

# 声发射试验报告

——模拟桥梁主缆钢丝断裂试验

试验单位：深圳市科兰德实业发展有限公司

北京理工大学

北京声华兴业科技有限公司

试验地点：浙江省杭州市余杭区闲林镇

五常联胜路 2 号横板桥工业园区四栋

试验时间：2015 年 7 月

# 目 录

模拟桥梁主缆钢丝断裂试验报告.....	3
一、试验目的.....	3
二、试验设备.....	3
三、试验方法.....	3
四、试验基础.....	3
第一节 声发射的概念.....	3
第二节 突发和连续声发射.....	4
第三节 声发射的基本原理.....	4
第四节 材料中的波速.....	5
第五节 衰减.....	6
第六节 凯塞(Kaiser)和费利西蒂(Felicity)效应.....	7
第七节 影响声发射特性的因素.....	7
第八节 声发射信号处理方法.....	8
8.1 经典信号处理方法.....	8
8.3 定位技术.....	11
五 主缆钢丝声发射监测试验结果.....	14
5.1 单根衰减测试.....	14
5.2 主缆模型衰减测试.....	15
5.3 主缆单根钢丝断裂试验（1）.....	17
5.4 主缆单根钢丝断裂试验（2）.....	20
5.5 主缆单根钢丝断裂试验（3）.....	23
5.6 主缆单根钢丝断裂试验（4）.....	25
5.7 主缆单根钢丝断裂试验（5）.....	27
六 试验分析.....	29
七 试验建议.....	30

# 模拟桥梁主缆钢丝断裂试验报告

## 一、试验目的

- 1、 探讨使用声发射仪器检测桥梁主缆损伤可行性
- 2、 确定主缆钢丝断裂信号的传播距离
- 3、 确定主缆钢丝断裂信号的频域特性和探头种类

## 二、试验设备

SAEU2S-8 型声发射检测仪：10M 采样率，16bitAD

SR150M 声发射传感器：中心频率 150KHz，工作频域：60～400KHz；灵敏度>75dB

WG50 声发射传感器：频域范围：50～800KHz，灵敏度>65dB

PAI 型前置放大器：工作频域：20～1200KHz，100 倍放大

## 三、试验方法

以位于两支点正中的手拉葫芦为施力源，在钢丝位于支点上内侧一定距离位置预制断裂点，声发射传感器布置在预断裂位置两端及远端的相应位置（具体布置方案见各批次试验）；在手拉葫芦施力过程中用声发射检测系统检测主缆钢丝的变化情况

## 四、试验基础

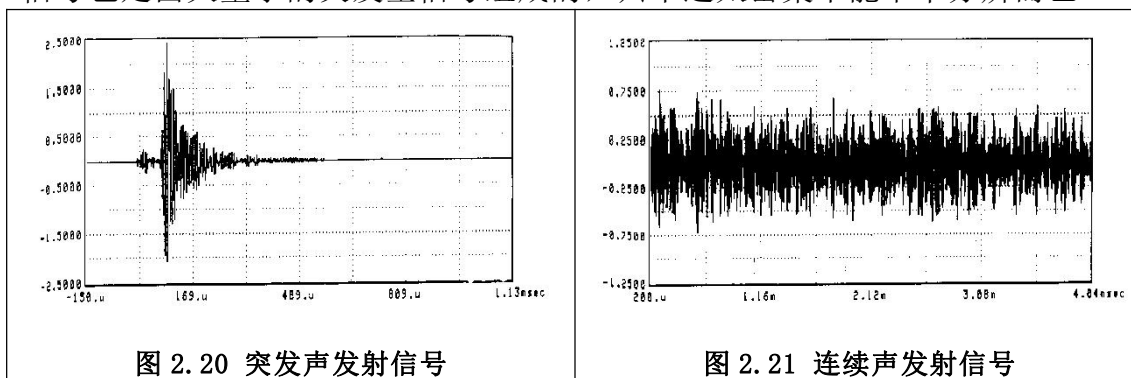
### 第一节 声发射的概念

材料中局域源快速释放能量产生瞬态弹性波的现象称为声发射 (Acoustic Emission, 简称 AE)，有时也称为应力波发射。材料在应力作用下的变形与裂纹扩展，是结构失效的重要机制。这种直接与变形和断裂

机制有关的源，被称为声发射源。声发射是一种常见的物理现象，各种材料声发射信号的频率范围很宽，大多数材料变形和断裂时有声发射发生，但许多材料的声发射信号强度很弱，需要借助灵敏的电子仪器才能检测出来。用仪器探测、记录、分析声发射信号和利用声发射信号推断声发射源的技术称为声发射技术。

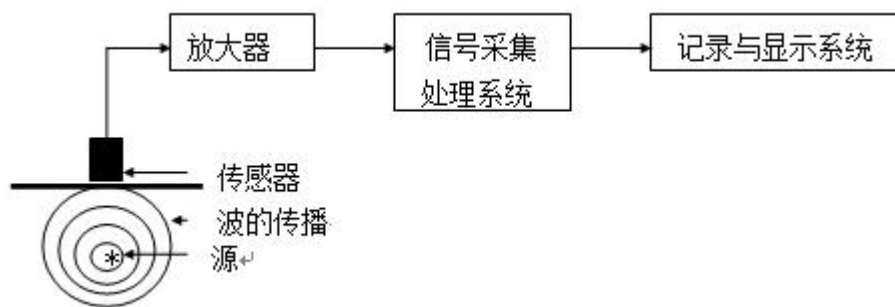
## 第二节 突发和连续声发射

材料内产生的声发射信号具有很宽的动态范围，其位移幅度可以从小于  $10^{-15}$  m 到  $10^{-9}$  m，达到  $10^6$  量级（120dB）的范围。另外声发射信号的产生率也是变化无常的，所以目前人为地将声发射信号分为突发和连续发射。如果声发射事件信号是断续，且在时间上可以分开，那么这种信号就叫突发声发射信号，如图 2.20 所示；如果大量的声发射事件同时发生，且在时间上不可分辨，这些信号就叫做连续声发射信号，如图 2.21 所示。实际上连续型声发射信号也是由大量小的突发型信号组成的，只不过太密集不能单个分辨而已。



## 第三节 声发射的基本原理

声发射检测的原理如图 1.1 所示，从声发射源发射的弹性波最终传播到达材料的表面，引起可以用声发射传感器探测的表面位移，这些探测器将材料的机械振动转换为电信号，然后再被放大、处理和记录。固体材料中内应力的变化产生声发射信号，人们根据观察到的声发射信号进行分析与推断以了解材料产生声发射的机制。



声发射检测原理方框图

声发射检测的主要目的是：①确定声发射源的部位；②分析声发射源的性质；③确定声发射发生的时间或载荷；④评定声发射源的严重性。一般而言，对超标声发射源，要用其它无损检测方法进行局部复检，以精确确定缺陷的性质与大小。

#### 第四节 材料中的波速

波的传播速度，是与介质的弹性模量和密度有关的材料特性，因而不同的材料，波速也不同。不同的传播模式也具有不同的传播速度。在均匀介质中，纵波与横波的速度分别可用下式表达。

$$V_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\sigma}{1+\sigma} \frac{1}{1-2\sigma}}; \quad v_t = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\sigma)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

式中  $V_l$  —— 纵波速度；

$v_t$  —— 横波速度；

$\sigma$  —— 泊松比；

$E$  —— 杨氏模量；

$G$  —— 切变模量；

$\rho$  —— 密度。

在同种材料中，不同模式的波速之间有一定比率关系。例如，横波速度约为纵波速度的 60%，表面波速度约为横波的 90%。纵波、横波、表面波的速度与波的频率无关，而板波的速度则与波的频率有关，即具有频散现象，约分布在纵波速度和横波速度之间。在实际结构中，传播速度还受到诸如材料类型、各向异性、结构形状与尺寸、内容介质等多种因素的影响，因而传播速度实为一种易变量。

传播速度，与波的频率和波长成正比，等于频率与波长的乘积。

$$\text{波速} = \text{频率} \times \text{波长} \quad (C = f \times \lambda)$$

## 第五节 衰减

衰减就是信号的幅值随着离开声源距离的增加而减小。衰减控制了声源距离的可检测性。因此，对于声发射检验来说它是确定传感器间距的关键因素。

引起波衰减的原因有很多种，尤其与决定波幅度的物理参数有关。引起波幅下降的衰减机制也有多种，但并非所有的衰减机制都引起能量的损失，某些衰减机制仅引起波的传播模式转变和能量的重新再分布，并无实际的能量损失。下面是波传播的几种主要衰减因素：

1) 几何衰减：当波由一个局域的源所产生时，波动将从源部位向所有的方向传播。即使是在无损耗的介质中，整个波前的能量保持不变，但散布在整个波前球面上，随着波传播距离的增加，波的幅度必定下降。

2) 色散衰减：色散是在某些物理系统中波速随频率变化引起的一种现象。由于实际的声发射信号包括多种频率的分量，而波速  $C$  为频率的函数，波包中不同频率的分量在介质中将以不同的速度传播，因此随着波传播距离的增加，波包的幅度将下降。

3) 散射和衍射衰减：波在具有复杂边界或不连续(如空洞、裂纹、夹杂物等)的介质中传播将与这些几何不连续产生相互作用产生散射和衍射现象。由于波的散射和衍射都能导致波幅下降(某些情况下增加)，两种情况都可引起波的衰减。最常见的散射原因之一是某些材料中不均匀晶粒引起的。例如粗晶结构的铸铁对 1MHz 以上频率范围的波产生明显的散射，由散射引起的衰减也是十分显著的。

4) 由能量损耗机制（内摩擦）引起的衰减：在上述讨论的波的衰减机制中，如果固体为弹性介质，所有波(原始波、反射波、散射波、衍射波、色散等)的总机械能保持不变。然而，在实际的介质中，波传播的总机械能不能保持不变，而是逐渐衰减。由于热弹效应，机械能可以被转变为热能。如果应力超过介质的弹性极限，塑性变形也引起机械能的损失。裂纹扩展将波的机械能转换为新的表面能，波与介质中位错的相互作用也可引起能量的损失和衰减。塑性材料的粘性行为、界面之间的摩擦和复合材料中非完全结合的夹杂物或纤维都能引起波的能量损耗和衰减。磁弹相互作用、金属中的电子相互作用、顺磁电子或核子的自旋机制等都能引起波的能量损失和衰减。无论上述那一种机制引起机械能的损耗，波的幅度都将随波通过介质中的传播而下降。

5) 其它因素：①相邻介质“泄漏”，即由于波向相邻介质“泄漏”而也造成波的幅度下降，例如，容器中的水介质，② 障碍物，即容器上的接管、人孔等障碍物也可造成幅度下降。

实际结构中，波的衰减机制很复杂，难以用理论计算，只能用试验测得。例如，在被检件表面上，利用铅笔芯模拟源和声发射仪，按一定的间距测得幅度 (dB) ~ 距离 (m) 曲线。图 2.32 给出了长 12.2m，内径 1.2m，厚度 12.5mm 的

压力容器封头上，用不同频率测得的幅度—距离曲线。由图中可见随着频率的增加内摩擦也增加，衰减加快。

传播衰减的大小，关系到每个传感器可监视的距离范围，在源定位中成为确定传感器间距或工作频率的关键因素。在实际应用中，为减少衰减的影响而常采取的措施包括：降低传感器频率或减小传感器间距，例如，对复合材料的局部监视通常采用 150kHz 的高频传感器，而大面积监视则采用 30kHz 的低频传感器，对大型构件的整体检测，可相应增加传感器的数量。

## 第六节 凯塞(Kaiser)和费利西蒂(Felicity)效应

### 凯塞尔效应

材料的受载历史，对重复加载声发射特性有重要影响。重复载荷到达原先所加最大载荷以前不发生明显声发射，这种声发射不可逆性质称为凯塞尔效应。多数金属材料和岩石中，可观察到明显的凯塞尔效应。但是，重复加载前，如产生新裂纹或其它可逆声发射机制，则凯塞尔效应会消失。

凯塞尔效应在声发射技术中有着重要用途，包括：①在役构件的新生裂纹的定期过载声发射检测；②岩体等原先所受最大应力的推定；③疲劳裂纹起始与扩展声发射检测，④通过预载措施消除加载销孔的噪声干扰，⑤加载过程中常见的可逆性摩擦噪声的鉴别。

### 费利西蒂效应和费利西蒂比

材料重复加载时，重复载荷到达原先所加最大载荷前发生明显声发射的现象，称为费利西蒂效应，也可认为是反凯塞尔效应。重复加载时的声发射起始载荷 ( $P_{AE}$ ) 对原先所加最大载荷 ( $P_{max}$ ) 之比 ( $P_{AE} / P_{max}$ )，称为费利西蒂比。

费利西蒂比作为一种定量参数，较好地反映材料中原先所受损伤或结构缺陷的严重程度，已成为缺陷严重性的重要评定判据。树脂基复合材料等粘弹性材料，由于具有应变对应力的迟后效应而使其应用更为有效。费利西蒂比大于 1 表示凯塞尔效应成立，而小于 1 则表示不成立。在一些复合材料构件中，费利西蒂比小于 0.95 作为声发射源超标的重要判据。

## 第七节 影响声发射特性的因素

声发射技术的应用均以材料的声发射特性为基础。不同材料的声发射特性差异很大。即使对同一材料而言，影响声发射特性的因素也十分复杂，如热处理状态、组织结构、试样形状、加载方式、受载历史、温度环境和气氛等。对同一试样作声发射试验，在同样的内部和外部条件下，由于试样的声发射源不同，也会表现出不同的声发射特性。表中列出了通常影响材料声发射信号强度的因素，并

把它们分为内部因素和外部因素两大类。

**影响材料声发射信号强度的因素**

条 件	产生高强度信号的因素	产生低强度信号的因素
材料特性 (内部因素)	高强度材料 各向异性材料 不均匀材料 铸造材料 大晶粒 马氏体相变 核辐照过的材料	低强度材料 各向同性材料 均匀材料 锻造材料 细晶粒 括散型相变 未辐照过的材料
试验条件 (外部因素)	高应变速率 无预载 厚断面 低温 有腐蚀介质	低应变速率 有预载 薄断面 高温 无腐蚀介质
形变和断裂方式 (内外部因素综合作用)	孪生变形 解理型断裂 有缺陷材料 裂纹扩展 复合材料的纤维断裂	非孪生变形 剪切型断裂 无缺陷材料 塑性变形 复合材料的树脂断裂
仪器特性 (外部因素)	通频带宽度 传感器的响应模式和频率 系统总增益 设置的阈值电压	

## 第八节 声发射信号处理方法

目前采集和处理声发射信号的方法可分为两大类。一种为以多个简化的波形特征参数来表示声发射信号的特征，然后对这些波形特征参数进行分析和处理；另一种为存贮和记录声发射信号的波形，对波形进行频谱分析。简化波形特征参数分析方法是自二十世纪五十年代以来广泛使用的经典的声发射信号分析方法，目前在声发射检测中仍得到广泛应用，且几乎所有声发射检测标准对声发射源的判据均采用简化波形特征参数。

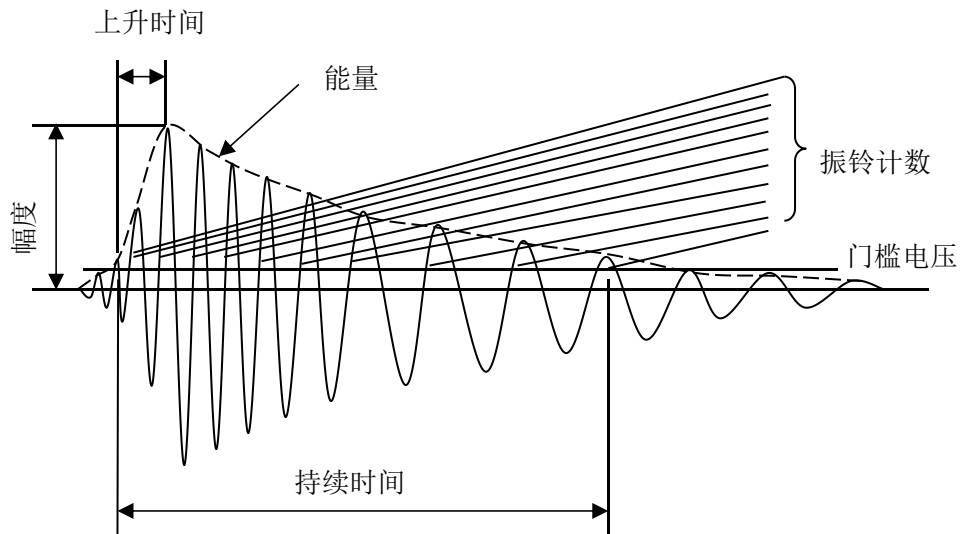
### 8.1 经典信号处理方法



### 8.1.1 波形特性参数

图中为突发型标准声发射信号简化波形参数的定义。由这一模型可以得到如下参数：

- (1) 波击（事件）计数；
- (2) 振铃计数；
- (3) 能量；
- (4) 幅度；
- (5) 持续时间；
- (6) 上升时间；



声发射信号简化波形参数的定义

对于连续型声发射信号，上述模型中只有振铃计数和能量参数可以适用。为了更确切地描述连续型声发射信号的特征，由此又引入了如下两个参数：

- (7) 平均信号电平；
- (8) 有效值电压。

声发射信号的幅度通常以 dBae 表示，定义传感器输出  $1\mu\text{V}$  时为 0dB，则幅值为  $V_{ae}$  的声发射信号的 dBae 幅度可由下式算出：

$$\text{dBae} = 20 \lg (V_{ae}/1\mu\text{V})$$

表列出了常用整数幅度 dBae 对应的传感器输出电压值。

表常用整数幅度 dBae 对应的传感器输出电压值

dBae	0	20	40	60	80	100
$V_{ae}$	$1\mu\text{V}$	$10\mu\text{V}$	$100\mu\text{V}$	$1\text{mV}$	$10\text{mV}$	$100\text{mV}$

对于实际的声发射信号，由于试样或被检构件的几何效应，声发射信号波形为如图所示的一系列波形包络信号。因此，对每一个声发射通道，通过引入

声发射信号撞击定义时间（HDT）来将一连串的波形包络画入一个撞击或划分为不同的撞击信号。对于图 5.2 的波形，当仪器设定的 HDT 大于两个波包过门槛的时间间隔 T 时，则这两个波包被划归为一个声发射撞击信号；但如仪器设定的 HDT 小于两个波包过门槛的时间间隔 T 时，则这两个波包被划归为两个声发射撞击信号。

## 8.2 分析识别技术

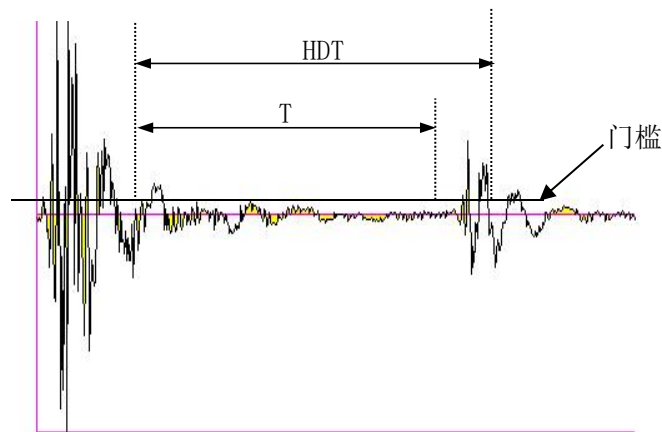
### (1) 声发射信号参数的列表显示和分析

列表显示是将每个声发射信号参数进行时序排列和直接显示，包括信号到达时间，各个声发射信号参数、外变量、声发射源的坐标等。表 5.3 为压力容器升压过程中采集到的裂纹扩展声发射信号参数数据列表。在声发射检测前对声发射系统进行灵敏度测定和模拟源定位精度测试时，直接观察数据列表。对声发射源的强度进行精确分析时也经常采用数据列表显示和分析。

表 声发射信号参数

参数	含义	特点与用途
撞击 (Hit) 和撞击计数	超过门槛并使某一通道获取数据的任何信号称之为一个撞击。所测得的撞击个数，可分为总计数、计数率	反映声发射活动的总量和频度，常用于声发射活动性评价
事件计数	产生声发射的一次材料局部变化称之为一个声发射事件。可分为总计数、计数率。一阵列中，一个或几个撞击对应一个事件	反映声发射事件的总量和频度，用于源的活动性和定位集中度评价
计数	越过门槛信号的振荡次数，可分为总计数和计数率	信号处理简便，适于两类信号，又能粗略反映信号强度和频度，因而广泛用于声发射活动性评价，但受门槛值大小的影响
幅度	信号波形的最大振幅值，通常用 dBac 表示（传感器输出 1 $\mu$ V 为 0dB）	与事件大小有直接的关系，不受门槛的影响，直接决定事件的可测性，常用于波源的类型鉴别、强度及衰减的测量
能量计数 (MARSE)	信号检波包络线下的面积，可分为总计数和计数率	反映事件的相对能量或强度。对门槛、工作频率和传播特性不甚敏感，可取代振铃计数，也用于波源的类型鉴别
持续时间	信号第一次越过门槛至最终降至门槛所经历的时间间隔，以 $\mu$ s 表示	与振铃计数十分相似，但常用于特殊波源类型和噪声的鉴别
上升时间	信号第一次越过门槛至最大振幅	因受传播的影响而其物理意义变得不明

	所经历的时间间隔, 以 $\mu\text{s}$ 表示	确, 有时用于机电噪声鉴别
有效值电压 (RMS)	采样时间内, 信号的均方根值, 以 V 表示	与声发射的大小有关, 测量简便, 不受门槛的影响, 适用于连续型信号, 主要用于连续型声发射活动性评价
平均信号电平 (ASL)	采样时间内, 信号电平的均值, 以 Db 表示	提供的信息和用途与 RMS 相似, 对幅度动态范围要求高而时间分辨率要求不高的连续型信号, 尤为有用。也用于背景噪声水平的测量
到达时间	一个声发射波到达传感器的时间, 以 $\mu\text{s}$ 表示	决定了波源的位置、传感器间距和传播速度, 用于波源的位置计算
外变量	试验过程外加变量, 包括时间、载荷、位移、温度及疲劳周次等	不属于信号参数, 但属于波击信号参数的数据集, 用于声发射活动性分析



### 声发射撞击信号的定义

表列出了常用声发射信号特性参数的含义和用途。这些参数的累加可以被定义为时间或试验参数(如压力、温度等)的函数, 如总事件计数、总振铃计数和总能量计数等。这些参数也可以被定义为随时间或试验参数变化的函数, 如声发射事件计数率、声发射振铃计数率和声发射信号能量率等。这些参数之间也可以任意两个组合进行关联分析, 如声发射事件-幅度分布、声发射事件能量-持续时间关联图等。

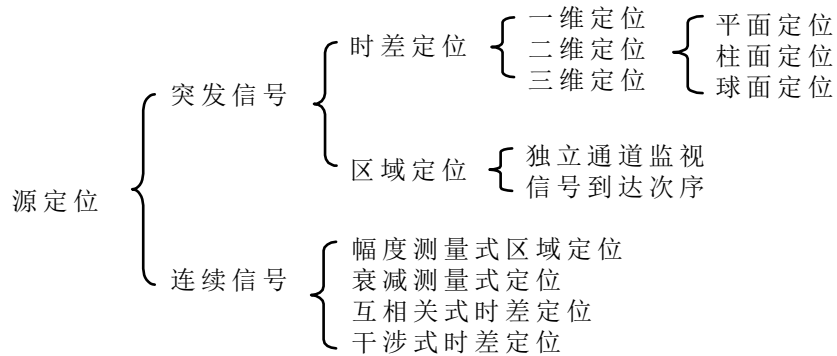
## 8.3 定位技术

声发射源的定位, 需由多通道声发射仪器来实现, 也是多通道声发射仪最重要的功能之一。对于突发型声发射信号和连续型声发射信号需采用不同的声发射源定位方法, 表列出了目前人们常用的声发射信号源定位方法。

时差定位, 是经对各个声发射通道信号到达时间差、波速、探头间距等

参数的测量及复杂的算法运算，来确定波源的坐标或位置。时差定位是一种精确而又复杂的定位方式，广泛用于试样和构件的检测。不过，时差定位，易丢失大量的低幅度信号，其定位精度又受波速、衰减、波形、构件形状等许多易变量的影响，因而，在实际应用中也受到种种限制。

### 声发射源定位方法分类



区域定位，是一种处理速度快、简便而又粗略的定位方式，主要用于复合材料等由于声发射频度过高或传播衰减过大或检测通道数有限而难以采用时差定位的场合。

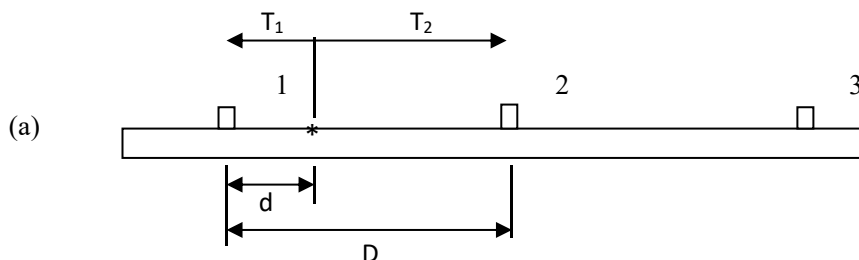
### 8.4 线定位

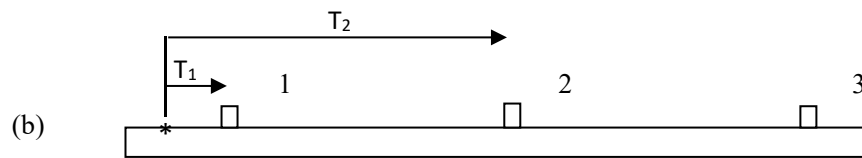
当被检测物体的长度与半径之比非常大时，易采用线定位进行声发射检测，如管道、棒材、钢梁等。时差线定位至少需要两个声发射探头，其定位原理如图 5.8(a)所示。如在 1 号和 2 号探头之间有 1 个声发射源产生 1 个声发射信号，到达 1 号探头的时间为  $T_1$ ，到达 2 号探头的时间为  $T_2$ ，因此，该信号到达两个探头之间的时差为： $\Delta t = T_2 - T_1$ ，如以  $D$  表示两个探头之间的距离，以  $V$  表示声波在试样中的传播速度，

则声发射源距 1 号探头的距离  $d$  可由下式得出：

$$d = \frac{1}{2}(D - \Delta tV)$$

由上式可以算出，当  $\Delta t = 0$  时，声发射信号源位于两个探头的正中间；当  $\Delta t = D/V$  时，则声发射源位于 1 号探头处；当  $\Delta t = -D/V$  时，则声发射源位于 2 号探头处。





声发射源时差线定位原理图

图所示为声发射源在探头阵列外部的情况，此时，无论信号源距 1 号探头有多远，时差均为 $\Delta t = T_2 - T_1 = D/V$ ，声发射源被定位在 1 号探头处。

## 五 主缆钢丝声发射监测试验结果

### 5.1 单根衰减测试

试验方法：在一根独立的钢丝上布置一只 SR150M 传感器，后端连接 PAI 前置放大器到主机采集卡，以声发射检测系统采集；

#### 采集设置

采样率：3333KHz

采集门槛：40dB

采样长度：29136 点

放大增益：40dB

撞击定义时间（HDT）:2000us

数字滤波器：直通

锁闭时间（HLT）：2000us

模拟滤波器：100~400KHz

峰值定义时间（PDT）：1000us

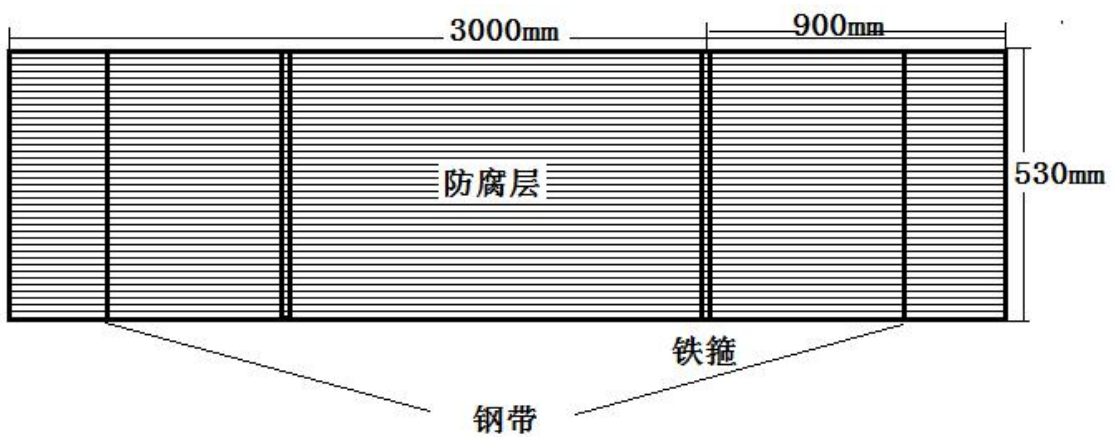
#### 测试结果

距离/m	0	0.1	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
第一次/dB	100	90	88	78	76	81	80	79	79
第二次/dB	99	93	86	78	75	80	78	78	79
第三次/dB	99	94	85	80	81	80	80	79	78
平均值/dB	99	92	86	79	77	80	79	79	79

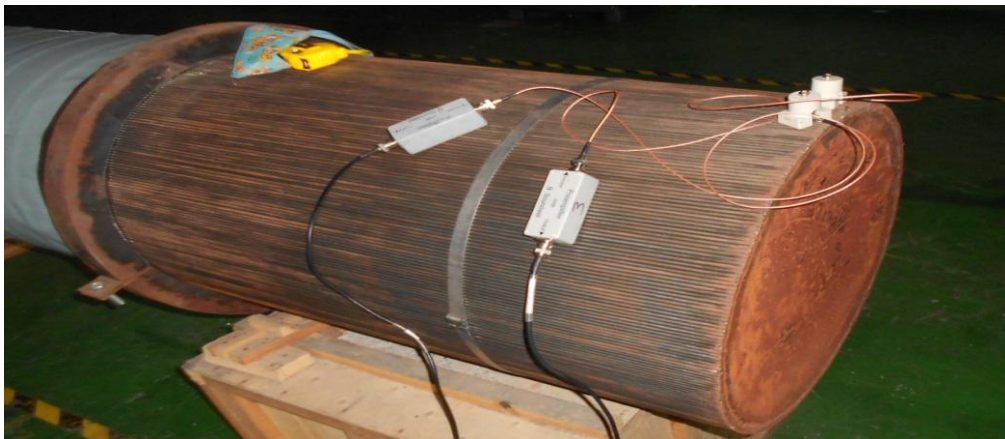
## 5.2 主缆模型衰减测试

### 试验方法：

在主缆模型右端放置 SR150M 及 WG50 传感器各一，后端连接 PAI 前置放大器到主机采集卡，以声发射检测系统采集；模拟源位置位于左端，分别在顺时针夹角 0、30、60、90、120、150、180 度以三次断铅信号，测量信号幅值及频率



主缆模型示意图



传感器布置图

## 采集设置

采样率：3333KHz

采集门槛：40dB

采样长度：29136 点

放大增益：40dB

撞击定义时间（HDT）:2000us

数字滤波器：直通

锁闭时间（HLT）：20000us

1#模拟滤波器：100~400KHz

峰值定义时间（PDT）：1000us

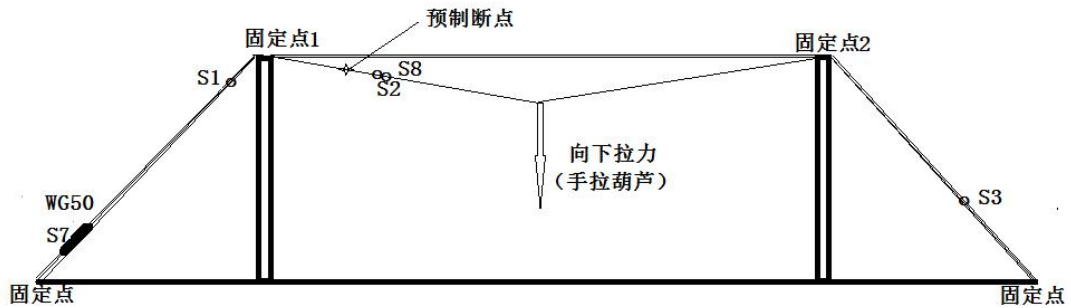
2#模拟滤波器：20~400KHz

## 测试结果

角度	0	30	60	90	120	150	180
第一次/dB	57	55	54	55	54	61	58
第二次/dB	55	55	49	57	54	56	60
第三次/dB	55	50	51	48	49	57	60
平均值/dB	56	53	51	53	52	58	59
频域 KHz	150~ 350	100~ 220	100~ 220	55~ 190	55~ 200	55~ 200	55~ 200



### 5.3 主缆单根钢丝断裂试验（1）



传感器布置图

传感器布置说明：

S1 传感器为 SR150M，距离固定点 1 距离为 500mm；距离预断裂点 1800mm；

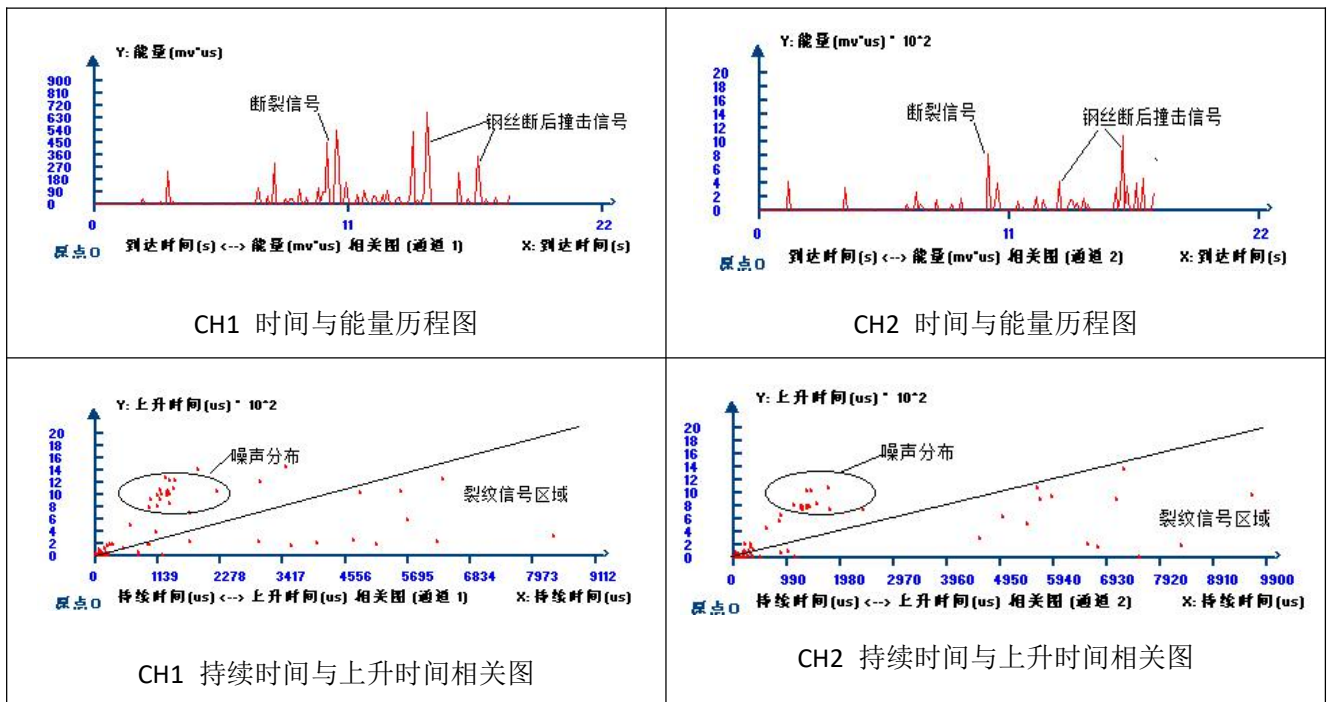
S2 传感器为 SR150M，距离断裂位置 300mm

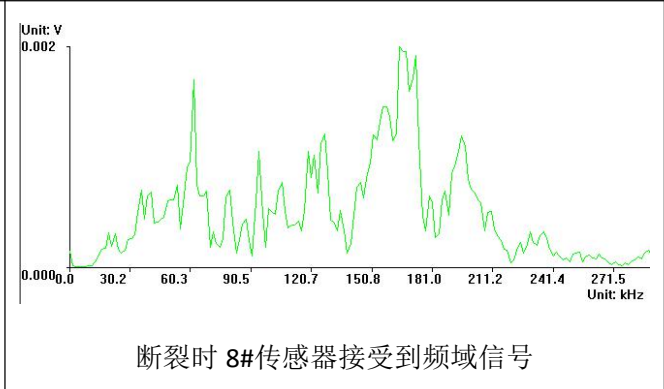
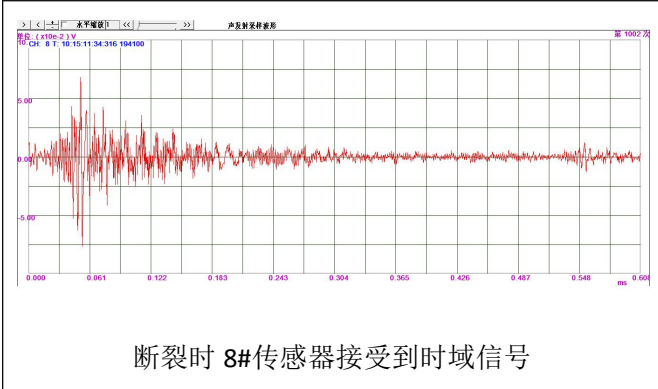
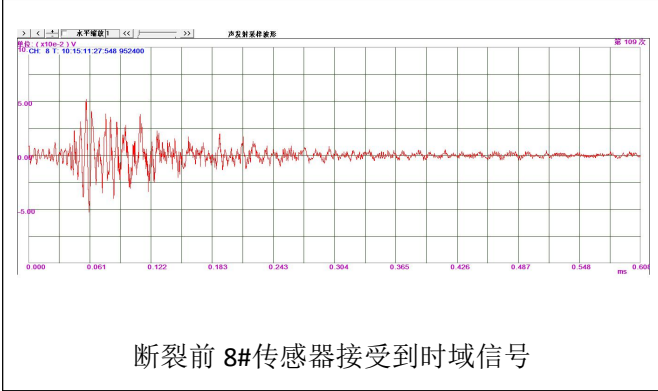
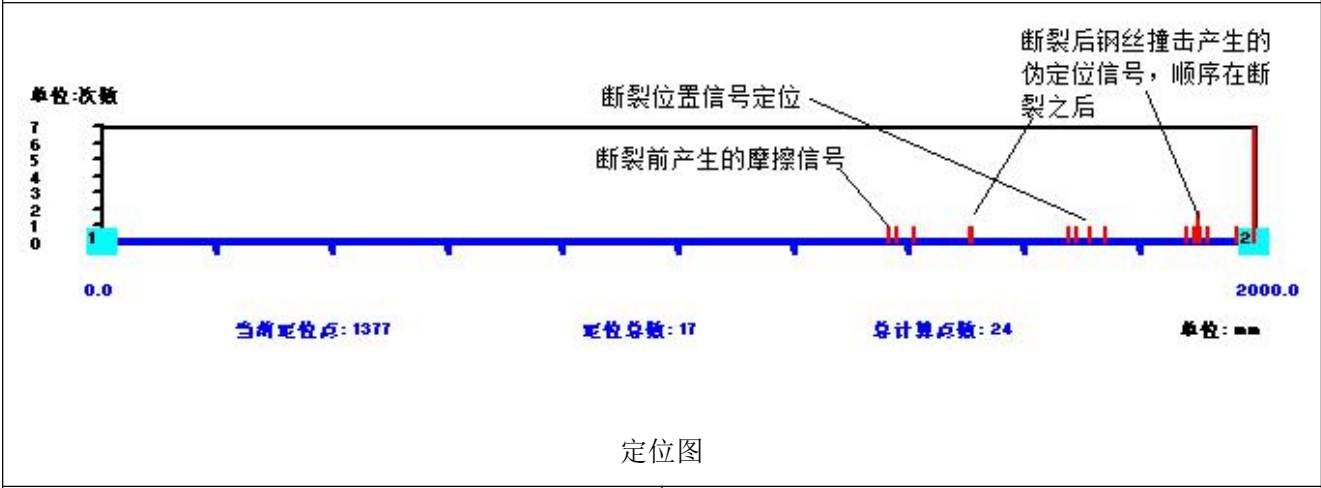
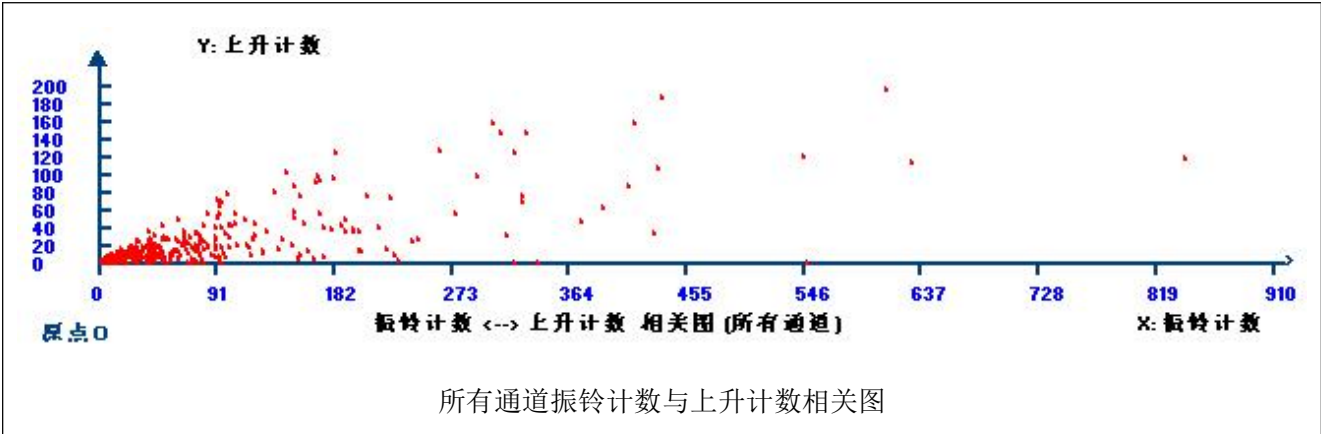
S3 传感器为 SR150M，距离断裂位置 13500mm

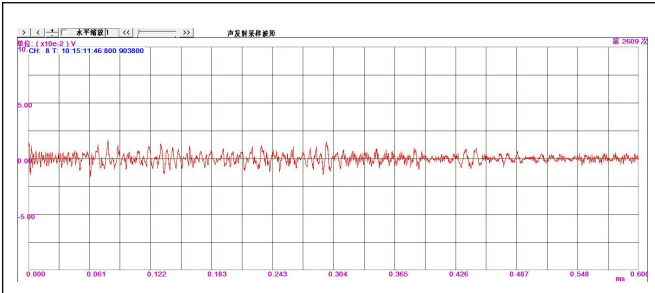
S7 传感器为 WG50，距离断裂位置 5300mm

S8 传感器为 WG50，距离断裂位置 300mm

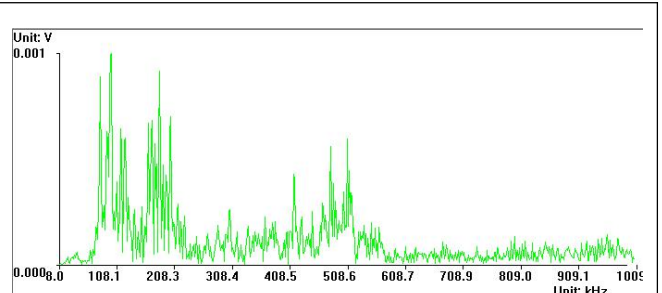
试验处理截图



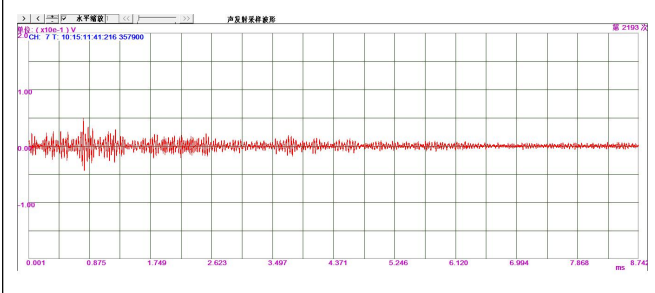




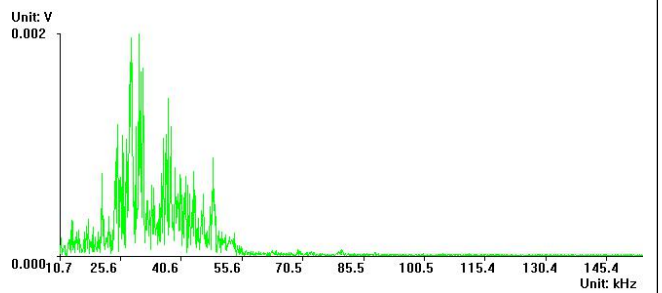
8#传感器接收到钢丝剧烈碰撞时域信号



8#传感器接收到钢丝剧烈碰撞频域信号

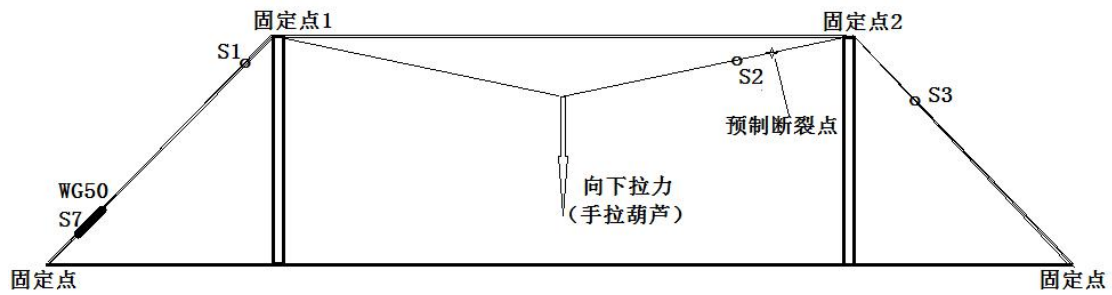


7#传感器接收到断裂瞬间时域信号



7#传感器接收到断裂瞬间频域信号

## 5.4 主缆单根钢丝断裂试验（2）



传感器布置图

传感器布置说明：

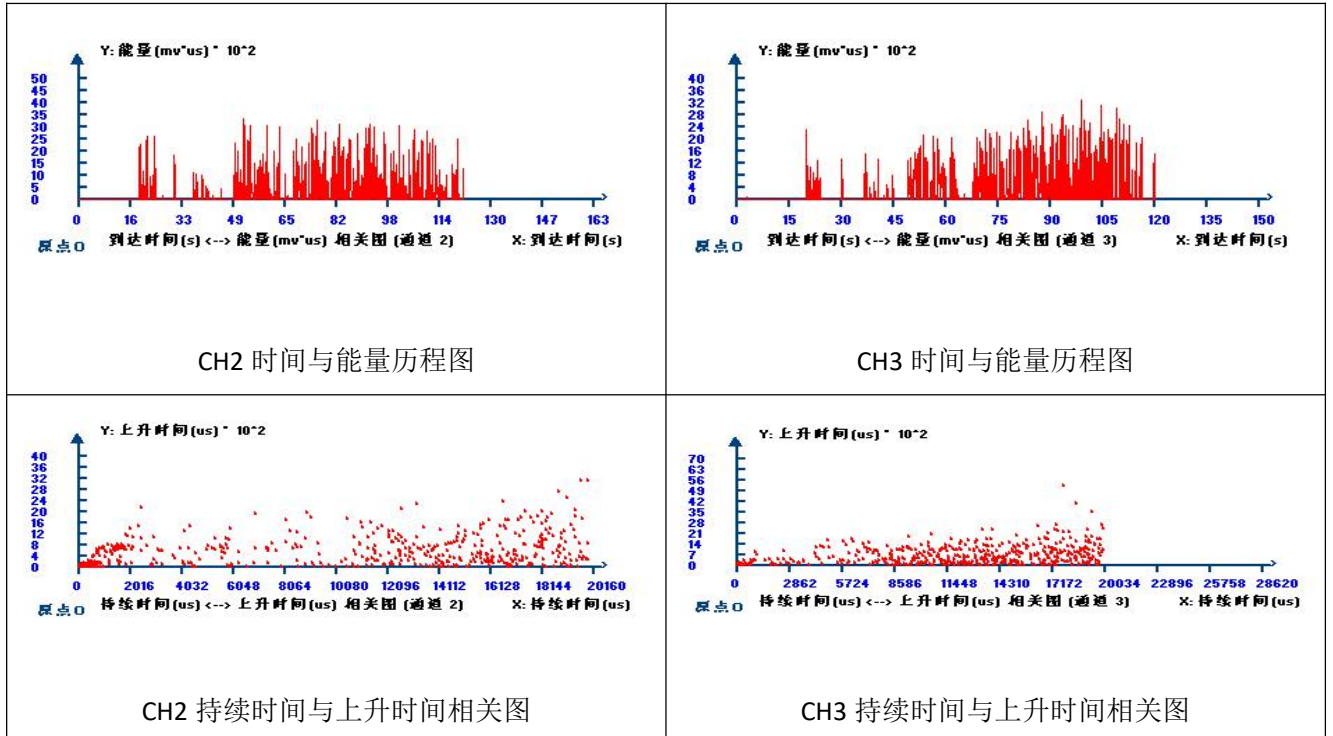
S1 传感器为 SR150M，距离固定点 1 距离为 500mm；

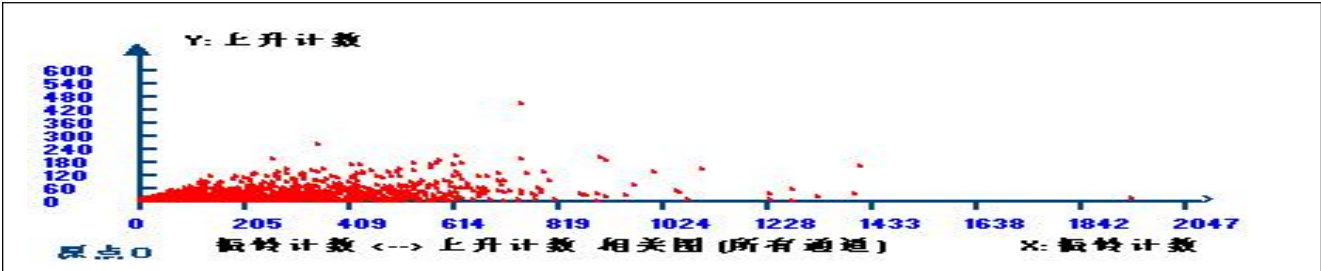
S2 传感器为 SR150M，距离断裂位置 800mm，距离固定点 2 的距离为 2150mm；

S3 传感器为 SR150M，距离固定点 2 距离为 1800mm

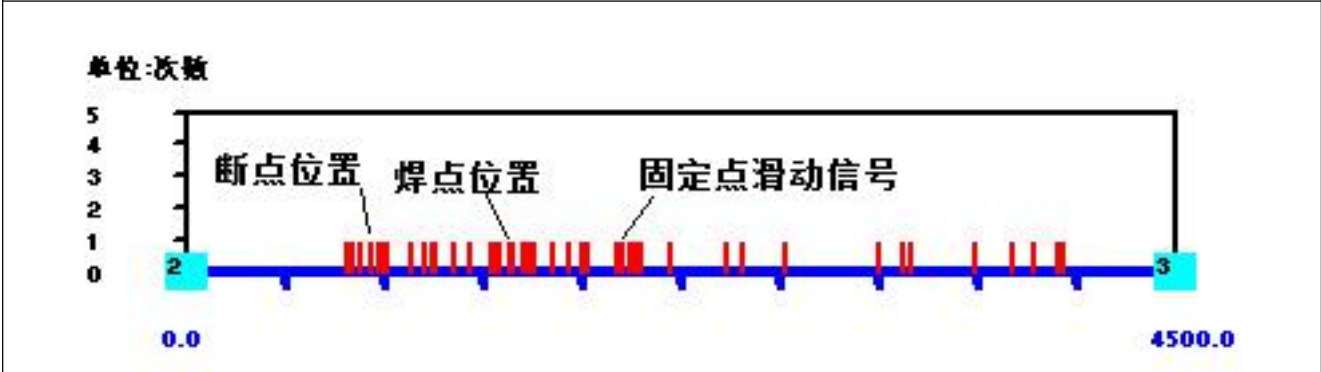
S7 传感器为 WG50，距离支点 1 距离为 4500mm

试验处理截图

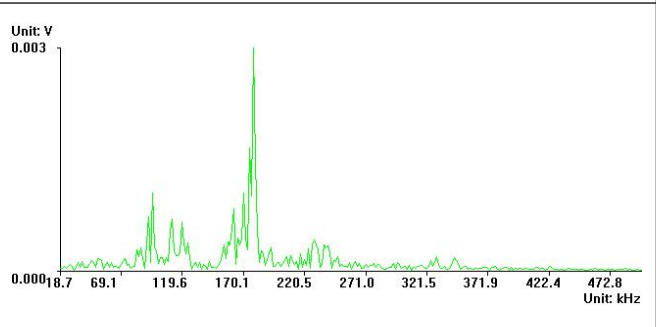
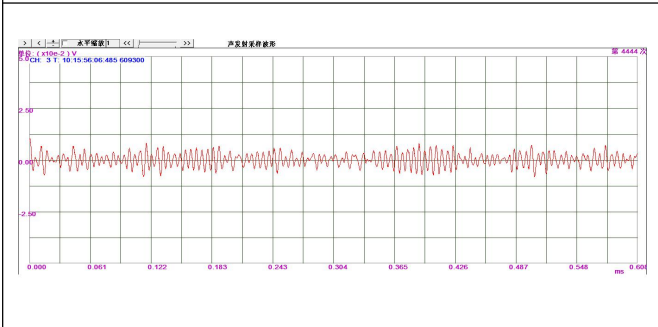
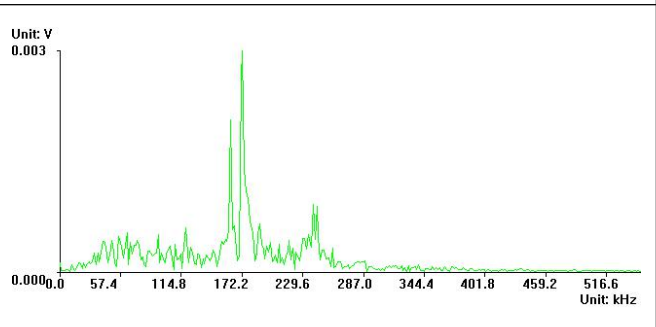
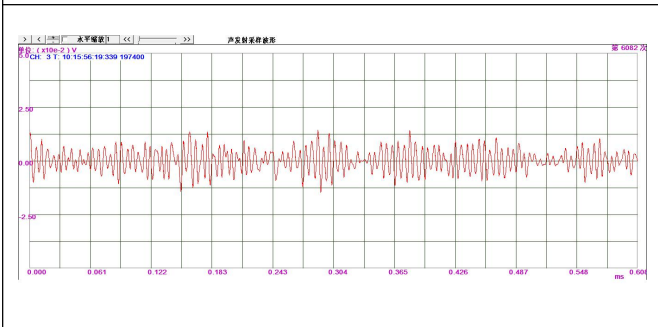


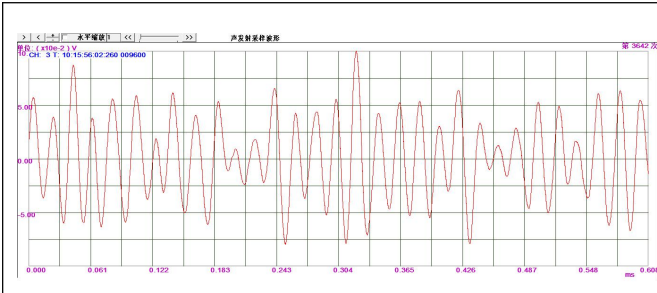


所有通道振铃计数与上升计数相关图

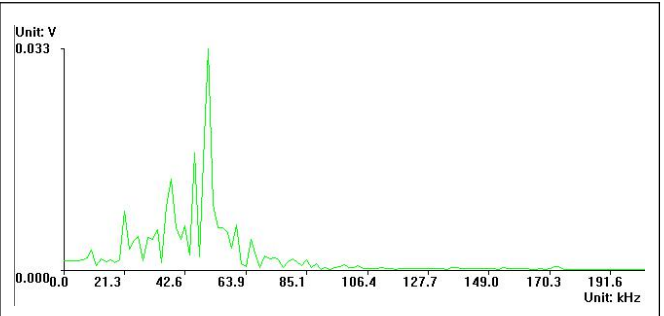


定位图



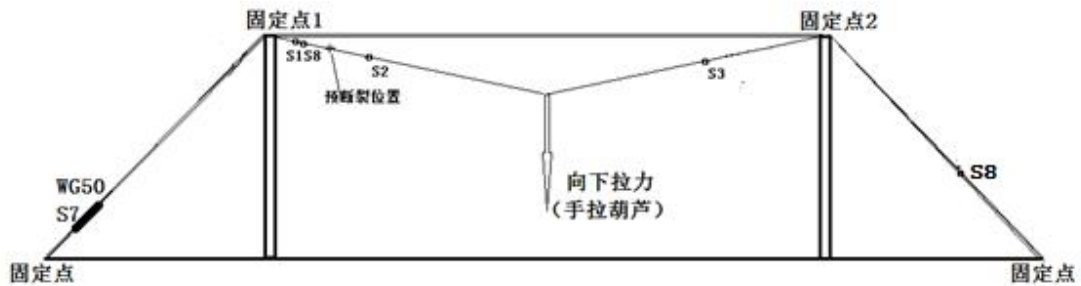


固定点滑动时域信号



固定点滑动频域信号

## 5.5 主缆单根钢丝断裂试验（3）

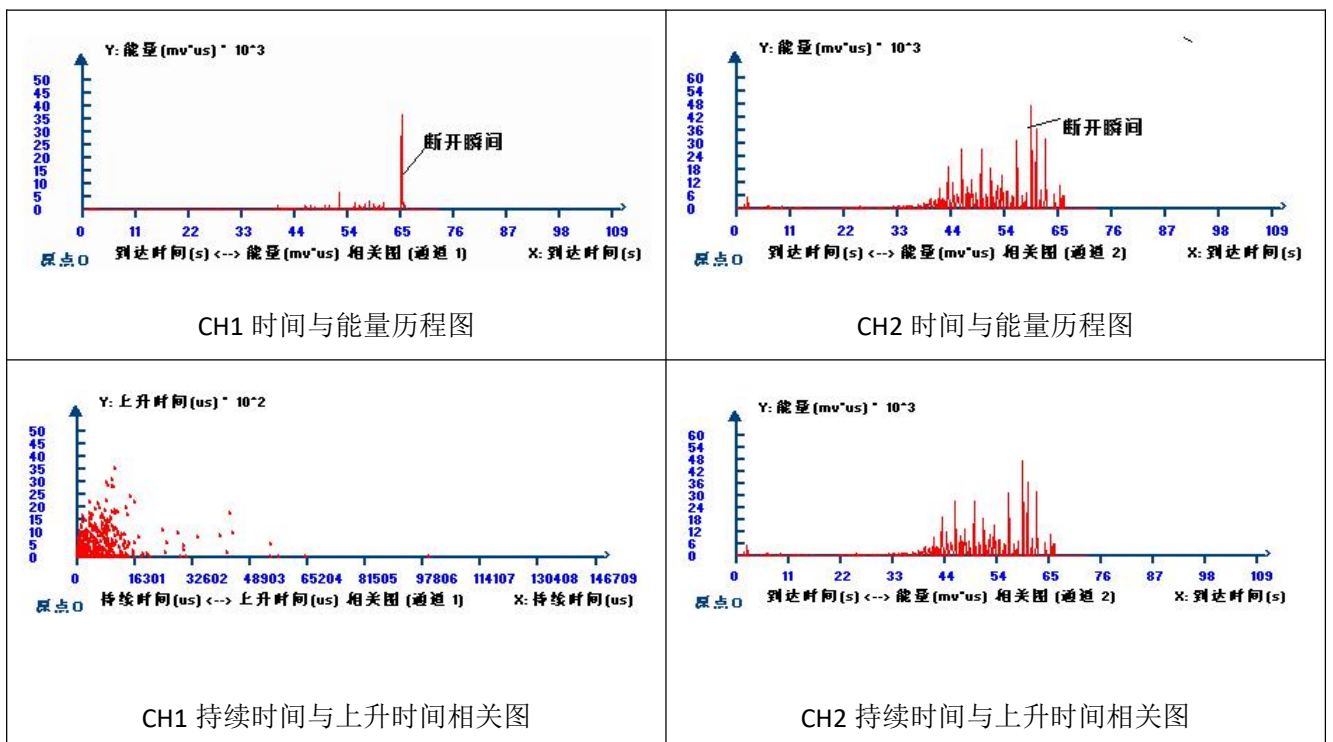


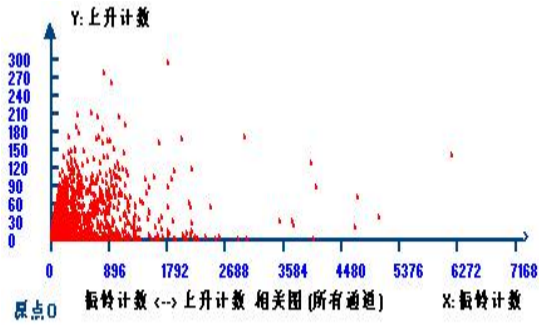
传感器布置图

传感器布置说明：

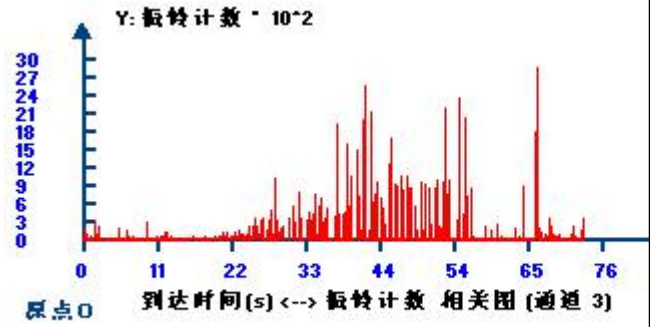
- S1 传感器为 SR150M，距离固定点 1 距离为 800mm；距离预断裂点 600mm；
- S2 传感器为 SR150M，距离断裂位置 1200mm，距离固定点 1 的距离为 2600mm
- S3 传感器为 SR150M，距离固定点 2 的距离为 3100mm
- S7 传感器为 WG50，距离断裂位置 5300mm
- S8 传感器为 WG50，距离固定点 2 的距离为 3500mm

试验处理截图

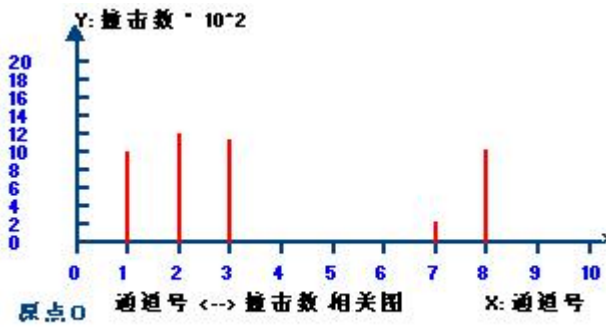




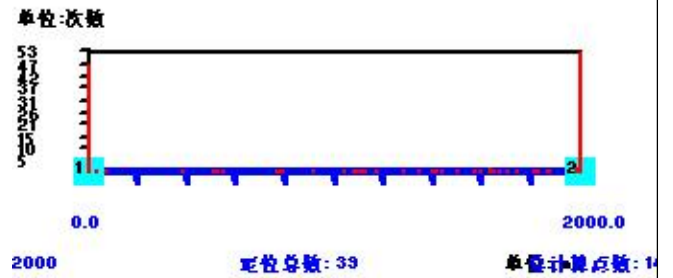
所有通道振铃计数与上升计数相关图



所有通道时间与振铃计数历程图



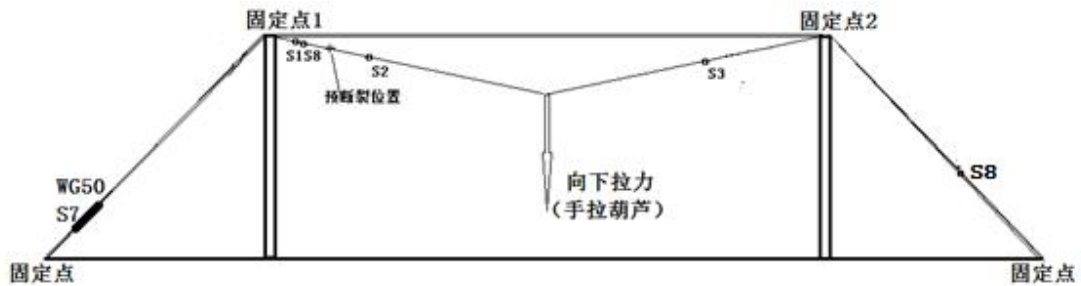
各通道与撞击数相关图



定位图



## 5.6 主缆单根钢丝断裂试验（4）



传感器布置图

传感器布置说明：

传感器布置说明：

S1 传感器为 SR150M，距离固定点 1 距离为 60mm；距离预断裂点 800mm；

S2 传感器为 SR150M，距离断裂位置 900mm

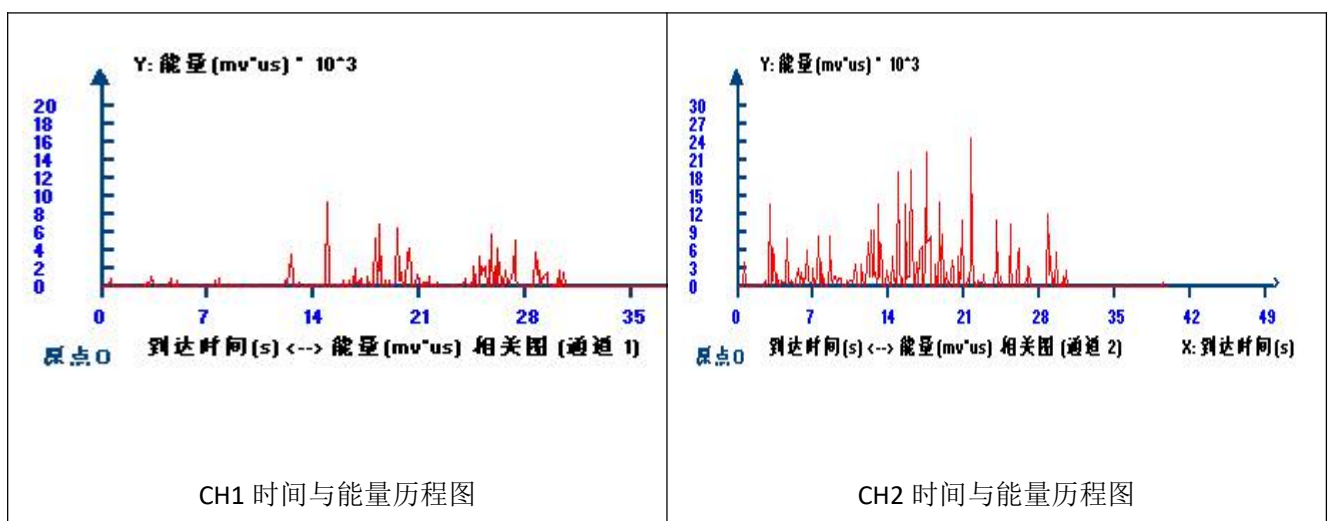
S3 传感器为 SR150M，距离固定点 2 的距离为 3100mm

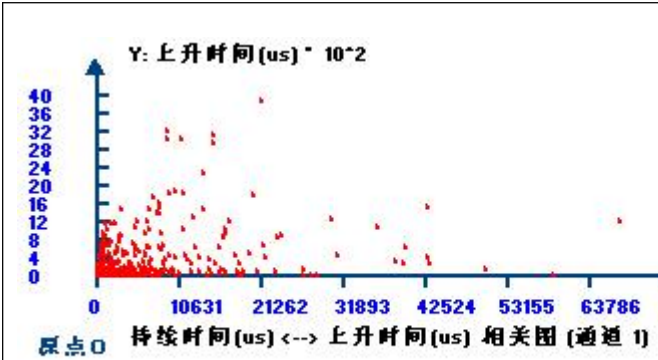
S7 传感器为 WG50，距离断裂位置 5300mm

S8 传感器为 WG50，距离固定点 2 的距离为 3500mm

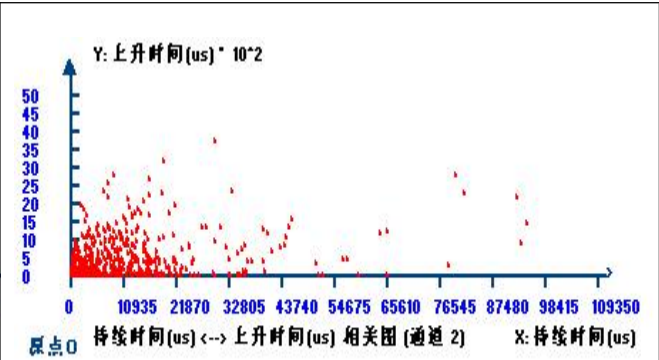
说明：对上次断裂位置焊接后，以焊接位置为预断裂位置进行拉力试验

试验处理截图

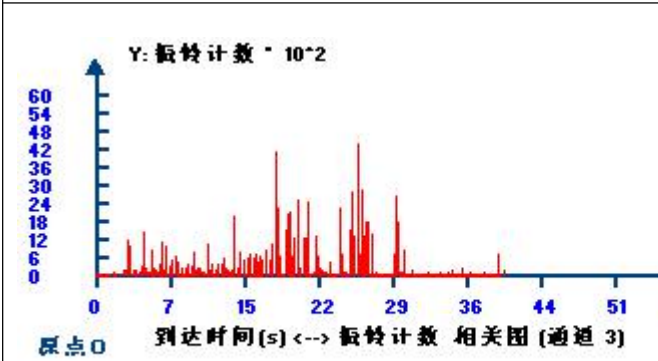




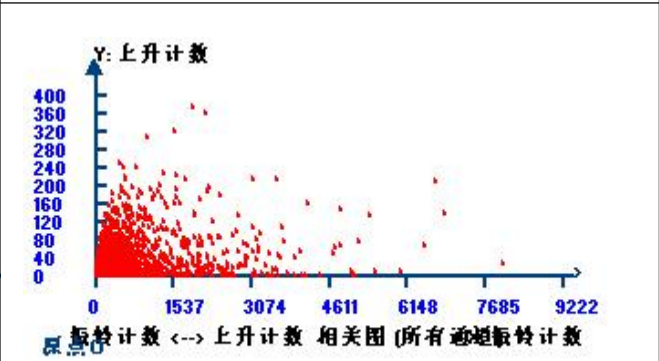
CH1 持续时间与上升时间相关图



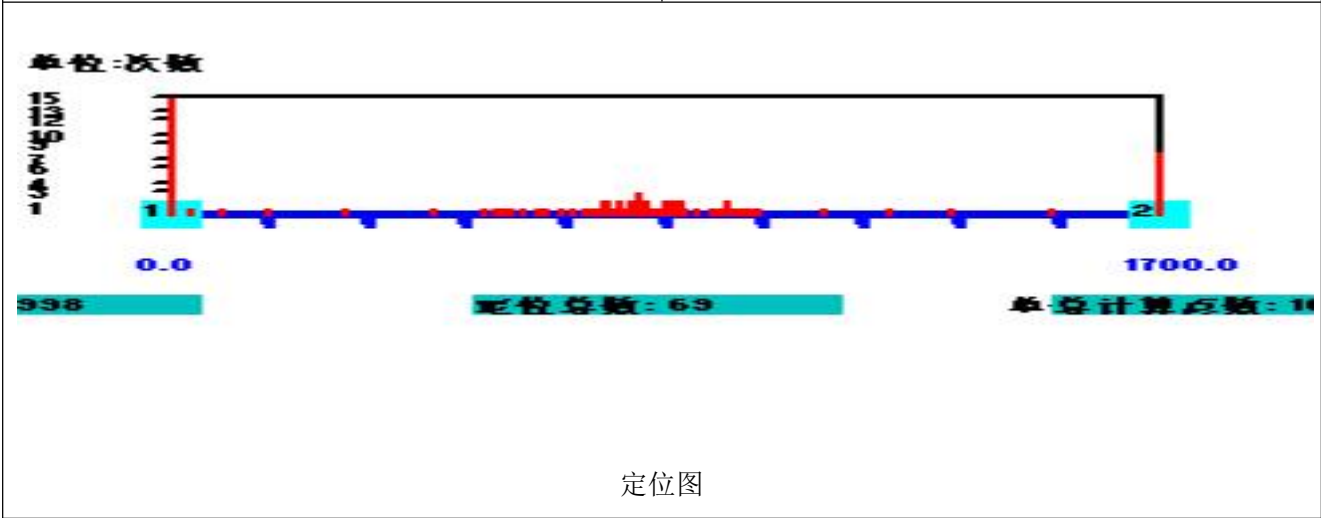
CH2 持续时间与上升时间相关图



CH3 时间与振铃计数历程图

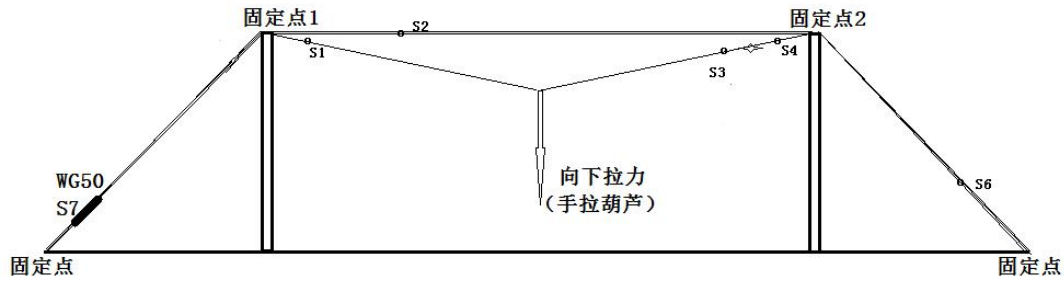


所有通道振铃计数与上升计数相关图



定位图

## 5.7 主缆单根钢丝断裂试验（5）



传感器布置图

传感器布置说明：

S1 传感器为 SR150M，距离固定点 1 距离为 500mm；

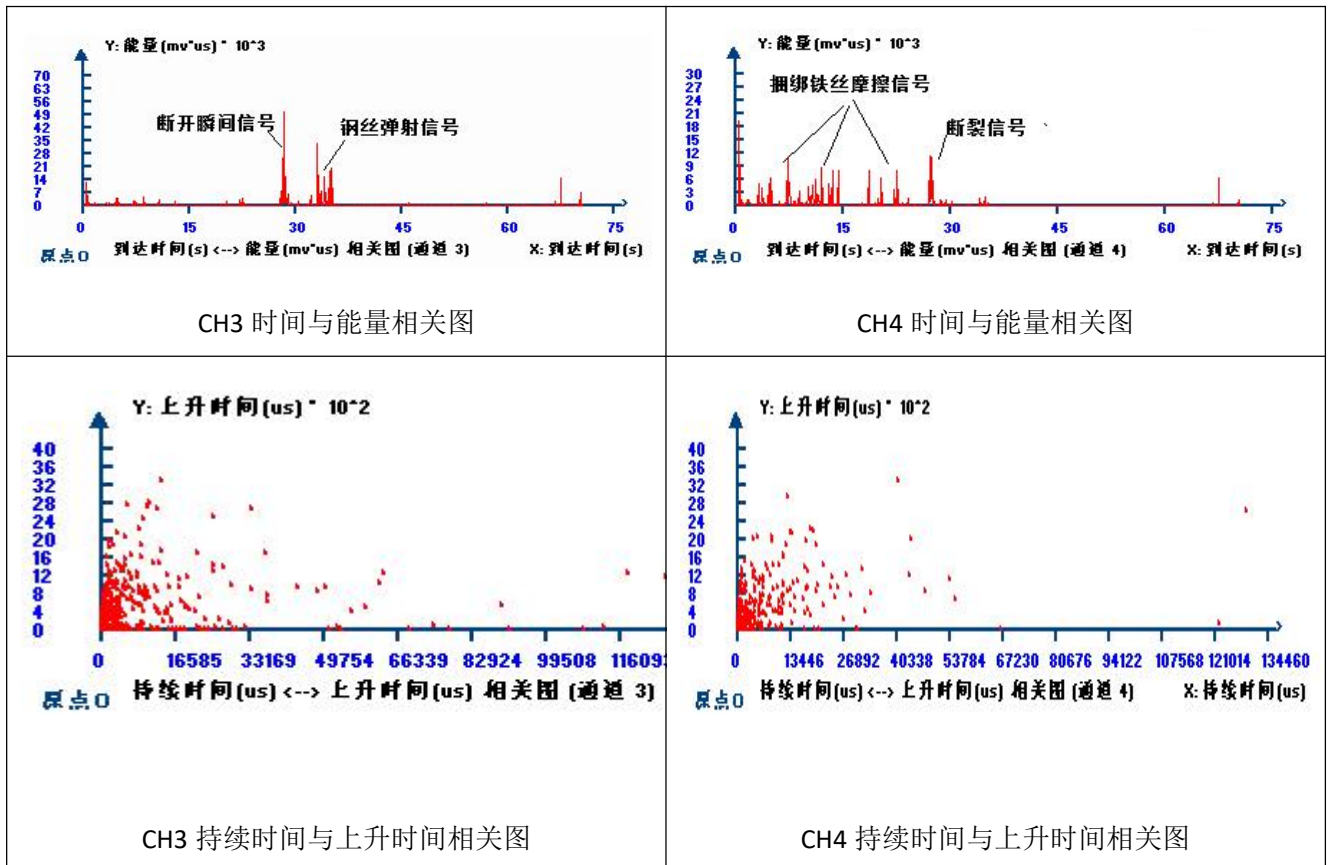
S2 传感器为 SR150M，距离固定点 1 的距离为 2200mm，固定在保护钢丝上

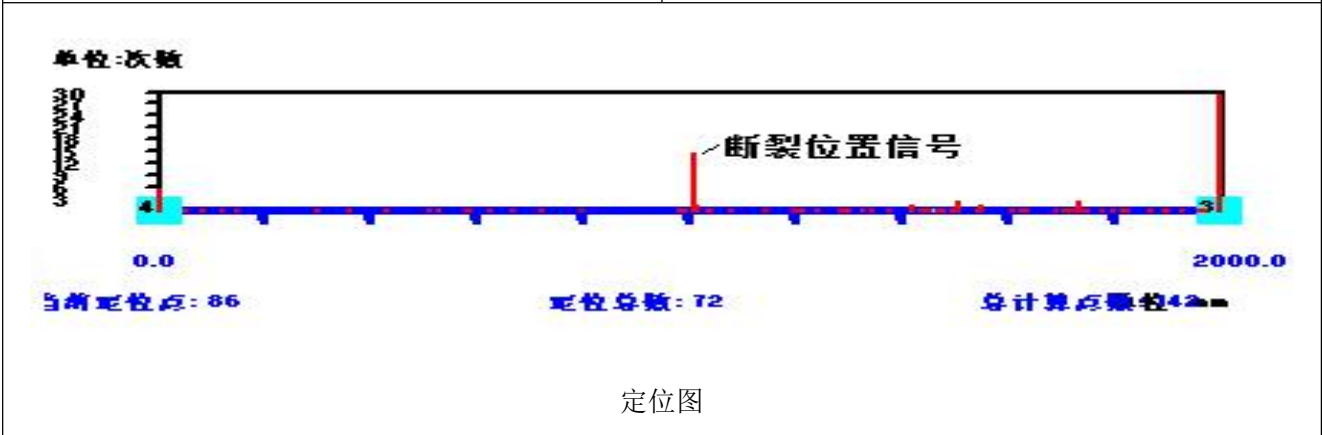
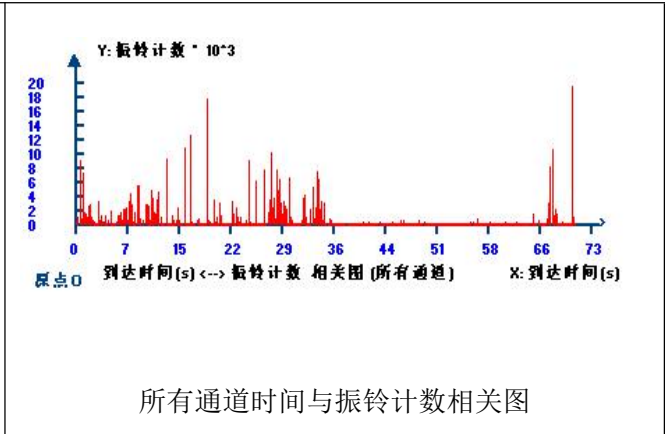
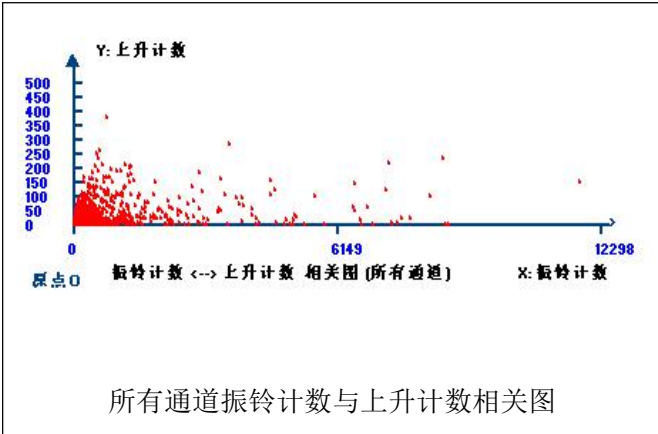
S3 传感器为 SR150M，距离断裂位置 1000mm，距离固定点 2 距离为 2600mm

S4 传感器为 SR150M，距离断裂位置 1000mm，距离固定点 2 的距离为 600mm

S6 传感器为 WG50，距离固定点 2 的距离为 3500mm

试验处理截图





## 六 试验分析

根据损伤力学与断裂力学原理可知，裂纹萌生、稳定、扩展直至最后断裂的过程是一个能量累积和快速释放的过程。能量的释放包括表面能、热能、弹性能等形式，其中的弹性能以应力波的形式释放出来，产生声发射。声发射信号包含了信号源处的有效信息，通过监测分析裂纹损伤在拉力载荷作用下的声发射信号，有助于了解裂纹及结构的变化情况，进而对材料或结构构件进行损伤评价

工程结构中钢梁焊缝连接处由于交变载荷作用容易产生疲劳损伤，其发生、发展历程由位错-滑移-微观裂纹-裂纹扩展-断裂等阶段组成，针对于桥梁主缆长度较大，直径较大等特点，声发射监测在实际现场检测中，主要以监测裂纹扩展及断裂为主要方向。

试验过程中，布置在左端S7位置的宽频传感器始终可以接收到裂纹扩展及断裂瞬间的信号，因结构松散，导致高频信号及信号强度都收到影响；布置在预断裂钢丝上的SR150M传感器收到的信号显示，信号在单根钢丝上的传播路径较为复杂，在以手拉葫芦为施力源的情况下，裂纹扩展期间，二次声发射信号会与一次声发射源信号产生叠加，难以仅凭信号强度衰减判断裂纹位置。

对于与防止钢丝断裂后弹射的保护钢丝连接，铁丝与主缆钢丝之间的硬性摩擦，信号与裂纹扩展信号有很大的相似性，需更多的考虑特征参数中的持续时间-上升时间、幅值-ASL之间的关系。

## 七 试验建议

- 1、改进施力源，尽可能的降低噪声信号，葫芦挂钩与钢丝之间的垫层尽可能是高衰减的材料
- 2、载荷的变化速率应减小，且截取相应的时段进行保载观察
- 3、保护钢丝与预断裂钢丝之间的固定，建议采用软连接，保证两组钢丝之间的信号不在短距离内产生串扰，固定绳索不产生位移
- 4、建议配合工作频域在50~200KHz的传感器进行下次试验