

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.202000930



本刊网刊

悬索桥索夹螺杆轴力超声识别的影响因素分析及应用

陈鑫^{1,2,3}, 朱劲松¹, 叶仲韬^{2,3}, 伊建军^{2,3}

(1.天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2.中铁大桥科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430034;
3.桥梁结构健康与安全国家重点实验室, 湖北 武汉 430034)

摘要:为有效评估悬索桥索夹螺杆轴力的损失程度,对悬索桥索夹螺杆轴力超声识别方法进行了影响因素分析及实桥应用。首先,基于声弹性效应建立螺杆轴力计算公式,并用于螺杆轴力识别;然后,分析无应力声时差异和应力系数差异对识别精度的影响;最后,将该方法用于识别螺杆张拉效率和梁段吊装过程中的螺杆轴力损失。结果表明:1)悬索桥索夹螺杆声弹性效应明显,螺杆轴力识别误差均在1.1%以内。2)传感器耦合状态和螺杆几何、材料参数差异均会影响螺杆无应力声时,从而影响螺杆轴力识别精度,二者引起的轴力识别偏差分别为47.7和43.7 kN。3)不同螺杆应力系数存在差异,标定螺杆与待测螺杆应力系数差异引起的轴力识别偏差为4.75%。4)通过实测声时计算螺杆张拉效率来控制螺母拧紧程度,螺杆张拉效率达到94%以上,较未控制螺母拧紧程度前最大增加了95.93%;索夹螺杆轴力随梁段重量的增加损失严重,实测索夹平均轴力最低为424.32 kN,仅达到设计轴力的56.58%,在梁段吊装过程中应及时对索夹螺杆进行补张拉,确保施工安全。

关键词:悬索桥;索夹;螺杆;轴力识别;声弹性效应;影响因素分析

中图分类号:U446.3

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2021)06-0142-06

Influence Factor Analysis and Application of Ultrasonic Method for Identifying Cable Clamp Bolt Axial Force in Suspension Bridge

CHEN Xin^{1,2,3}, ZHU Jingsong¹, YE Zhongtao^{2,3}, YI Jianjun^{2,3}

(1.School of Civil Eng., Tianjin Univ., Tianjin 300072, China; 2.China Railway Bridge Sci. Research Inst., Ltd., Wuhan 430034, China;
3.State Key Lab. of Bridge Structure Health and Safety, Wuhan 430034, China)

Abstract: To effectively evaluate the loss of axial force for the bolts in cable clamp of suspension bridge, the influence factors analyses and application of ultrasonic identification method for cable clamp bolt axial force in suspension bridge were carried out. Firstly, the axial force calculation formula was established based on the acoustic elastic effect, and the accuracy of this formula was verified by experiments. Then, effects of the non-stress acoustic time difference and stress coefficient difference on the recognition accuracy was analyzed. Finally, this method was utilized to identify the tension efficiency and the axial force loss during the lifting process. The results show that: 1) The acoustoelastic effect of bolts is obvious and the recognition error of screw axial force is less than 1.1%. 2) Identification errors caused by the coupling state of sensors and the bolt geometry and material parameters are 47.7 kN and 43.1 kN, respectively. 3) The stress coefficients of different bolts are different. Identification deviation caused by the difference of stress coefficients between calibrated bolts and tested bolts is 4.75%. 4) With the increase of screw nut tightening degree, the tension efficiency can reach more than 94%, which is 95.93% higher than that before the tightening degree of nut is not controlled. The bolt axial force is seriously lost with the increase of beam weight. The measured minimum average axial force of cable clamps is 424.32 kN, which is only 56.58% of the designed axial force. In the process of beam section hoisting, the cable clamp bolts should be tensioned in

收稿日期:2020-10-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51578370)

作者简介:陈鑫(1994—),男,博士生.研究方向:桥梁健康监测及损伤识别. E-mail: chenxin_bsri@tju.edu.cn

网络出版时间:2021-10-22 11:46:00

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.tb.20211018.0856.003.html>

time to ensure construction safety.

Key words: suspension bridge; cable clamp; bolt; axial force identification; acoustoelastic effect; influence factor analysis

悬索桥索夹螺杆轴力是保障索夹抗滑移能力的关键因素。受材料性能、张拉工艺及运营环境的影响,索夹螺杆轴力往往存在不同程度的损失,造成索夹滑移,对结构整体稳定和承载力产生不利影响^[1]。

目前,常规的螺杆轴力识别方法主要有扭矩法^[2]、反拉法^[3]、应变法^[4],但受测试精度、检测效率及适用范围的限制,这些方法均难以在悬索桥螺杆轴力识别中推广应用。超声法具有操作简单、检测速度快、识别精度高、适用范围广等优点,近年来在应力识别中得到广泛应用^[5-7]。声弹性理论是超声法用于材料应力识别的重要理论之一。Chen等^[8-9]最先将声弹性效应用于杆类构件的轴向应力检测,提出杆中应力的增大会造成波速下降。Rizzo等^[10-11]进一步分析了拉力对钢绞线中超声传播特性的影响。Loveday等^[12-13]采用半解析有限元方法分析了钢轨中的声弹性效应,从理论上验证了声弹性效应在材料应力识别中的有效性。刘飞等^[14-15]采用有限元特征频率法计算了板、杆类构件的声弹性常数频散曲线,并分析了声弹敏感模态与最优激励频率。Pei等^[16]研究垂直于传播方向的应力对Lamb波传播的影响,提出高阶Lamb波的声弹性效应更为显著。丁旭^[17]、Liu^[18]等分别研制了适用于螺栓、钢绞线轴力识别的电磁超声测量系统。何文^[19-20]、贾雪^[21]、许西宁^[22]、Chaki^[23]等基于声弹性理论有效识别螺栓、钢轨和钢绞线中的轴向应力。张闯^[24]、马子奇^[25]等将声弹性效应用于金属板材及高速列车底架的残余应力检测,均取得了不错的效果。但由于声弹性是一种弱效应,其识别精度受测试质量、螺杆间的几何、材料参数等因素影响较大。目前,对于螺杆轴力超声识别方法影响因素的分析仍有待进一步研究。声弹性理论在多领域的成功应用验证了其可靠性和适用性,但该方法在悬索桥索夹螺杆轴力识别中的应用仍研究较少。

本文基于声弹性理论,通过标定应力系数和温度系数建立螺杆轴力计算公式,进行悬索桥索夹螺杆轴力识别,分析了标定螺杆与待测螺杆间的无应力声时差异和应力系数差异对轴力识别精度的影响,并将该螺杆轴力识别方法用于实桥螺杆张拉效率和施工阶段螺杆轴力损失识别。

1 螺杆轴力识别方法

根据声弹性效应^[21],螺杆轴力与纵波波速存在线性对应关系,即:

$$V_{\sigma} = V_0(1 + K\sigma) \quad (1)$$

式中, K 为声弹性系数, σ 为螺杆应力, V_0 为无应力声速, V_{σ} 为应力为 σ 时的螺杆声速。

已有研究表明^[26],温度与声速同样存在线性变化关系,即:

$$V_t = V_0(1 + \alpha\Delta T) \quad (2)$$

式中: α 为温度系数; $\Delta T = T - T_0$ 为温度变化量, T 为实测螺杆温度, T_0 为基准温度; V_t 为温度变化 ΔT 的螺杆声速。

假定螺杆长度为 L ,螺杆夹持长度为 L_0 ,螺杆张拉前后温度不变,则由于应力变化引起的声时变化量 ΔS 可由式(3)计算:

$$\Delta S = \frac{L_0(1 + \sigma/E + \beta\Delta T)}{V_0(1 + K\sigma)(1 + \alpha\Delta T)} - \frac{L_0(1 + \beta\Delta T)}{V_0(1 + \alpha\Delta T)} \quad (3)$$

式中, E 为螺杆弹性模量, β 为材料线膨胀系数。

$\alpha\Delta T$ 、 $K\sigma$ 均远小于1,可将式(3)作泰勒展开,取 $\alpha\Delta T$ 、 $K\sigma$ 的一级近似^[26],可得:

$$\Delta S = (1/E + K + K\beta\Delta T + \alpha\Delta T(1/E + K))\sigma L_0/V_0 + (K^2 + K/E)\sigma^2 L_0/V_0 \quad (4)$$

式(4)中的非线性项远小于线性项,可忽略不计。令

$$K_s = V_0/(1 + EK) \quad (5)$$

$$K_t = \frac{\alpha + \alpha EK + \beta EK}{1 + EK} \quad (6)$$

则螺杆轴力 F 可由式(7)计算:

$$F = \frac{EAK_s}{L_0(1 + K_t\Delta T)}\Delta S \quad (7)$$

式中, A 为螺杆截面积, K_s 为应力系数, K_t 为温度系数。

通过标定应力系数 K_s 和温度系数 K_t ,代入式(7),得到螺杆轴力计算公式;根据螺杆张拉前后的声时变化 ΔS ,即可实现螺杆轴力识别。

2 试验

2.1 试验概况

采用中铁大桥科学研究院有限公司研制的螺杆轴力测试系统对螺杆轴力进行测试。待测螺杆采用杨泗港长江大桥索夹螺杆,螺杆设计轴力 $P=750$ kN,长 $L=1\ 080$ mm,直径 $D=48.75$ mm,弹性模量 $E=209$ GPa,密度 $\rho=7\ 830$ kg/m³。将待测螺杆固定在MTS 1000 kN万能试验机上进行逐级张拉,每级荷载为50 kN,最大张拉力为950 kN,压电超声传感器位于待测螺杆端部,同时在螺杆表面布置2个温度传感器。激励荷载为0.1 μ s的窄带脉冲,信号采样率为80 MHz。试验装置如图1所示。

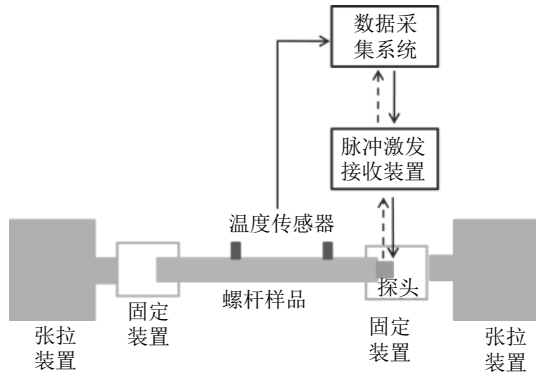


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

2.2 螺杆轴力识别

令基准温度 $T_0=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，按照 100 kN 的步径荷载将螺杆从 0 张拉至 900 kN，实测不同轴力下的声时和温度进行线性拟合，得到螺杆应力系数 $K_s=0.7686\text{ mm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$ ，温度系数 $K_t=2.37\times 10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。将 K_s 、 K_t 代入式 (7)，得到螺杆轴力计算公式。

同时，将螺杆按照 100 kN 的步径荷载将螺杆从 150 kN 张拉至 950 kN，实测不同轴力下的声时和温度，计算不同轴力下的声时差，代入轴力计算公式 (7)，进行轴力识别，识别结果如表 1 所示。

表 1 螺杆轴力识别结果

Tab. 1 Identification results of bolt axial force

声时差/ μs	计算轴力/kN	实际轴力/kN	偏差/%
0.4250	150.41	150	0.27
0.7125	252.50	250	1.00
0.9875	350.16	350	0.05
1.2625	447.81	450	-0.49
1.5375	545.46	550	-0.83
1.8125	643.11	650	-1.06
2.1125	749.64	750	-0.05
2.4000	851.73	850	0.20
2.7000	958.26	950	0.87

由表 1 可知，螺杆轴力识别误差均在 1.1% 以内，螺杆声弹性效应明显，通过标定螺杆应力系数和温度系数建立螺杆轴力计算公式可有效识别螺杆轴力。

3 影响因素分析

3.1 无应力声时的影响

根据式 (7)，对螺杆应力系数和温度系数进行标定后，通过实测声时变化量即可识别螺杆轴力。对于运营期悬索桥，索夹螺杆已张拉完毕，无法得到待测螺杆的实测无应力声时，因此，实桥检测时往往把标定螺杆的无应力声时与待测螺杆实测声时差值作为声时变化量。然而，标定螺杆与待测螺杆不可避免地存在传感器耦合状态及几何、材料参数差异，使得标定螺杆无应力声时与待测螺杆无应力声时往往存在偏差，影响轴力识别精度。

3.1.1 传感器耦合状态差异

为分析传感器耦合状态差异引起的无应力声时偏差对轴力识别的影响，在同一螺杆中进行 9 次无应力声时测试，每次试验前均重新调整传感器耦合状态。不同耦合状态下的螺杆无应力声时如表 2 所示。

表 2 不同耦合状态下的螺杆无应力声时

Tab. 2 Acoustic time without stress under different coupling states

试验次数	无应力声时/ μs
1	368.7972
2	368.8122
3	368.7313
4	368.7411
5	368.7617
6	368.7438
7	368.8655
8	368.8592
9	368.8161

由表 2 可知，由于传感器耦合状态差异，同一螺杆无应力声时差异明显。9 次试验中，螺杆无应力声时最大相差 0.1342 μs 。根据前文分析，声时变化 1 μs 引起的轴力变化为 355.1 kN 左右。最不利情况下，该无应力声时偏差引起的轴力识别误差约为 47.7 kN。

3.1.2 螺杆几何及材料参数差异

为分析螺杆几何及材料参数差异引起的无应力声时偏差对轴力识别的影响，选取 5 根典型螺杆，进行无应力声时测试，每根螺杆分别进行 5 次重复试验，取 5 次重复试验的平均声时作为螺杆的无应力声时。不同螺杆的无应力声时如表 3 所示。

表 3 不同螺杆无应力声时

Tab. 3 Acoustic time without stress for different bolts

螺杆编号	无应力声时/ μs	偏差/ μs
1 [#]	368.6107	-0.1231
2 [#]	368.6982	-0.0356
3 [#]	368.7831	0.0493
4 [#]	368.7920	0.0582
5 [#]	368.7850	0.0512
平均值	368.7338	—

由表 3 可知，由于螺杆几何及材料参数差异，不同螺杆的无应力声时差异明显。采用各螺杆平均无应力声时作为代表值时，无应力声时最大偏差 0.1231 μs 。根据前文分析，声时变化 1 μs 引起的轴力变化为 355.1 kN 左右，则该无应力声时偏差引起的轴力识别误差约为 43.7 kN。

3.2 应力系数差异的影响

由于标定螺杆与待测螺杆不可避免存在几何、材料参数差异，使得标定螺杆与待测螺杆的应力系数存在差异，从而影响轴力识别精度。为分析由于螺杆几何及材料参数差异引起的应力系数偏差对轴力

识别的影响,对5根典型螺杆进行应力系数标定,不同螺杆应力系数如表4所示。

表4 不同螺杆应力系数

Tab. 4 Stress coefficients of different bolts

螺杆编号	应力系数/ (mm·μs ⁻¹)	偏差/ (mm·μs ⁻¹)	偏差率/%
1 [#]	0.7686	-0.0099	1.27
2 [#]	0.7548	-0.0237	3.05
3 [#]	0.8083	0.0298	3.83
4 [#]	0.7451	-0.0334	4.29
5 [#]	0.8155	0.0370	4.75
平均值	0.7785	—	—

由表4可知,由于螺杆几何及材料参数差异,不同螺杆应力系数差异明显。采用各螺杆平均应力系数作为代表值时,应力系数最大偏差0.037 mm·μs⁻¹,偏差率达到4.75%,则由于螺杆几何、材料参数差异引起的应力系数偏差对轴力识别精度的影响为4.75%。

4 工程应用

4.1 工程概况

武汉杨泗港长江大桥主跨1700 m,是世界上最大跨度的双层悬索桥。大桥主跨采用骑跨式吊索,边跨未设计吊索,吊索索夹均采用左右对半的结构形式,螺杆从索夹上下部穿过,通过张拉螺杆保证索夹具有足够的抗滑移性能。螺杆设计轴力为750 kN,安装张拉力为1070 kN,螺杆几何及材料参数与标定试验一致。

为提高索夹螺杆张拉施工质量,保证索夹具有足够的抗滑移性能,在大桥梁段吊装过程中,对典型索夹螺杆进行检测,检测工作照如图2所示。



图2 检测工作照

Fig. 2 Inspection work photo

4.2 螺杆张拉效率

索夹螺杆采用索夹拉伸器及配套的拉伸泵进行张拉,在张拉到设计吨位时,将螺母拧紧,将拉伸泵卸载,完成螺杆的张拉。在螺母拧紧、拉伸泵卸载后,由于螺杆回缩,螺杆轴力存在不可避免的损失,实桥中往往采用高于设计轴力的张拉力来保证螺杆轴力达到设计标准。为保证张拉完毕后螺杆中的真实轴力达到设计要求,应提高螺母拧紧程度,以降低螺杆回缩引起的轴力损失,但由于螺母拧紧程度缺乏衡量标准,使得张拉完成后螺杆中的真实轴力离散性较大,存在一定的安全隐患。

为控制螺杆张拉完成后螺母的拧紧程度,定义螺杆张拉完成后的真实轴力与设计张拉力的比值作为张拉效率 W ,结合式(7),张拉效率 W 可由式(8)表示。

$$W = \frac{F_2}{F_1} = \frac{\frac{EAK_s}{L_0(1+K_t\Delta T)}\Delta S_2}{\frac{EAK_s}{L_0(1+K_t\Delta T)}\Delta S_1} = \frac{\Delta S_2}{\Delta S_1} = \frac{S_2 - S_0}{S_1 - S_0} \quad (8)$$

式中, S_1 为张拉至设计张拉力时的螺杆实测声时, S_2 为张拉完成后的螺杆实测声时, S_0 为螺杆无应力声时。

由式(8)计算螺杆张拉效率,如图3所示。

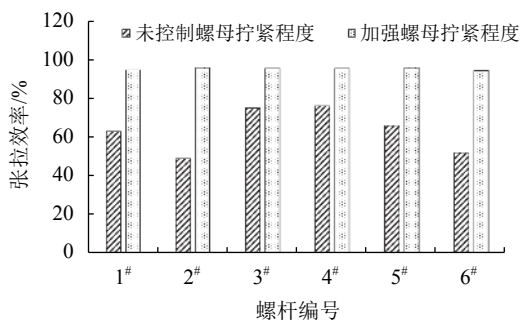


图3 螺杆张拉效率

Fig. 3 Tensoning efficiency of bolts

由图3可知:在未控制螺母拧紧程度前,螺母拧紧较为随意,螺杆轴力张拉效率较低,各螺杆张拉效率离散性较大,1[#]~6[#]螺杆张拉效率在49.10%~76.50%之间。通过提高螺母拧紧程度,螺杆轴力张拉效率提升显著,所有螺杆张拉效率均达到94.00%以上,较未控制螺母拧紧程度相比,最大增加了95.93%。基于实测声时计算螺杆张拉效率,可有效控制螺母拧紧程度,降低螺杆回缩引起的轴力损失。

4.3 梁段吊装过程中的螺杆轴力损失

主缆直径随着梁段的吊装逐渐减小,使得螺杆轴力存在不同程度的损失。为分析实桥索夹螺杆轴力损失情况,对张拉完毕的S6[#]、S7[#]、S8[#]、X6[#]、X7[#]、X[#]共6个索夹螺杆轴力进行检测。为保证识别精度,

均采用实测待测螺杆无应力声时进行轴力识别,检测结果如图4所示。

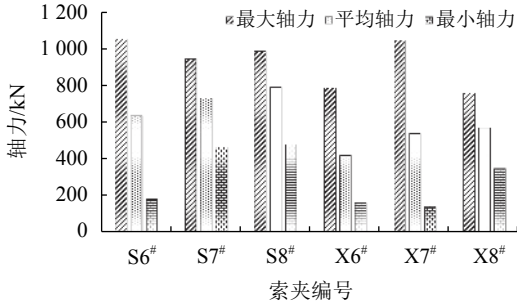


图 4 不同索夹螺杆轴力检测结果

Fig. 4 Detection results of different cable clamps

由图4可知:索夹螺杆轴力损失严重,除S8#索夹外,其余索夹螺杆平均轴力均低于设计轴力。X6#索夹螺杆平均轴力最低,为424.32 kN,仅达到设计轴力的56.58%。所有检测螺杆中,轴力最低值为139.96 kN,仅达到设计轴力的18.66%。

5 结 论

1) 悬索桥索夹螺杆声弹性效应明显,螺杆轴力识别误差均在1.1%以内,通过标定螺杆应力系数和温度系数建立螺杆轴力计算公式,可有效识别螺杆轴力。

2) 传感器耦合状态和螺杆几何、材料参数差异均会影响螺杆无应力声时,从而影响螺杆轴力识别精度。最不利情况下,传感器耦合状态引起的轴力识别偏差为47.7 kN;螺杆几何、材料参数差异引起的轴力识别偏差为43.7 kN。

3) 不同螺杆应力系数存在差异,标定螺杆与待测螺杆应力系数差异引起的轴力识别偏差为4.75%。

4) 实桥螺杆张拉效率受螺母拧紧程度的影响较大。通过实测声时计算螺杆张拉效率来控制螺母拧紧程度,螺杆张拉效率达到94.00%以上,较未控制螺母拧紧程度前最大增加了95.93%。索夹螺杆轴力随梁段重量的增加损失严重,实测索夹平均轴力最低为424.32 kN,仅达到设计轴力的56.58%,在梁段施工过程中应及时对索夹螺杆进行补张拉,确保施工安全。

参考文献:

[1] Yi Jianjun, Peng Xumin, Wang Bo, et al. Ultrasonic inspection technique for axial forces of bolts in cable clamps of suspension bridge[J]. *Bridge Construction*, 2019, 49(Supp1): 68-73. [伊建军, 彭旭民, 王波, 等. 悬索桥索夹螺杆轴力超声检测技术[J]. *桥梁建设*, 2019, 49(增刊1): 68-73.]

[2] Wang Peng, Chen Ansheng, Zhang Huiwu, et al. Experimental study of the factors effecting on bolt torque coefficient[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2013, 28(3): 34-40. [王

朋, 陈安生, 张会武, 等. 螺栓扭矩系数影响因素的试验研究[J]. *实验力学*, 2013, 28(3): 34-40.]

- [3] Ai Huilin, Chen Chaowei, Dai Wenda. Study of rapid inspection method for under-anchorage effective prestress in prestressed beams[J]. *World Bridges*, 2015, 43(4): 48-52. [艾辉林, 陈朝慰, 戴文达. 预应力梁锚下有效预应力的快速检测方法研究[J]. *世界桥梁*, 2015, 43(4): 48-52.]
- [4] Lan Chunguang, Liu Hang, Zhou Zhi. Experimental investigation of prestress loss in PC beams based on BOTDA-FBG smart steel strands[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(9): 55-61. [兰春光, 刘航, 周智. 基于BOTDA-FBG智能钢绞线的预应力损失监测[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(9): 55-61.]
- [5] Chen Xin, Zhu Jingsong, Qian Ji, et al. Steel strands tension identification using multi-scale energy entropy of ultrasonic guided waves[J]. *Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis*, 2020, 40(4): 745-750. [陈鑫, 朱劲松, 钱骥, 等. 基于导波多尺度能量熵的钢绞线张拉力识别[J]. *振动、测试与诊断*, 2020, 40(4): 745-750.]
- [6] Qian Ji, Li Changchun, Luo Yingxiang, et al. Identification of steel strands tension stress based on ARX system identification model[J]. *Applied Acoustics*, 2019, 38(6): 986-992. [钱骥, 李长春, 罗映相, 等. 基于ARX系统辨识模型的钢绞线张拉力识别[J]. *应用声学*, 2019, 38(6): 986-992.]
- [7] Qian Ji, Yang Jinchuan, Li Changchun, et al. Tensile force calculation of steel strands based on guided wave mode bifurcation angles[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Sciences)*, 2018, 37(11): 1-7. [钱骥, 杨金川, 李长春, 等. 基于导波模式转角的钢绞线张拉力计算方法研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2018, 37(11): 1-7.]
- [8] Chen H L, He Y, Gangarao H V. Measurement of prestress force in the rods of stressed timber bridges using stress waves[J]. *Materials Evaluation*, 1998, 56(8): 977-981.
- [9] Chen H L, Wissawapaisal K. Application of wigner-ville transform to evaluate tensile forces in seven-wire prestressing strands[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2002, 128(11): 1206-1214.
- [10] Rizzo P, Scalea F L D. Wave propagation in multi-wire strands by wavelet-based laser ultrasound[J]. *Experimental Mechanics*, 2004, 44(4): 407-415.
- [11] Rizzo P. Ultrasonic wave propagation in progressively loaded multi-wire strands[J]. *Experimental Mechanics*, 2006, 46(3): 297-306.
- [12] Loveday P W. Semi-analytical finite element analysis of elastic waveguides subjected to axial loads[J]. *Ultrasonics*, 2009, 49(3): 298-300.
- [13] Loveday P W, Wilcox P D. Guided wave propagation as a measure of axial loads in rails[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2010, 7650

- (23):1-8.
- [14] Liu Fei,Wu Bin,He Cunfu,et al.Determination of surveying mode and excitation frequency for waveguard structure stress measurement by use of acoustoelastic effect of guided waves in bar[J].*Journal of Vibration and Shock*,2015,34(1):24-28.[刘飞,吴斌,何存富,等.杆中导波声弹敏感模态与激励频率的确定方法[J].*振动与冲击*,2015,34(1):24-28.]
- [15] Liu Fei,Wu Bin,He Cunfu,et al.Analysis of acoustoelastic effect for low-order guided wave modes in elastic plate[J].*Journal of Beijing University of Technology*,2013,39(6):823-827.[刘飞,吴斌,何存富,等.弹性板中低阶导波模态声弹性效应分析[J].*北京工业大学学报*,2013,39(6):823-827.]
- [16] Pei N,Bond L J.Higher order acoustoelastic Lamb wave propagation in stressed plates[J].*The Journal of the Acoustical Society of America*,2016,140(5):3834-3843.
- [17] Ding Xu,Wu Xinjun.Development of EMAT based axial load measurement system for in-service bolts[J].*Nondestructive Testing*,2016,38(6):48-52.[丁旭,武新军.在役螺栓轴力电磁超声测量系统的研制[J].*无损检测*,2016,38(6):48-52.]
- [18] Liu Z,Zhao J,Wu B,et al.Configuration optimization of magnetostrictive transducers for longitudinal guided wave inspection in seven-wire steel strands[J].*NDT and E International*,2010,43(6):484-492.
- [19] He Wen,Wang Cheng.Guided wave nondestructive testing of axial stress in the stud[J].*Chinese Journal of Computational Mechanics*,2009,26(4):604-607.[何文,王成.基于导波技术的螺柱轴力无损检测[J].*计算力学学报*,2009,26(4):604-607.]
- [20] He Wen,Wang Cheng,Ning Jianguo,et al.Guided wave determination method of service load in partially grouted bolt[J].*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2009,28(9):1767-1772.[何文,王成,宁建国,等.端锚锚杆工作载荷的导波确定法[J].*岩石力学与工程学报*,2009,28(9):1767-1772.]
- [21] Jia Xue,Wang Xuemei,Gan Wencheng,et al.Research on calibration of bolt's axial stress based on acoustoelastic effect[J].*China Measurement and Testing Technology*,2018,44(3):23-27.[贾雪,王雪梅,甘文成,等.声弹性效应螺栓轴向应力标定试验研究[J].*中国测试*,2018,44(3):23-27.]
- [22] Xu Xining,Ye Yangsheng,Yu Zujun,et al.The method to measure rail stress based on acousto-elastic effect[J].*Journal of Beijing Jiaotong University*,2015,39(4):37-43.[许西宁,叶阳升,余祖俊,等.基于声弹性效应的钢轨应力检测方法[J].*北京交通大学学报*,2015,39(4):37-43.]
- [23] Chaki S,Bourse G.Guided ultrasonic waves for non-destructive monitoring of the stress levels in prestressed steel strands[J].*Ultrasonics*,2009,49(2):162-171.
- [24] Zhang Chuang,Wang Biao,Cao Xiaolin,et al.Researches on on-line detection methods of residual stress of aluminum plates based on electromagnetic loading[J].*Proceedings of the CSEE*,2019,39(24):7429-7435.[张闯,王标,曹晓琳,等.基于电磁加载的铝板残余应力在线检测方法研究[J].*中国电机工程学报*,2019,39(24):7429-7435.]
- [25] Ma Ziqi,Liu Xuesong,Zhang Shiping,et al.Stress analysis of high speed train underframe welding deformation by ultrasonic method[J].*Transactions of the China Welding Institution*,2013,34(5):49-52.[马子奇,刘雪松,张世平,等.高速列车底架焊接变形的超声波法应力分析[J].*焊接学报*,2013,34(5):49-52.]
- [26] Zhang Jun,Gu Linyi,Qian Xiaolin,et al.Ultrasonic measurement of high strength bolt axial tension in steel construction[J].*Chinese Journal of Mechanical Engineering*,2006,42(2):216-220.[张俊,顾临怡,钱筱林,等.钢结构工程中高强度螺栓轴向应力的超声测量技术[J].*机械工程学报*,2006,42(2):216-220.]

(编辑 张凌之)

引用格式: Chen Xin,Zhu Jingsong,Ye Zhongtao,et al.Influence factor analysis and application of ultrasonic method for identifying cable clamp blot axial force in suspension bridge[J].*Advanced Engineering Sciences*,2021,53(6):142-147.[陈鑫,朱劲松,叶仲韬,等.悬索桥索夹螺杆轴力超声识别的影响因素分析及应用[J].*工程科学与技术*,2021,53(6):142-147.]