

# 桥梁拉索疲劳试验声压信号处理 及疲劳破坏时刻判定研究

刘佰鑫 吴勇翔 甘秋萍

(柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545006)

**摘要:**桥梁拉索疲劳破坏是在用桥梁发生安全事故的主要原因之一。拉索疲劳试验能获取成品索的疲劳寿命参数,对估计桥梁使用寿命,改良成品索设计方案有重要意义。疲劳试验周期长,采用人工巡检试验过程获取的信息有限,存在不能确定疲劳破坏时荷载循环次数的缺陷。采用录音笔记录试验中的声压信号,将峭度分析法引入疲劳破坏声音特征提取中,准确判定疲劳破坏时刻,丰富了拉索疲劳试验的意义。实际应用证明,所提出的方法切实有效。

**关键词:**拉索 疲劳试验 声压 疲劳破坏

## 引言

斜拉桥和悬索桥以其尺寸小、跨越能力大等特点在我国公路交通建设中被广泛采用。拉索是斜拉桥和悬索桥的主要承载结构,因此拉索的性能至关重要。一批桥梁拉索出厂前需抽样进行疲劳试验,检验拉索组件的疲劳损坏及变形情况以及拉索用预应力筋疲劳断裂的位置及数量,发生破坏时的荷载循环次数。根据《JTT 771-2009无粘结钢绞线斜拉索技术条件》标准要求,疲劳试验的循环次数为200万次,试验频率不超过8Hz。以此计算,每次疲劳试验过程至少需要70h,依靠人工巡视记录难以获取准确的疲劳破坏发生时刻及其它详细信息。杨华伟<sup>[1]</sup>等提出采用传声器、声压触发模块为核心搭建触发器。当触发器接收到声压远大于环境噪音时,触发摄像机提取疲劳破坏过程图像,但该系统不适用于噪音较大的环境,容易产生误判;且对于包裹完整的成品索的试验,不能通过视频信号消除误判。本文采用录音笔记录试验中的声压信号,采用峭度特征描述疲劳破坏时的声压信号,精确地提取出了疲劳破坏发生的时刻。实际应用证明,本文提出的方法成功解决了桥梁拉索疲劳试验不能判定疲劳破坏时间的问题,完善了拉索疲劳试验的方案。

## 1 疲劳试验

为检验风电项目用SC15-19型拉索的疲劳性

能,采用某型号的疲劳试验机,按照图1所示安装好各组件。取拉索公称破断索力的65%为上限加载力,在应力幅度为80MPa的水平上进行200万次荷载循环试验,加载频率不超过4Hz,估算试验时间为139h。试验要求记录疲劳破坏发生时的荷载循环次数。由于现有设备没有自动记录疲劳破坏时刻的功能,故需要对试验设备进行改造。为节约成本,采取编写软件功能插件的形式实现。

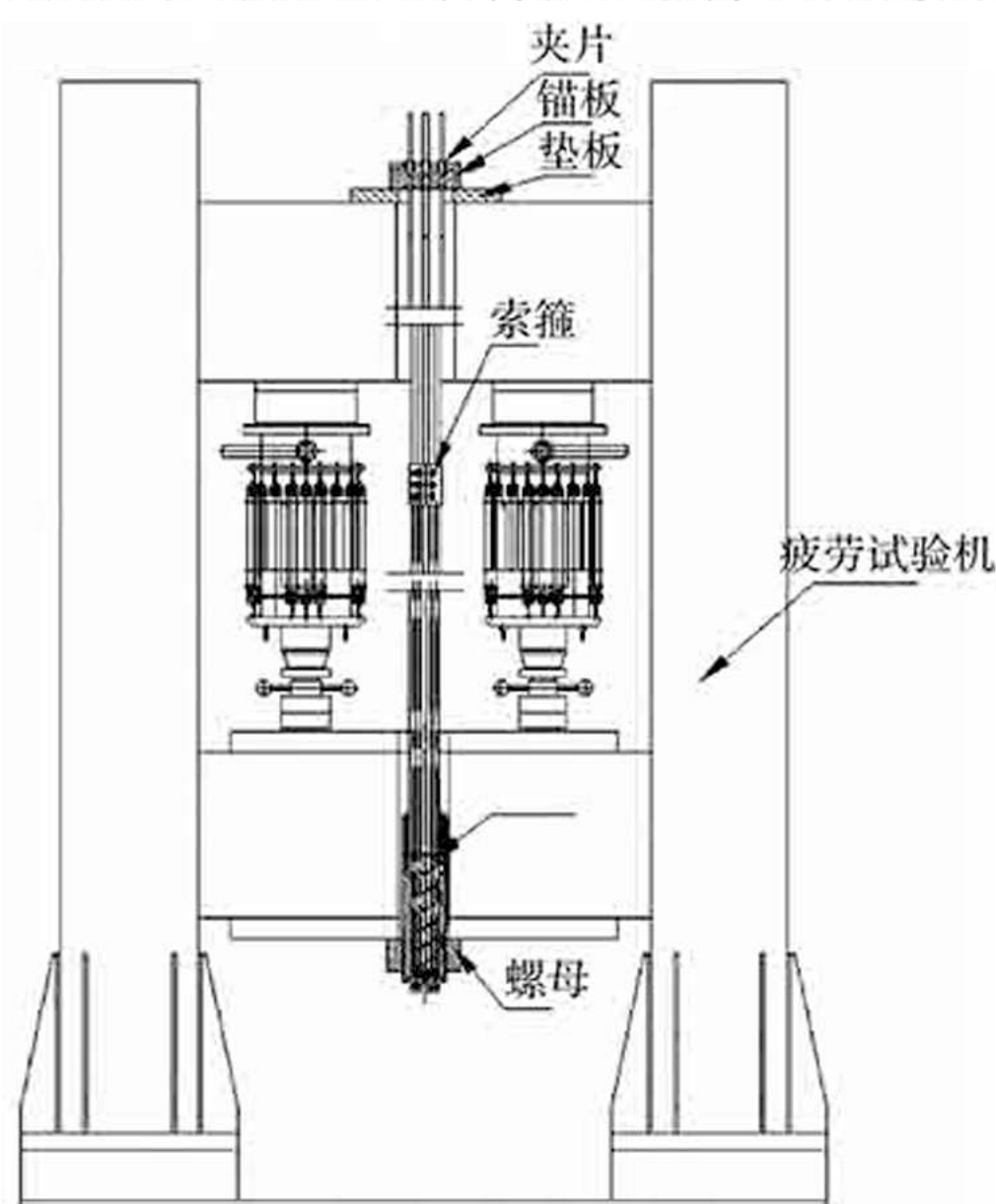


图1 拉索疲劳试验组件安装示意图

随着疲劳试验的进行,拉索钢丝内部微粒产生相对运动,进而发展为宏观上的疲劳裂纹。当裂纹扩展超过某一临界值时,就发生疲劳破坏的

现象<sup>[2]</sup>。疲劳破坏瞬间释放出极大的应变能，胁迫周围产生振动发出较大的声压。采用录音笔记录整个试验过程的声压，试验过程中定时采集检测数据中的声压信号特征，判定疲劳破坏是否发生。

本文选择续航能力强的录音笔，为避免长时间录音产生的音频文件体积超出普通PC机处理的极限，设置为采样频率1600Hz，单声道，且设置每个音频文件的最大时长为8h，超过8h就将数据录入新的音频文件。

## 2 声压信号数据处理

在C#中采用FileStream类将音频文件data标志位的数据读入内存，并将原采样频率1600Hz重采样为500Hz。如图2所示为音频的原始信号波形，横坐标为数据序列，每500个数据点对应1s音频；纵坐标为数据点的幅值，表示声压强度。原始信号幅值较基本一致，不能采用阈值分割声压的方式提取出疲劳破坏时刻。

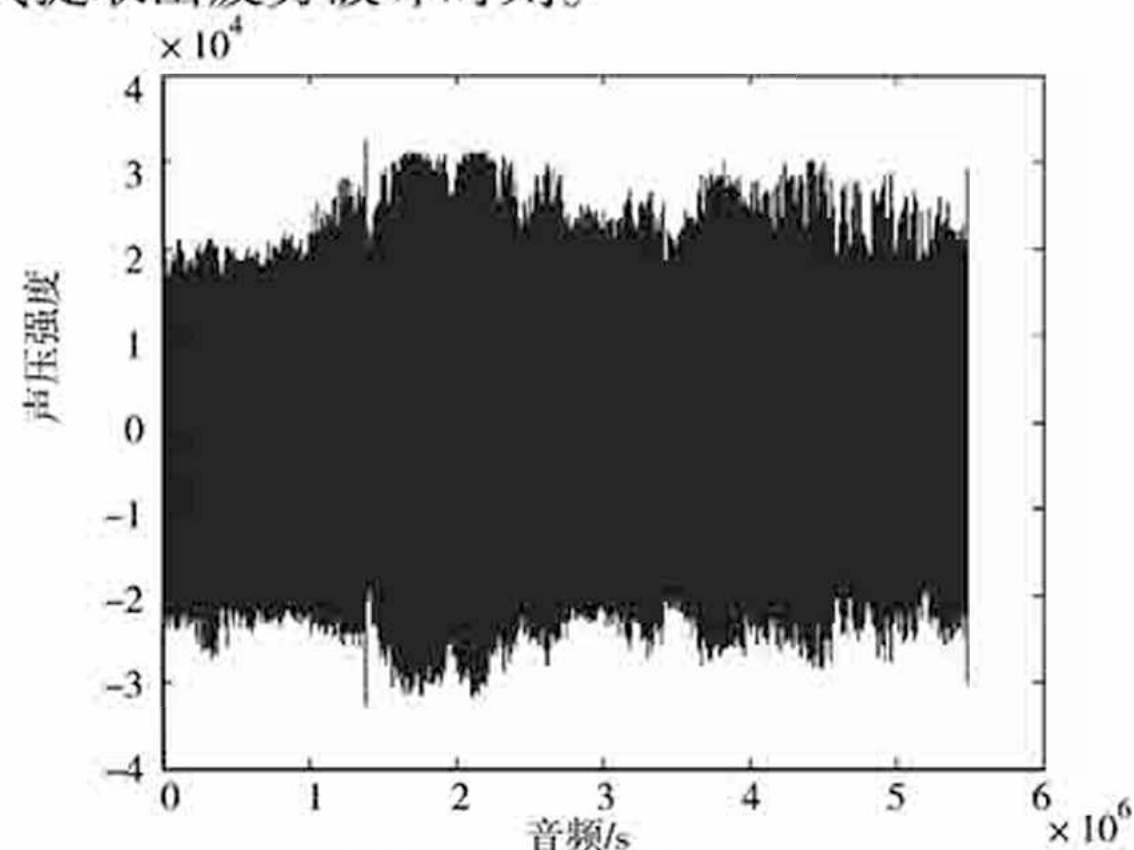


图2 原始声压信号

如图3所示，将原始时域信号进行快速傅里叶变换转到频域分析，采样频率为500Hz。由于疲劳试验期间，录音笔不可避免地采集到电机和液压泵等高频转动器件发出的声压信号，所以原始信号的能量集中在高频区域。并且考虑到疲劳破坏的声压信号持续时间很短，在整段信号的能量占比极低，设计低通滤波器滤除高频信号。滤波器的通带边界频率为130Hz，通带最大衰减为1，阻带截止频率为150Hz。滤波后波形如图4所示，低频信号幅值基本不变。采用该滤波器对原始信号处理，从滤波后的图像得到2个奇异点，如图5所示。人工采用播放器监听该2点附近的音频，发现第一个奇异点是疲劳破坏声压造成的，

第二个点是人说话的声音。所以，低通滤波并没有完全正确得出疲劳破坏发生的时间点。

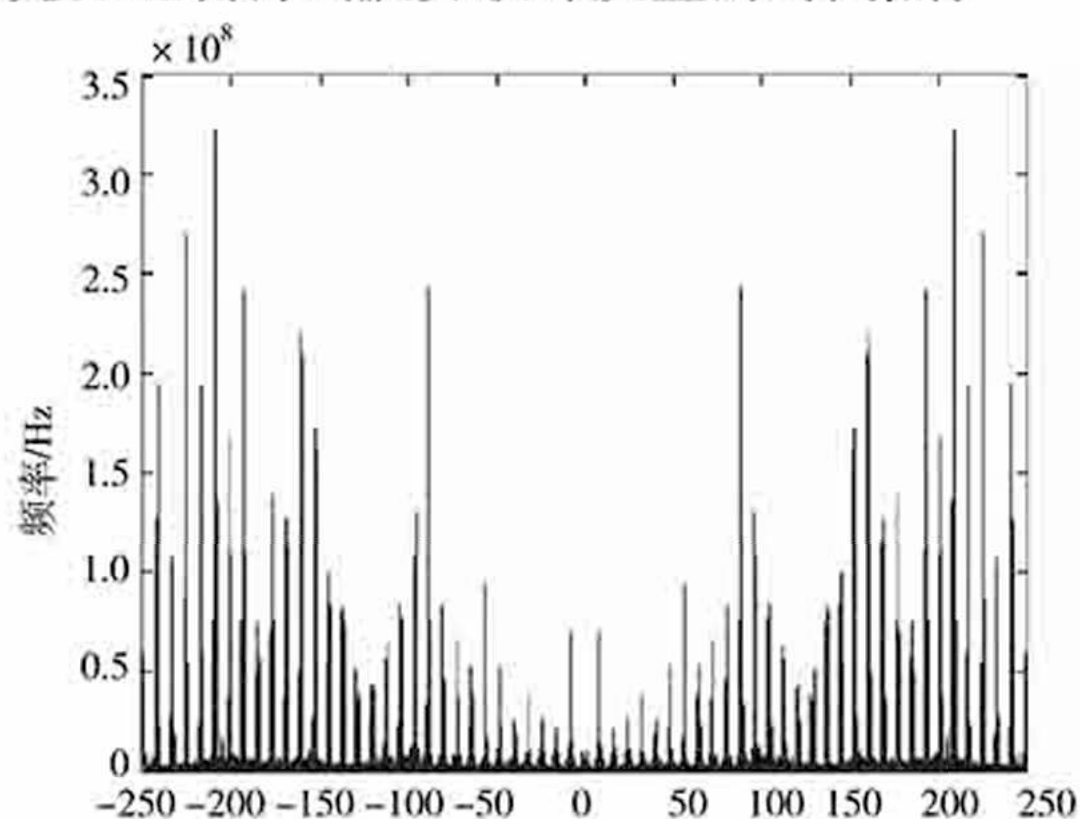


图3 原始信号幅频图

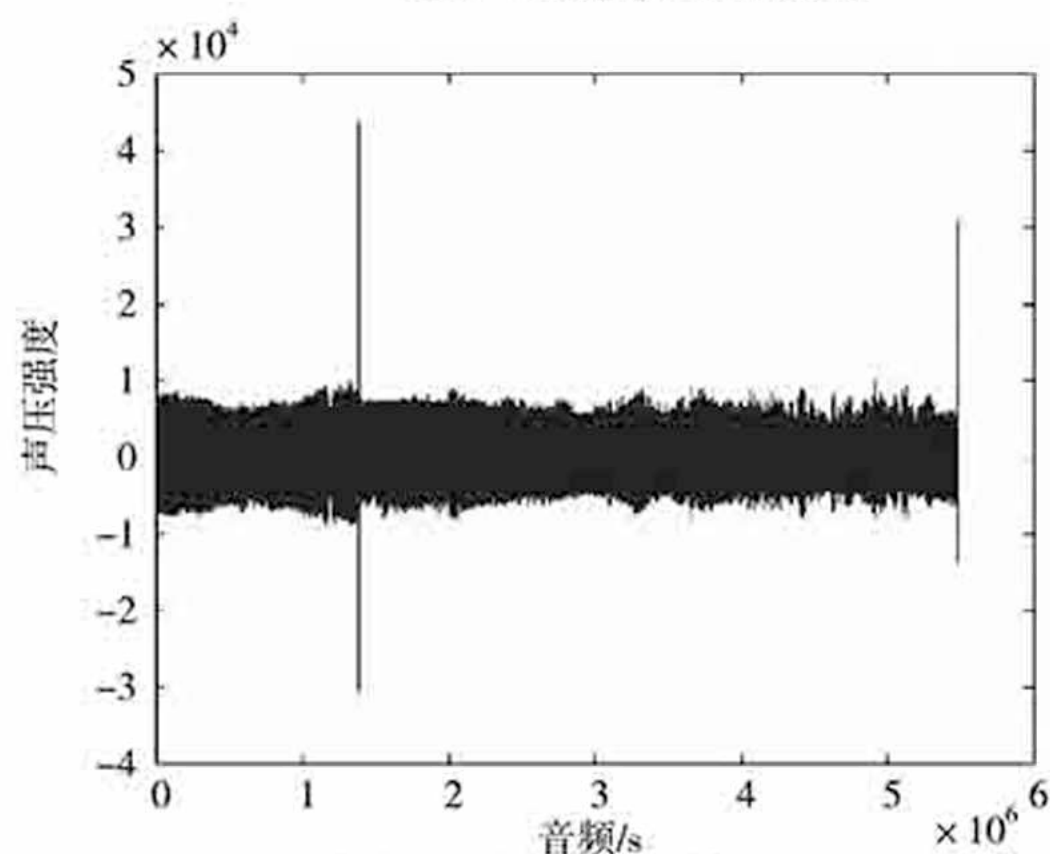


图4 低通滤波后的声压

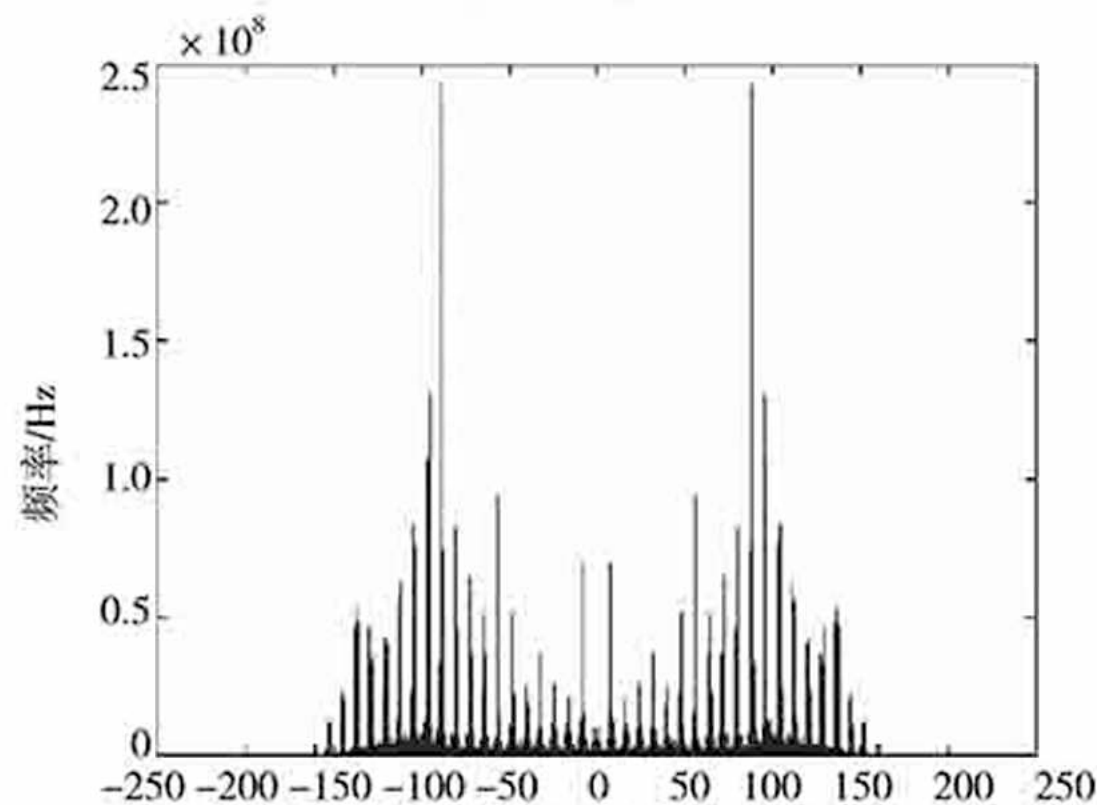


图5 低通滤波后幅频图

峭度是信号的4阶矩，对信号中的冲击特征很敏感<sup>[3]</sup>，反映了信号概率密度函数的陡峭程度，能将疲劳破坏形成的瞬间脉冲声压信号与其它方式产生的声压信号分辨出。其数学定义为：

$$C_q = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (|x_i - \bar{x}|)^4}{X_{rms}^4} \quad (1)$$

其中， $x_i$  为数据点的幅值， $\bar{x}$  为信号整体的幅值平均值。  
 (下转第14页)

张拉时,根据监控单位提供的数据,一次张拉索力到位,一般不进行二次索力调整<sup>[5]</sup>。

#### 4.7 施工监控计算

施工监控计算是充分利用现场采集的数据,综合分析,为施工修正提供科学依据。主要进行以下计算:

##### (1) 正装倒拆计算

根据设计资料和参数,对结构进行正装倒拆计算,对成桥及各施工阶段的索力、变形、应力以及设计线形进行计算,相互核对。

##### (2) 对各施工阶段进行跟踪计算

由于理论选用参数与实际工况参数差异,施工荷载、实际索力、结构线形等都有误差,不可能与理论计算一致。施工中,应根据实测索力、温度、线形、应力等参数值,修正实际计算参数,采取措施进行修正,确保实际工况与理论接近一致。

##### (3) 中间调索计算

由于施工中各种因素综合影响和各种偏差的积累,当主跨施工至跨中时,索力和线形有一定误差,需要进行中间索力的调整计算,应按索力与线形双控的原则,重新计算索力,优化调索工作。

#### (4) 成桥索力调整计算

主梁建成后,根据实测线形、索力,比对设计线形、索力,对偏差超过要求的梁段进行索力调整,调整时,应根据实测参数,重新计算索力,优化调索方案,使全桥索力与线形均满足要求。

### 5 总结和建议

在京杭大桥主桥施工实践证明,主塔施工和挂索施工工艺的关键工序均经过现场的实际施工验证,其工艺合理,安全可靠,可操作性强,即保证安装精度,提高施工效率。主体结构完工后其质量检测各项指标均符合设计要求和施工规范,其施工工艺方法为同类型桥梁的建设中提供了有益的经验。

#### 参考文献

- [1] 李晓磊,赵艳. 淮安通甫路大运河桥斜拉索施工技术[J]. 预应力技术, 2012, 92(3): 35-39.
- [2] 李文献,徐栋,肖军等. 拉萨市纳金大桥桥塔节段尺寸模型试验研究[J]. 世界桥梁, 2012, 40(5): 63-68.
- [3] 李文献,宋强. 矮塔斜拉桥中交叉抗滑键的研究及应用[J]. 桥梁建设, 2012, 42(6): 92-96.
- [4] 闫云友,庞维林. OVM250平行钢绞线拉索单根换索试验研究[J]. 预应力技术, 2005, 52(5): 19-23.
- [5] 叶生. 谈某斜拉桥环氧涂层钢绞线斜拉索施工工艺[J]. 山西建筑, 2009, 35(5): 310-311.

(上接第9页)

均方值  $X_{rms}$  信号的二阶矩统计平均,用于描述信号的整体能量。均方值定义为:

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (2)$$

滤波后的信号经过峭度特征提取,结果如图6所示。其中横坐标每个点代表音频文件的1s;纵坐标为峭度指标,值越大则为疲劳破坏的概率越大。数据处理过程准确判定出疲劳破坏发生的时刻。

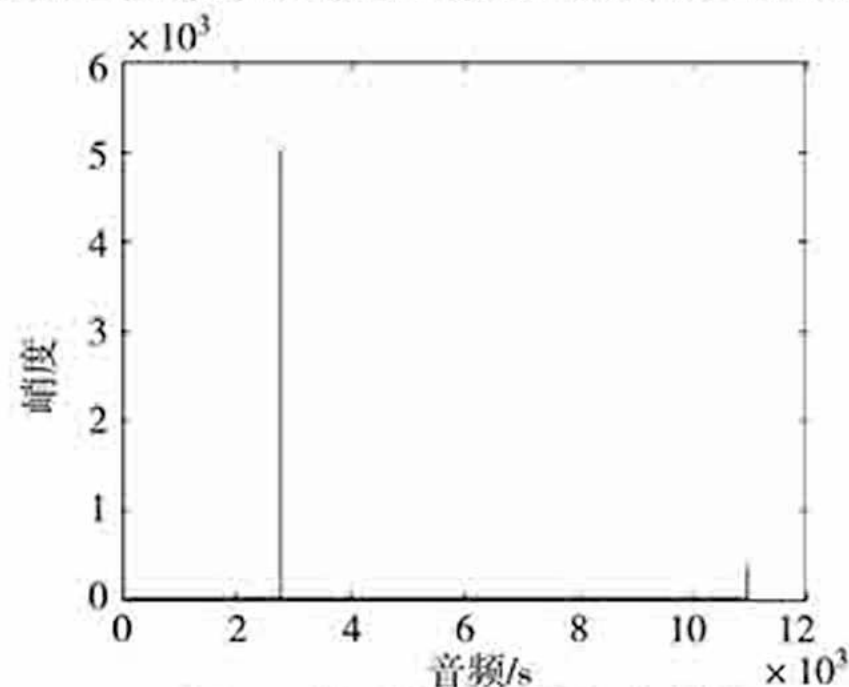


图6 信号的声压峭度特征

### 3 结论

本文对桥梁拉索疲劳试验声压信号进行处理,采用低通滤波和峭度特征提取出声压信号中疲劳破坏声压发生的时刻,从而准确判定出疲劳破坏发生的时刻。基于C#实现本文算法,准确给出疲劳破坏发生时的荷载循环次数,解决了拉索疲劳试验存在的不足。

#### 参考文献

- [1] 杨华伟,吴国庆,葛沈瑜. 桥梁拉索疲劳试验智能监测系统研究[C]//纪念徐秉汉院士船舶与海洋结构力学学术会议, 2011.
- [2] 胡倩. 桥梁拉索疲劳声发射信号处理及损伤分析[D]. 大连:大连理工大学, 2011.
- [3] 陈军堂,廖世勇,甘剑锋等. 峭度分析法在发动机噪声信号故障特征提取中的应用[J]. 移动电源与车辆, 2011(1): 15-18.