

# 中华人民共和国国家军用标准

FL 0109

GJB 150.27-2009

---

## 军用装备实验室环境试验方法 第 27 部分：爆炸分离冲击试验

Laboratory environmental test methods for military materiel—  
Part 27: Pyroshock test

中国可靠性网 <http://www.kekaoxing.com>

2009-05-25 发布

2009-08-01 实施

---

中国人民解放军总装备部 批准

## 目 次

前言	III
1 范围	1
2 引用文件	1
3 目的与应用	1
3.1 目的	1
3.2 应用	1
3.3 限制	1
4 剪裁指南	2
4.1 选择试验方法	2
4.2 选择试验程序	2
4.3 确定试验条件	3
5 信息要求	7
5.1 试验前需要的信息	7
5.2 试验中需要的信息	7
5.3 试验后需要的信息	7
6 试验要求	7
6.1 试验设备	7
6.2 试验控制	8
6.3 测试仪器	8
6.4 数据分析	9
7 试验过程	9
7.1 试验准备	9
7.2 试验程序	10
8 结果分析	11
8.1 概述	11
8.2 程序 I——使用真实配置的近场模拟	11
8.3 程序 II——使用模拟配置的近场模拟	11
8.4 程序 III——使用机械试验装置的远场模拟	12
8.5 程序 IV——使用电动振动台的远场模拟	12
附录 A (资料性附录) 爆炸分离冲击的基本概念	16
A.1 爆炸分离冲击	16
A.2 爆炸分离冲击——动量交换	16
A.3 爆炸分离冲击——物理现象	17
附录 B (规范性附录) 爆炸分离冲击环境的预示	18
B.1 总则	18
B.2 冲击源的能量相似	18
B.3 冲击源到响应位置的距离相似	18
附录 C (规范性附录) 爆炸分离冲击的测量和分析技术	22

C.1	爆炸分离冲击的加速度测量.....	22
C.2	爆炸分离冲击信号分析.....	23

## 前 言

GJB 150《军用装备实验室环境试验方法》分为 28 个部分：

- a) 第 1 部分：通用要求；
- b) 第 2 部分：低气压(高度)试验；
- c) 第 3 部分：高温试验；
- d) 第 4 部分：低温试验；
- e) 第 5 部分：温度冲击试验；
- f) 第 7 部分：太阳辐射试验；
- g) 第 8 部分：淋雨试验；
- h) 第 9 部分：湿热试验；
- i) 第 10 部分：霉菌试验；
- j) 第 11 部分：盐雾试验；
- k) 第 12 部分：砂尘试验；
- l) 第 13 部分：爆炸性大气试验；
- m) 第 14 部分：浸渍试验；
- n) 第 15 部分：加速度试验；
- o) 第 16 部分：振动试验；
- p) 第 17 部分：噪声试验；
- q) 第 18 部分：冲击试验；
- r) 第 20 部分：炮击振动试验；
- s) 第 21 部分：风压试验；
- t) 第 22 部分：积冰/冻雨试验；
- u) 第 23 部分：倾斜和摇摆试验；
- v) 第 24 部分：温度-湿度-振动-高度试验；
- w) 第 25 部分：振动-噪声-温度试验；
- x) 第 26 部分：流体污染试验；
- y) 第 27 部分：爆炸分离冲击试验；
- z) 第 28 部分：酸性大气试验；
- aa) 第 29 部分：弹道冲击试验；
- bb) 第 30 部分：舰船冲击试验。

本部分为 GJB 150 的第 27 部分，是本次修订 GJB 150-1986《军用设备环境试验方法》新增加的内容。

本部分附录 A 是资料性附录，附录 B 和附录 C 是规范性附录。

本部分由中国人民解放军总装备部电子信息基础部提出。

本部分起草单位：航天科技集团一院 702 所、航天科技集团五院 511 所、中国航天标准化研究所。

本部分主要起草人：夏益霖、刘 斌、王其政、罗 克、王朝贵、张小达。

# 军用装备实验室环境试验方法

## 第 27 部分：爆炸分离冲击试验

### 1 范围

本部分规定了军用装备实验室爆炸分离冲击试验的目的与应用、剪裁指南、信息要求、试验要求、试验过程和结果分析的内容。

本部分适用于对军用装备进行爆炸分离冲击试验。

### 2 引用文件

下列文件中的有关条款通过引用而成为本部分的条款。凡注日期或版次的引用文件，其后的任何修改单(不包括勘误的内容)或修订版本都不适用于本部分，但提倡使用本部分的各方探讨使用其最新版本的可能性。凡不注日期或版次的引用文件，其最新版本适用于本部分。

GJB 150.1A-2009 军用装备实验室环境试验方法 第 1 部分：通用要求

GJB 150.18A-2009 军用装备实验室环境试验方法 第 18 部分：冲击试验

GJB 573 引信环境与性能试验方法

GJB 4239 装备环境工程通用要求

### 3 目的与应用

#### 3.1 目的

本试验的目的在于：

- a) 给出装备在结构和功能上能够承受火工装置动作所导致的冲击效应的置信度；
- b) 估计装备在爆炸分离冲击环境下的易损性，以便采用缓冲方法保护装备的结构和功能完整性。

#### 3.2 应用

本试验适用于评估在寿命期内可能暴露于一次或多次爆炸分离冲击环境中的装备。

#### 3.3 限制

本试验：

- a) 不包括由任何机械冲击和瞬态振动、舰船冲击或电磁干扰(EMI)冲击所导致的装备经受的冲击效应。
- b) 不包括对火工装置产生的冲击敏感的引信系统所经受的效应。对于引信及其部件安全性和动作的冲击试验可按 GJB 573 进行。
- c) 不包括在高温或低温条件下进行爆炸分离冲击试验的特殊规定。除另有规定外，或在有理由确认使用过程中的高温或低温可增强爆炸分离冲击环境的情况，试验一般在室温条件下进行。
- d) 不包括由于爆炸分离冲击装置故障或在用机械方法模拟爆炸分离冲击的情况下，机械试验设备故障所导致的计划外试验中断的指南。通常，若在机械冲击脉冲期间发生爆炸分离冲击装置的故障或中断，则重新施加冲击脉冲。应注意保证中断冲击脉冲所产生的应力不使后续试验结果失效。应检查整个装备的完整性，以保证冲击试验前装备结构和功能的完整性。在按试验顺序继续试验之前，应记录和分析这类中断的数据。
- e) 不涉及二次效应，如诱发的冲击波、电磁干扰(EMI)和热效应。
- f) 不适用于敌方武器穿透或爆炸效应。



## 4 剪裁指南

### 4.1 选择试验方法

#### 4.1.1 概述

分析有关技术文件的要求,应用装备(产品)订购过程中实施 GJB 4239 得出的成果,确定装备寿命期内爆炸分离冲击环境出现的阶段,根据下列环境效应确定是否需要进行本试验。当确定需要进行本试验,且本试验与其他环境试验使用同一试件时,还需确定本试验与其他试验的先后顺序。

#### 4.1.2 环境效应

爆炸分离冲击环境的主要特征见附录 A。通常,爆炸分离冲击可能对所有电子装备产生不利影响。不利影响的程度一般随着爆炸分离冲击的量级和持续时间的增大而增大,并且随着离爆炸分离冲击源(火工装置)的距离增大而减小。当爆炸分离冲击产生的材料应力波波长与装备中微电子器件固有频率的波长一致时,会增强不利影响。通常,结构仅传递弹性波,不受爆炸分离冲击的影响。下面给出了与爆炸分离冲击有关问题的部分实例:

- a) 微电子芯片结构完整性破坏所导致的装备故障。
- b) 继电器抖动所导致的装备故障。
- c) 电路板故障、电路板损伤和电连接器故障所导致的装备故障。有时,爆炸分离冲击可使电路板的多余物迁移,造成短路。
- d) 晶体、陶瓷、环氧树脂或玻璃封装中的裂纹和断裂所导致的装备故障。

#### 4.1.3 选择试验顺序

##### 4.1.3.1 一般要求

见 GJB 150.1A-2009 中的 3.6。

##### 4.1.3.2 特殊要求

除另有规定外,由于正常情况下,爆炸分离冲击出现在接近寿命期结束时,一般将爆炸分离冲击试验安排在试验顺序的后面。由于爆炸分离冲击试验的独特性质,通常可认为与其他试验无关。

## 4.2 选择试验程序

### 4.2.1 概述

本试验包括四个爆炸分离冲击试验程序,分别用于爆炸分离冲击近场和远场环境的模拟(近场和远场的定义见附录 A):

- a) 程序 I——使用真实配置的近场模拟。使用真实装备和相应的火工冲击试验装置结构配置,复现近场环境的爆炸分离冲击。
- b) 程序 II——使用模拟配置的近场模拟。使用真实装备,但将相应的火工冲击试验装置与试件隔离(例如,将试件安装在一块平钢板的背面),复现近场环境的爆炸分离冲击。由于减小了安装试件的装备结构和(或)平台的损伤,这种方法通常使试验成本减小到最低限度,可以用于不同爆炸分离冲击量级下的重复试验。
- c) 程序 III——使用机械试验装置的远场模拟。通过一个机械式冲击试验装置(电动振动台除外)模拟爆炸分离冲击峰值加速度的幅值和频率分量,复现远场环境的爆炸分离冲击。
- d) 程序 IV——使用电动振动台的远场模拟。利用电动振动台模拟爆炸分离冲击所产生的频率相对较低的结构共振响应,复现远场环境的爆炸分离冲击。

### 4.2.2 选择试验程序考虑的因素

基于试验数据的要求,确定可适用的试验程序。在大多数情况下,程序的选择受到真实装备技术状态的支配,特别应注意任何结构不连续性,它可减轻爆炸分离冲击对装备的影响。在某些情况下,程序的选择取决于试验的实际可行性。应考虑装备在其寿命期内(包括后勤和工作模式)预计的所有爆炸分离冲击环境。选择试验程序时,应考虑:

- a) 装备的工作目的。从有关技术文件中确定装备在暴露于爆炸分离冲击环境期间或之后所需要完

爆炸分离冲击固有的暴露情况。确定装备或装备的一部分是否位于火工装置的近场或远场内。

b) 爆炸分离冲击固有的暴露情况。确定装备或装备的一部分是否位于火工装置的近场或远场内。若装备或装备的一部分位于火工装置的近场内, 并且没有专门的隔离装置, 在没有外场实测数据的情况下, 则只能选用程序 I 或程序 II。若装备的任何部分均不在火工装置的近场内, 并且没有外场实测数据, 只要数据处理结果符合试验装置的幅值和频率范围能力, 则可选用程序 III。若整个装备位于远场内, 并且经受结构响应, 只要数据处理结果符合电动振动台相对较低的频率范围(上限不超过 3000Hz), 则可选用程序 IV。若整个装备位于远场内, 数据处理结果不符合电动振动台相对较低的频率范围, 则可选用程序 III。在任何情况下, 所选择的试验程序应满足在装备暴露的整个幅值和频率范围内进行试验的要求。不应将任何实测或预示的爆炸分离冲击响应分解成几个相互独立的频带, 而在不同的频带选用不同的试验程序。

c) 需要的数据。验证装备在预期情况下生存和工作所需要的试验数据。

d) 试验程序的顺序。见 4.1.3。

#### 4.2.3 各程序的差别

##### 4.2.3.1 程序 I——使用真实配置的近场模拟

程序 I 按装备的工作模式和真实配置(装备和火工装置的实际结构)进行装备(包括机械、电气、液压和电子装备)试验, 以保证其能够在使用预定安装结构上的真实火工试验装置进行试验时, 保持完好并按要求工作。在程序 I 中, 假设装备或装备的一部分位于火工装置的近场内。

##### 4.2.3.2 程序 II——使用模拟配置的近场模拟

程序 II 按装备的工作模式并与模拟的结构配置一起进行装备(包括机械、电气、液压和电子装备)试验, 以保证其能够在真实装备和火工装置的实际配置情况下, 保持完好并按要求工作。在本程序中, 假设装备的某些部分位于火工装置的近场中。使用本程序时应尽可能按照全尺寸试验的方法复制真实的平台和装备结构。若这样做过于昂贵或不切实际, 可采用缩比模型试验, 但在缩比过程中, 不能忽略重要的结构细节。实际上, 在合理地假定结构的其余部分不会影响装备响应的条件下, 可在试验中仅包含直接对装备有影响的结构部分。有时, 为了方便起见, 可使用专门的火工试验装置进行装备试验, 例如, 将装备安装在一块贴有炸药的平钢板上。

##### 4.2.3.3 程序 III——使用机械试验装置的远场模拟

使用机械式的高加速度幅值和高频响冲击试验输入装置可以复现爆炸分离冲击响应。这类机械试验装置应产生复杂的瞬态振荡波形。在本程序中, 假设装备的所有部件均位于火工装置的远场中。

##### 4.2.3.4 程序 IV——使用电动振动台的远场模拟

有时, 使用通用的电动振动台可以复现爆炸分离冲击响应。在本程序中, 假设装备的所有部件均位于火工装置的远场中, 并且装备仅受到结构平台共振响应的作用。

#### 4.3 确定试验条件

##### 4.3.1 概述

选定本试验和相应程序后, 还应根据有关文件和为该程序提供的信息, 选定该程序所用的试验条件和试验技术, 并确定装备经爆炸分离冲击环境作用后应完成的功能。应确定冲击响应谱、有效瞬态持续时间、试验轴向、冲击次数等试验参数和试件的技术状态。在剪裁过程中, 应特别注意细节的考虑。确定试验量值时应考虑 4.3.2~4.3.5 的内容。

##### 4.3.2 爆炸分离冲击环境的描述

###### 4.3.2.1 爆炸分离冲击的时间历程

爆炸分离冲击的测量参数一般为响应加速度。有时, 也可采用其他测量参数, 如速度、位移或应变, 但应明确这些测量参数的含义和相应测量系统的技术性能和局限性。特别应注意火工装置产生的高频环境和测量系统无失真地记录爆炸分离冲击响应的能力。

图 1 给出一个带有仪器背景噪声的实测远场爆炸分离冲击加速度时间历程, 显示爆炸分离冲击之



前、过程中和紧随爆炸分离冲击之后的背景噪声,给出的测量数据中包括了爆炸分离冲击之前的噪声和爆炸分离冲击之后混合的噪声与低量级结构剩余响应。在三个离散时刻的垂线用于标识一个“短持续时间”的截断爆炸分离冲击响应和一个“长持续时间”的爆炸分离冲击响应。第一条垂线之前为爆炸分离冲击之前的时间间隔,包含了测量系统的背景噪声,并用作测量信号的参考电平。第一与第三条垂线之间为爆炸分离冲击的时间间隔,包含了爆炸分离冲击所有重要的响应能量。第三条垂线之后为爆炸分离冲击之后的时间间隔,包含了测量系统的噪声以及某些爆炸分离冲击剩余响应,这些剩余响应可认为对爆炸分离冲击响应能量影响不大。当爆炸分离冲击之前和之后的幅值电平与爆炸分离冲击相比较小时,如爆炸分离冲击已经被减弱和(或)测量系统噪声较大的情况,确认爆炸分离冲击可能比较困难,需要采用工程判断来确定爆炸分离冲击事件的起点和终点。在所有情况下,应将爆炸分离冲击之前和之后的测量信息与爆炸分离冲击的测量信息结合在一起分析。

对于爆炸分离冲击中采集的所有数据,应确认其有效性。确认爆炸分离冲击数据有效性的基本方法是,在消除各种残余漂移后对信号的时间历程积分,若积分得到的时间历程存在过零点,且不出现单调增长,则爆炸分离冲击数据有效。图2给出了图1中长持续时间爆炸分离冲击的速度曲线。

#### 4.3.2.2 爆炸分离冲击环境的参数

##### 4.3.2.2.1 有效瞬态持续时间

爆炸分离冲击响应的有效瞬态持续时间  $T_e$  是包含所有显著的时间历程幅值的最小时间长度,起点为恰好位于起始的最显著的测量信号之前的测量系统背景噪声,持续到衰减的结构响应被测量噪声湮没点。确定有效瞬态持续时间一般需要分析人员具有工程经验。爆炸分离冲击的有效瞬态持续时间越长,保留的低频信息越多,这对于远场爆炸分离冲击试验是重要的。而对于近场试验所考虑的问题,由于测量系统的量程较大,有效瞬态持续时间较短。从幅值考虑,在爆炸分离冲击之后,时间历程包络的幅值不应比爆炸分离冲击之前的背景噪声高 12dB。在图1中,爆炸分离冲击的持续时间看起来至少有两个合理的时间间隔。第一个持续时间是紧接着高频信息结束之后——图1中第二条垂线,位于爆炸分离冲击开始后大约 3.5ms。第二个持续时间是在一些明显的低频结构响应已经衰减之后——图1中第三条垂线,位于爆炸分离冲击开始后大约 6.6ms。这些基于时间历程观察的判断利用了幅值准则和低频准则。图3给出了一个爆炸分离冲击时间历程绝对值的幅值的分贝数与时间的关系,表明按照精确的准则确定爆炸分离冲击的有效持续时间是困难的,在长持续时间爆炸分离冲击之后的时间历程一般比初始背景噪声的量级高。图4说明了图1中两种不同的爆炸分离冲击持续时间(即 3.5ms 的短持续时间爆炸分离冲击和 6.6ms 的长持续时间爆炸分离冲击)的冲击响应谱之间的差异,显然,仅在 100Hz 附近有明显的差异。在所选的分析频率(特别是高频)上,冲击响应谱的幅值对有效瞬态持续时间不敏感。

##### 4.3.2.2.2 冲击响应谱

冲击响应谱的定义见 GJB 150.18A-2009 的附录 A。对于爆炸分离冲击响应,最大绝对加速度冲击响应谱是基本的表示方法。在希望使爆炸分离冲击与简单系统的损伤相联系的情况下,可采用最大伪速度冲击响应谱作为表示方法,原因是最大伪速度冲击响应谱与单自由度系统单元的应力和应变相关。图5给出了图1中爆炸分离冲击记录的最大绝对加速度冲击响应谱的估计,图6在四坐标纸上给出了同一记录的最大伪速度冲击响应谱的估计。在这些冲击响应谱中,100Hz 以下的信息一般是无效的。一般用 1/12 倍频程和  $Q=10$  (对应于具有 5% 临界阻尼的单自由度系统) 计算在爆炸分离冲击持续时间内和在爆炸分离冲击之前与之后相同持续时间内的冲击响应谱。图5和图6也分别给出了爆炸分离冲击之前和之后的最大绝对加速度冲击响应谱和最大伪速度冲击响应谱的估计。对于实验室模拟试验,在数据处理中也可使用  $Q=50$  (对应于具有 1% 临界阻尼的单自由度系统)。

##### 4.3.2.2.3 能量谱密度

能量谱密度的定义见 GJB 150.18A-2009 的附录 A。能量谱密度用于比较多个爆炸分离冲击在频带内的能量分布。在计算能量谱密度估计时,应选择快速傅立叶变换的数据块长度,使得爆炸分离冲击事件全部包含在数据块内,而爆炸分离冲击持续时间以外的噪声通过在数据块中填零予以消除。使用爆炸



分离冲击之前和之后的能量谱密度估计,通过爆炸分离冲击之前的噪声与爆炸分离冲击之后混合的噪声和结构响应的频率特征相比较,可提供与爆炸分离冲击独特的频率特征有关的信息。图 7 给出了图 1 中爆炸分离冲击和爆炸分离冲击之前与之后时间历程的能量谱密度估计。

#### 4.3.2.2.4 傅立叶谱

傅立叶谱的定义见 GJB 150.18A-2009 的附录 A。傅立叶谱用于指示爆炸分离冲击在整个频带内突出的频率分量。在计算傅立叶谱估计时,应选择快速傅立叶变换的数据块长度,使得爆炸分离冲击事件全部包含在数据块内,而爆炸分离冲击持续时间以外的噪声通过在数据块中填零予以消除。使用爆炸分离冲击之前和之后的傅立叶谱估计,通过爆炸分离冲击之前的噪声与爆炸分离冲击之后混合的噪声和结构响应的频率特征相比较,可提供与爆炸分离冲击独特的频率特征有关的有用信息。图 8 给出了图 1 中爆炸分离冲击和爆炸分离冲击之前与之后时间历程的傅立叶谱估计,这些曲线与图 7 中的能量谱密度曲线一致。

#### 4.3.2.2.5 其他方法

时域矩方法可用于比较爆炸分离冲击在不同频带内的特性。若爆炸分离冲击能够表示为一个简单的非平稳点积模型,则在所选的滤波器带宽内,时域矩为常数,因此,爆炸分离冲击能够用一个统计模型表征。小波分析也可用于爆炸分离冲击描述,特别是爆炸分离冲击包含的冲击持续时间内各个时间间隔上不同时间尺度(即不同频率)的信息。

#### 4.3.2.3 爆炸分离冲击环境的统计分析

一次爆炸分离冲击试验一般仅得到单一的响应记录。为了考虑爆炸分离冲击环境的随机性和固有的可变性,需要以适当的统计方式组合经过等效处理的响应。GJB 150.18A-2009 的附录 B 给出了对一组试验数据进行统计叠加的方法。为了给出符合正态分布的估计,一般应对冲击响应谱、能量谱密度或傅立叶谱的处理结果进行对数变换,原因是从一系列试验中得到的有效数据往往很少,并且未经变换的估计的概率分布不可能假定为正态分布的。爆炸分离冲击数据的统计分析可采用非参数方法或参数方法。由于所处理的数据一般属于小子样统计的范畴,参数方法相比较为有效,而非参数方法的有效性较差。

#### 4.3.3 冲击响应谱和瞬态持续时间

##### 4.3.3.1 概述

从装备环境的测量结果中,或在适用的情况下,从类似环境的动力相似测量结果中,能够导出冲击响应谱和有效瞬态持续时间  $T_e$ 。

##### 4.3.3.2 爆炸分离冲击的实测数据适用的情况

4.3.3.2.1 在实测数据适用的情况下,可使用冲击响应谱、傅立叶谱或能量谱密度处理数据。对于爆炸分离冲击,冲击响应谱是实测数据处理的基本方法,一般采用最大绝对加速度冲击响应谱或最大伪速度冲击响应谱。在数据处理之前,应对数据仔细鉴定,确认时间历程中不存在异常现象;然后,在至少从 100Hz 到 20kHz 频率范围内(上限一般不超过 100kHz),以至少 1/6 倍频程或 1/12 倍频程的频率间距和  $Q=10$  的放大系数进行冲击响应谱分析。当适用的冲击响应谱数据足够时,使用 GJB 150.18A-2009 的附录 B 所提供的统计方法(包络方法)确定所需要的试验谱。若数据符合一种假设的概率分布,可使用参数统计。在数据符合正态或对数正态分布的情况下,GJB 150.18A-2009 的附录 B 提供了一种估计试验量级的方法。试验量级基于最大期望环境。在使用单边容差分位方法的情况下,最大期望环境定义为在至少 50%的时间内等于或大于 95%的值。

4.3.3.2.2 当适用于统计分析的数据不足时,考虑到爆炸分离冲击环境的随机性和固有的易变性,可通过在冲击响应谱最大包络上增加裕量,得到所需要的试验谱。增加的裕量值基于工程判断。通常采用的方法是,取所有样本的冲击响应谱的最大包络,并在所关心的频率范围内对冲击响应谱的最大包络增加 6dB 裕量。

4.3.3.2.3 当使用爆炸分离冲击方法时,应按 4.3.2.2,从实测环境数据的时间历程中确定有效瞬态持续时间  $T_e$ 。对于所有试验程序,用于冲击响应谱分析的爆炸分离冲击时间历程的持续时间应为  $T_e$ 。另

外,对于后续的分析,应采集爆炸分离冲击之前和之后同样持续时间  $T_e$  内的测量数据。一般,由于在程序 I 和程序 II 中爆炸分离冲击的全方向特性,三个正交轴中的每个独立的轴向将有近似相同的试验冲击响应谱和平均有效瞬态持续时间。对于程序 III 和程序 IV,试验冲击响应谱的形状可能随轴向变化。当采用程序 IV 时,应使用振动台复现冲击响应谱的冲击试验方法;不能在试验中使用经典冲击脉冲,如半正弦、后峰锯齿波等。

#### 4.3.3.3 爆炸分离冲击的实测数据不适用的情况

在实测数据对一个特定的技术状态不适用的情况下,可使用技术状态的相似性和相关的实测数据规定爆炸分离冲击试验谱。附录 B 给出了用于爆炸分离冲击动力相似外推的两个相似定律——爆炸源的能量相似定律或响应位置的距离相似定律,可获得所需要的冲击响应谱。由于爆炸分离冲击响应数据对结构细节的敏感性、固有的随机性和易变性,以及响应预示方法的局限性,在进行动力相似外推中应小心谨慎地处理。

在大多数情况下,当无法选择程序 I 时,程序 II 或程序 III 是最佳试验程序,两者明显欠试验或严重过试验的风险最小。执行程序 II 或程序 III 时,应注意了解有关试验装置的必要信息。

#### 4.3.4 试验轴向、持续时间和冲击次数

##### 4.3.4.1 概述

对于每个轴向的适当冲击是指:在使用规定的有效瞬态持续时间  $T_e$  进行冲击试验的情况下,当实测冲击的有效瞬态持续时间  $T$  与规定的  $T_e$  之间的偏差在 20% 以内,并且,所得到的冲击响应谱在规定的频率范围内等于或大于所要求的试验冲击响应谱,则认为试验的瞬态冲击过程符合要求。对于程序 I,  $T_e$  不作规定,但应测量。应对试验数据的有效性进行确认,并用  $Q=10$  和至少 1/12 倍频程计算最大加速度冲击响应谱。也可应用下列指南:对于可能在给定的爆炸分离冲击事件中暴露一次的装备,用每个适用的环境条件进行 1 次冲击;对于可能多次暴露于爆炸分离冲击事件的装备,且没有适用的数据确认爆炸分离冲击的次数,应根据预计的服役使用情况,在每种环境条件下进行 3 次或更多的冲击。在一种环境条件中施加 3 次或更多的冲击是为了增加统计置信度。

##### 4.3.4.2 程序 I

对于程序 I,使试件经受足够数量的满足规定试验条件的冲击或至少 3 次冲击,取两者中较大者。试验目的是检验装备在火工装置近场的爆炸分离冲击下结构和功能的完整性。

##### 4.3.4.3 程序 II

对于程序 II,使试件经受足够数量的满足规定试验条件的冲击或至少 3 次冲击。试验目的是检验装备在火工装置近场的爆炸分离冲击下结构和功能的完整性。

##### 4.3.4.4 程序 III

对于程序 III,使试件经受足够数量的满足规定试验条件的冲击或至少 3 次冲击。对于单一的试验状态,沿着多于一个轴向的实测响应可能满足试验要求。因此,最少重复 3 次试验冲击将满足三个正交轴的所有方向的要求。在另一极端情况下,若每次冲击仅满足一个轴的一个方向的试验要求,则需要总共 9 次冲击。试验目的是检验装备在火工装置远场的爆炸分离冲击下结构和功能的完整性。

##### 4.3.4.5 程序 IV

对于程序 IV,使试件经受足够数量的满足规定试验条件的冲击或至少 3 次冲击。实测响应一般不会是全方向的。对于程序 IV,单一的试验状态可能沿着多于一个轴向同时满足试验要求,但出现的概率很小。因此,最少重复 3 次试验冲击将满足三个正交轴的所有方向的要求。在另一极端情况下,若每次冲击仅满足一个轴的一个方向的试验要求,则需要总共 9 次冲击。试验的目的是检验装备在火工装置远场的爆炸分离冲击下结构和功能的完整性。

#### 4.3.5 试件技术状态

试件的一般要求见 GJB 150.1A-2009 的 3.9。应按照对服役期内装备的预计技术状态配置爆炸分离冲击的试件,特别注意装备安装到平台上的细节。对于程序 II,应提供试件技术状态选择合理性的专门



说明。爆炸分离冲击响应的变化对装备和(或)平台结构的细节特别敏感。

## 5 信息要求

### 5.1 试验前需要的信息

一般信息见 GJB 150.1A-2009 中的 3.8, 特殊信息如下:

- a) 试验系统(试件与平台)的详细技术状态, 包括:
  - 1) 火工装置的位置;
  - 2) 装备的位置;
  - 3) 火工装置与装备之间的结构路径, 以及火工装置与平台和平台与装备的任何连接状态, 包括结构接头的标识;
  - 4) 装备与火工冲击装置的最近距离。
- b) 爆炸分离冲击环境, 包括:
  - 1) 火工装置的类型;
  - 2) 若与装药量有关, 火工装置的装药量;
  - 3) 若存在装配效应, 主要装置贮存的应变能;
  - 4) 火工装置的起爆方式;
  - 5) 预计的电磁干扰或热效应。
- c) 在使用程序 III 或程序 IV 的情况下, 爆炸分离冲击的有效持续时间; 或者, 在使用程序 I 或程序 II 的情况下, 火工装置的装药量和分布。
- d) 装备的总体技术状态, 包括在装备上或靠近装备的测量点。

### 5.2 试验中需要的信息

一般信息见 GJB 150.1A-2009 中的 3.11, 特殊信息如下:

- a) 对于程序 I、程序 II 和程序 III, 在继续试验之前, 评定夹具和装备结构损伤的方法;
- b) 用于分析以前的冲击时间历程信息的记录;
- c) 用于确定在程序 II、程序 III 和程序 IV 中规定的爆炸分离冲击量级是否复现的冲击响应谱分析能力。

### 5.3 试验后需要的信息

一般信息见 GJB 150.1A-2009 中的 3.14, 特殊信息如下:

- a) 由装在试验夹具或试件上的传感器记录的每次暴露的持续时间, 以及确切的暴露次数;
- b) 数据测量中的任何异常现象, 例如, 仪器噪声电平过高、试验导致的传感器或传感器安装座脱落等;
- c) 每次试验后试件与夹具的状态;
- d) 每次试验后测量系统的状态。

## 6 试验要求

### 6.1 试验设备

对于施加爆炸分离冲击, 可以使用在真实结构和模拟结构上的真实火工装置、机械式高加速度幅值和高频响冲击试验装置, 或者在受限制的状况下, 使用电动振动台。爆炸分离冲击装置可能包括高压气体激波管、金属与金属碰撞、炸药产生的爆炸分离冲击模拟器、在缩比模型上的真实火工装置、在全尺寸模型上的真实火工装置或其他激励类型。对于程序 I 或程序 II, 应参阅有关火工装置的技术文件。对于程序 III, 可选择经过改装的落锤式或摆锤式冲击机、各种可调或不可调共振装置等机械式冲击激励装置, 但应注意不同装置的局限性。对于程序 IV, 假设装备的各部分均位于火工装置的远场, 并且实测或预示的数据符合电动振动台的加速度幅值和频率范围的限制。应注意, 振动台的速度输入可能超过装备在真实爆炸分离冲击环境下的速度, 对于速度敏感的装备, 这可能造成过试验。在以下章节中, 试



验设备中用于向装备传递爆炸分离冲击的部分将被称为冲击装置。这类冲击装置包括，程序 I 和程序 II 中的火工品冲击装置和夹具，程序 III 中的机械激励装置和夹具，以及程序 IV 中的电动振动台和夹具。

## 6.2 试验控制

### 6.2.1 校准

冲击装置应按所选择的试验程序中规定的试验要求进行一致性校准。对于程序 I，除了保证结构技术状态与试验计划一致以外，在冲击之前不需要校准。对于程序 II、程序 III 和程序 IV，在试件安装到冲击装置上之前，应安装一个模拟负载进行调试，以获得试验条件下的实测数据，并与规定的试验响应进行比较。在程序 II 的校准中，应注意正式试验之前的冲击不得改变冲击装置的结构性能。附加的校准要求按 GJB 150.1A-2009 中 3.4.2 和 3.3 的规定。

### 6.2.2 允差

#### 6.2.2.1 概述

对于爆炸分离冲击的四种试验程序，所有允差按最大加速度冲击响应谱规定。对于伪速度冲击响应谱规定的允差，应从最大加速度冲击响应谱的允差中导出。对于按“区域”定义的一组测量数据，允差可按在“区域”内测量数据的平均值规定。但应注意，这实际上是放松了单个测量数据的允差，即个别测量数据可能严重地超出了允差，而平均值在允差内。一般地，当基于在一个区域内多于两个测量数据的平均值规定试验允差时，对于对数变换的冲击响应谱估计，允差带不应超过计算的 P95/50 单边标准容差上限，或者小于均值减去 1.5dB。任何“区域”允差和平均的使用应有相关文件规定。附加的试验允差要求按 GJB 150.1A-2009 中 3.4.2 和 3.3 的规定。

#### 6.2.2.2 程序 I 和程序 II

若以前的实测数据适用或者进行了一系列的爆炸分离冲击测量，在 100Hz~20kHz 的整个频带上至少 80% 的范围内，以 1/12 倍频程计算的所有加速度最大冲击响应谱允差应在 -3dB~6dB 范围内。对于剩余的 20% 频带，所有冲击响应谱的允差应在 -6dB~9dB 范围内。应保证至少 50% 的冲击响应谱幅值超过规定的试验值。

#### 6.2.2.3 程序 III

若以前的实测数据适用或者进行了一系列的爆炸分离冲击测量，在 100Hz~10kHz 的整个频带上至少 90% 的范围内，以 1/12 倍频程计算的所有加速度最大冲击响应谱允差应在 -3dB~6dB 范围内。对于剩余的 10% 频带，所有冲击响应谱允差应在 -6dB~9dB 范围内。应保证至少 50% 的冲击响应谱的幅值超过规定的试验值。

#### 6.2.2.4 程序 IV

在以前的实测数据是适用的或者进行了一系列爆炸分离冲击的情况下，在 10Hz~3kHz 的整个频带上最小 90% 的范围内，以 1/12 倍频程计算的所有加速度最大冲击响应谱是在 -1.5dB~3dB 的范围内。对于剩余的 10% 频带，所有冲击响应谱允差应在 -6dB~9dB 范围内。应保证至少 50% 的冲击响应谱的幅值超过规定的试验值。

## 6.3 测试仪器

### 6.3.1 概述

通常采用加速度测量系统测量爆炸分离冲击的响应。在选择加速度测量所用的测试仪器时，特别注意仪器的量程和频率范围应满足爆炸分离冲击高幅值和宽频带的测量和分析要求，以保证加速度测量结果能够提供有意义的的数据。应当注意的是，在近场及其附近的爆炸分离冲击测量中，容易出现测量数据异常的情况。有时，可使用更复杂的测试仪器，如激光测速仪。

### 6.3.2 加速度传感器

爆炸分离冲击响应测量可采用压电式或压阻式加速度传感器。加速度传感器应满足下列要求：

- a) 横向灵敏度小于或等于 5%；
- b) 在试验要求的峰值加速度幅值的 5%~100% 范围内，幅值线性度在 10% 以内；

- c) 对于所有爆炸分离冲击测量程序, 在 10Hz~20kHz 频率范围内, 频率响应的平直度在±10% 以内。

加速度传感器的使用应满足附录 C 中的有关要求。

### 6.3.3 信号适调

信号适调的量程和频率范围应与爆炸分离冲击信号的测量要求相一致。滤波应与响应时间历程的要求一致, 特别是在放大器的输出端进行加速度信号的滤波时应当极其小心。若使用低通滤波器, 其截止频率宜至少为冲击响应谱分析的最高分析频率的 1.5 倍。为了防止滤掉异常的测量数据, 并且不能在放大器的输出端检测出异常的测量数据, 进入放大器的信号不应进行滤波。在数字化之前, 来自信号适调或记录装置的信号应通过线性相移滤波器在感兴趣的频率范围内进行抗混滤波。

### 6.4 数据分析

在试验测量数据的采集和分析过程中, 应满足下列要求:

- a) 数字化过程中通过混叠导入所关心的频带(100Hz~20kHz)的测量误差不应超过 5%。
- b) 若使用滤波器进行抗混滤波, 则滤波器应具有线性相移特性。
- c) 滤波器(如使用)在测量要求规定的频率范围内应具有不超过 1dB 的通带平直度(见 6.3)。
- d) 分析程序应与附录 C 中给出的要求和指南相一致。特别是爆炸分离冲击的加速度时间历程应按附录 C 中的方法验证。应对每个时间历程进行积分以检查测量系统中的任何异常现象, 例如导线破损、超过放大器压摆率、数据削波、无法解释的加速度传感器漂移等。积分的幅度时间历程应与附录 C 中给出的准则进行比较。对于程序 I 和程序 II, 为了检查来自外界干扰源的辐射(如电磁干扰), 可布置一个没有敏感元件的加速度传感器, 并按与其他加速度传感器测量结果相同的方式处理其响应。若这个加速度传感器显示出不同于测量系统背景噪声的任何特征, 则认为加速度测量结果受到未知的噪声源污染。

## 7 试验过程

### 7.1 试验准备

#### 7.1.1 试验前准备

试验开始前, 根据有关文件确定试验程序、试件的技术状态、爆炸分离冲击的量级、爆炸分离冲击的次数等试验的细节:

- a) 选择适当的试验程序。
- b) 程序 II、程序 III 和程序 IV 校准之前, 若以往处理的数据适用, 根据这些数据确定适当的爆炸分离冲击试验量级。
- c) 用于爆炸分离冲击测量的信号适调和记录装置应具有合适的量程和频率范围。估计信号的峰值并适当地调整仪器的量程可能是困难的。一般无法从削波的信号中复原数据, 然而, 对于超量程的信号适调, 通常可能从超过测量系统背景噪声 20dB 的信号中得出有意义的结果。在某些情况下, 冗余测量可能是合适的, 即一个测量通道设置为超量程, 而另一个测量通道按信号峰值的最佳估计设置量程。大多数现代化的记录装置的频率范围是足够的, 但应确保装置的输入滤波没有限制信号的频带。

#### 7.1.2 初始检测

试验前所有试件均需在标准大气条件下进行检测, 以取得基线数据。检测按以下步骤进行:

- a) 对试件进行全面的目视检查, 特别注意微电子线路的部位。应特别注意平台支承结构和应力波可能传递的路径。
- b) 记录检查结果。
- c) 在适当的地方, 将试件安装到试验夹具上。
- d) 按技术文件的规定进行通电检测, 同时进行简单的试验以保证测量系统正确地响应。



- e) 记录检测结果, 以便与试验期间和之后得到的数据进行比较。
- f) 若试件工作正常, 开始进行第一次试验。若试件工作不正常, 则应解决问题, 并从 a) 重新开始。
- g) 拆除试件, 并开始进行校准(程序 I 除外)。

## 7.2 试验程序

### 7.2.1 程序 I——使用真实结构的近场模拟

程序 I 的步骤如下:

- a) 试件按设计或实际使用状态固定在装有火工装置的真实全尺寸结构或原型上, 若爆炸分离冲击的影响是局部的, 可用结构的一部分替代全尺寸结构(当在本试验程序中使用真实硬件时, 一般不用校准)。选择符合 6.3 和 6.4 中规定的加速度传感器和分析方法。
- b) 对试件进行功能检查。
- c) 以火工装置冲击加载的方法, 使试件(在其工作模式下)经受火工装置的爆炸分离冲击激励。
- d) 记录必要的数以确认用冲击响应谱算法处理的冲击瞬态过程在规定的允差范围内。这些数据包括试验装置的照片、试验记录和实际的冲击瞬态信号曲线。对于试件内隔离冲击的组件, 应进行测量和(或)检查以确认这些组件衰减爆炸分离冲击的能力。
- e) 对试件进行功能检查。记录性能数据。
- f) 在试验期间能够保持试验结构的完整性的情况下, 为了增加统计置信度, 重复 b)~e) 至少 3 次。
- g) 记录试验序列。

### 7.2.2 程序 II——使用模拟结构的近场模拟

程序 II 的步骤如下:

- a) 按下列要求选择试验条件并校准冲击装置:
  - 1) 选择符合 6.3 和 6.4 中规定的加速度传感器和分析方法。
  - 2) 按类似于真实装备服役的固定方式将模拟负载(真实试件、不合格产品或刚性模拟质量)固定到冲击装置上。若试件通常是安装在冲击隔离器上以衰减爆炸分离冲击, 则应保证试验过程中隔离器起作用。
  - 3) 进行校准冲击, 直至至少在至少一个轴的一个方向上, 连续两次作用于模拟负载上的冲击所产生的用冲击响应谱算法处理的冲击瞬态过程在规定的允差范围内。
  - 4) 拆除模拟负载, 并将真实试件安装到冲击装置上, 应注意固定的细节。
- b) 对试件进行功能检查。
- c) 使试件(在其工作模式下)经受火工装置的爆炸分离冲击激励。
- d) 记录必要的数以确认用冲击响应谱算法处理的冲击瞬态过程在规定的允差范围内。这些数据包括试验装置的照片、试验记录和实际的冲击瞬态信号曲线。在要求是按多于一个轴给出的情况下, 应检查其他轴的响应, 以保证试验条件已得到满足。对于试件内隔离冲击的组件, 应进行测量和(或)检查以确认这些组件衰减爆炸分离冲击的能力。
- e) 对试件进行功能检查。记录性能数据。
- f) 若试验的冲击在其他轴上不满足试验条件, 则对被试的每个正交轴重复 a)~e) 三次。
- g) 记录试验情况。

### 7.2.3 程序 III——使用机械试验装置的远场模拟

程序 III 的步骤如下:

- a) 按下列要求选择试验条件并校准冲击装置:
  - 1) 选择符合 6.3 和 6.4 中规定的加速度传感器和分析方法。
  - 2) 按类似于真实装备服役的固定方式将模拟负载(真实试件、不合格产品或刚性模拟质量)固定到冲击装置上。若试件通常是安装在冲击隔离器上以衰减爆炸分离冲击, 则应保证



试验过程中隔离器起作用。

3) 进行校准冲击,直至至少在至少一个轴的一个方向上,连续两次作用于模拟负载上的冲击所产生的用冲击响应谱算法处理的冲击瞬态过程在规定的允差范围内。

4) 拆除模拟负载,并将真实试件安装到冲击装置上,应注意固定的细节。

b) 对试件进行功能检查。

c) 使试件(在其工作模式下)经受机械冲击装置的爆炸分离冲击模拟激励。

d) 记录必要的数以确认用冲击响应谱算法处理的冲击瞬态过程在规定的允差范围内。这些数据包括试验装置的照片、试验记录和实际的冲击瞬态信号曲线。在要求是按多于一个轴给出的情况下,应检查其他轴的响应,以保证试验条件已得到满足。对于试件内隔离冲击的组件,应进行测量和(或)检查以确认这些组件衰减爆炸分离冲击的能力。

e) 对试件进行功能检查。记录性能数据。

f) 若试验的冲击在其他轴上不满足试验条件,则对被试的每个正交轴重复 a)~e) 三次。

g) 记录试验情况。

#### 7.2.4 程序 IV——使用电动振动台的远场模拟

程序 IV 的步骤如下:

a) 按下列要求选择试验条件并校准冲击装置:

1) 选择符合 6.3 和 6.4 中规定的加速度传感器和分析方法。

2) 按类似于真实装备的方式将模拟负载(真实试件、不合格产品或刚性模拟质量)固定到电动振动台上。若试件通常是安装在冲击隔离装置上以衰减爆炸分离冲击,则应保证试验过程中隔离装置起作用。

3) 基于所要求的试验冲击响应谱,用小波或衰减正弦波匹配冲击响应谱的方法导出时间历程。

4) 进行校准冲击,直至至少在至少一个轴的一个方向上,连续两次冲击作用于模拟负载上所产生的用冲击响应谱算法处理的冲击瞬态过程在规定的允差范围内。

5) 拆除模拟负载,并将真实试件安装到电动振动台上,应注意固定的细节。

b) 对试件进行功能检查。

c) 使试件(在其工作模式下)经受电动振动台的爆炸分离冲击模拟激励。

d) 记录必要的数以确认用冲击响应谱算法处理的冲击瞬态过程在规定的允差范围内。这些数据包括试验装置的照片、试验记录和实际的冲击瞬态信号曲线。在要求是按多于一个轴给出的情况下,应检查其他轴的响应,以保证试验条件已得到满足。对于试件内隔离冲击的组件,应进行测量和(或)检查以确认这些组件衰减爆炸分离冲击的能力。

e) 对试件进行功能检查。记录性能数据。

f) 若试验的冲击在其他轴上不满足试验条件,则对被试的每个正交轴重复 b)~e) 三次。

g) 记录试验情况。

## 8 结果分析

### 8.1 概述

除 GJB 150.1A-2009 中 3.15、3.16 和 3.17 提供的指南外,以下信息也有助于评价试验结果。应按装备的技术要求,详细分析试件的任何故障,并考虑 8.2~8.5 中的有关信息。

### 8.2 程序 I——使用真实配置的近场模拟

仔细地评估试件结构中的任何故障,例如电路板中的微小裂纹,其可能不会直接引起装备功能故障,但可以导致在其服役的环境条件下出现故障。

### 8.3 程序 II——使用模拟配置的近场模拟

仔细地评估试件结构中的任何故障,例如电路板中的微小裂纹,其可能不会直接引起装备功能故障,但可以导致在其服役的环境条件下出现故障。

8.4 程序 III——使用机械试验装置的远场模拟

机械冲击模拟一般将产生比真实爆炸分离冲击事件更严酷的低频环境(相比较大的速度和位移),因此,任何结构失效,例如,紧固件或支承变形,可能更类似于 GJB 150.18A-2009 所叙述的以冲击响应谱规定的冲击试验中所发现的失效。若出现这种情况,并且导致结构失效的原因不易发现,可能需要采用其他程序以满足试验要求。

8.5 程序 IV——使用电动振动台的远场模拟

机械冲击模拟一般将产生比真实爆炸分离冲击事件更严酷的低频环境(相比较大的速度和位移),因此,任何结构失效可能更类似于 GJB 150.18A-2009 所叙述的以冲击响应谱规定的冲击试验中所发现的失效。若出现这种情况,并且导致结构失效的原因不易发现,可能需要采用其他程序以满足试验要求。

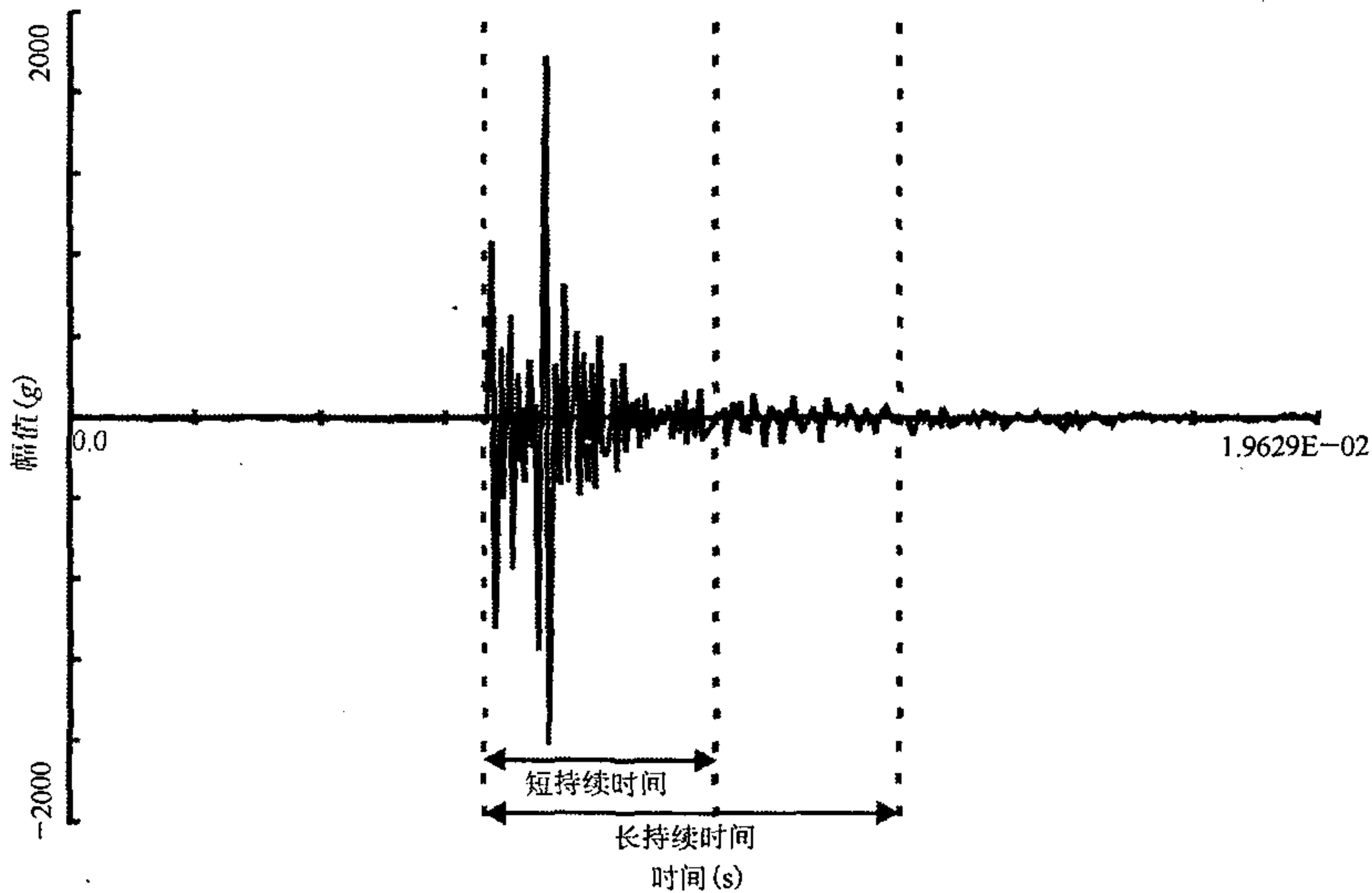


图 1 爆炸分离冲击的加速度时间历程

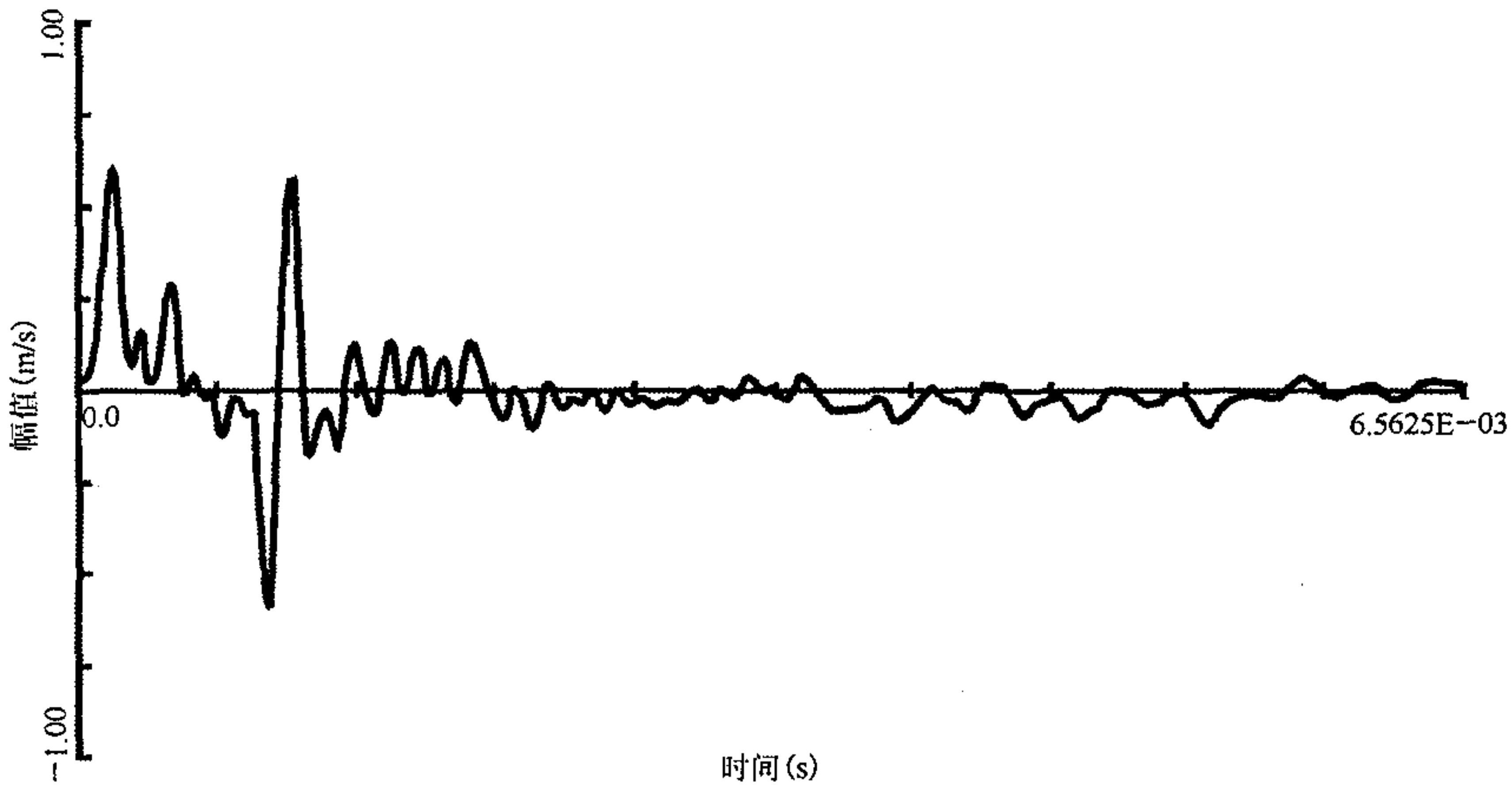


图 2 长持续时间爆炸分离冲击的速度时间历程

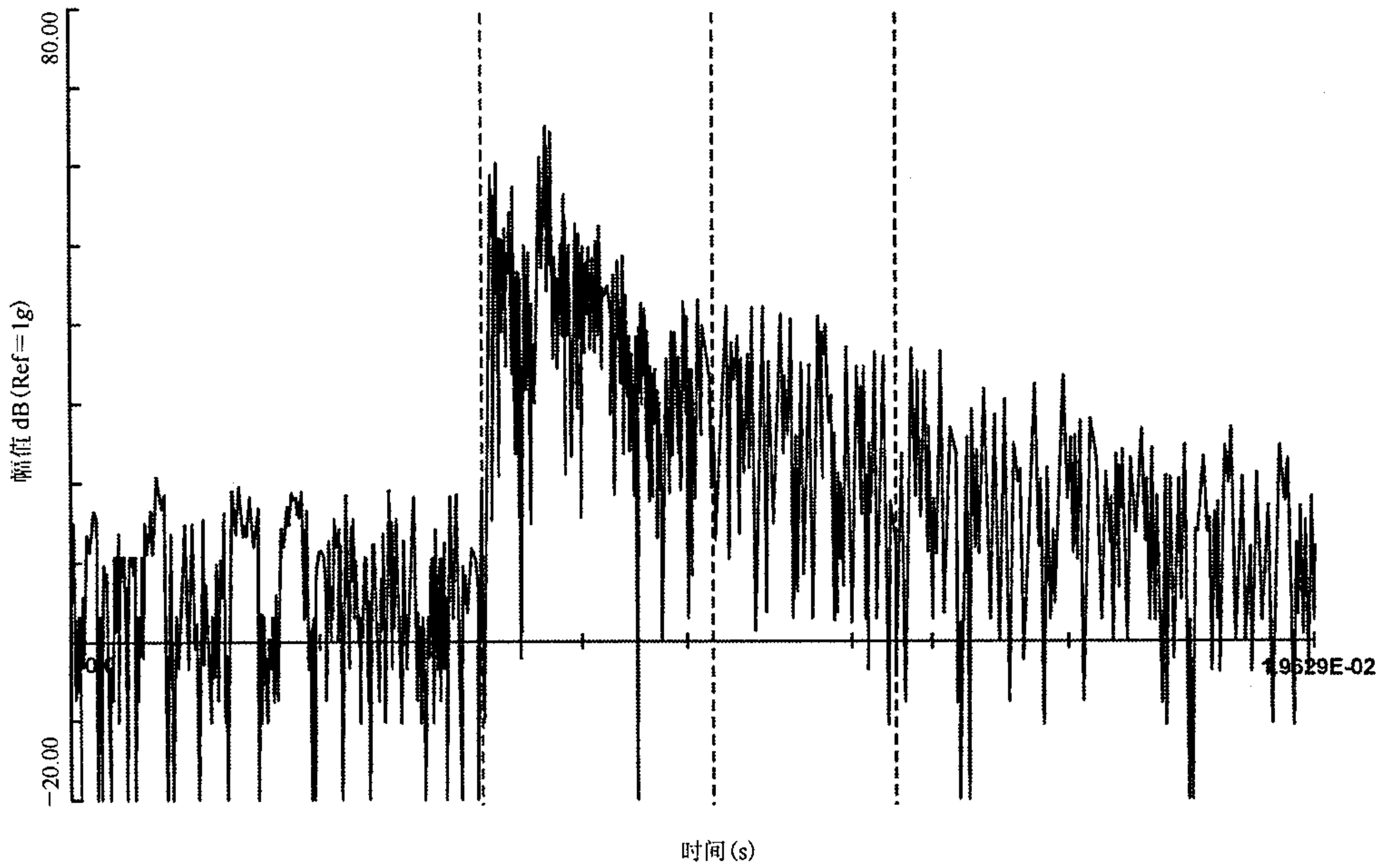


图3 绝对值加速度时间历程

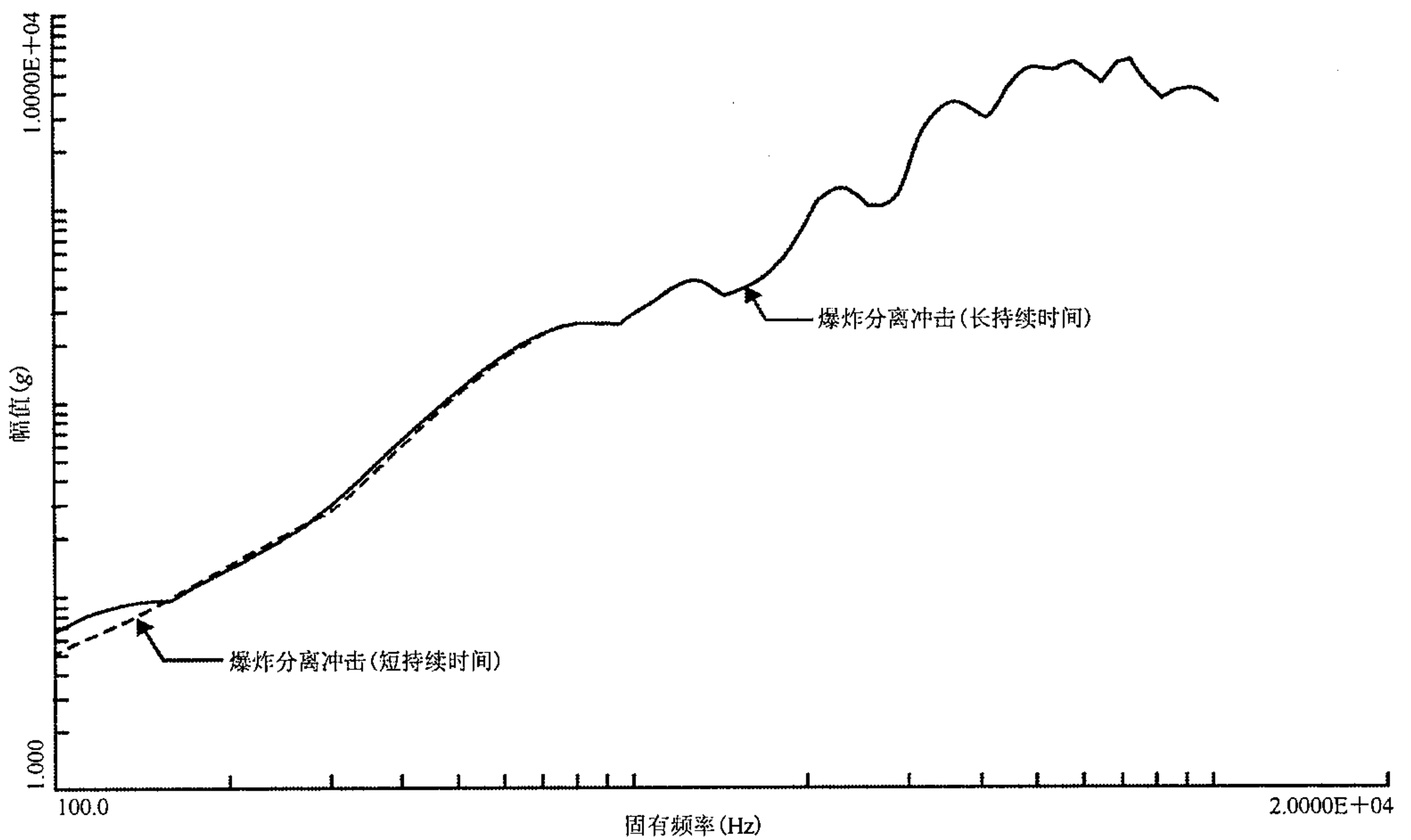


图4 最大绝对加速度冲击响应谱——长持续时间和短持续时间



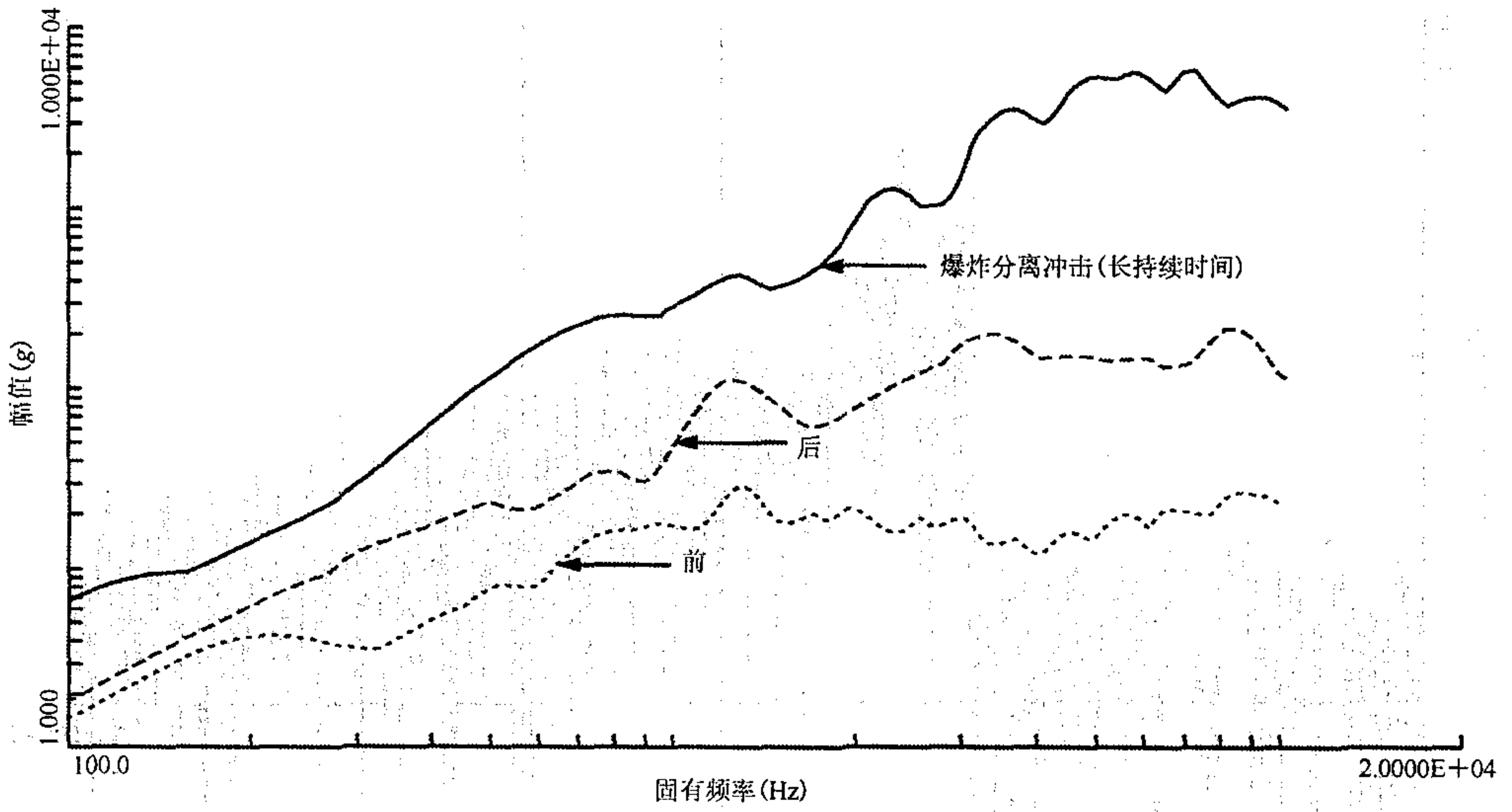


图5 爆炸分离冲击及其之前和之后的最大绝对加速度冲击响应谱

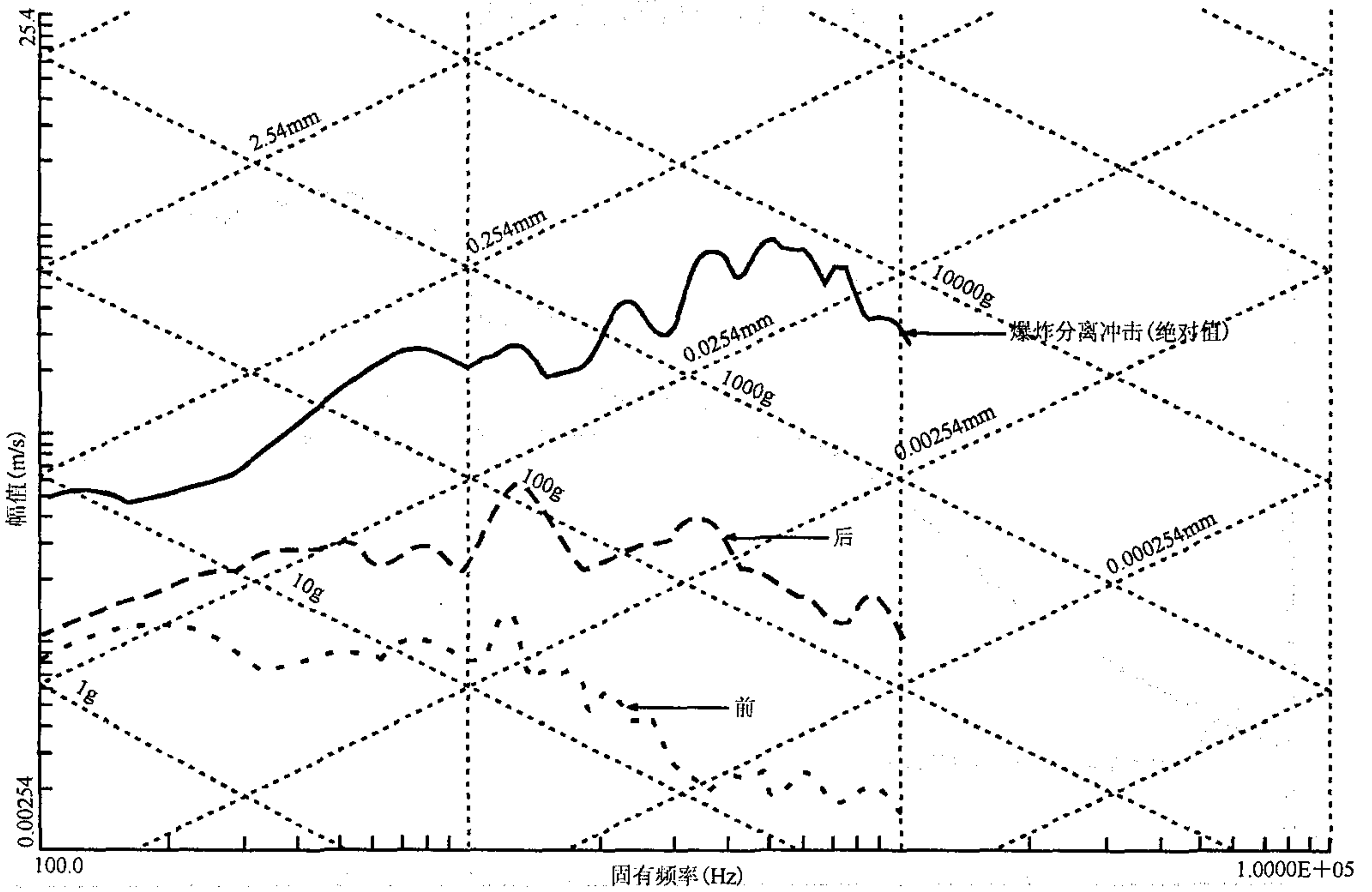


图6 爆炸分离冲击及其之前和之后的最大伪速度冲击响应谱

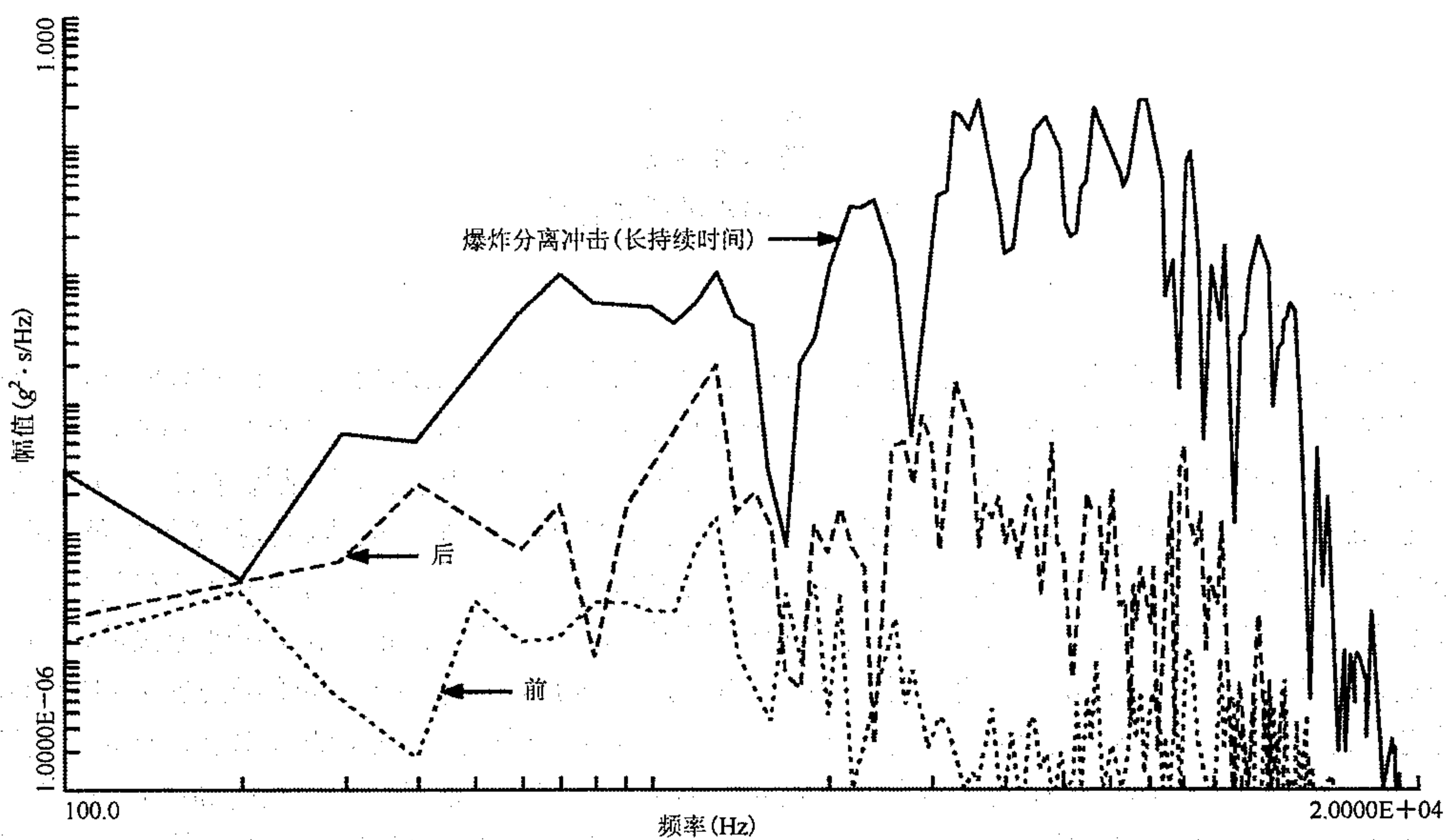


图 7 加速度能量谱密度估计

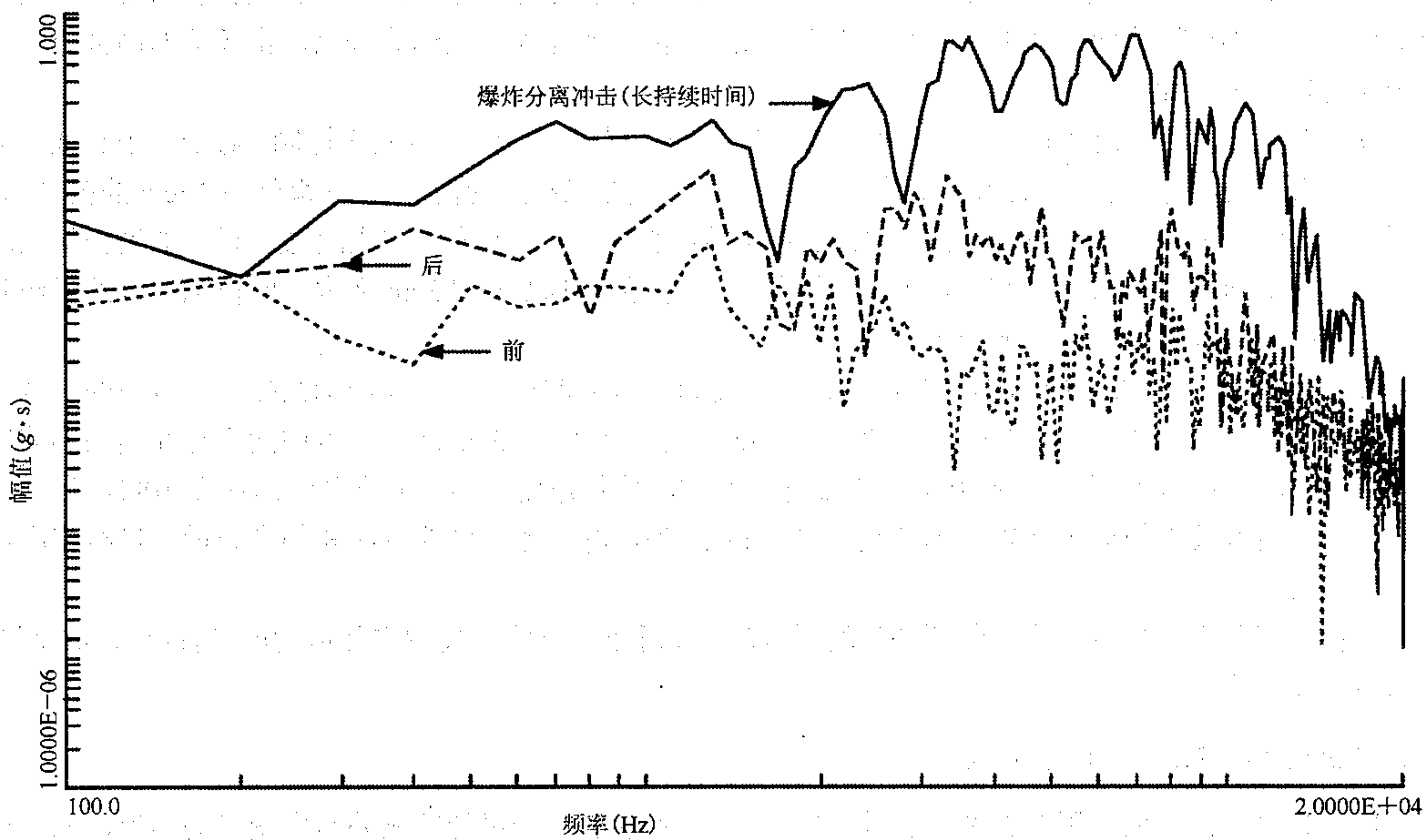


图 8 加速度傅立叶谱估计

## 附录 A (资料性附录)

### 爆炸分离冲击的基本概念

#### A. 1 爆炸分离冲击

爆炸分离冲击也称为火工品冲击,是指安装在结构上的火工装置(由炸药或推进剂驱动)动作所导致的装备局部强作用机械瞬态响应。许多火工装置能够向装备传递这类强作用瞬态响应。通常,可以按火工装置激励源的空间分布将其分为:点源、线源和点与线组合源。典型的点源包括爆炸螺栓、分离螺母、解锁器、螺栓与电缆切割器以及火工驱动的执行硬件(例如电爆活门)。典型的线源包括柔性聚能炸药条、导爆索以及传爆管。典型的点与线组合源包括包带。在某些情况下,火工装置的冲击加载可能伴随着结构预载荷产生的应变能释放,或由于火工装置动作而产生的结构部件之间的撞击。爆炸分离冲击的频率范围通常在 100Hz~1000kHz,持续时间从 50 $\mu$ s~20ms,加速度响应幅值范围可能在 300g~300 000g。爆炸分离冲击的加速度响应时间历程一般会剧烈振荡,并存在一个接近 10 $\mu$ s 的基本上升时间。通常,爆炸分离冲击产生材料应力波,可激发装备上波长与微型电子芯片外形尺寸同量级的高频响应。由于火工装置点火所引起的结构速度变化有限以及火工装置的局部特征,装备在 500Hz 以下的结构共振通常不会被激发,并且,在整体结构或机械微小损伤的情况下,系统的位移响应很小。装备周围的爆炸分离冲击加速度环境通常强烈依赖于装备和传递结构(装备与火工装置之间存在的结构)的技术状态。在本试验中,爆炸分离冲击环境分为近场和远场。近场与远场之间的主要差别是爆炸分离冲击环境的强度和频谱分量,其取决于火工装置的类型和装药量、与爆炸源之间的距离、以及传递结构的细节(特别是结构的不连续性,如接头、拐点、集中质量和弹性单元等,其能够明显地衰减爆炸分离冲击环境的高频分量)。近场和远场的定义如下:

- a) 在火工装置的近场内,爆炸分离冲击响应受结构材料应力波扩散效应控制。对于一个高能量的火工装置,其近场一般为火工装置或其中一部分(在线装药的情况下)的爆炸点 15cm 的范围内。若中间不存在结构不连续性,预计装备可能经受超过 5000g 的峰值加速度,显著的谱分量出现在 100kHz 以上。可以认为威力较小的火工装置的近场是在 7.5cm 之内,峰值加速度的量级和频谱分量的量级相应地减小。
- b) 在火工装置的远场内,爆炸分离冲击响应受材料应力波扩散效应和结构共振响应效应的联合控制。对于一个高能量的火工装置,其远场一般为爆炸点 15cm 之外。若中间不存在结构不连续性,预计装备可能经受 500g 至 5000g 之间的峰值加速度,显著的谱分量出现在 10kHz 以上。而能量较小的火工装置的远场是在 7.5cm 之外,峰值加速度的量级和频谱分量的量级相应地减小。

装备或其部件可能位于火工装置的近场或远场,在近场中爆炸分离冲击环境的严酷程度最高,而在远场中严酷程度最低。

#### A. 2 爆炸分离冲击——动量交换

爆炸分离冲击一般表现为在两个物体之间没有动量交换(一个可能的例外是应变能的传递,源自火工装置产生的应力波通过结构传播到装备上)。爆炸分离冲击基本上不产生装备支承结构的速度变化,也不需要考虑 100Hz 以下的频率。其中,在适当远离火工装置激励源的一个给定点的爆炸分离冲击响应的幅值是火工装置装药量的函数。除装药区域外,大部分结构没有塑性变形,爆炸分离冲击是线弹性材料波从支承结构到装备的传递结果。通常,结构不连续性(如接头和螺栓连接)可大幅度衰减爆炸分离冲击的幅值。在测量技术方面,通常采用加速度传感器、应变计和激光速度计作为测量装置。在爆炸分离冲击数据处理中,重要的是检查测量数据中是否存在异常现象。其中一种检查方法是加速度时间历程



的积分,以确定其是否具有高频速度的特征。爆炸分离冲击是为了特定的用途通过火工装置的布置在装备中设计的。由于爆炸分离冲击环境在很大程度上是由结构几何形状和装药或驱动装置所确定的,因此,作用区域内装备的爆炸分离冲击响应在一定程度上是可以预示和复现的。

### A.3 爆炸分离冲击——物理现象

爆炸分离冲击是由炸药或推进剂驱动装置所导致的结构上的材料和结构响应。这一装置可能在一点或沿着一条线产生局部极限压力(或许伴随有加热和电磁辐射)。这一装置几乎同时产生局部的高量级非线性材料应变速率,而随即传送的高量级和高频材料应力波在点源或线源一定距离上产生高加速度、低速度、短持续时间的响应。爆炸分离冲击的特点是:

- a) 高材料应变速率(材料非线性区域)所造成的结构内爆炸源附近的应力波扩散到近场及其之外。
- b) 高频率和宽频带的输入(频率范围 100Hz~1000kHz)。
- c) 结构响应的加速度大(300g~300000g),但速度和位移小。
- d) 持续时间短(<20ms)。
- e) 在火工装置动作之后的结构剩余加速度响应大。
- f) 由直接连接在结构上的爆炸装置或推进剂驱动装置(释放贮存的应变能)所产生。为了无污染,推进剂驱动装置包含了压紧装置之类的部件,其释放的应变能所产生的结构响应比单独推进剂爆炸产生的响应更大。
- g) 高度局部化的点源输入或线源输入。
- h) 非常高的结构驱动点阻抗(驱动点阻抗为  $P/v$ ,其中, $P$ 是爆炸产生的力或压力, $v$ 是结构速度)。在爆炸源上,相对于较高的材料质点速度,材料的驱动点阻抗实际上可能较小。
- i) 响应时间历程本质上是随机的,使得重复性很小,并且强烈依赖于装备结构的细节。
- j) 结构上各点的响应受结构不连续性的影响很大。
- k) 装备和结构响应可能伴随着显著的热辐射和电磁辐射(来源于爆炸期间的气体电离)。
- l) 装备或其部件对爆炸分离冲击的响应特性可以按位于火工装置的近场或远场分类。

附录 B  
(规范性附录)

爆炸分离冲击环境的预示

B.1 总则

爆炸分离冲击环境主要取决于火工装置的类型和结构的传递路径。尽管已经对各种不同的装备和不同类型的火工装置采集了大量的爆炸分离冲击环境数据，但在进行新型装备研制时，由于装备结构和选用的火工装置规格不同，这些环境数据一般不能直接使用。在这种情况下，环境预示技术可能成为解决环境条件制定问题的主要方法。由于爆炸分离冲击环境的复杂性，目前可供工程应用的预示方法并不多，动力相似外推是实际使用的主要方法之一。爆炸分离冲击环境的外推方法主要有两个相似准则：冲击源的能量相似和冲击源到响应位置的距离相似。

爆炸分离冲击环境的外推需要基于以前的环境测试数据，当使用这些数据时，应确认数据的品质符合要求。作为爆炸分离冲击试验的参考数据，图 B.1 给出了 4 种航天器使用的典型点源火工装置的冲击响应谱估计。

B.2 冲击源的能量相似

根据爆炸分离冲击源的能量相似准则，在所有频率上的冲击响应谱按两个不同火工装置所释放的总能量之比换算。对于两个火工装置，在给定的距离  $D$  上的冲击响应谱的关系见式 (B.1)：

$$A_n(f_n) = A_r(f_n) \left( \sqrt{\frac{E_n}{E_r}} \right) \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

$A_n(f_n)$ 、 $A_r(f_n)$ ——对应于使用的和参考的火工装置的冲击响应谱 (SRS) 值，g；

$f_n$ ——给定的固有频率，Hz；

$E_n$ 、 $E_r$ ——使用的和参考的火工装置爆炸所释放的总能量，J。

在上述关系中，假定火工装置所释放的总能量的增加或减少将以完全相同的路径传递给结构，即装置送入结构的能量远远超过在其他一些路径中(如通过空气)所耗散的能量。 $E_r$  和  $E_n$  可取自火工装置的有关技术条件或者由能量谱密度估计计算，其中，假定时间历程测量数据表示能量微分的度量。

在使用上述关系时，应当注意，许多情况下，超过产生结构分离所需要的额外的冲击源能量将不增加结构的冲击传递，而是导致传递到结构附近的大气或真空中的冲击波增强。这一额外的能量可能不会有效地产生结构响应。因此，当  $E_n > E_r$  时，应用上述表达式可能导致爆炸分离冲击环境的过预示，而  $E_n < E_r$  时，则可能导致欠预示。

B.3 冲击源到响应位置的距离相似

随着响应位置到火工装置之间的距离增加，爆炸分离冲击环境的幅值将明显衰减。图 B.2 给出了图 B.1 中点源火工装置产生的爆炸分离冲击环境的冲击响应谱的峰值和斜率(在双对数坐标曲线上随频率增加而线性增加的部分)随着到冲击源的距离而衰减的关系曲线。图 B.3 给出了 7 种航天结构的爆炸分离冲击响应时间历程的峰值随着到冲击源的距离而衰减的关系曲线。

根据冲击源到响应位置的距离相似准则，在所有频率上的冲击响应谱按根据经验导出的两个响应位置与冲击源之间距离的函数换算。对于点源火工装置，两个响应位置的冲击响应谱的关系见式 (B.2)：

$$A_2(f_n) = A_1(f_n) \exp\{[-8 \times 10^{-4} f_n^{(2.4f_n^{0.105})}] (D_2 - D_1)\} \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

$A_1(f_n)$ 、 $A_2(f_n)$ ——对应于距离  $D_1$  和  $D_2$  的冲击响应谱(SRS)值,  $g$ ;

$f_n$ ——给定的固有频率, Hz;

$D_1$ 、 $D_2$ ——响应位置到冲击源的距离, m。

在上述关系中, 假定  $D_1$  和  $D_2$  可容易地按点源火工装置的情况规定。图 B.4 表示了对于所选的  $D_2-D_1$  的值,  $A_2(f_n)$  与  $A_1(f_n)$  之比与固有频率  $f_n$  的函数关系。从该曲线中可看到, 随着单自由度固有频率增大, 对于固定的  $(D_2-D_1) > 0$ , 比值明显减小, 并且随着  $D_2-D_1$  增大, 衰减更加显著。当用于两种结构技术状态之间的预示时, 这一相似关系非常严重地依赖于结构的相似性, 并且要求是同样类型的火工装置。

应当注意, 上述经验关系式是从点源火工装置的有关爆炸分离冲击数据中导出的, 可能不代表其他类型的火工装置。另外, 爆炸分离冲击通过结构连接处的传递可使冲击响应谱的峰值明显衰减, 在某些情况下, 对于多达 3 个接头, 每个接头可衰减 40%, 而冲击响应谱的斜率部分不衰减。

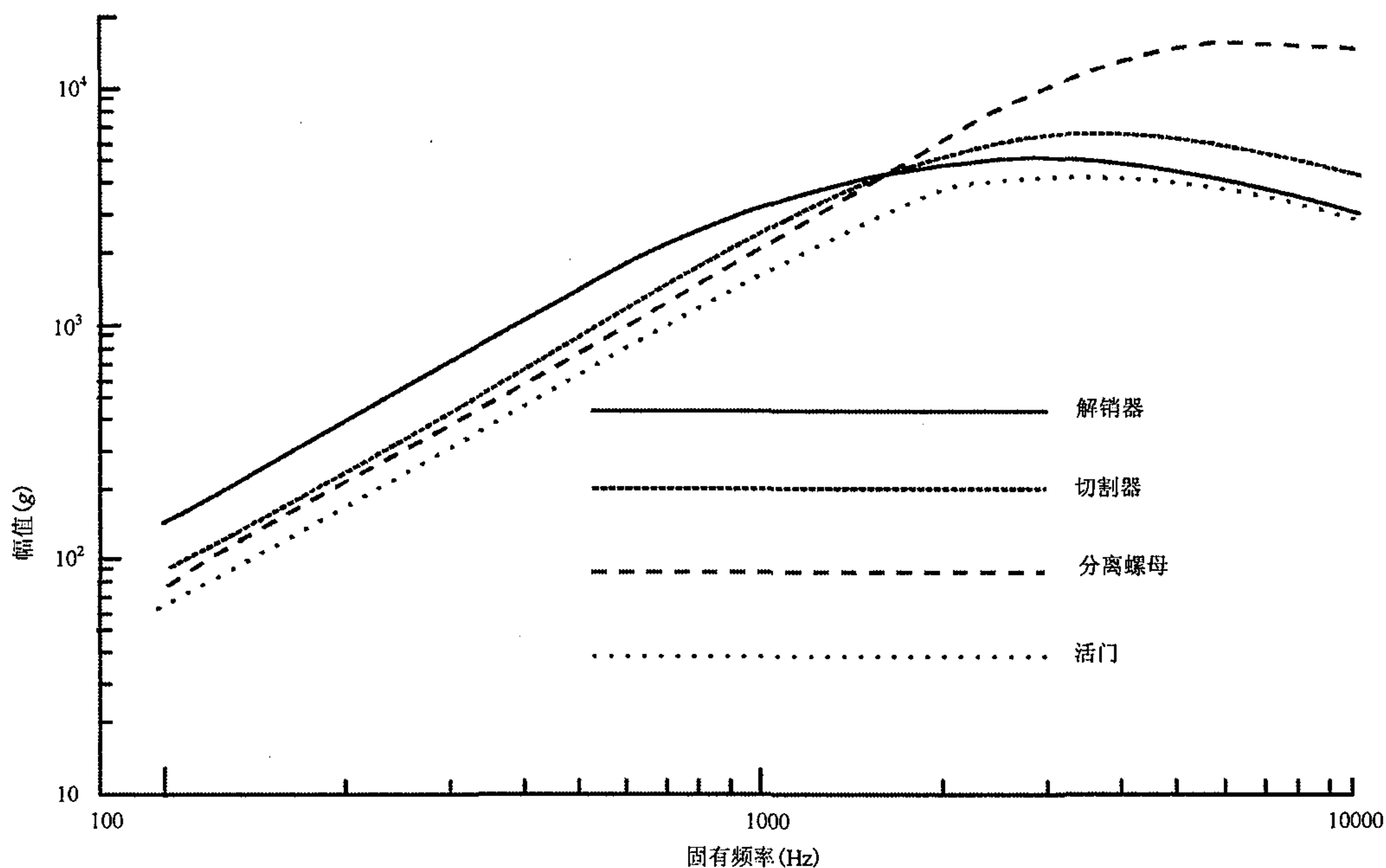


图 B.1 各种点源火工装置的冲击响应谱



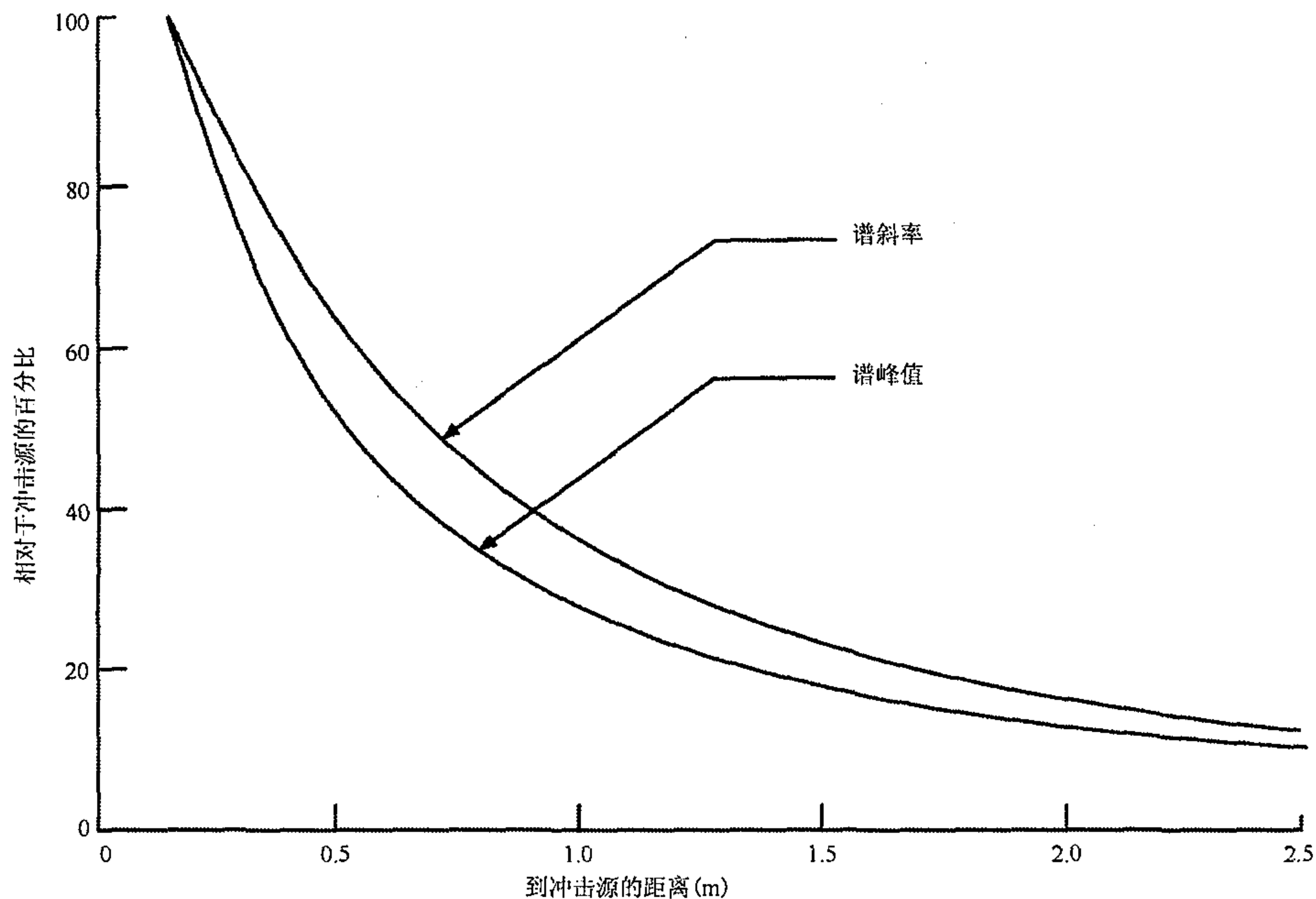


图 B.2 冲击响应谱与到冲击源距离的关系

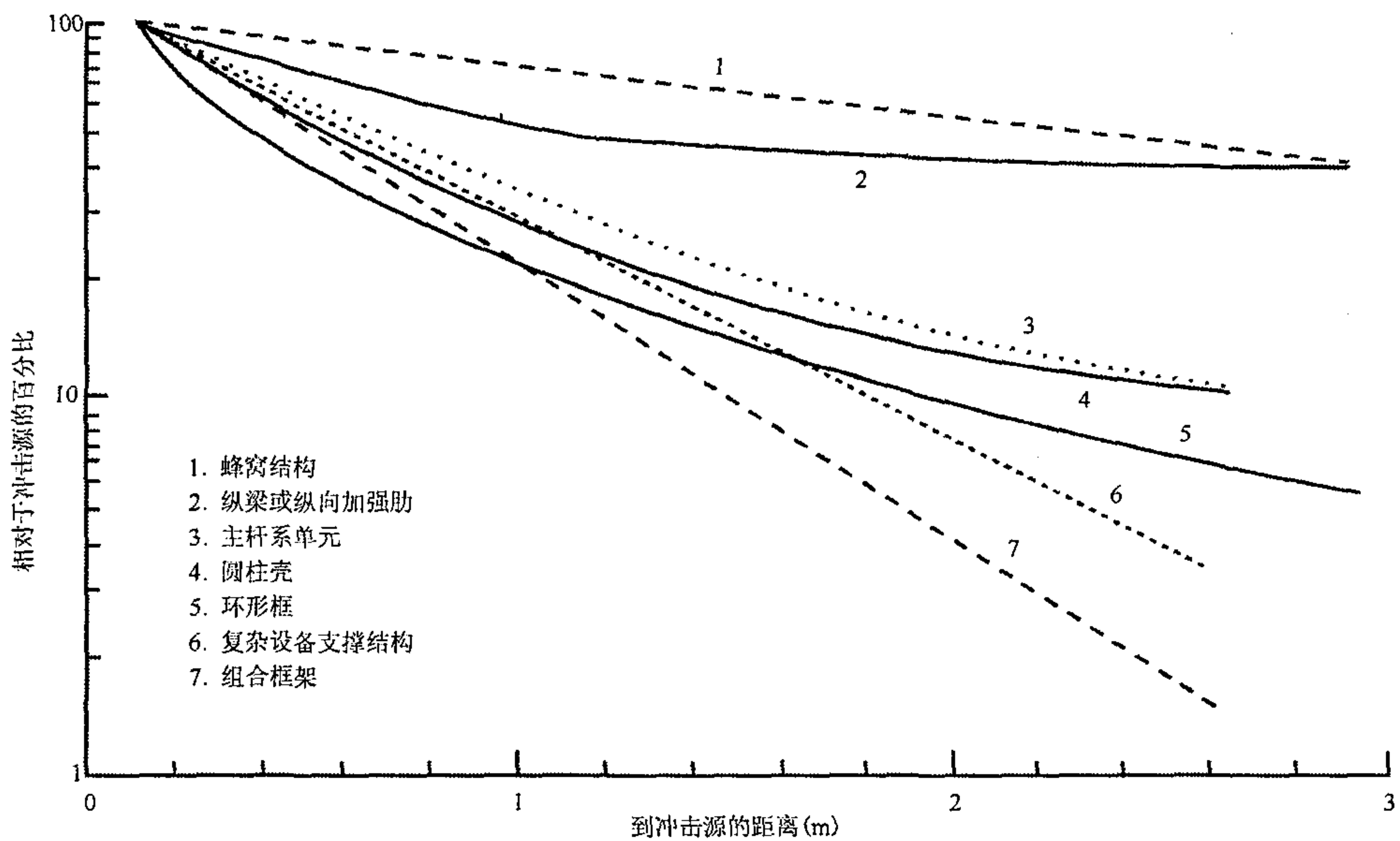


图 B.3 爆炸分离冲击时间历程峰值与到冲击源距离的关系

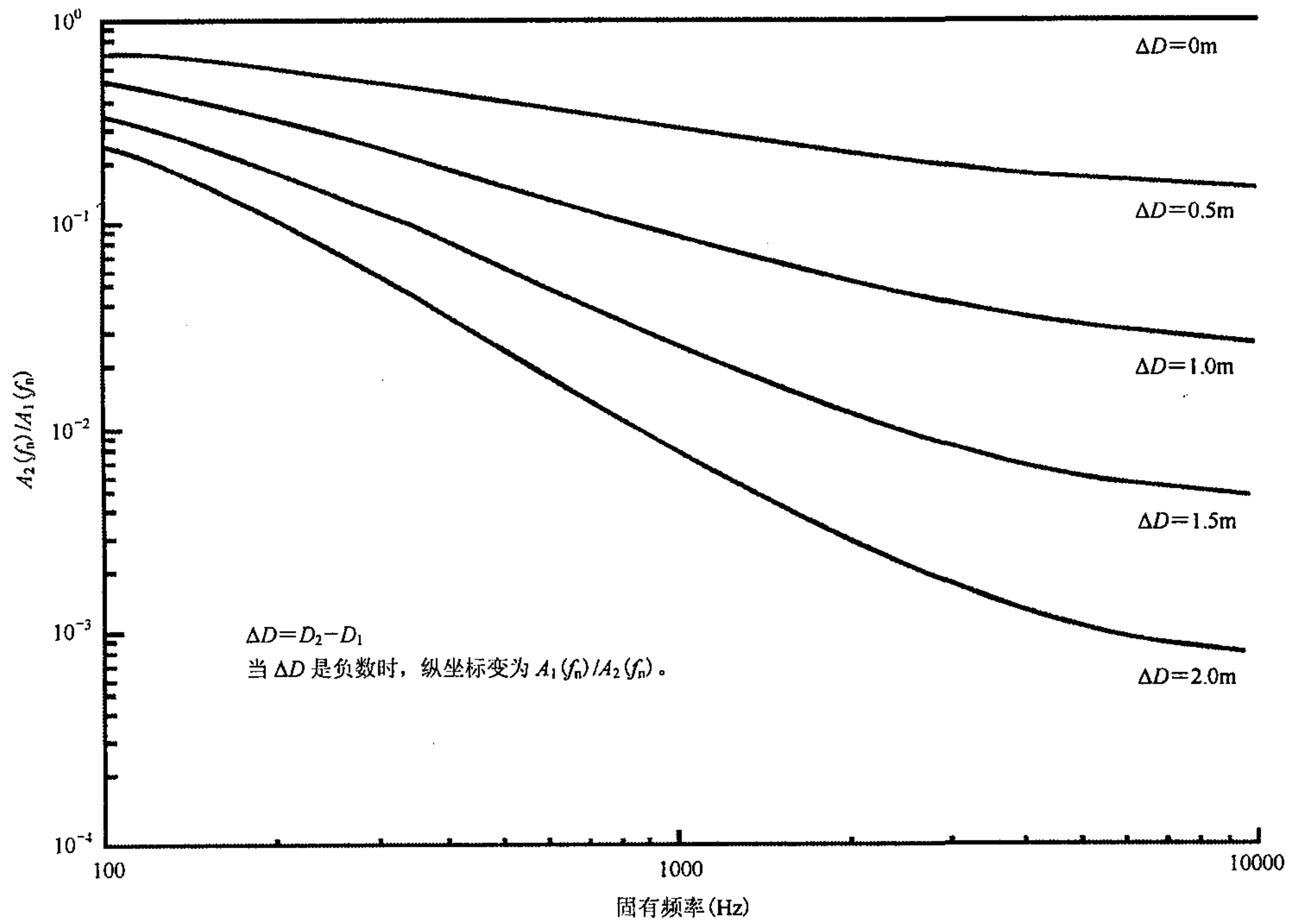


图 B.4 响应位置到冲击源距离的冲击响应谱修正

## 附 录 C (规范性附录)

### 爆炸分离冲击的测量和分析技术

#### C.1 爆炸分离冲击的加速度测量

C.1.1 对于定义特定被试硬件的输入载荷的爆炸分离冲击测量，加速度传感器的测量位置应尽可能接近硬件的安装点。

C.1.2 在进行加速度测量时，应特别注意避免接地回路和由火工装置点火产生的电磁辐射脉冲所导致的背景噪声问题。对于程序 I 和程序 II，应遵循下列指南：

- a) 应尽可能选择有电气绝缘的加速度传感器。若加速度传感器无电气绝缘，则应通过绝缘螺钉或绝缘胶固定到结构上。
- b) 在每次试验之前，宜用欧姆表检查加速度传感器与结构之间可能的接地情况。唯一的接地宜在信号放大器或末端仪器处。
- c) 若可能，在每次试验之后，宜用欧姆表再次检查加速度传感器与结构之间可能的接地情况，以确认电气绝缘没有受到爆炸分离冲击破坏。
- d) 对于非内装式的压电加速度传感器，传感器与电荷放大器之间的所有电缆宜采用连续的低噪声同轴电缆。不宜使用接线盒或双绞线。
- e) 在可行的情况下，宜将电缆直接焊到加速度传感器上，而不是使用电连接器。
- f) 为了防止电磁辐射干扰和电缆损伤，电缆不宜固定到加速度传感器连接以外的结构上，并且宜在火工装置激励源相反的方向引出加速度传感器的电缆。可用一个特殊的支座支撑离开结构的电缆。
- g) 为了检查试验期间加速度信号可能存在的外界辐射干扰，如电磁辐射干扰，宜将一个钝化加速度传感器(加速度传感器拆除了敏感元件，但其他部分与测量用加速度传感器相同)安装在靠近测量加速度传感器的结构上，并且用电缆连接到具有相同增益设置的信号适调器上。按与其他加速度传感器测量结果相同的方式处理钝化加速度传感器的响应，若其显示出不同于很低电平噪声的任何特征，则认为加速度测量结果受到外界辐射干扰的污染。上述钝化加速度传感器也可用一个自由悬挂(但不接触)到测量点邻近结构上的加速度传感器代替。

C.1.3 通常，加速度传感器宜直接固定在结构上，尽量避免使用转接块。但是，若需要使用转接块，则应注意避免转接块的共振和脱落问题。在使用转接块时，应遵循下列指南：

- a) 带有加速度传感器的转接块的固有频率宜大于 40kHz。典型地，转接块宜为铝、镁或铍材料，边长不超过 2cm。
- b) 对于高量级的爆炸分离冲击(峰值超过 5000g)测量，若可行，转接块宜同时用胶接和螺接固定到结构上，以减少爆炸分离冲击期间脱落的风险。在结构上钻孔之前应考虑加速度传感器安装对结构完整性的影响。对于低量级的爆炸分离冲击，一般可单独采用胶接方式。
- c) 若转接块同时用胶接和螺接固定到结构上，在每次爆炸分离冲击事件之后宜松开螺钉以确定转接块是否仍胶接在结构上。胶接的破损可能意味着转接块在冲击过程中脱落。
- d) 对于面内测量，应尽可能减少转接块的旋转运动对测量结果的影响。

C.1.4 在特定的机械滤波器经过验证对爆炸分离冲击信号的测量有效的情况下，可在加速度传感器与结构之间采用机械式低通滤波器降低爆炸分离冲击产生的频率很高的分量。在使用机械滤波器时，应遵循下列指南：

- a) 机械滤波器的截止频率宜至少为冲击响应谱分析的最高分析频率的 1.5 倍；



- b) 机械滤波器在被测量级的爆炸分离冲击作用下不应存在“饱和”或其他非线性现象；
- c) 机械滤波器在接近其共振频率处的增益不应因不适当的阻尼消除真实的峰值；
- d) 机械滤波器不应存在导致不可接受的横向加速度输入灵敏度的明显的横向共振。

## C. 2 爆炸分离冲击信号分析

C. 2. 1 爆炸分离冲击信号的分析一般采用冲击响应谱方式。

C. 2. 2 在进行冲击响应谱分析之前，宜检查爆炸分离冲击加速度的时间历程信号中是否存在下列异常现象：

- a) 模-数转换器(ADC)故障或削波产生的明显的野点、信号丢失、限幅或其他异常现象；
- b) 加速度传感器故障或脱落产生的信号中断；
- c) 电连接器松动或其他间歇噪声源产生的随机出现的尖峰；
- d) 加速度传感器或信号适调器饱和产生的零漂；
- e) 单边削波、加速度传感器或信号适调器饱和产生的正、负值之间的不对称。

C. 2. 3 应对爆炸分离冲击加速度的每个时间历程进行积分以检查测量系统中的任何异常现象，例如导线破损、超过放大器压摆率、数据削波、无法解释的加速度传感器漂移等。在进行积分检查时，应考虑可能出现由于低频噪声积分所导致的积分信号的低频趋势项。应注意虚假加速度信号产生的较快的趋势项与正常噪声积分产生的较慢的趋势项之间的差异。

C. 2. 4 在对爆炸分离冲击加速度时间历程进行冲击响应谱分析时，应遵循下列指南：

- a) 用于冲击响应谱计算的加速度信号的持续时间宜是有效瞬态持续时间  $T_e$ 。
- b) 用于冲击响应谱计算的加速度信号的初始值应为零。若实测加速度信号存在零偏，则宜用爆炸分离冲击之前的背景信号的平均值得到加速度信号的零点。爆炸分离冲击事件之前和之后的背景噪声宜从计算冲击响应谱的数据中删除。
- c) 用于冲击响应谱计算的加速度信号的采样频率宜选为最高分析频率的 4 倍以上。
- d) 除另有规定外，冲击响应谱计算的阻尼比宜选为 5% ( $Q=10$ )。
- e) 冲击响应谱计算的分析频率点至少应为 1/6 倍频程频率间隔，一般选择 1/6 倍频程频率间隔。

C. 2. 5 宜在所有相同的分析频率上计算爆炸分离冲击加速度时间历程的最大正向和负向加速度冲击响应谱。若在某些分析频率上最大正向和负向加速度冲击响应谱存在明显的差异，则可认为在爆炸分离冲击测量数据中存在异常现象。

C. 2. 6 对于爆炸分离冲击加速度时间历程的冲击响应谱计算结果，应遵循下列指南进行评定：

- a) 若爆炸分离冲击的冲击响应谱值与背景噪声的冲击响应谱值之间相差小于 6dB，则可认为在这些分析频率上的冲击响应谱计算结果无效。
- b) 若爆炸分离冲击的冲击响应谱值与钝化或自由悬挂加速度传感器(见 C.1.2)的冲击响应谱值之间相差小于 6dB，则可认为在这些分析频率上的冲击响应谱计算结果无效。
- c) 对于在结构一阶模态频率以下的分析频率，若爆炸分离冲击的冲击响应谱的斜率小于 6dB/oct，则可认为在所有分析频率上的冲击响应谱计算结果无效。