

拉索应力波传播速度与能量衰减特性试验研究

钱 骥, 孙利民, 蒋 永

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 通过在单根钢丝、无张力索及张拉索上进行不同声源的声发射试验, 分别获得了应力波在不同传播介质中的首波波速、能量衰减规律及频谱变化情况。结果表明: 单根钢丝上的首波波速接近圆杆一阶纵波理论值, 拉索中的首波波速则略小于钢丝; 索中能量衰减, 受张拉力影响, 张紧的拉索能量衰减要远小于无张力索, 实桥拉索可采用 0.447 这一实测能量衰减因子进行断丝源的能量反演。

关键词: 声发射; 拉索; 断丝; 波速; 能量衰减因子

中图分类号: U446.1

文献标志码: A

Experimental Study on Wave Velocity and Energy Attenuation in Cables

QIAN Ji, SUN Limin, JIANG Yong

(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Through the acoustic emission tests in high-strength wires, tension free cables and tensioned cables, head wave velocity, energy attenuation characteristics and spectrum alteration were discussed by taking different conditions into consideration. The results illustrate that, head wave velocity in single wire is close to the first order longitudinal wave, and it is slightly greater than that in cables; The energy attenuation factor in cables is influenced by tension force, which will attenuate more quickly in no-tension cable than that in tension cable. Source energy inversion in real bridge can use the measured values 0.447.

Key words: acoustic emission; cables; wire breakage; wave velocity; energy attenuation factor

拉索是索承结构体系桥梁中最重要的受力构件之一, 对拉索状态的监测是全桥健康监测的重要组成部分。目前, 对拉索有效的监测方法包括磁泄露^[1]、超声波^[2]及声发射方法^[3]。

声发射(acoustic emission, AE)是一种被动的实时动态监测方法, 其原理是通过捕捉材料损伤发生时辐射出的应力波来识别损伤源, 通常用来监测拉索中应力腐蚀、钢丝断裂的发生过程。早期, Casey等^[4-5]指出声发射技术在钢丝绳监测中的最大应用在于断丝的检测和定位, 成功的断丝检测和定位取决于钢丝绳的构造、直径、长度和断丝的数量。Pure Technologies 公司曾于 2001 年在休斯顿 Fred Hartman 桥的斜拉索上安装了声发射传感器, 这套声发射系统后来监测到一个“断丝信号”, 但是在进行全面检查之前, 并不能确定真的有断丝发生。2007 年, Drummond 等^[6]采用声发射监测拉索的疲劳过程, 建立了声发射特征参数分布与疲劳发生过程的关系。2010 年, Nair 等^[7]采用声发射进行损伤预警时, 也是基于声发射参数的统计分析结果。李冬生^[8]在进行桥梁吊杆钢绞线的损伤研究时, 运用声发射特征参数相关图, 识别断丝与非断丝信号, 并且将声发射特征参数的分形维数变化作为钢绞线的失效判别依据。金挺^[9]在进行拉索断丝的声发射监测试验时, 认为在噪音环境下, 仅根据声发射特征参数不足以精确辨别断丝信号, 容易误判, 应更多地从波形方面去寻找断丝信号特征。

本文通过在与实桥索相同的试验索中开展声发射试验, 进行基于全波形分析的波传播过程研究, 获得应力波在钢丝、无张力索及张拉索中的定位波速、能量衰减及频谱特征变化规律, 建立由实测波形反演源能量的能量衰减模型, 为实桥索断丝监测提供依据。

1 弹性波传播理论

圆柱形波导中, 主要存在纵波、扭转波及弯曲波三种模式波。当柱径一定时, 在只出现一阶波的频段

收稿日期: 2012-11-12

基金项目: 土木工程防灾国家重点实验室基金(SLDRCE08-A-05)

第一作者: 钱 骥(1983—), 男, 博士生, 主要研究方向为桥梁健康监测。E-mail: jiqian228@gmail.com

通讯作者: 孙利民(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁健康监测与振动控制。E-mail: lmsun@tongji.edu.cn

范围内,纵波波速最快,扭转波次之,弯曲波最慢. 根据 Pochhammer 方程^[10],纵波满足下式:

$$(2l/r)(m^2 + k^2)j_1(lr)j_1(mr) - (m^2 - k^2)^2j_0(lr)j_1(mr) - 4k^2lmj_1(lr)j_0(mr) = 0 \quad (1)$$

式中: r 是钢丝半径; $j_n (n=0, 1)$ 是第 n 阶贝塞尔函数; k 是扩张波数; $l = \sqrt{\omega^2/v_p^2 - k^2}$, $m = \sqrt{\omega^2/v_s^2 - k^2}$, 其中 v_p 和 v_s 分别是半无限体纵波与横波波速, ω 是角频率.

在杆径不大的情况下,考虑一维杆中的横向惯性效应,杆在轴向力 $\sigma(x, t)$ 的作用下除有轴向应变 $\epsilon(x, t)$ 外,还由于泊松效应而有横向变形,每单位体积的横向动能为 $\frac{1}{2}\rho\gamma^2r_g^2\left(\frac{\partial\epsilon}{\partial t}\right)^2$, 其中 r_g 是截面对 x 轴的回转半径, γ 是泊松比, ρ 是杆密度. 建立杆单元的微元运动方程,并以位移为未知函数,则

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \gamma^2 r_g^2 \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2} = c_0^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2)$$

将解函数以谐波的形式给出为

$$u(x, t) = u_0 \exp[i(\omega t - kx)] \quad (3)$$

则

$$\omega^2 + \gamma^2 r_g^2 \omega^2 k^2 = c_0^2 k^2 \quad (4)$$

其中 $c = \omega/k$ 可表示为

$$c^2 = c_0^2 - \gamma^2 r_g^2 \omega^2 \quad (5)$$

将上式略做变化,可得

$$\frac{c}{c_0} \approx 1 - \frac{1}{2}(\gamma r_g k)^2 \quad (6)$$

从式(6)中可以看到,不同频率的波,将以不同的波速在杆中传播. 对于一根半径为 r 的圆杆,其回转半径 $r_g = r/\sqrt{2}$, 则

$$\frac{c}{c_0} \approx 1 - \gamma^2 \pi^2 \left(\frac{r}{\lambda}\right)^2 \quad (7)$$

式中: c 为应力波波速; $c_0 = \sqrt{E/\rho}$, 取杨氏模量 $E = 205 \text{ GPa}$, $\rho = 7.8 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 理论算得 $c_0 = \sqrt{E/\rho} = 5127 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 为无频散时的波速; λ 为波长,当杆径远小于波长时, c 接近于 c_0 . 高强钢丝直径取 5 mm , 理论算得其一阶纵波波速与 c_0 非常接近, 可取 $c = 5127 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 作为理论参考值.

对于由高强钢丝组成的拉索,应力波在其上的传播过程非常复杂,没有解析解. 一般采用有限元进行数值模拟,在边界条件上也多做了简化,不能给出精确的数值解,目前比较多的是通过试验方法进行分析研究.

应力波在索中传播必然会产生衰减,衰减过程

以衰减因子来描述,地球物理学中,衰减因子也常被表述为岩石材料的品质因子,其测量有许多种方法,比较常用的有振幅衰减法、上升时间法、频谱比法、波形反演法等.

在拉索中直接测量幅值,总会受到一些偶然因素影响,误差较大,测量均方根值可以减小偶然性,但由于波形持续长度难以确定而很难精确计算. 采用全波形能量计算衰减因子既可以避免幅值测量的偶然性,也可以避免均方根值中的波形长度确定,并且能量本身就是区分断丝信号与其他信号的有效特征之一.

全波形能量计算值为

$$e = \sum_{i=1}^n V_i^2 \quad (8)$$

式中: V_i 为第 i 点的电压值, n 为波形长度.

假定能量在传播过程中,其衰减满足如下指数模型:

$$e(s) = e_0 \exp(-\alpha s) \quad (9)$$

式中: $e(s)$ 为距离声源 s 处应力波能量值, e_0 为波源处应力波能量值, α 为衰减因子.

离开波源距离为 s_1 和 s_2 的两点上,全波形能量分别为 e_1 和 e_2 , 则衰减因子

$$\alpha = -\frac{\ln e_1 - \ln e_2}{s_1 - s_2} \quad (10)$$

通过实测不同传播介质中的定位波速及 α 值,可由能量衰减模型反演损伤源能量,作为源类型判别的依据之一.

2 试验方法

试验过程中声发射采集设备为美国 PAC 生产的 PCI-2 声发射采集系统,信号采样频率均为 1 MHz , 传感器采用 R15, 中心频率为 150 kHz , 传感器直接粘贴于钢丝及拉索表面,采用专用耦合剂耦合. 试验包含三个部分: ① 试验一. 单根高强钢丝声发射试验; ② 试验二. 无张力索声发射试验; ③ 试验三. 拉索张拉断丝声发射试验.

试验一装置如图 1 所示. 试验钢丝为桥梁索中常用的直径 5 mm 镀锌高强钢丝, 钢丝总长度为 25 m , 两端张拉在支架上, 垂跨比为 $1/300$. 采用铁条在钢丝上定点定高度自由落体撞击钢丝产生声源, 声源发生装置如图 2 所示. 钢丝离铁条的竖直距离为 10 cm , 铁条撞击钢丝点离钢丝端支点 6 m , 六个 R15 传感器(S1~S6)从击点开始间距 2.5 m 向另一端支点依次布置, 如图 5a 所示.

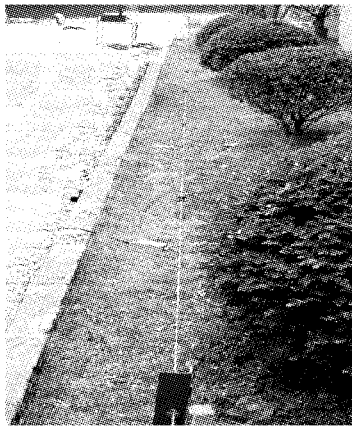


图 1 单根钢丝试验装置
Fig.1 Test unit for single wire

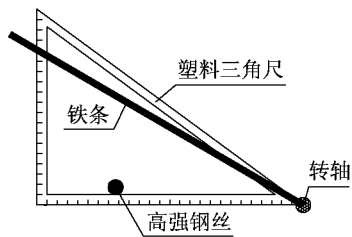


图 2 声源发生装置
Fig.2 Acoustic emission source

试验二装置如图 3 所示. 拉索总长度为 14.8 m, 其中在两端各有 0.4 m 无 PE 制锚预留段, 索截面包含 91 根 5 mm 直径平行钢丝, 其中有五根钢丝带有刻痕, 刻痕深度为环向 0.6 mm, 索体无垂度简单支撑在支架上, 支点位置如图 5b 所示. 声源采用空气枪高能枪击, 击点在索端横截面中心区域, 传感器从 PE 起始点开始布置, 间距 3 m, 总共五个, 粘贴在 PE 表面.

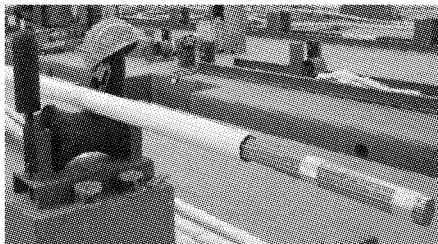


图 3 无张力索试验装置
Fig.3 Test unit for tension free cable

试验三装置如图 4 所示. 索体为试验二中的拉索, 两端锚具采用热铸锚, 传感器从离 PE 起始点 2 m 开始布置, 间距 2 m, 总共六个, 均粘贴在 PE 表面, 如图 5c 所示. 试验过程采用逐级加载, 最大张拉力控制在屈服荷载的 75% 左右.

3 试验结果分析

三个试验分别针对单根钢丝和拉索两种传播介

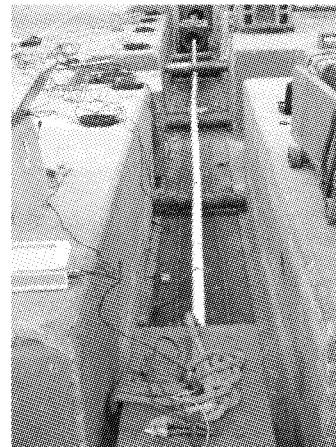


图 4 张拉索试验装置
Fig.4 Test unit for tension cable

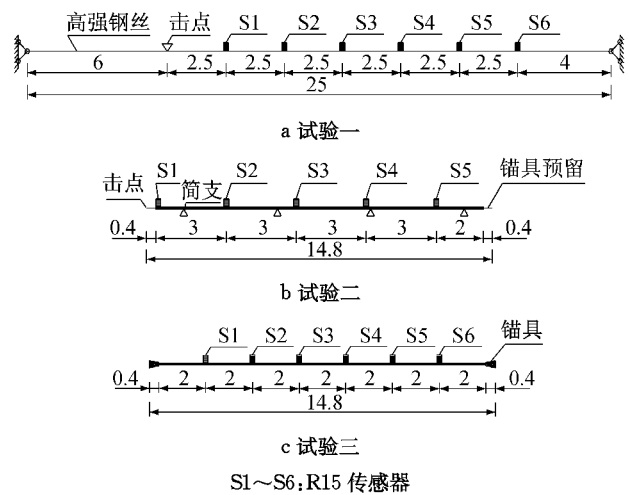


图 5 传感器布置图(单位: m)

Fig.5 Sensors layout (unit: m)

质, 声源包含人工声源与断丝声源两类. 试验中各传感器同步进行全波形采集, 通过分析不同传感器监测到的声发射全波形, 获得三种传播介质中的波速、能量衰减及频谱变化特征.

试验一共进行了 60 次撞击试验, 随机选取 18 次试验数据进行分析. 试验二共进行了 80 次枪击试验, 随机选取 20 次试验数据进行分析. 试验三包含两根试验索, 每根索除五个刻痕点位置不同外, 几何构造与试验条件完全相同, 试验过程中最大张拉力控制为 75% 屈服荷载, 最终 10 根刻痕钢丝中, 有七根钢丝破断, 无刻痕钢丝则没有发生破断.

3.1 首波波速

波速的测定是进行损伤源定位及源能量反演的基础, 实测信号中惟一能精确获得的波速为一阶纵波波速, 可通过同步传感器实测首波到达时间计算.

三种试验工况下, 都分别采集了多组数据, 取单根钢丝中的一组数据, 如图 6 所示. 图中波形为六个

同步传感器所采集到的全波形中的波形前沿部分。

从图 6 中看到,试验一钢丝上传感器接收到首波的到达时间依次滞后,并且能明显地观测波形起始时间,通过计算各传感器接收到的首波时差,以测定首波波速。

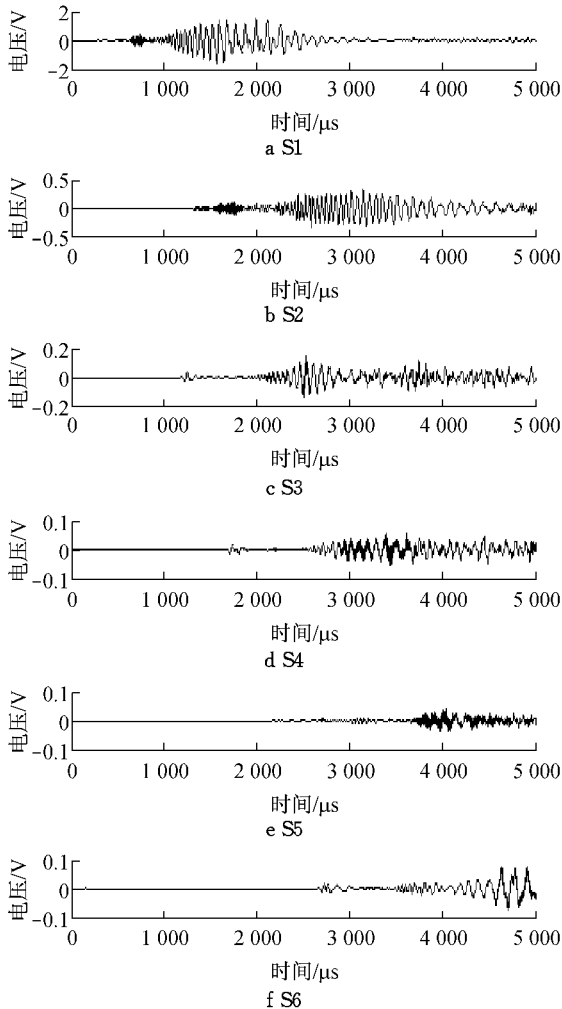


图 6 钢丝中各传感器波形图
Fig.6 Waveform in single wire

同样的方法用于测定试验二与试验三中的首波波速,在同一种试验工况下,各组数据所计算的首波波速值都非常接近,试验结果具有一致性和可重复性.三种试验工况下各传感器间多组实测波速值的平均值如表 1 所示,表中 c_{S1-S2} 指波速计算区间为 S1 传感器到 S2 传感器。

表 1 三种试验工况首波波速
Tab.1 Head wave velocity in three conditions

	$m \cdot s^{-1}$				
工况	c_{S1-S2}	c_{S2-S3}	c_{S3-S4}	c_{S4-S5}	理论值
单根钢丝	5 155	5 099	5 070	5 150	5 127
无张力索	5 706	5 167	4 922	5 058	—
张拉索	4 960	5 068	5 093	5 050	—

从实测结果中可以看到,单根钢丝的波速测定

值比较稳定,和一阶纵波波速的理论值非常接近,最大差值为 1.1%,说明采用一阶纵波(首波)进行时差定位具有可行性。

无张力索中测定的 c_{S1-S2} 远高于一阶纵波波速理论值,多次试验的测量值也有一些离散,并且和后续传感器测定值相差很大,可能是由于离波源太近而使传播路径异常.后续四个传感器测定波速值则较为稳定,拉索中的声发射波速无理论解,实测值比较接近单根钢丝中的一阶纵波波速理论值。

张拉索中的声源为断丝信号,截面中心和边缘均有断丝产生.从七次断丝试验结果可以看到,其首波波速只是略小于单根钢丝中的一阶纵波波速理论值,并且测定值浮动不超过 3%,实测拉索首波波速平均值与单根钢丝一阶纵波理论值相差为 2%,说明应力波在索体内,从中间钢丝经相邻钢丝传到 PE 表面,其一阶纵波波速没有太大变化,断丝点的位置,对索体内波速的测定基本也没有影响。

不同工况声源的频率是不同的,但从结果看到,基本都接近一阶纵波波速理论值,可以认为在拉索声发射传播中,不用考虑频率对波速的影响,索中波源定位直接采用 $5\ 043\ m \cdot s^{-1}$ 的波速平均值,能够达到源定位的精度要求,在无实测数据的情况下,源定位采用单根钢丝一阶纵波理论值亦可。

3.2 能量衰减因子

应力波在传播过程中,能量必然会存在衰减,衰减率取决于传播介质的物理与几何特性.而对于像拉索这种细长的传播介质而言,能量传播到端面时已衰减到较小,可不考虑其反射的能量对传感器实测总能量的影响。

在三种试验工况中分别选取一组数据,按指数衰减拟合的能量衰减对数曲线如图 7 所示。

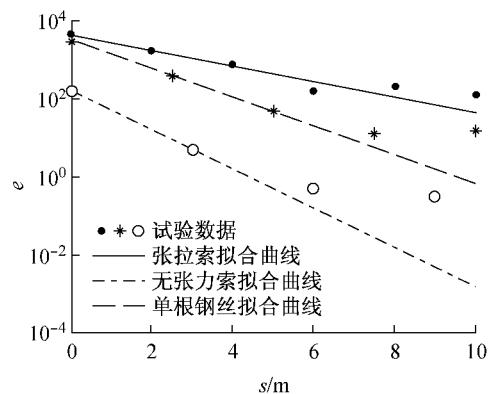


图 7 三种工况能量拟合曲线
Fig.7 Energy fitted curve in three conditions

各试验工况下能量衰减因子试验测定采用与波

速测定中相同的试验数据源,多次试验测定的能量衰减因子平均值如表 2 所示。

表 2 三种工况能量衰减因子平均值
Tab.2 The average energy attenuation factors
in three condition

工况	α	主频率/kHz
单根钢丝	0.832	15
无张力索	1.149	44
张拉索	0.447	43

从试验数据中可以看到,虽然不同工况下的波速相近,但是能量衰减却相差甚远。即使在相同的结构形式中,无张力索能量衰减也要远远大于张拉索能量衰减,这可能是由于索被张紧之后,相临钢丝之间接触更紧密,应力波从中心钢丝向 PE 外侧传播时,损失的能量变小。

张拉索中的声源为断丝信号,首根钢丝破断张拉力约为索承载力的 20%,后续钢丝破断张拉力逐步提高,使与实测能量衰减因子相近,说明索体只要张紧即可,更大的张力并不会减小能量的衰减。实桥拉索均表现为有张力能量衰减,其断丝信号衰减因子采用 0.447 这一试验值是合理的,但由于拉索张拉破断危险性较高,文中所取得的断丝信号样本数有限,在条件允许的条件下,应增加拉索断丝样本以保证工程应用的可靠性。

图 7 中单根钢丝撞击的能量值并没有比断丝信号的能量值小太多,这是由于索体断丝信号测定的是 PE 外侧所能接受到的能量值,实际上断丝信号的能量值要远高于敲击所产生的能量,这从空气枪子弹高速撞击拉索端面所测定的能量值就可以看出,实际上空气枪撞击的能量是要远大于敲击所产生的能量。

3.3 频谱特征变化

应力波在介质中传播,受频散和能量衰减的影响,不同传播距离上所监测到的波形频谱特征将发生变化。选取试验三中一组典型的断丝信号波形频谱比较,如图 8 和 9 所示。根据源定位确定该断丝点的纵向位置在 S1 与锚具之间,经 S1 传到 S6,断丝点的横向位置在由外向内第二层钢丝上,需经外层钢丝及 PE 层才能被传感器接受。

从图 8 中可以看到,断丝声源所产生的应力波频率分布不超过 100 kHz,频率成分包含在两个频带内,主要能量集中在 40~50 kHz 的频带内,另一部分能量出现在 5~30 kHz 的频带内。应力波从 S1 经过 10 m 距离的传播到达 S6,频谱分布如图 9 所示。S6 频谱总能量值小于 S1,但最大峰值频率位置没有变,依然在 43kHz 左右,频带分布相似,说明应

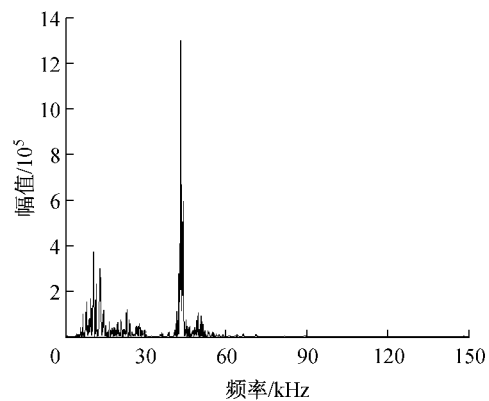


图 8 S1 频谱

Fig.8 Frequency spectrum of S1

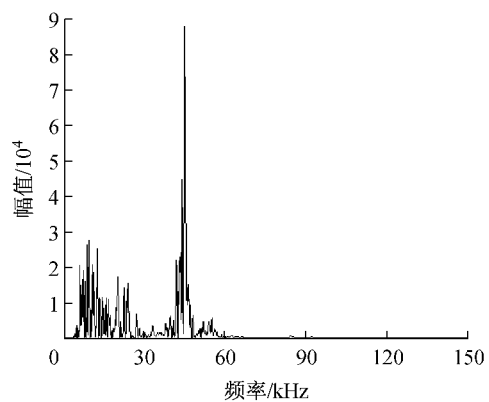


图 9 S6 频谱

Fig.9 Frequency spectrum of S6

力波在经过一段距离的传播之后,由于传播路径上的能量耗散,频谱总体能量会减小,但是主要的频谱特征依然保留。通过比较试验三中其他断丝波源的试验数据,可以看到其频谱在不同传播距离上的变化均表现出这一规律。

在单根钢丝及无张力索试验中,波形传播时的频谱变化同样也具有总能量减小、频谱特征不变的规律。在其中一些试验结果中,会存在低能量的频率成分随着传播距离增加而消失的情况。总体而言,波形在传播时,均能够保留峰值频率位置、频带分布等主要特征。由此,可以根据实测波形判断波源的主要频谱特征,作为识别源类型的依据之一。

4 结论

(1) 单根钢丝中测定的首波波速非常接近圆杆理论一阶纵波波速,无张力索和张拉索 PE 层外侧实测波速略小于单根钢丝的一阶纵波波速,索中声源定位可以采用 $5\ 043\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的实测值。

(2) 试验测定了单根钢丝、无张力索和张拉索

(下转第 1731 页)