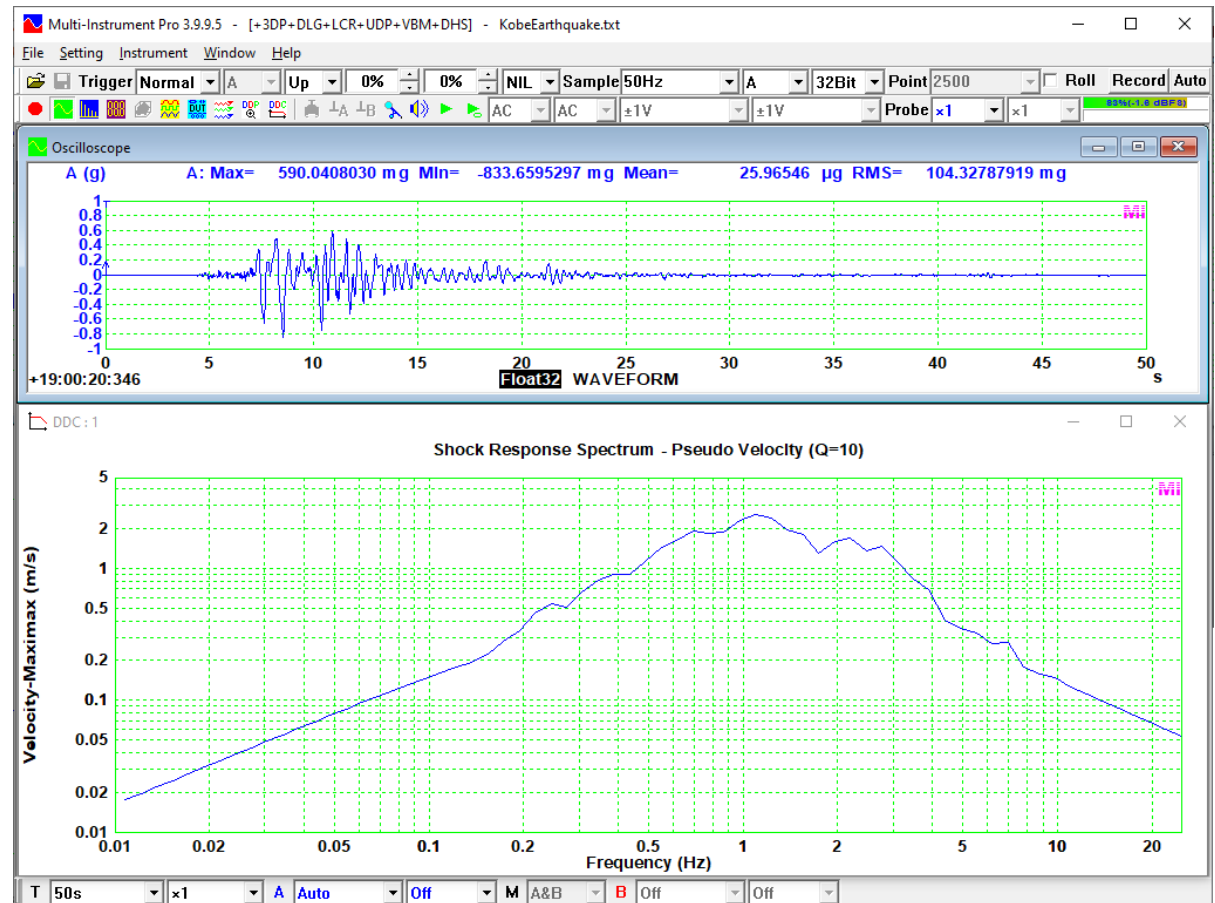
日本神户大地震

3.3.5.1 绝对加速度冲击响应谱



日本神户大地震的一个绝对加速度冲击响应谱

3.3.5.2 伪速度冲击响应谱



日本神户大地震的一个伪速度冲击响应谱