

# 基于钢绞线断丝检测的超声导波传播特性试验

熊红芬,武新军,徐江,孙鹏飞

(华中科技大学 机械科学与工程学院,武汉 430074)

**摘要:**超声导波技术已被成功应用于钢绞线单处断丝检测。然而,实际工程中钢绞线经常发生多处断丝,使用导波检测时,由于钢绞线结构的特殊性和多处断口的存在,使得导波的传播极为复杂。提出在钢绞线同一根钢丝中制作三处断口,通过设计试验获取不同条件下检测信号的方法来研究导波的传播特性。分析了脉冲信号的衰减和断口回波信号的变化,结果表明:由于钢绞线钢丝之间接触应力的存在,导波遇到某根钢丝中的断口时会发生部分反射,从而降低了导波向前传播的能量;通过断口之后,钢丝之间的能量泄漏使得导波继续在已断钢丝和其他钢丝中同时传播,有利于检测同根钢丝上的其他缺陷。为导波检测钢绞线实际存在的多处断丝奠定了基础。

**关键词:**超声导波;传播特性;钢绞线;断丝检测;接触应力

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2011)05-0011-04

## Experiment on Propagation Characteristics of Ultrasonic Guided Waves in Steel Strands based on Fractured Wires Detection

XIONG Hong-Fen, WU Xin-Jun, XU Jiang, SUN Peng-Fei

(School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The ultrasonic guided wave technology was successfully used for the detection of strands with fractured wires at a single position. However, in practice, wires comprising the strand often fracture in several places. In such a case, the propagation of guided waves was very complicated because of the special structure of the strand and many fractured surfaces. In this paper, a strand with three fractured surfaces in a wire was used as the specimen, and a method was proposed to study propagation characteristics of guided waves by acquiring signals from the strand under different experimental conditions. At last, the attenuation of the passing pulse signals and the change of the defect signals were analyzed. Results show that due to the contact stresses between the wires guided waves propagation in a strand can not be reflected completely when they encounter a fractured surface in a wire. While the forward energy of guided waves decreases, and then waves continue propagating simultaneously in the fractured wire and other wires because of the energy losses between these wires, which is helpful to inspect other defects in the same wire. The conclusion provides a certain foundation for application of guided waves technology to detect the strand with fractured wires in different places.

**Keywords:** Ultrasonic guided waves; Propagation characteristics; Strand; Fractured wire detection; Contact stress

钢绞线因其强度高、松弛性能好等特点被广泛

应用于高层建筑、斜拉索桥和预应力工程中。受长期工作环境和承载力变化的影响,钢绞线易产生磨损、腐蚀和疲劳断裂等缺陷。这些缺陷将直接危害到结构的安全性和使用寿命。因此,国内外学者针对钢绞线上缺陷的检测展开了大量研究。

收稿日期: 2010-07-23

基金项目: 国家“863”计划资助项目(2006AA04Z435)

作者简介: 熊红芬(1986—),女,硕士研究生,主要研究方向为钢绞线磁致伸缩导波检测与信号处理。

近年来,超声导波无损检测技术因其检测效率高、范围长等特点已被成功应用于钢绞线的缺陷检测。Kwun 等较早地开发了磁致伸缩导波传感器用于钢绞线的无损评估<sup>[1]</sup>。XU 等使用导波检测钢绞线单处断丝缺陷时,发现断丝回波峰峰值与断丝根数成线性关系<sup>[2]</sup>,从而为断丝定量检测提供了依据。Rizzo 等不仅使用激光超声研究了钢绞线单根钢丝中的导波传播问题<sup>[3]</sup>,还使用压电导波研究了钢丝之间导波能量的泄漏问题<sup>[4]</sup>,为进一步了解钢绞线中导波的传播提供了基础。上述成果中,未涉及钢绞线多处断丝的检测,而实际应用中钢绞线易发生多处断丝。从导波检测原理可知,导波在钢绞线中遇到一处断口会发生反射,从而降低导波向前传播的能量,不利于其他断口的检测。另一方面,导波在钢丝之间的能量泄漏对多处断口的检测会产生何种影响尚不明确。因此,研究导波遇到断口如何传播具有重要意义。

笔者采用磁致伸缩导波技术,通过检测钢绞线多处断丝缺陷来研究导波在钢绞线中的传播特性。首先,在 7 芯钢绞线的一根外围钢丝上制作三处断口。然后,变换传感器位置和拆除一截断丝,获取不同条件下的检测信号并进行分析。研究结果不仅证明了该方法的有效性,还进一步明确了导波遇到断口时的传播行为,从而为导波检测钢绞线实际存在的多处断丝提供了依据。

## 1 试验试样、装置和方法

### 1.1 试验试样

试验对象是公称直径 15.24 mm 的 7 芯钢绞线。其外围钢丝直径 5.1 mm,中心钢丝直径 5.3 mm,捻距 219 mm。选定一根长 5m 的钢绞线试样,使用角磨机在其同一根外围钢丝中制作 3 处断口。如图 1 所示,每个断口宽度 3.3 mm,断口之间相距 400 mm。

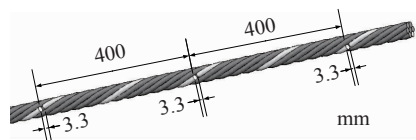


图 1 具有三处断口的钢绞线试样

### 1.2 试验装置

试验装置采用自行研制的磁致伸缩导波检测系统,如图 2 所示,主要由计算机、脉冲发生器、功率放大器、传感器、前置放大器、数据采集卡等组成<sup>[5-6]</sup>。

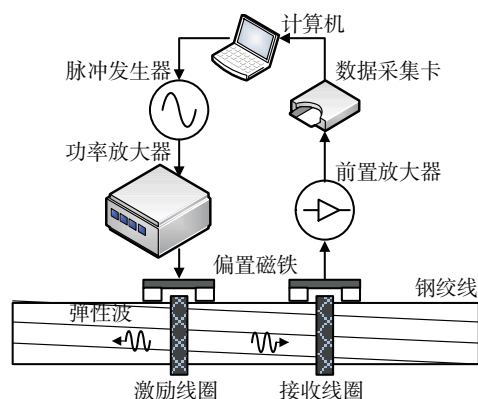


图 2 钢绞线磁致伸缩导波检测系统

其中传感器为一对,分别实现导波信号的激励和接收,均由偏置磁铁和感应线圈构成。脉冲发生器发出某一中心频率的脉冲信号,经功率放大器放大后进入放置在钢绞线上的激励线圈,从而产生沿钢绞线长度方向传播的弹性应力波;安放在另一处的接收线圈即可检测到导波信号。当钢绞线中存在缺陷时,导波信号会在缺陷处反射回来被接收线圈检测到。在此过程中,偏置磁铁提供偏置磁场,起到提高换能效率的作用。

试验装置激励和接收的信号是  $L(0,1)$  模态的导波。由文献<sup>[3]</sup>可知 50 kHz 激励频率下  $L(0,1)$  模态的导波在外围钢丝中衰减较小。因此,选用中心频率为 50 kHz 的两个周期的正弦波作为激励信号。每次试验激励脉冲电压幅值设置为 360 V。为提高信噪比,接收信号连续采集 300 次并进行平均后作为一次检测信号。

### 1.3 试验方法

采用上述磁致伸缩导波检测系统,对钢绞线试样进行试验。试样上的三处断口分别用  $a_1, a_2, a_3$  表示。首先,如图 3 所示,固定激励传感器 T 的位置,把接收传感器 R 分别放在  $R_1, R_2, R_3$  位置,检测通过脉冲信号,然后按上述相同的距离,在试样的左半部分无缺陷处重置激励和接收传感器,检测通过脉冲信号;其次,如图 4 所示布置,获取 3 处断口回波信号;最后,如图 5 所示,拆除断口  $a_1$  和  $a_2$  之间的外围钢丝,再按图 4 中布置传感器重新检测三处

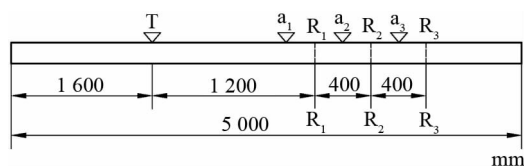


图 3 接收传感器移动布置示意图

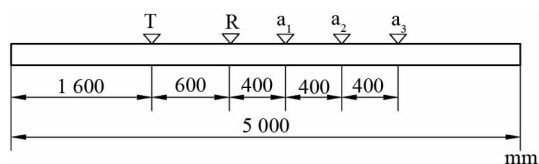


图4 钢绞线三处断口检测布置示意图



图5 拆除一截钢丝后的钢绞线

断口回波信号。试验中,为排除单次测量的偶然因素,各布置条件下检测信号均测量多次。

## 2 试验结果与信号分析

### 2.1 断口对通过脉冲的影响分析

按图3布置传感器,分别检测经过不同断口后的通过脉冲信号。为评价断口对导波传播造成的影响,同时在试样无缺陷部分按相同距离布置传感器获取通过脉冲信号,然后按式(1)计算通过脉冲的衰减系数 $\alpha$ :

$$\alpha = 20 \log \frac{A_1}{A_0} \quad (1)$$

式中 $A_1$ 是经过断口后通过脉冲的幅值; $A_0$ 是相同距离下在无缺陷部分传播的通过脉冲的幅值。由于激励信号频带较宽,直接从时域读取单次所测信号幅值不够精确,故截取相同条件下多次测量的通过脉冲信号,分别经FFT变换得到50 kHz对应的频域幅值,最后计算平均值作为通过脉冲的幅值。文中信号幅值均使用此方法获得。计算结果如表1所示,可见随着经过断口次数的增加,通过脉冲幅值衰减增大。该现象表明:导波在钢绞线中传播,每次遇到断口,其向前传播的整体能量都会降低。

表1 通过脉冲信号幅值因断口导致的衰减系数

接收传感器位置	传播距离/mm	$A_1$ / $V$	$A_0$ / $V$	$\alpha$ /dB
R <sub>1</sub>	1 200	0.876	1.115	-2.09
R <sub>2</sub>	1 600	0.580	0.910	-3.91
R <sub>3</sub>	2 000	0.425	0.800	-5.50

### 2.2 三处断口回波信号特性分析

钢丝上断口的存在使导波在钢绞线中向前传播的能量降低,这对检测其他断口会造成不利影响。

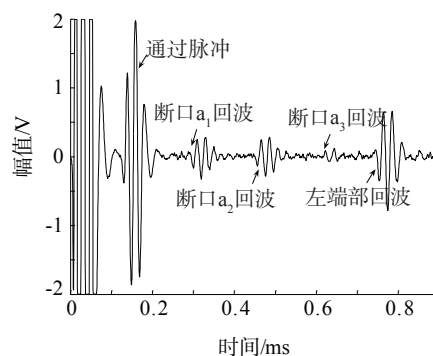


图6 钢绞线同根钢丝三处断口检测信号

按图4布置方式对试样进行检测,信号波形如图6所示,可见3处断口回波信号明显。

通过脉冲和断口 $a_1, a_2, a_3$ 处的回波信号幅值分别为1.274和0.199, 0.198, 0.057 V,断口 $a_1, a_2$ 回波信号幅值几乎相等, $a_3$ 回波幅值较小。钢绞线断丝1根,导波遇到 $a_1$ 断口反射回波的幅值与通过脉冲幅值之比是 $0.199/1.274 \approx 1/7$ ,与钢绞线的截面积损失率相等。但此规律理论上应当不适合 $a_2$ 断口回波信号,因为断口 $a_1$ 的存在会导致此根钢丝中的导波发生全反射而无法继续向前传播,断口 $a_2$ 将不存在回波信号,即使导波在钢丝之间会发生能量泄漏<sup>[7]</sup>, $a_2$ 回波应当远小于 $a_1$ 断口回波,而实际检测发现 $a_2$ 回波能量很强。此现象的可能原因分析如下:文中激励的 $L(0,1)$ 模态的导波主要在钢绞线的外围钢丝中传播<sup>[8]</sup>。由于钢丝之间接触应力的影响,当导波遇到断口 $a_1$ 发生反射的同时也伴有能量泄漏现象;接着由于钢丝之间的耦合作用<sup>[7]</sup>,其他钢丝的能量会逐渐泄漏到已断钢丝中,使得导波在所有钢丝中继续传播。钢丝之间的接触应力促使 $a_2$ 断口回波能量几乎与 $a_1$ 相等,同时也对检测断口 $a_3$ 有利。 $a_3$ 回波能量较小一是断口 $a_1$ 和 $a_2$ 造成整体导波能量衰减较大,这可以从表1中得到验证;二是断口 $a_3$ 反射回程距离较长,且回波遇到断口 $a_1, a_2$ 仍会反射导致其能量衰减。

实际上,当导波第一次遇到断口 $a_2$ 后,在 $a_1, a_2$ 断口之间会不断重复反射,且第一次重复反射的回波在检测接收时间上与 $a_3$ 断口第一次回波相同。因此在制作断口 $a_3$ 之间,按照图4中布置先对试样进行检测。结果发现 $a_1, a_2$ 之间第一次重复反射回波与背景噪声的幅值在一个数量级上。故观察 $a_3$ 断口回波时可忽略其影响。

### 2.3 拆丝后三处断口回波信号变化分析

为进一步证明导波经过 $a_1$ 断口后钢丝之间接



触应力导致的能量泄漏对检测断口  $a_2$  有利,按图 5 所示拆除断口  $a_1$ ,  $a_2$  之间已断的钢丝,再按图 4 布置重新检测。信号波形如图 7 所示,可见  $a_2$  断口回波能量明显变小,无法从背景噪声中分辨出来。

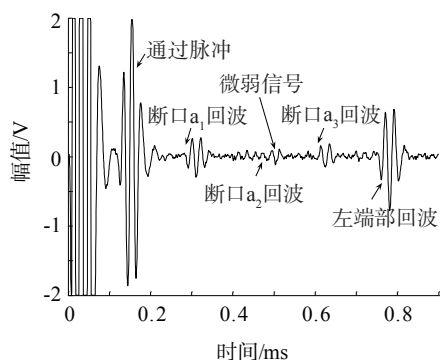


图7 拆除断口  $a_1$ ,  $a_2$  之间钢丝后检测信号

拆丝前后三处断口回波幅值及变化如表 3 所示。拆除断丝后,在通过脉冲幅值稍微变大的情况下,仅有  $a_3$  断口回波幅值增加, $a_1$ ,  $a_2$  回波能量均减弱,其中  $a_2$  回波信号幅值变化最大。这表明没有  $a_1$ ,  $a_2$  之间的外围钢丝,导波遇到断口  $a_1$  发生部分反射后,其他钢丝的能量就无法泄漏到已断的钢丝中,对检测断口  $a_2$  就起不到促进的作用。相反的,断口  $a_2$ ,  $a_3$  之间已断钢丝的存在使得  $a_3$  回波信号能量较强;又因为断口  $a_2$  不再造成导波向前传播能量的衰减, $a_3$  回波幅值增大 65%。断口  $a_1$  回波能量之所以变小,与导波在  $a_1$  后端面无法再反射有关。

表 1 拆丝前后各检测信号幅值变化

信号	拆丝后幅值/V	拆丝前幅值/V	幅值变化/V
通过脉冲	1.310	1.274	+0.036
$a_1$ 回波	0.179	0.199	-0.020
$a_2$ 回波	0.030	0.198	-0.168
$a_3$ 回波	0.094	0.057	+0.037

另外,由图 7 可见紧邻断口  $a_2$  理论回波时间之后,存在一个微弱回波信号。其原因可能是导波传播到断口  $a_2$  时,由于  $a_2$ ,  $a_3$  之间已断钢丝的存在,钢丝内部存在的接触应力促使导波能量泄漏到已断钢丝中的同时发生了小部分能量反射。再次证明导波在钢绞线上遇到断丝缺陷的一瞬间,发生部分反射的同时伴有能量泄漏现象,由于钢丝之间的耦合作用导波仍在已断钢丝和其他钢丝中继续同时传播。

### 3 结论

利用磁致伸缩导波技术,对钢绞线同根外围钢丝中存在的三处断口进行了不同条件下的检测试验。分析通过脉冲信号经过断口后的衰减和拆丝前后断口回波信号的变化,研究了超声导波在钢绞线中的传播特性。由于钢丝之间存在的接触应力,导波一旦在钢绞线中传播,钢丝之间的能量泄漏一直存在,所以,当导波遇到某根钢丝中的断口会发生部分反射,降低了导波向前传播的能量;但钢丝之间的耦合作用又使得导波仍在所有钢丝中继续同时传播,并有利于检测同根钢丝上的下一处断口。另一方面,此研究预示导波技术可用于钢绞线实际应用中存在的多处断丝检测。下一步的工作将集中研究钢绞线不同钢丝多处断口缺陷的检测,从而使得导波技术真正应用于实际工程中。

### 参考文献:

- [1] Keith A B, Chris D, Kwun H. Nondestructive evaluation of prestressing strands with magnetostrictive sensors[J]. Proceedings of SPIE, 1998(3400): 326—337.
- [2] XU Jiang, WU Xin-jun, WANG Liang-yun, et al. Detecting the flaws in prestressing strands using guided waves based on the magnetostrictive effect[J]. Insight, 2007, 49(11): 647—650.
- [3] Rizzo P, Lanza di Scalea F. Wave propagation in multi-wire strands by wavelet-based laser ultrasound [J]. Society for Experimental Mechanics, 2004, 44(4): 407—415.
- [4] Bartoli I, Marzani A, Lanza di Scalea F, et al. SAFE modeling of waves for the Structural Health Monitoring of Prestressing tendons[J]. Proceedings of SPIE, 2007(65320D): 1—10.
- [5] 武新军,徐江,沈功田. 非接触式磁致伸缩导波管道无损检测系统的研制[J]. 无损检测, 2010, 32(3): 166—170.
- [6] 邹君,武新军,徐江,等. 基于杜芬混沌振子的磁致伸缩导波信号识别[J]. 无损检测, 2008, 30(9): 600—602.
- [7] Kwun H, Keith A B, Hanley J J. Effects of tensile loading on the properties of elastic-wave propagation in a strand[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 103(6): 3370—3375.
- [8] Lanza di Scalea F, Rizzo P, Seible F, et al. Stress measurement and defect detection in steel strands by guided Stress waves[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15(3): 219—227.