

1. Z 振级

最大 Z 振级是衡量城市轨道交通引起的环境振动水平的重要指标之一，它能评价轨道交通引起的环境振动对人体健康、舒适性及工作效率的影响。根据 GB 10070—88 要求采用 1s 计权，时程信号可依次分为若干幅波形进行分析，对每一幅波形进行 1/3 倍频程分析得到各个中心频率对应的分频振级。根据 Z 振级计算公式可得该幅波形的 Z 振级，依次计算可得 Z 振级随时间的变化过程。GFE 软件后处理中，Z 振级计算过程如下：

1. 将铅锤向加速度时程划分为若干个 1s 时间段的子波形并设置一定的重叠率(需大于 0.75，GFE 默认为 0.9)，如图 1 所示。

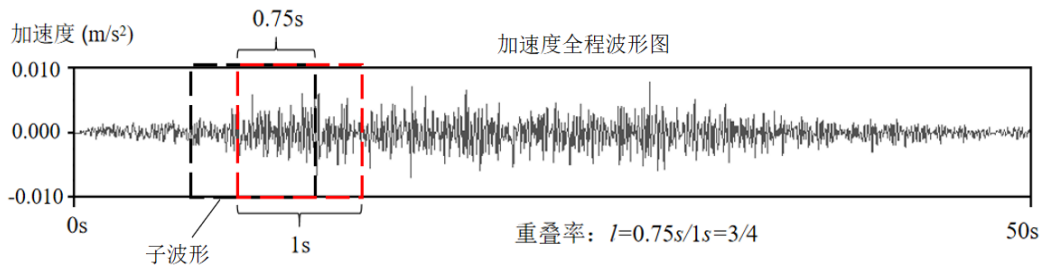


图 1 测点处加速度时程

环境振动是随机过程，具有波动性。由数据采集仪获得的数据为离散数据，计算环境振动评价指标时，每次需要计算 1s 长度的样本数据。为了使得离散数据的计算结果能真实反映连续振动过程，相邻两幅计算波形需要设置一定的重叠率，即重叠系数 l 以反应客观实际。因而对于离散采样所得的数据，考虑相邻两幅波形间的重叠，并对每幅波形进行计算，计算波形的总幅数 n 为

$$n = \frac{N - F_s}{(1 - l)F_s} + 1 \quad (1)$$

式中， N 为采样点数， F_s 为采样频率。

2. 对每个 1s 子波形进行傅立叶变换，得到频域范围内加速度分布结果。对 1~80 Hz 频率范围划分 1/3 倍频程频带，并计算每一频带中心频率点的有效加速度值。有效加速度计算公式如下：

$$a_{ri} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N a_i(j)^2} \quad (2)$$

其中 $a_i(j)$ 为将该子波形第 i 频带的加速度进行傅里叶逆变换得到的时域内加速度值。

3.计算各 1s 子波形各 1/3 倍频程频带内的振动加速度级，得到如表 1 所示各加速度级，振动加速度级计算公式为：

$$VL = 20\lg \frac{a}{a_0} \text{ (dB)} \quad (3)$$

式中： a ——振动加速度有效值， m/s^2 ；

a_0 ——基准加速度， $a_0=10^{-6}\text{m/s}^2$ ；

表 1 各幅波形分频振级计算示意

	t_1	t_2	t_3	...	t_k	t_{k+1}	...	t_{n-1}	t_n
f_1	VL_{11}	VL_{12}	VL_{13}	...	VL_{1k}	$VL_{1(k+1)}$	...	$VL_{1(n-1)}$	VL_{1n}
f_2	VL_{21}	VL_{22}	VL_{23}	...	VL_{2k}	$VL_{2(k+1)}$	...	$VL_{2(n-1)}$	VL_{2n}
f_3	VL_{31}	VL_{32}	VL_{33}	...	VL_{3k}	$VL_{3(k+1)}$	...	$VL_{3(n-1)}$	VL_{3n}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots
f_i	VL_{i1}	VL_{i2}	VL_{i3}	...	VL_{ik}	$VL_{i(k+1)}$	...	$VL_{i(n-1)}$	VL_{in}
f_{i+1}	$VL_{(i+1)1}$	$VL_{(i+1)2}$	$VL_{(i+1)3}$	...	$VL_{(i+1)k}$	$VL_{(i+1)(k+1)}$	...	$VL_{(i+1)(n-1)}$	$VL_{(i+1)n}$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots
f_{m-1}	$VL_{(m-1)1}$	$VL_{(m-1)2}$	$VL_{(m-1)3}$	...	$VL_{(m-1)k}$	$VL_{(m-1)(k+1)}$	...	$VL_{(m-1)(n-1)}$	$VL_{(m-1)n}$
f_m	VL_{m1}	VL_{m2}	VL_{m3}	...	VL_{mk}	$VL_{m(k+1)}$	...	$VL_{m(n-1)}$	VL_{mn}

4.计算各子波形的 Z 振级，计算公式为：

$$VL_Z = 10\log(\sum 10^{(VL_i + \alpha_i)/10}) \quad (4)$$

VL_Z 表示铅垂向 Z 计权振级，简称 Z 振级，单位 dB； VL_i 为 1/3 倍频程各中心频率对应的振动加速度级，单位 dB；其中 α_i 为 1/3 倍频程各中心频率的 Z 计权因子，单位为 dB。

GB 10070—88 和 GB 10071—88 中指出，为评价城市区域的环境振动水平，测量铅垂向 Z 振级，采用时间计权常数为 1s，采用频率计权范围为 1~80 Hz，计权因子有 ISO 2631—1:1985 和 ISO 2631—1:1997 两个标准，其计权曲线如图 2 所示。GFE 同时集成了两个计权因子标准的 Z 振级计算以供用户选择。

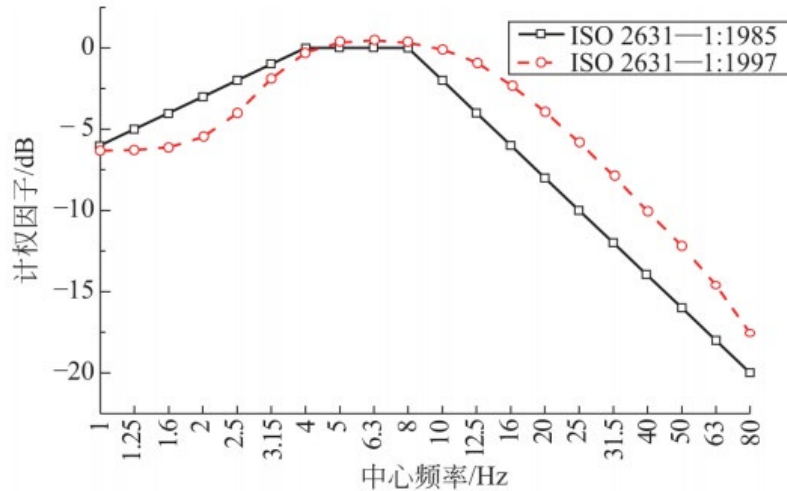


图 2 ISO 2631—1:1985 和 ISO 2631—1:1997 频率计权曲线对比

ISO 2631—1:1985 所推荐的频率计权曲线是基于等感曲线以及当时采用的“疲劳-熟练度降低限”曲线所得出的，指在一定工作时间内，引起工作者疲劳或熟练度降低的振动值。“疲劳-熟练度降低限”是一个针对于工业作业人员振动暴露而提出的概念，无法完整地反映出轨道交通引起的环境振动对于人体的影响。对于城市区域轨道交通引起环境振动的评价来说，对象人群主要是建筑物内的人员，他们以坐姿者为多，且坐姿姿势保持的时间一般较长，因此这些人的健康、感觉和舒适性应当着重考虑；而长时间处于立姿和卧姿的人较少，主要关心感觉和舒适度。因此，国际标准化组织在 ISO 2631—1:1997 中提出了新的频率计权曲线，综合考虑了振动对人体健康、舒适度、感觉等的影响，采用新版本的计权曲线更有利于客观真实地进行环境振动评价。

2. 分频振级

最大分频振级是衡量城市轨道交通引起的环境振动水平的重要指标之一。为了解决城市轨道交通环境振动的评价问题，《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准：JGJ/T 170—2009》指出采用分频最大振级作为轨道交通环境振动评价量。在 4~200 Hz 频率范围内对铅垂向振动加速度进行 1/3 倍频程分析，经计权因子修正后可得 1/3 倍频程中心频率上的最大振动加速度级，即分频最大振级。

通过对全程每幅波形进行计算可得如表 1 所示各个时段的分频振级值，按式(5)对各分频求其最大值，即得各频段的最大包络值。

$$VL_{i,max} = \max_{i=1 \rightarrow m} (VL_{i,k} + \alpha_i), \quad i \in (1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

式中， $VL_{i,k}$ 表示第 k 幅计算波形在 $1/3$ 倍频程中心频率 f_i 处的加速度振级，dB； $VL_{i,max}$ 为 $1/3$ 倍频程中心频率 f_i 处的振级最大值，dB；其中 α_i 为频率计权因子，其取值根据 JGJ/T 170—2009 如表 2 所示。环境振动评价标准限值如表 3 所示。

表 2 JGJ/T 170—2009 加速度在 $1/3$ 倍频程中心频率的 Z 计权因子

1/3 倍频程中心频率/Hz	计权因子/dB	1/3 倍频程中心频率/Hz	计权因子/dB
4	0	31.5	-8
5	0	40	-10
6.3	0	50	-12
8	0	63	-14
10	0	80	-17
12.5	-1	100	-21
16	-2	125	-25
20	-4	160	-30
25	-6	200	-36

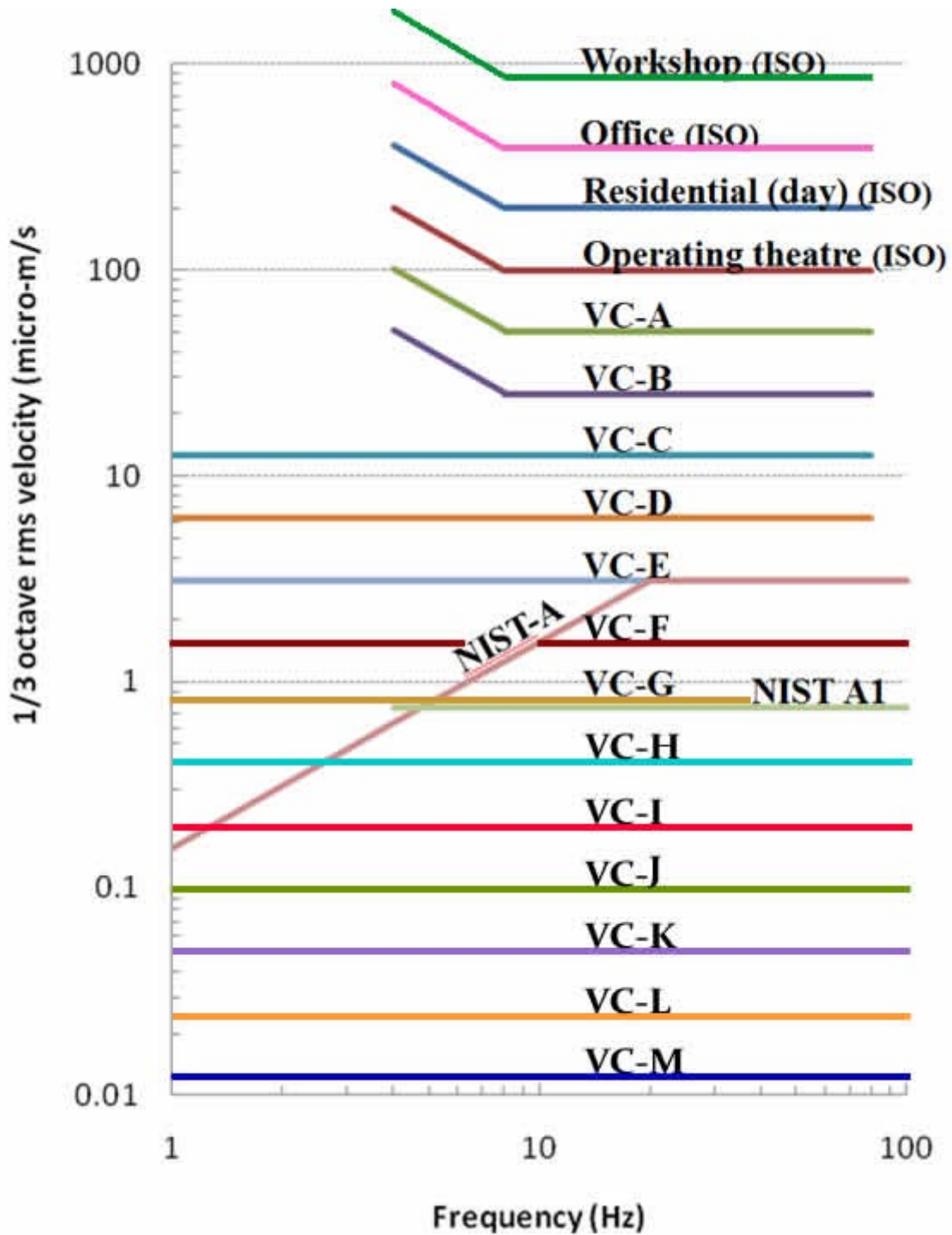
表 3 环境振动评价标准限值

区域	昼间	夜间
特殊住宅区	65	62
居住、文教区	65	62
居住、商业混合区、商业中心区	70	67
工业集中区	75	72
交通干线两侧	75	72

3.VC 振级

VC 标准曲线（VC 振动标准）由 Eric Ungar 和 Colin Gordon 于 20 世纪 80 年代初开发。它们最初是作为半导体、医疗和生物制药行业振动敏感设备的通用振动标准而开发的，但现已广泛应用于各种技术领域。VC 振动标准采用了一组三分之一倍频程频带速度谱的形式，以及国际标准化组织（ISO）关于振动对建筑物内人员影响的指导方针。该标准适用于在垂直和两个水平方向测量的振动。对于某种用于安装精密设备或仪器的

地基，所测得的三分之一倍频程速度谱曲线的所有频率点必须落在振动等级(VC)曲线对应的标准曲线之下。



曲线标准	振幅 μm/s (μin/s)	Detail Size ² μm	用途描述
Workshop (ISO)	800 (32,000)	N/A	振感明显。适用于车间或非振动敏感区域。
Office (ISO)	400 (16,000)	N/A	可察觉的振动。适用于办公室及非敏感地区。
Residential Day (ISO)	200 (8000)	75	几乎察觉不到的振动。大多数情况下适合睡眠区域。通常适用于计算机设备、医院康复室、半导体探针测试设备和小于 40 倍的显微镜。
Op. Theatre (ISO)	100 (4000)	25	不易于察觉的振动。适用于外科设备，100 倍的显微镜或其他低灵敏度的设备。
VC-A	50 (2000)	8	通常适用于 400 倍的光学显微镜、微天平、光学天平、接近和投影对准器等。
VC-B	25 (1000)	3	适用于线宽为 3μm 的检查和光刻（包括步进机）。
VC-C	12.5 (500)	1 - 3	适用于 1000 倍光学显微镜，1μm 的检查/光刻检查设备（包括中灵敏度电子显微镜），TFT-LCD 步进/扫描器。
VC-D	6.25 (250)	0.1 - 0.3	适用于要求苛刻的设备，包括电子显微镜（TEM 和 SEM）和电子束系统。
VC-E	3.12 (125)	< 0.1	一个难以达到的标准。适用于高灵敏度系统，包括长径、激光、小目标系统、纳米尺度的电子束光刻系统，以及其他对动态稳定性要求极高的系统。
VC-F	1.56 (62.5)	N/A	适用于极其安静的研究空间；通常在大多数情况下都很难实现，尤其是在洁净室中。不建议将其用作设计标准，仅用于评估。
VC-G	.78 (31.3)	N/A	适用于极其安静的研究空间；通常在大多数情况下都很难实现，尤其是在洁净室中。不建议将其用作设计标准，仅用于评估。
NIST-A			在高于 20 Hz 的频率下，NIST-A 标准与 VC-E 曲线相同，但低于此频率时，则保持恒定位移。1 至 20 Hz 之间为 0.025μm 或 25 nm；20 至 100 Hz 之间为 3.1μm/s (125μin/s)
NIST-A1			NIST-A1 标准要求小于 4 Hz 的频率的 RMS 速度为 3μm/sec (118μin./sec)，而对于 4 Hz < f < 100 Hz 的频率则为 0.75μm/sec (29.5μin./sec) 速度
VC-H	.39 (15.63)	N/A	适用于极其安静的研究空间；通常在大多数情况下都很难实现，尤其是在洁净室中。不建议将其用作设计标准，仅用于评估。
VC-I	.195 (7.81)	N/A	适用于极其安静的研究空间；通常在大多数情况下都很难实现，尤其是在洁净室中。不建议将其用作设计标准，仅用于评估。
VC-J	.097 (3.9)	N/A	适用于极其安静的研究空间；通常在大多数情况下都很难实现，尤其是在洁净室中。不建议将其用作设计标准，仅用于评估。
VC-K	.048 (1.95)	N/A	适用于极其安静的研究空间；通常在大多数情况下都很难实现，尤其是在洁净室中。不建议将其用作设计标准，仅用于评估。
VC-L	.024 (0.98)	N/A	适用于极其安静的研究空间；通常在大多数情况下都很难实现，尤其是在洁净室中。不建议将其用作设计标准，仅用于评估。
VC-M	.012 (0.49)	N/A	适用于极其安静的研究空间；通常在大多数情况下都很难实现，尤其是在洁净室中。不建议将其用作设计标准，仅用于评估。

1 在 8 至 80 Hz (VC-A 和 VC-B) 或 1 至 80 Hz (VC-C 至 VC-G) 频率范围的三分之一倍频程中测得

2 detail size 是指微电子制造情况下的线宽，医学和制药研究情况下的粒子（单元）尺寸等。与探针技术，AFM 和纳米技术相关的成像无关。

GFE 亦可计算三分之一倍频程有效速度谱曲线，计算过程与有效加速度的计算类似：对全段速度时程进行傅立叶变换，得到频域范围内速度分布结果。对 1~100 Hz 频率范围划分 1/3 倍频程频带，并计算每一频带中心频率点的有效速度值。有效速度计算公式：

$$v_{ri} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N v_i(j)^2} \quad (6)$$

其中 $v_i(j)$ 为将第 i 频带的速度进行傅立叶逆变换得到的时域内的速度值。

4.二次噪声

对于室内二次结构噪声评价范围内的振动环境保护目标,其列车通过时段建筑物室内二次结构噪声空间最大 1/3 倍频程声压级 $L_{p,i}$ (16~200 Hz)预测计算见式(7)。

混凝土楼板:

$$L_{p,i} = L_{Vmid,i} - 22 \quad (7)$$

式中: $L_{p,i}$ ——单列车通过时段的建筑物室内空间最大 1/3 倍频程声压级(16-200 Hz), dB;

$L_{Vmid,i}$ ——单列车通过时段的建筑物室内楼板中央垂向 1/3 倍频程振动速度级(16~200 Hz), 参考振动速度基准值为 1×10^{-9} m/s, dB;

i ——第 i 个 1/3 倍频程, $i=1 \sim 12$ 。

式(7)适用于高度 2.8m 左右、混响时间 0.8s 左右的一般装修的房间(面积约为 10~12m 左右)。如果偏离此条件,需按式(8)进行计算。

$$L_{p,i} = L_{Vmid,i} + 10 \lg \sigma - 10 \lg H - 20 + 10 \lg T_{60} \quad (8)$$

式中: $L_{Vmid,i}$ ——单列车通过时段的建筑物室内楼板中央垂向 1/3 倍频程振动速度级(16~200 Hz), 参考振动速度基准值为 1×10^{-9} m/s, dB;

i ——第 i 个 1/3 倍频程, $i=1 \sim 12$;

σ ——声辐射效率, 在通常建筑物楼板振动卓越频率时声辐射效率可近似取 1;

H ——房间平均高度, m;

T_{60} ——室内混响时间, s;

单列车通过时段的建筑物室内空间最大等效连续 A 声级 $L_{Aeq,Tp}$ (6-200Hz)按式(9)计算。

$$L_{Aeq,Tp} = 10 \lg \sum_i^n 10^{0.1(L_{p,i} + C_{f,i})} \quad (9)$$

式中: $L_{Aeq,Tp}$ ——单列车通过时段的建筑物室内空间最大等效连续 A 声级(16-200 Hz), dB(A);

$L_{p,i}$ ——单列车通过时段的建筑物室内空间最大 1/3 倍频程声压级(16~200 Hz), dB(A);

$C_{f,i}$ ——第 i 个频带的 A 计权修正值, dB;

i ——第 i 个 1/3 倍频程, $i=1 \sim 12$;

n ——1/3 倍频程带数。

通过建筑物室内楼板振动速度级 $L_{V_{mid,i}}$ (16-200Hz)预测室内二次结构声时，室内楼板振动速度级 $L_{V_{mid,i}}$ (16-200Hz)可根据式(10)得到：

$$L_{V_{mid, i}} = 20\lg \frac{v_{rms,i}}{v_0} \text{ (dB)} \quad (10)$$

式中： $v_{rms,i}$ ——第 i 频带的速度有效值，可由式(6)计算得到；

v_0 ——参考振动速度基准值，取值为 $1 \times 10^{-9} \text{m/s}$ 。

5.反应谱

反应谱分析是指将模态分析结果与已知反应谱结合，计算模型的位移和应力的分析技术。它主要用于分析结构对随机荷载或随时间变化荷载(如地震、风载、海洋波浪、喷气发动机推力、火箭发动机振动等)的动力反应。反应谱分析的输入频谱可以是位移谱、速度谱或加速度谱，输出则是结构的峰值响应。反应谱分析的作用是可以替代瞬态分析快速获取结构的最大响应。

反应谱为一条曲线，该曲线表示当受到给定时程输入时，线性单自由度系统的最大响应。如 3 所示，横坐标为单自由度振子的固有频率，纵坐标为时域范围内的最大响应（可以是位移、速度或加速度）。

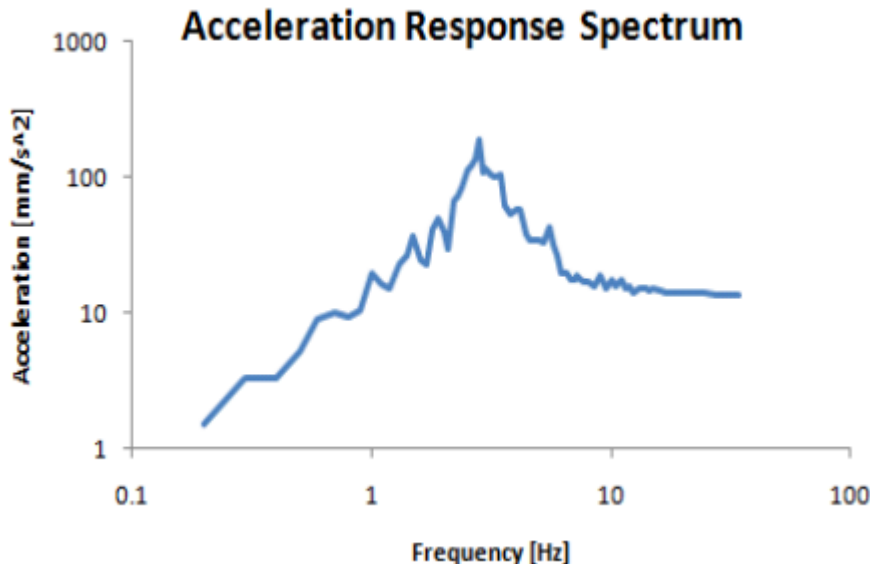
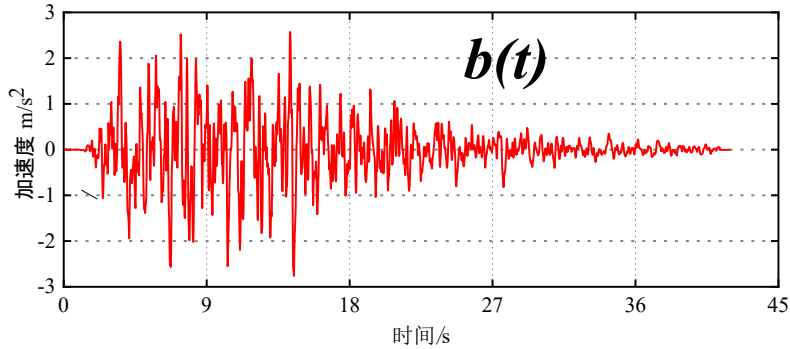
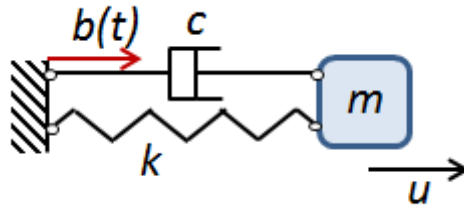


图 3 反应谱曲线

通常情况下，响应谱不需要自己生成，但 GFE 后处理提供将加速度时程转换为反应谱的功能，其生成过程如下：

1.使一个小模型受到瞬态载荷的作用，最小则为单自由度振子，如图 4 所示。



2.记录响应随时间的变化（位移、速度或加速度），获取时域范围内振幅绝对值的最大值。单自由度系统受任意激励载荷作用的响应可由杜哈梅积分公式计算得到：

$$u(t) = \int_0^t \frac{F(\tau)}{m\omega_d} e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin\omega_d(t-\tau) d\tau \quad (11)$$

式(11)可采用卷积计算、直接积分法、傅里叶变换等数值方法求解。

3.对固有频率不同的振子重复之前步骤（阻尼相同），绘制频域范围内的最大响应曲线，横坐标为振子的固有频率，即得反应谱曲线。

在反应谱中已经包含了阻尼，对于不同的阻尼值，可以生成不同的谱。使用更多的振子结果，能够获得更精细的曲线，生成一次谱，即对任意模型重复使用。

