◇ 研究报告 ◇

基于ARX系统辨识模型的钢绞线张拉力识别*

钱 骥^{1,2} 李长春^{1†} 罗映相¹ 张俊波^{1,2}

(1 重庆交通大学土木工程学院 重庆 400074)

(2 重庆交通大学 山区桥梁结构与材料教育部工程研究中心 重庆 400074)

摘要 钢绞线是预应力结构和大跨索承体系桥梁的核心受力构件,其实际保有应力值将决定结构的承载能力 和耐久性。以钢绞线超声导波传播过程为独立系统,外在激励和数据采集为系统的输入和输出,通过 ARX 系 统辨识方法分析钢绞线张拉力引起的系统模型参数变化,并以模型参数为特征向量,构建张拉力识别指标。实 验结果表明该识别指标具有良好的单调线性变化规律,确定系数达到0.964;传感器布置在钢绞线端面和侧面 具有相似的规律性,相对而言,端面布置传感器识别指标的敏感性和线性规律更好;重复加卸载过程,识别指 标线性拟合斜率比较稳定,受钢绞线应力加载路径影响较小。 关键词 钢绞线,超声导波,系统辨识,ARX 模型,张拉力识别指标

中图法分类号: U443.38 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2019)06-0986-07 DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2019.06.011

Identification of steel strands tension stress based on ARX system identification model

QIAN Ji^{1,2} LI Changchun¹ LUO Yingxiang¹ ZHANG Junbo^{1,2}

(1 School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

(2 Engineering Research Center of mountain bridge structure and material of Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract Steel strands are the most crucial component in pre-stressed structures and long-span bridges, and its retained stress is the determinant of structure's carrying capacity and durability. The propagation of ultrasonic guide wave is taken as an independent system in steel strands, meanwhile, the extrinsic motivation and data acquisition is taken as the input and output of the system. Then parameters of system model are analyzed by ARX system identification methods which are relevant to strands tension force, and the identification index is proposed which is based on the eigenvector of model parameter. The experimental results illustrate that the identification index possesses a favorable monotone linear regularity and the determination coefficient comes up to 0.964. Sensors arranged at the end face and side face of the strands have similar feature, and the sensibility and regularity embody better in end face sensor correspondingly. The linear fitting slope of identification index is stability in reloading process and influenced by loading paths diminutively.

Key words Steel strands, Ultrasonic guide wave, System identification method, ARX model, Tension identification index

²⁰¹⁹⁻⁰²⁻²⁶ 收稿; 2019-06-08 定稿

^{*}国家自然科学基金项目 (51478347), 山区桥梁结构与材料教育部工程研究中心项目 (QLGCZX-JJ2017-3), 重庆市自然科学基金面上 项目 (cstc2019jcyj-msxmX0624)

作者简介: 钱骥 (1983-), 男, 湖北黄冈人, 博士, 副教授, 研究方向: 结构健康监测与振动控制。

[†]通讯作者 E-mail: 892792312@qq.com

0 引言

预应力钢绞线广泛应用于土木工程建筑物,更 是大跨度桥梁最重要的受力构件,如梁桥的预应力 主筋、拱桥吊杆及斜拉桥拉索等。钢绞线长期处于 高应力状态,对环境侵蚀及结构徐变非常敏感,经常 出现实际保有应力值下降的现象,从而衍生结构开 裂、下挠等病害,降低大跨度结构的承载能力和耐 久性。通常,钢绞线由于其防腐蚀需要而处于层层 保护之中,在其防腐性能提高的同时也增大了钢绞 线日常检测、监测的难度。在役结构钢绞线应力检 测评估一直是土木工程领域面临的技术难题,相对 成熟的钢绞线应力测试技术聚焦于应力增量的检 测且需在早期预埋,无法满足大量在役预应力及索 结构的应用需求。

超声导波是近年来研究较多的一种结构无损 检测方法,相比于传统超声波检测使用的体波,导 波由波导介质边界多次反射形成,其传播特性与介 质的边界条件及局部缺陷密切相关,能够反映波导 体的缺陷特征及力学边界变化,目前已应用于管道、 锚杆等结构的缺陷检测^[1-2]。相比与管道、锚杆这 类规则构件,超声导波在钢绞线中的传播特性更为 复杂。Kwun等^[3]、Treyssède等^[4]、Bartoli等^[5]通 过实验及半解析有限元等方法提出了钢绞线张拉 力引起的导波模态缺失现象。Rizzo等^[6-7]、Chaki 等^[8]、Nucera等^[9]、Liu等^[10]、吴斌等^[11]研究了导 波时频域特征参数随钢绞线张拉力变化规律,构建 了钢绞线张拉力识别因子,但受应力状态、传播距 离影响较大,直接以导波波速的变化判别钢绞线应 力值敏感度偏低。刘增华等[12]通过波动理论、声弹 性理论和实验相结合的方法,得出应力在0.5 GPa 以上时,钢绞线中L(0,1)模态的群速度会随着应力 增大呈近似线性下降,实验结果与理论结果吻合较 好。钱骥等[13-14] 通过实验及有限元模拟等方法提 出了导波能量熵谱和模态转角的方法,建立了导波 模态转角和钢绞线张拉力之间的幂函数关系。众多 研究成果表明,钢绞线中导波传播携带有明显的张 拉力信息,但提出具有宽泛实用条件的张拉力识别 方法仍需要进一步的研究。

本文以工程结构中常用的7芯钢绞线作为研究 对象,通过进行不同应力条件下钢绞线导波传播实 验,将钢绞线中导波传播过程假定为独立系统,通过 辨识系统模型参数随钢绞线应力变化规律,构建具 有更高敏感性的张拉力识别指标,最后讨论了传感 器布置位置、钢绞线加卸载等因素的影响。

1 ARX 系统辨识模型

弹性波在固体中的传播是一个弹性动力学问题,通过波动方程并代入几何边界条件和力学边界 条件,可求解模态特征方程。对于单根高强钢丝而 言,经典柱波导理论己可求得纵波、弯曲波、扭转波 等模态曲线。但是,钢绞线结构复杂,多根钢丝接触 耦合问题使得建立导波传播数学模型非常困难,目 前尚无解析解。

钢绞线在使用过程中,各种外界因素引起的实际保有应力值变化都将直接引起内部钢丝间接触力发生变化,该力学边界条件的改变会引起其间传播的导波模态发生变化。在难以直接解析钢绞线导波模态随张拉力变化规律时,可考虑将导波传播过程理解为一个独立系统,通过外在的导波输入和输出来辨识该系统的模型参数,从而建立模型参数随钢绞线张拉力变化规律。

系统辨识的目的是根据系统的输入、输出,利用 某种误差准则来确定描述系统行为的数学模型^[15]。 ARX模型由于不需要知道过程内部复杂的物理机 理,因此被视为一种"黑箱"模型,模型的建立过程 一般包括以下三个基本步骤:

(1) 输入、输出数据的采集与预处理;

(2) 模型结构的选择和参数估计;

(3) 模型的验证。

ARX 模型结构简单、鲁棒性强, 在噪声较小时, 辨识精度高; 在噪声较大时, 可适当提高模型的阶 次, 来补偿噪声对辨识精度的影响。ARX 模型表示 形式如下^[16]:

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t),$$
 (1)

式 (1) 中: u(t) 为输入序列; y(t) 为输出序列; e(t) 为 零均值的随机噪声; A(q)、B(q) 为关于平移算子 q 的 多项式, 定义为

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots + a_{na} q^{-na}, \quad (2)$$

$$B(q) = b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots + b_{nb} q^{-nb}.$$
 (3)

将式(1)展开为输出形式:

$$y(t) = -a_1 y(t-1) - \dots - a_{na} y(t-na) + b_1 u(t-1) + \dots + b_{nb} u(t-nb) + e(t).$$
(4)

988

$$y(t) = \boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{\theta} + e(t), \qquad (5)$$

式(5)中: φ 为样本集合; θ 为被辨识的参数的集 合, $\theta = [a_1, a_2, \dots, a_{na}, b_1, b_2, \dots b_{nb}]$ 。进而可以将 式(5)写成向量形式:

$$\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{\psi}\boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\varepsilon}, \tag{6}$$

式(6)中: $\psi = [\varphi_1^{\mathrm{T}}, \varphi_2^{\mathrm{T}}, \cdots, \varphi_n^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}, N$ 为样本点数, n 为参数个数, 一般要求 N 远大于 2n。

取残差的平方和为准则函数[16]:

$$J(\theta) = \sum_{i=1}^{N} |e(t)|^{2} = \sum_{i=1}^{N} |y(t) - \varphi^{\mathrm{T}}(t)\theta|^{2}$$
$$= \boldsymbol{Y}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y} + \boldsymbol{\theta}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\psi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\psi}\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}\boldsymbol{\psi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y} - \boldsymbol{Y}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\psi}\boldsymbol{\theta}, \quad (7)$$

求出 θ 的最小二乘估计值 θ_{LS} 的必要条件为

$$\frac{\partial J(\theta)}{\partial(\theta)}\Big|_{\boldsymbol{\theta}=\theta_{\rm LS}} = 0. \tag{8}$$

将式(7)代入式(8)中,可以得到

$$\boldsymbol{\psi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\psi}\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{LS}} = \boldsymbol{\psi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y}.$$
 (9)

如果式(9)中 $\psi^{T}\psi$ 满秩,则[$\psi^{T}\psi$]⁻¹存在,从而可 以得出

$$\theta_{\rm LS} = (\boldsymbol{\psi}^{\rm T} \boldsymbol{\psi})^{-1} \boldsymbol{\psi}^{\rm T} \boldsymbol{Y}.$$
 (10)

根据最小二乘辨识过程,未知模型参数 θ 最可能的值是在实际观测值与计算值之间累计误差的 平方和达到最小值时,这种估计模型的输出能够更 好地接近实际过程的输出。

2 定义钢绞线张拉力识别指标

基于ARX模型参数来识别钢绞线张拉力大小 的过程是通过提取各个不同张拉力条件下系统模 型的自回归参数作为特征向量,以钢绞线张拉到70%F_m(F_m为钢绞线最大力)状态下的模型参数作为基准值,计算各张拉力状态下模型参数与基准值之间距离作为张拉力识别指标 I_{stf}。假设70%F_m张拉力状态下的系统 ARX 模型为

$$y_7(t) + a_{71}y_7(t-1) + \dots + a_{7na}y_7(t-na)$$

= $b_{71}u_7(t-1) + \dots + b_{7nb}u_7(t-nb) + e_7(t)$. (11)

取模型参数*a*₇₁,*a*₇₂,*a*₇₃,...,*a*_{7na}构成特征向 量作为指标值*I*_{stf}计算的基准值,(20% ~ 60%)*F*_m 张拉力状态下的模型为

$$y_i(t) + a_{i1}y_i(t-1) + \dots + a_{ina}y_i(t-na)$$

= $b_{i1}u_i(t-1) + \dots + b_{inb}u_i(t-nb) + e_i(t)$, (12)

式 (12) 中, i 取 2、3、4、5、6。以参数 $a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}, \cdots$, a_{in} 构成特征向量作为指标值 I_{stf} 计算的状态值, 计 算 I_{stf} 如下:

$$I_{\text{stf}} = (a_{71} - a_{i1})^2 + (a_{72} - a_{i2})^2 + \dots + (a_{7na} - a_{ina})^2.$$
(13)

识别指标 I_{stf} 反映了由张拉力引起的钢绞线导波传播特征的变化。

3 实验

采用钢绞线张拉锚固综合试验台进行逐级加 卸载实验(图1~2)。钢绞线为工程中常用的公称直 径D = 15.2 mm 七芯钢绞线,总长度L = 5.5 m, 几何参数及材料参数如表1所示。钢绞线一端锚固, 一端张拉,最大张拉力为182 kN (70% F_m)。先将钢 绞线张拉至52 kN (20% F_m),接下来每次依26 kN (10% F_m)进行逐级加卸载,直至加载到70% F_m 。



Fig. 1 Layout of experiment



图 2 钢绞线张拉锚固试验系统

Fig. 2 Equipment for strands tensioning and anchoring

表1 钢绞线几何及材料参数

Table 1 Geometry and material parameters of steel strand

几何参数	材料参数			
钢丝直径 d_c/mm	5.08	弹性模量 E/GPa	196	
钢绞线直径 d/mm	15.2	泊松比 v	0.29	
外围螺旋钢丝螺距 h/mm	260	密度 $\rho/(\text{kg·m}^{-3})$	7850	
外围螺旋钢丝捻角β/(°)	7.9	公称抗拉强度 $R_{\rm m}/{ m MPa}$	1860	
钢绞线最大力 $F_{\rm m}/{ m kN}$	260			

导波激励与采集系统为美国 PAC 生产的 PCI-2 声发射监测系统,系统可识别频率范围 0~ 4000 kHz,传感器采用 WD 宽频压电换能器,频 带范围 100 kHz~1000 kHz,信号采样率 2000 kHz。 导波激励为步径频率 $\Delta f = 50$ kHz 的一系列单周 期正弦脉冲,激励波源函数如式 (14) 所示:

$$f(t) = \sum_{i=0}^{(f-f_0)/\Delta f} V_i \sin (2\pi (f_0 + i \cdot \Delta f)t), \quad (14)$$

其中: V_i 为矩形窗函数, $f_0 = 100 \text{ kHz}$ 为起始频率, f = 1000 kHz为截止频率, $\Delta f = 50 \text{ kHz}$ 为步径频 率,矩形窗的窗长 $T_i = 1/f_0 + i \cdot \Delta f$ 。



(a) 端面接收

(b) 侧面接收

图 3 接收传感器的布置 Fig. 3 Layout of receiving sensors

导波激发和接收传感器(系统输入和输出)布 置在钢绞线两端(图3)。实验过程中,传感器保持 接触状态不变,当钢绞线加卸载至预定荷载且持载 2 min后,激发端产生激发脉冲,接收端过门槛自动 采集。

4 实验结果分析

4.1 钢绞线 ARX 模型的建立

激发端输入波形(输入波形是通过公式(14)得 出的一系列100 kHz~1000 kHz的单周期正弦脉冲 信号)如图4(a)所示,不同张拉力条件下,接收端实 测波形如图4(b)、图4(c)所示。实验过程保持激励 源不变,激发端及接收端传感器均布置在钢绞线端 面,随钢绞线张拉力增大,钢丝间接触应力发生变 化,实测导波波形幅值明显降低。



图4 实测导波信号



对输出端波形进行去除均值和趋势项处理后, 以激励波形和输出波形作为系统的输入和输出,采 用 ARX 模型进行系统辨识。模型定阶是 ARX 模 型估计过程中重要的一环,阶数的超定和欠定都 会很大程度地影响模型的准确性。最小信息准则 (Akaike information criterion, AIC)法是 ARX 模 型定阶方法中相对成熟的信息量准则法,假设考虑 某个含 $k(k \leq p)$ 个参数的参数模型,其密度函数记 为 $g(y|\theta_k)$,对应的似然函数最大值记为 $g(\hat{\theta}_k|y)$,这 里 θ_k 为未知参数,而 $\hat{\theta}_k$ 为其极大似然估计,则AIC 准则定义为AIC = $-2\ln g(\hat{\theta}_k|y) + 2k$ 。式中第一项 反映模型拟合的优良性,第二项表示对模型采用较 多变量个数的一种"惩罚",最终阶数的确定是权衡 模型拟合效果与变量个数的结果。

对实测数据采用AIC准则法定阶,确定ARX 模型的最佳阶次分别为na = 10、nb = 3, na、nb分别为ARX模型中多项式 $A(q^{-1})$ 、 $B(q^{-1})$ 的 阶次。以式(14)所示单周期正弦脉冲为系统输入, (20%~70%) F_m 荷载状态下实测数据为系统输出, 建立ARX系统辨识模型参数如表2所示。

表2 不同张拉力下系统辨识模型参数

Table 2 Identification model parameters in different to	tension force
---	---------------

建培力	参数									
元1117]	a_1	a_2	a_3	a_44	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}
$0.2F_{ m m}$	-2.419	1.766	0.197	-0.558	-0.085	0.280	-0.049	-0.351	0.490	-0.176
$0.3F_{ m m}$	-2.394	1.752	0.147	-0.494	-0.053	0.194	-0.071	-0.215	0.396	-0.155
$0.4F_{ m m}$	-2.504	2.029	0.039	-0.671	-0.001	0.291	-0.028	-0.201	0.205	-0.039
$0.5F_{ m m}$	-2.610	2.283	-0.134	-0.645	-0.059	0.289	0.089	-0.160	0.011	0.057
$0.6F_{\rm m}$	-2.664	2.487	-0.498	-0.242	-0.263	0.277	-0.087	0.365	-0.449	0.200
$0.7F_{ m m}$	-2.662	2.433	-0.273	-0.663	0.242	-0.169	0.141	0.406	-0.573	0.249

随钢绞线张拉力增大,系统模型参数发生了明显变化。总体而言, [*a*₁, *a*₂, …, *a*₁₀] 中各参数均呈规律性的单调变化,其中部分在增大,部分在减小,仅从参数的变化趋势无法判别钢绞线应力值。

为验证系统辨识模型的准确性,真实值与模型 计算值的拟合度按式(15)计算:

fit =
$$1 - \left(Q / \sum_{i=1}^{n} y^2\right)^{0.5}$$
, (15)

其中:残差平方和

$$Q = \sum_{i=1}^{n} (y - y^*)^2,$$

y为真实的输出值, y*为根据系统模型计算的输出值。

以图 4(a) 所示波形作为系统输入,以70% F_m 对应的 $[a_1, a_2, \cdots, a_{10}]$ 作为模型参数,预测波形与 真实波形如图 5(a) 所示,真实值与预测值之间的残 差如图 5(b) 所示。图 5(b) 中所示残差分布比较均 匀,绝对值不超过 0.03,相对值约为 3%,按式 (15) 计 算拟合度 fit = 97.32%,说明模型定阶合理,拟合度 较高,辨识结果可靠。







4.2 钢绞线张拉力识别指标

实验过程共独立开展了6根钢绞线逐级加卸载实验,采用相同的模型阶数计算模型参数 $[a_1, a_2, \cdots, a_{10}]$,取6根钢绞线70% F_m 状态下的平均值 $[\bar{a}_1, \bar{a}_2, \cdots, \bar{a}_{10}]$ 作为基准值,按式(13)计算张

拉力指标 I_{stf},结果如图6所示。

基于6组独立的钢绞线逐级加载数据构建的张 拉力识别指标 I_{stf} 随张拉力增大呈现出明显的单调 变化规律。由于指标值 I_{stf} 是以70%Fm 作为基准 值,荷载越小将产生更大的模型参数差异,从而识别 指标值也将更大,所以关系曲线表现为负斜率。考 虑到运营期结构的实际受力状态,实验数据没有考 虑20%Fm 以下的受力状态。



图 6 识别指标随张拉力变化曲线



按最小二乘法直线拟合6组数据,采用确定 系数 $R^2 = 1 - \sum_{i=1}^{n} (y_i - f(x_i))^2 / \sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2$ 评 价拟合效果,其中 $f(x_i)$ 为模型预测应力值, y_i 为 实际应力值, \bar{y} 为平均值。计算得到拟合直线斜率 k = -5.59,确定系数 $R^2 = 0.964$,线性变化规律 显著。

以识别指标值 *I*_{stf} 为自变量,以钢绞线张拉力 为因变量,建立钢绞线张拉力 *F* 随实测指标值 *I*_{stf} 之间函数关系如下:

$$F = -0.18 \cdot F_{\rm m} \cdot I_{\rm stf} + 185.28. \tag{16}$$

4.3 传感器布置位置影响

对单根高强钢丝而言,传感器布置在端面及侧 面位置,实测波形中包含的纵波和弯曲波成分不同。 钢绞线尚无导波传播的解析解,端面和侧面传感器 实测波形成分不得而知,实验中分别在端面和侧面 布置传感器分析传感器布置位置对应力识别结果 的影响。相同荷载工况、相同激励源输入条件下,端 面、侧面实测输出波形的识别指标 *I*stf 计算结果如 图7所示。

由图7知,无论传感器布置在端面还是侧面,实 测数据计算的识别指标 *I*stf 曲线表现出相同的单调 变化规律。传感器布置在端面时,最小二乘法直线 拟合 k = -5.93,确定系数 $R^2 = 0.984$,传感器布置 在侧面时 k = -5.46,确定系数 $R^2 = 0.933$ 。相比 较于侧面布置传感器,传感器布置在端面时,拟合 直线斜率 k 值绝对值增大了 8.6%,确定系数增大了 5.5%。 k 值减小将使得在同样的应力变化条件下,识 别指标值的变化更为明显。



图 7 不同位置布置传感器时识别指标曲线 Fig. 7 Identification index curve at different sensors position

总体而言,传感器无论布置在侧面还是端面, 采用基于ARX系统辨识模型参数的张拉力识别指 标均能够反映钢绞线张拉力状态,且均具有较好的 线性变化规律,当采用端面布置传感器将更能提高 识别指标的敏感性和拟合度。

4.4 应力加载路径的影响

预应力结构承载能力检算只考虑钢绞线的状态应力,与钢绞线的加载路径无关,因此,张拉力指标值应尽量避免应力加载路径的影响。钢绞线逐级加卸载两个循环,激发同样的宽频单周期正弦脉冲,端面布置传感器,计算张拉力指标值 *I*stf 随加载等级变化如图8所示,直线拟合参数如表3所示。





Fig. 8 Identification index curve for loading and unloading process

由图8可知,钢绞线逐级加卸载两个循环,加载 与卸载过程中识别指标 I_{stf} 均呈单调的近线性变化 规律,钢绞线的加载路径没有影响识别指标的规律 性。比较两次加卸载循环 k 值变化,第1次加载与 第2次加载、第1次卸载与第2次卸载之间 k 值变化 均较小,分别下降了1.3%和0.9%。相对而言,两次 循环各自的加卸载之间 k 值变化略大,分别下降了 9.9%和9.6%,主要是受加卸载时液压滞后导致的 读数差异所致。总体而言,重复加载时识别指标能 够保持稳定,受加载过程的影响较小。

表 3 直线拟合参数表 Table 3 Parameters of linear fitting

	k	R^2
第1次加载	-5.93	0.984
第1次卸载	-5.34	0.986
第2次加载	-5.85	0.971
第2次卸载	-5.29	0.979

5 结论

(1) 采用系统辨识方法能够有效识别钢绞线张 拉力引起的系统导波传播特性变化,以ARX 系统 辨识模型参数作为特征向量,构建预应力钢绞线张 拉力识别指标 *I*stf,随钢绞线张拉力增大,指标值表 现为明显的单调线性规律,按最小二乘线性拟合效 果良好。

(2) 基于端侧面实测导波数据的张拉力识别指标 *I*stf 随张拉力的增大均呈现出明显的单调线形变化规律,相对而言,端面布置传感器线性拟合 *k* 增大8.6%,确定系数增大5.5%,指标值的敏感性和拟合度更优。

(3) 重复加卸载过程中识别指标具有良好的一致性,两次加卸载循环在加载阶段和卸载阶段直线 *k*值分别下降了1.3%和0.9%,识别指标受加载路径 的影响较小。

参考文献

- Madenga V, Zou D H, Zhang C. Effects of curing time and frequency on ultrasonic wave velocity in grouted rock bolts[J]. Journal of Applied Geophysics, 2006, 59(1): 79–87.
- [2] Carandente R, Ma J, Cawley P. The scattering of the fundamental torsional mode from axi-symmetric defects with

2019 年 11 月

varying depth profile in pipes[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2010, 127(6): 3440–3448.

- [3] Kwun H, Bartels K A, 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.
- [4] Treyssède F, Laguerre L. Investigation of elastic modes propagating in multi-wire helical waveguides[J]. Journal of Sound & Vibration, 2010, 329(10): 1702–1716.
- [5] Bartoli I, Castellazzi G, Marzani A, et al. Prediction of stress waves propagation in progressively loaded seven wire strands[C]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2012.
- [6] 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.
- [7] Rizzo P. Ultrasonic wave propagation in progressively loaded multi-wire strands[J]. Experimental Mechanics, 2006, 46(3): 297–306.
- [8] Chaki S, Bourse G. Guided ultrasonic waves for nondestructive monitoring of the stress levels in prestressed steel strands[J]. Ultrasonics, 2009, 49(2): 162–171.
- [9] Nucera C, di Scalea F L. Monitoring load levels in multiwire strands by nonlinear ultrasonic waves[J]. Structural Health Monitoring, 2011, 10(6): 617–629.
- [10] Liu X, Wu B, Qin F, et al. Observation of ultrasonic guided wave propagation behaviours in pre-stressed multiwire structures[J]. Ultrasonics, 2017, 73: 196–205.
- [11] 吴斌,张瑞芳,刘秀成,等.基于纵向模态超声导波陷频特性的钢绞线拉力测量新方法 [J]. 机械工程学报, 2016, 52(12): 9-15.

Wu Bin, Zhang Ruifang, Liu Xiucheng, et al. A new method for tension measurement of steel strands based on notch frequency characteristics of longitudinal mode ultrasonic guided waves[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52 (12): 9–15.

- [12] 刘增华, 刘溯, 吴斌, 等. 预应力钢绞线中超声导波声弹性效应的试验研究 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(2): 22-27.
 Liu Zenghua, Liu Su, Wu Bin, et al. Experimental study on acoustic elastic effects of ultrasonic guided waves in prestressed steel strands[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46 (2): 22-27.
- [13] 钱骥, 陈鑫, 蒋永, 等. 基于导波能量谱的钢绞线腐蚀损伤识别研究 [J]. 振动与冲击, 2018, 37(20): 115–121.
 Qian Ji, Chen Xin, Jiang Yong, et al. Steel strands corrosion identification based on guide wave energy spectrum[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(20): 115–121.
- [14] Qian J, Chen X, Sun L, et al. Numerical and experimental identification of seven-wire strand tensions using scale energy entropy spectra of ultrasonic guided waves[J]. Shock and Vibration, 2018(6): 1–11.
- [15] 杨承志,孙棣华,张长胜.系统辨识与自适应控制 [M].重庆: 重庆大学出版社,2003.
- [16] 刘党辉, 蔡远文, 苏永芝, 等. 系统辨识方法及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.