

弹性波在受拉钢绞线中传播的耦合与衰减

赵华贇, 裘进浩, 顾娜, 程军, 季宏丽

(南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要:基于超声波的无损检测方法在钢绞线健康监测中得到了越来越多的关注。目前大多数研究将钢绞线视为整体来研究弹性波在其中的传播特性,而很少研究弹性波在钢丝绞线间的传递及相互耦合。该文从单根钢丝的角度出发,分别通过仿真和实验的方法,在外围单根钢丝线中激励弹性波,测量其余钢丝线中的响应,分析弹性波在钢丝线间的传递关系。仿真和实验结果表明,在受拉钢绞线中,弹性波从激励钢丝线到其余钢丝线的传递率相同,与几何位置无关。随后改变信号接收位置,得到了弹性波随传播距离呈指数衰减的规律。

关键词:钢绞线;弹性波;压电陶瓷;传递率;衰减

中图分类号:TM282; TB551 **文献标识码:**A

The Coupling and Attenuation of Elastic Waves Propagating in Pulled Multi-wire Strands

ZHAO Huayun, QIU Jinhao, GU Na, CHENG Jun, JI Hongli

(State Key Lab. of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Non-destructive testing methods based on ultrasonic waves are gaining increasing attention for the defect inspection of multi-wire strands. Till now, most studies take the strand as a whole assemble when investigating the propagating characteristics of elastic waves. But the studies on the transmission and coupling of elastic waves between individual wires are less reported. This paper studies the coupling transmissibility and attenuation of elastic waves at the level of individual wire via simulation and experiment. The results of two methods are in accordance with each other, showing that the transmissibility between individual wires is independent on the geometric position. Also, it is found that the elastic waves attenuate according to an exponential curve.

Key words: multi-wire strands; elastic waves; piezoelectric ceramics; coupling transmissibility; attenuation

0 引言

钢绞线是由一根直钢丝和外围多根螺旋钢丝绞合而成。由于其良好的力学性能而被广泛用于工程结构中。如它们被用于给混凝土结构预加拉力;在斜拉悬索桥中充当承载结构;用于电梯中的拉绳;还有其作为钢芯被用在高压输电线中。这些结构常处于恶劣的自然和工作环境(如酸雨、风载、空气腐蚀和振动及疲劳等)中,其健康状况直接关系到整个系统的运行和使用者的生命安全,所以确保他们的稳定可靠十分重要。

许多检测方法(如射线法、漏磁法、磁弹法、光纤检测法等)已不同程度地应用于工程实际中来检测钢绞线健康状况,但都存在一定局限性。许多方法

只能检测到可接触到的构件,如混凝土中体外预应力钢绞线或桥梁中拉索等,适用范围受限。而超声导波检测法因其传播距离长,检测全面和效率高等优点^[1-4],在无损检测中得到了越来越多的关注。该技术已应用于管道、锚杆等多种结构中的缺陷^[5-6]。Lanza di Scalea F 和 Rizzo 等^[7-8]利用激光激励宽频的纵向模态对钢绞线中的应力及缺陷的检测结果,证实了利用超声导波检测钢绞线健康状况的可行度和应用于不同工况条件下的钢绞线的健康检测地潜力。由于钢绞线复杂的几何外形和各股线间的耦合,使其研究没有圆柱杆透彻成熟。Treysede 等^[9-11]用半分析有限元法得到了弹性波在单根螺旋结构和 7 芯钢绞线中的传播特性

收稿日期:2013-11-22

基金项目:江苏高校优势学科建设工程基金资助项目;2011年度高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20113218110026);国家“八六三”计划基金资助项目(2013AA041105);国家重点实验室自主课题团队基金资助项目(0513G01)

作者简介:赵华贇(1988-),男,江苏人,硕士,主要从事基于智能材料与结构的高压输电线健康监测方法的研究。通信作者:裘进浩(1963-),男,浙江嵊州人,教授,博士生导师,“千人计划”国家特聘教授、教育部长江学者奖励计划特聘教授,主要从事智能材料与结构方面的研究。E-mail: qiu@nuaa.edu.cn.

和频散曲线,并基于周期有限元法提出了一个数值分析手段,从而减小了螺旋结构的周期长度。Thomas Haag 等^[12]考虑了一个由 2 根共享接触线的圆柱杆组成的简化能量模型,初步探索了钢绞线中接触段线间的耦合特性。然而,大多数研究中,钢绞线都是被视作一维结构,所有股线被看成一个整体,激励和接收都在所有股线实现。这虽然可得弹性波在整个钢绞线结构中的传播特性,但这种研究方式无法得到弹性波在单根股线中的传播特性及弹性波在他们间的传递与耦合。本文选取了 1 根两端受拉的 7 芯钢绞线,从单根钢丝的角度出发,分别通过仿真和实验的方法研究了弹性波在钢丝线中的传递率关系和衰减规律,实验和仿真结果一致,表明在受拉钢绞线中,弹性波从激励钢丝线到其余钢丝线的传递率相同,且弹性波在钢绞线中的传播随距离的增加呈指数规律衰减。

1 圆柱杆中弹性波理论

当弹性波在一个半径为 a 的圆柱杆中传播时,圆柱坐标系下的 3 个位移分量可表示为

$$u_r = U(r) \cos n\theta e^{i(kz - \omega t)} \quad (1)$$

$$u_\theta = V(r) \sin n\theta e^{i(kz - \omega t)} \quad (2)$$

$$u_z = W(r) \cos n\theta e^{i(kz - \omega t)} \quad (3)$$

式中: n 为 0 或整数; ω 为圆频率; k 为波数; t 为时间; r, θ, z 分别为 3 个坐标分量; $U(r), V(r), W(r)$ 分别为 3 个方向的位移幅值。

这 3 个方向(r, θ, z)的运动便构成了圆柱体中的纵向、扭转和弯曲振动 3 种振动形式。

若只考虑纵向振动,由于对称性, $n=0$,以上 3 个位移分量只剩下径向和轴向。将式(1)~(3)代入物理方程,几何方程,且与 $r=a$ 的圆柱表面切向应力为 0 的边界条件($\tau_r = \tau_\theta = \tau_z = 0$)代入 Navier 方程,可得纵向模式的 Pochhammer 频率方程为

$$\frac{2\alpha}{a}(\beta^2 + k^2)J_1(\alpha a)J_1(\beta a) - (\beta^2 - k^2)^2 J_0(\alpha a) \cdot J_1(\beta a) - 4k^2 \alpha \beta J_1(\alpha a)J_0(\beta a) = 0 \quad (4)$$

式中 J_0, J_1 分别为第一类 Bessel 函数的第一阶和第二阶函数, α 和 β 为

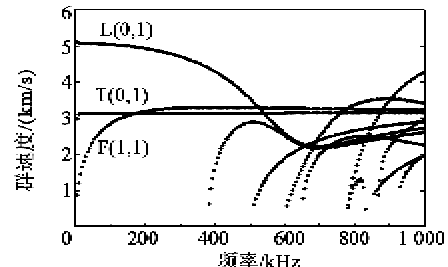
$$\alpha^2 = \omega^2 / c_l^2 - k^2 \quad (5)$$

$$\beta^2 = \omega^2 / c_t^2 - k^2 \quad (6)$$

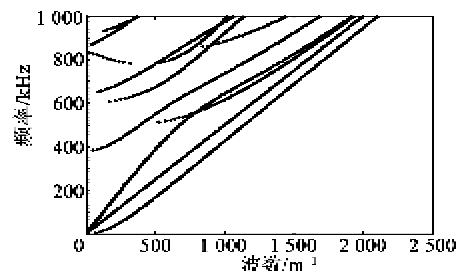
式中: c_l 为材料的纵向波速; c_t 为剪切波速。

图 1 为半径 2.5 mm 的铝杆中弹性波的频散曲线。由图 1(a)可看出,导波存在多模态特性,即在任一频率下存在多个模态,且频率越高,模态越多、越复杂。而在 300 kHz 以下,只存在 3 个模态,分别为纵向 $L(0, 1)$ 模态,扭转 $T(0, 1)$ 模态和弯曲

$F(1, 1)$ 模态,他们以不同的群速度传播。纵向模态 $L(0, 1)$ 的群速度明显大于另外两种模态,且其群速度随频率变化较小。



(a) 群速度-频率图



(b) 频率-波数图

图 1 铝杆中弹性波频散曲线

2 钢绞线中弹性波传播特性仿真

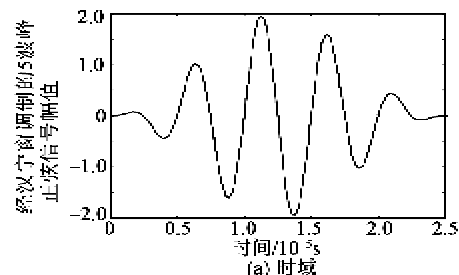
2.1 仿真模型

利用商用有限元软件 Abaqus 对钢绞线中的弹性波的传播特性进行仿真,仿真模型是一段 7 芯钢绞线,如图 2 所示。



图 2 仿真模型

钢绞线总长度为 2 090 mm,公称直径为 $\varnothing 8$ mm。其中左端固支,右端施加均匀载荷来模拟钢绞线服役过程中的受拉情况。A, B, C, D, E, F, G 分别为钢绞线的 7 根钢丝线。在右端单根钢丝上激励弹性波,并在其余位置的多根钢丝线上采集应力响应。激励信号采用经汉宁窗调制的 5 波峰正弦信号,如图 3 所示。



(a) 时域

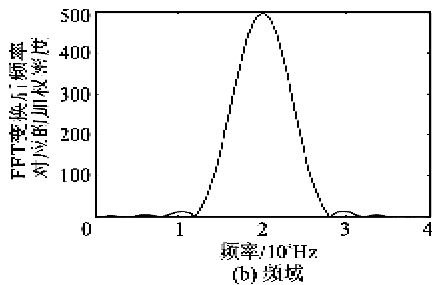


图3 弹性波激励信号

2.2 耦合传递率

由图2可看出,因为几何位置的不同,A、C、D、E、F、G与B有4个独立的相对关系,即A-B、C-B、D-B、E-B,如表1所示。在右端的B线上激励弹性波,并在离激励端1 m位置处的B、C、D、E上采集应力响应,将响应信号对激励信号的幅值归一化,得到结果如图4所示。

表1 B和其余钢丝线的位置关系

类型	A-B	C-B	D-B
描述	A为中心钢丝线	直接接触	相隔
类型	E-B	F-B	G-B
描述	关于A对称	与D-B相同	与C-B相同

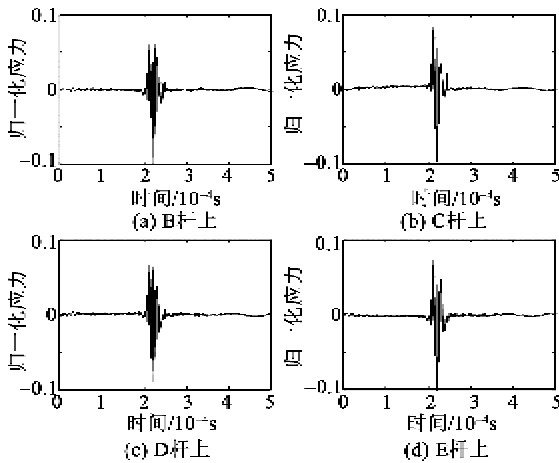


图4 B、C、D、E杆上距激励位置1 m处的应力响应

由图4可看出,即使只在一根钢丝线上激励弹性波,由于各杆间的相互耦合,其余各钢丝线中都会产生弹性波。C、D、E中的应力响应幅值与B中的响应幅值大小相近。由此可看出,经一定距离的传播,各杆间相互耦合,激励钢丝线中的弹性波能量减弱,同时其余钢丝线中的弹性波能量逐渐增加,直到所有钢丝线中弹性波能量达到平衡。另外,所有钢丝线中的弹性波幅值相近,与他们跟B的相对位置无关。即弹性波从B到其余各钢丝线的耦合传递率相等。

2.3 弹性波的衰减

为得到钢丝线中弹性波能量的衰减与传播距离间的关系,同样对钢丝线B进行激励,根据2.2节所得结论,任意取1根钢丝线采集其不同位置处的应力响应,并提取归一化的应力幅值,结果如图5所示。由图可看出,应力幅值与传播距离并不是线性关系,而是指数关系,这与板中弹性波的衰减特性一致。

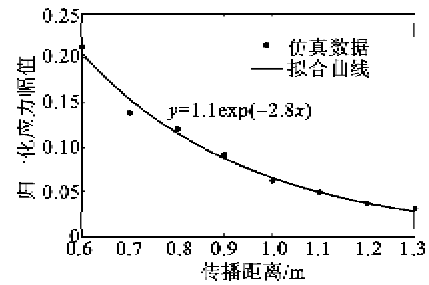


图5 仿真得到的响应幅值与传播距离关系

3 实验研究

3.1 实验装置

整个实验系统由功率放大器、电荷放大器、数据采集卡、计算机、压电片及钢丝线构成,如图6所示。首先由计算机生成5波峰正弦信号,然后经数采卡D/A转换输入功率放大器,再将功率放大后的信号加载到激励压电片上;将采集电压信号经电荷放大,再经数采卡A/D转换传入计算机进行处理。实验所采用压电片由环形压电陶瓷管切割而成,沿着钢丝线的一周贴在单根钢丝线上,如图7所示。

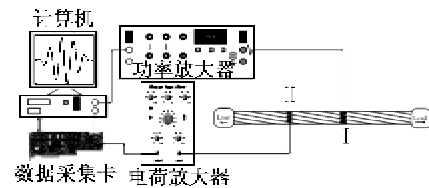


图6 实验系统

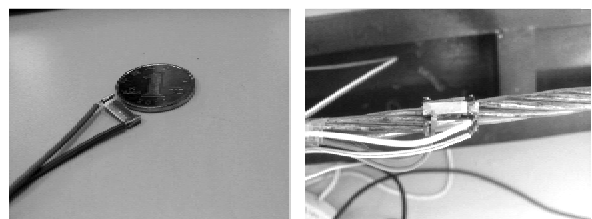


图7 贴在单根钢丝线上的压电片

3.2 传递率实验

与仿真一样,试验中对I处单根钢丝线上施加激励,然后测量距激励压电片0.72 m的II处钢丝

线中的响应。然而与仿真不同的是由于压电片各自性能的细小差异,贴片时胶水多少以及均匀程度等因素干扰,实验直接测得的信号并不能直接表示被测点的实际响应,因而需对压电片上测得信号进行处理。下面通过特殊的实验流程,从实验本身消除这些因素的影响,得到弹性波从钢丝线 B 到其余钢丝线间的传递率关系。

假设 I 端钢绞线中弹性波对应的实际信号与压电片上测得的实验信号间的影响系数为 X,II 端的影响系数为 Y,并假设个钢丝线间的传递函数为 T。

对 I 端 B 施加 U_1 电压激励,那么 B 中实际激励出来的弹性波对应的信号为 $U_1 \cdot X_B$,经过 B 到 B'(B'与 B 为同一根钢丝线,后面的 C'与 C,D'与 D、E'与 E 也是同一根钢丝线,无上标的表示 I 端,有上标的表示 II 端)距离的传播,II 端钢丝线中实际弹性波对应的信号为 $U_1 \cdot X_B \cdot T_{B-B'}$,因而实验测得的 B'上压电片的信号 $R_{B'1}$ 为

$$R_{B'1} = U_1 \cdot X_B \cdot T_{B-B'} \cdot Y_{B'} \quad (7)$$

同样可得 C'上压电片的信号 $R_{C'1}$ 为

$$R_{C'1} = U_1 \cdot X_B \cdot T_{B-C'} \cdot Y_{C'} \quad (8)$$

若对 I 中 C 杆施加 U_2 电压激励,那么 II 处 B',C'的响应分别为

$$R_{B'2} = U_2 \cdot X_C \cdot T_{C-B'} \cdot Y_{B'} \quad (9)$$

$$R_{C'2} = U_2 \cdot X_C \cdot T_{C-C'} \cdot Y_{C'} \quad (10)$$

由式(7)~(10)可得

$$\frac{R_{B'1} R_{C'2}}{R_{C'1} R_{B'2}} = \frac{T_{B-B'} T_{C-C'}}{T_{B-C'} T_{C-B'}} \quad (11)$$

由于对称性有

$$T_{B-B'} = T_{C-C'} \quad (12)$$

$$T_{B-C'} = T_{C-B'} \quad (13)$$

由(11)~(13)可得

$$\frac{T_{B-B'}}{T_{B-C'}} = \sqrt{\frac{R_{B'1} R_{C'2}}{R_{C'1} R_{B'2}}} \quad (14)$$

同理可得

$$\frac{T_{B-B'}}{T_{B-D'}} = \sqrt{\frac{R_{B'1} R_{D'2}}{R_{D'1} R_{B'2}}} \quad (15)$$

$$\frac{T_{B-B'}}{T_{B-E'}} = \sqrt{\frac{R_{B'1} R_{E'2}}{R_{E'1} R_{B'2}}} \quad (16)$$

如此得到了弹性波从 B 到 B'和 C',D',E'的传递率之间的比值关系。

分别激励 I 端的钢丝线 B,C,D,E,测量 II 端相应钢丝线上压电片上的电压,并提取响应幅值,如表

2 所示。

表 2 实验测得各位置压电片响应电压幅值

		接收杆			
		II-B' 电压/V	II-C' 电压/V	II-D' 电压/V	II-E' 电压/V
激 励 杆	I-B	2.00	2.20	2.00	2.68
	I-C	3.00	3.25		
	I-D	2.40		2.30	
	I-E	1.90			2.45

将表 2 中数据代入式(12)~(15)可得 $T_{B-B'}/T_{B-C'}=0.99, T_{B-B'}/T_{B-D'}=0.98, T_{B-B'}/T_{B-E'}=0.98$ 。由传递函数的比值可看出,在允许误差下,B 到各钢丝线的传递率相同,即理想情况下,在 B 上激励,其余各钢丝线上的响应相同,这与仿真结果一致。

3.3 衰减实验

如第 3.2 节所述,用压电片采集的电压信号不能直接当成相应位置钢绞线中的弹性波的实际响应信号,需后续处理,且压电片是粘贴在钢丝线上,无法移动,若用来检测弹性波在钢绞线中的衰减需粘贴多个压电片,这将增加对原结构的影响。本实验专门设计了一种压电换能器作为接收传感器^[13],该换能器由环形钢片和环形压电片构成,如图 8 所示。将换能器紧夹在钢绞线上,弹性波从钢绞线传递到钢片中,由此被压电片检测。改变换能器的放置距离,分别测量了距激励位置 0.2 m,0.3 m,0.4 m,0.5 m,0.6 m,0.7 m,0.8 m,0.9 m 处响应,并记录响应幅值,结果如图 9 所示。实验结果同样显示弹性波在钢绞线中传播呈指数衰减,且衰减率与仿真结果相近。

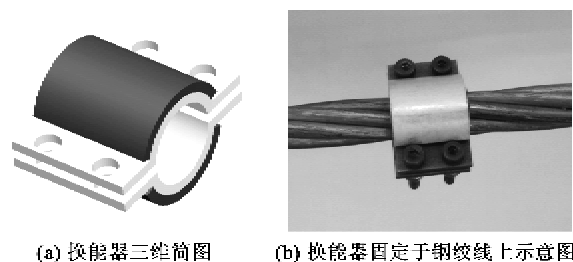


图 8 测量衰减所用的压电换能器结构

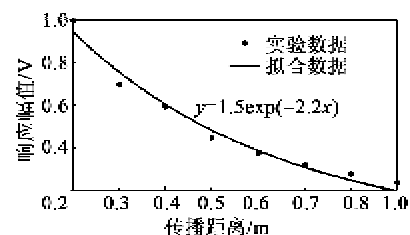


图 9 实验得到的响应幅值与传播距离关系

4 结束语

本文首先对受拉钢绞线中的弹性波的传播特性进行了仿真,在外围单根钢丝线上激励弹性波,并检测其余钢丝线上的响应,结果发现,所有钢丝线上的应力响应相同,而与其间相对位置无关。弹性波以相同的传递率从激励钢丝线上传递到所有钢丝线中,最终达到平衡。因此,若钢绞线的某根钢丝出现损伤,弹性波经损伤后的特征信号经一定距离的传播,将均匀传递到每根钢丝线中,任意采集一根钢丝线上的响应,便可识别出损伤信息;其次对弹性波在钢绞线中的衰减特性进行了研究,结果发现,其幅值与传播距离呈指数关系衰减。最后通过实验验证仿真结果的可靠性,并通过特殊的实验流程,从实验本身消除了压电片自身及人为贴片过程中产生的影响,得到了各杆间的传递规律,且实验结果与仿真结论一致。为便于多次测量,设计了特殊的压电换能器作为接收传感器,研究了弹性波在钢绞线中传播时随着距离增加的衰减情况。由于钢绞线结构复杂,对其中各钢丝线间的耦合关系及弹性波在更多股钢丝线的绞线中的传播特性需进一步研究。

参考文献:

- [1] KRAUTKRAMER J, KRAUTKRAMER H. Ultrasonic testing of materials[M]. New York: Springer-Verlag, 1977.
- [2] SZILARD J. Ultrasonic testing: Non-conventional testing techniques[M]. New York: John Wiley & Sons, 1982.
- [3] RIZZO P, DI SCALEA F L. Wave propagation in multi-wire strands by wavelet-based laser ultrasound [J]. *Experimental Mechanics*, 2004, 44(4): 407-415.
- [4] SIQUEIRA M. The use of ultrasonic guided waves and wavelets analysis in pipe inspection [J]. *Ultrasonics*, 2004, 41(10): 785-797.
- [5] 焦敬品. 管道超声导波检测技术研究进展 [J]. *实验力学*, 2002, 17(1): 1-9.
- [6] 蔡国宁, 章炳华, 严锡明. 超声导波技术检测管道腐蚀的波形特征与识别 [J]. *无损检测*, 2007, 29(7): 372-375.
- [7] LANZA DI S, RIZZO F P, SEIBLE F. Stress measurement and defect detection in steel strands by guided stress waves [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2003, 15(3): 219-227.
- [8] RIZZO P, DI SCALEA F L. Ultrasonic inspection of multi-wire steel strands with the aid of the wavelet transform [J]. *Smart Materials and Structures*, 2005, 14(4): 685.
- [9] TREYSSÈDE F. Numerical investigation of elastic modes of propagation in helical waveguides [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2007, 121: 3398.
- [10] TREYSSÈDE F. Elastic waves in helical waveguides [J]. *Wave Motion*, 2008, 45(4): 457-470.
- [11] TREYSSÈDE F, FRIKHA A. A semi-analytical finite element method for elastic guided waves propagating in helical structures [J]. *Acoustics '08*, 2008: 5995-5999.
- [12] HAAG T. Wave-based defect detection and interwire friction modeling for overhead transmission lines [J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2009, 79(6/7): 517-528.
- [13] LIU Shitao, QIU Jinhao, ZHU Kongjun. Damage monitoring of the transmission lines based on elastic wave [C]// Pennsylvania, PA (USA): 21st International Conference on Adaptive Structures and Technologies (ICAST) University Park, 2010.