

DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.23060802 CSTR: 32055.14.sxjs.1000-3630.23060802

引用格式: 陈亮, 王佳宁, 曹资源, 等. 温度对超声法识别螺杆紧固力影响的足尺试验[J]. 声学技术, 2025, 44(1): 87-92. [CHEN Liang, WANG Jianing, CAO Ziyuan, et al. Full scale experiment on the influence of temperature on ultrasonic identification of screw tightening force[J]. Technical Acoustics, 2025, 44(1): 87-92.]

温度对超声法识别螺杆紧固力影响的足尺试验

陈亮¹, 王佳宁², 曹资源², 周勇军²

(1. 广西欣港交通投资有限公司, 广西钦州 530012; 2. 长安大学公路大型结构安全教育部工程研究中心, 陕西西安 710064)

摘要: 为研究温度对超声波法识别螺杆紧固力的影响, 以龙门大桥索夹 MJ45 螺杆为对象开展了螺杆紧固力检测方法的试验研究。首先, 制作了室内单个螺杆模型, 在环境试验室采用智能张拉设备将螺杆张拉至不同应力状态, 调整环境温度, 利用超声纵波检测方法研究不同温度下超声回波声时与螺杆紧固力的关系, 从而建立了螺杆紧固力超声检测公式。其次, 制作了具有 8 根螺杆的索夹足尺模型, 将全部螺杆张拉至设计值, 基于超声回波声时和单根螺杆紧固力检测模型, 采用内插法得到拟合螺杆紧固力, 并与足尺试验螺杆的实际有效紧固力进行对比, 最后, 通过试验结果对螺杆紧固力超声检测公式进行校正。研究表明, 温度对超声回波声时的影响较大, 但在不同温度下, 螺杆应力差相同则回波声时差也相同, 即此时的回波声时差不受温度影响, 回波声时与拉力的斜率为 $3.9345 \times 10^{-3} \mu\text{s} \cdot \text{kN}^{-1}$ 。在足尺试验中, 单根螺杆超声拟合螺杆紧固力与实际的螺杆紧固力最大偏差约 16%, 提出螺杆紧固力超声检测公式的修正系数为 1.12。研究结果可为实际工程的螺杆紧固力检测提供依据。

关键词: 索夹螺杆; 紧固力; 超声纵波; 足尺试验; 温度

中图分类号: TB559

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2025)-01-0087-06

Full scale experiment on the influence of temperature on ultrasonic identification of screw tightening force

CHEN Liang¹, WANG Jianing², CAO Ziyuan², ZHOU Yongjun²

(1. Guangxi Xingang Communications Investment Corporation Ltd, Qinzhou 535000, Guangxi, China;

2. Research Center of Highway Large Structure Engineering on Safety, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To study the effect of temperature on the ultrasonic detection of screw fastening force, an experimental study of screw fastening force detection method is carried out on the MJ45 screw of the cable clamp of the Longmen Bridge. Firstly, a single screw model is made in the indoor environment laboratory, and the screw is tensioned to different stress states by using intelligent tensioning equipment, and the environment temperature is adjusted. The relationship between ultrasonic echo time and screw fastening force under different temperatures is studied by using ultrasonic longitudinal wave detection method, and the ultrasonic detection formula for screw fastening force is established. Secondly, a cable clamp model with 8 screws is made, and all screws are tensioned to the design value. Based on the ultrasonic echo time value and the single screw fastening force detection model, the fitting values of screw fastening force are obtained by interpolation method, and compared with the actual effective fastening force of the screw. Finally, the ultrasonic detection formula for screw fastening force is corrected based on the experimental results. The results show that temperature has a significant effect on the ultrasonic echo time, but at different temperatures, the difference in screw stress results in the same difference in echo sound time, that is, the echo sound time difference is not affected by temperature and the slope of the relationship between echo time and screw tension is $3.9345 \times 10^{-3} \mu\text{s} \cdot \text{kN}^{-1}$. In the full-scale test, the maximum deviation between the ultrasonic fitted screw tightening force of a single screw and the actual screw tightening force is about 16%, and the correction coefficient of the ultrasonic testing formula is finally proposed to be 1.12. The research results can provide a basis for the detection of screw tightening force in actual engineering.

Key words: cable clamp screw; tightening force; ultrasonic longitudinal wave; full scale test; temperature

收稿日期: 2023-06-08; 修回日期: 2023-07-26

基金项目: 广西科技重点研发计划(桂科 AB23026125)

作者简介: 陈亮(1984—), 男, 湖北荆门人, 博士, 高级工程师, 研究方向为桥梁工程建设管理及科研。

通信作者: 周勇军, Email: zyj@chd.edu.cn

0 引言

悬索桥的索夹螺杆紧固力(又称轴力)是影响索夹抗滑移的关键因素。在运营期间, 索夹螺杆的

紧固力往往存在不同程度的损失,导致主缆索夹不能有效抵抗吊索拉力,造成索夹滑移,对结构整体承载产生不利影响,因此,悬索桥索夹滑移及螺杆紧固力检测是公路缆索结构体系桥梁养护技术规范: JTG/T 5122—2021^[1]中的重要内容。

在索夹螺杆紧固力检测方面,传统方法有拔出法^[2]、扭矩扳手法^[3]等,由于受到检测精度、效率及适用范围的影响,在悬索桥螺杆紧固力识别中还没有大量推广。超声检测法因其具有无损、快速、识别精度高等特点,近年来被逐渐应用到索夹螺杆紧固力的检测上^[4-5]。超声法检测螺杆紧固力的原理是利用螺杆紧固力与超声在螺杆内部沿轴向传播时间变化的关系,通过测量超声波声时得到螺杆紧固力。声弹性是一种弱效应,其识别精度受环境、螺杆间的几何系数、材料参数等因素影响较大^[6-8]。对此,何少阳^[9]分析了超声波测试频率、波速、温度以及螺杆端部倾角、探头位置以及耦合剂厚度在实际测量过程中对超声法测试螺杆紧固力精度的影响,并提出需要对测试设备参数和测试数据进行修正。贾雪等^[10]、许西宁等^[11]基于声弹性理论有效识别了螺栓、钢轨和钢绞线中的轴向应力。文献^[12-14]基于纵波的螺杆紧固力测量原理,研制出一套悬索桥索夹螺杆紧固力检测系统。陈鑫等^[15]分析传感器耦合差异、螺杆几何及材料参数差异对螺杆无应力声时的影响。常用于螺杆紧固力超声检测方法的形式有纵波测量和纵横波测量^[16-18]。纵波测量方法成熟稳定,高效可靠,但不能直接对已紧固螺杆紧固力进行检测,且该法对于温度的变化非常敏感;超声纵横波法虽然可以直接检测已紧固螺杆紧固力,但是横波的激发、传递和信号分析目前难以广泛应用在索夹螺杆上。

以上研究发现温度会影响超声波的声速,且温度与声速存在某种关系。在利用超声法检测螺杆紧固力时,需掌握螺杆无应力状态时的声时,这显然在实桥检测时是不现实的。有关温度变化对超声波声时与螺杆紧固力关系的定量影响研究较少,现有文献相关的足尺试验也并不多见。本文利用超声纵波测量法,通过室内试验分析不同温度下超声波声时与单根螺杆紧固力之间的关系,研究温度变化对螺杆紧固力超声测量的影响,得到不同温度下超声波声时与螺杆紧固力之间的定量关系。最后,通过室内足尺模型开展了真实状态下的索夹多根螺杆紧固力识别试验研究,对超声纵波测量螺杆紧固力的计算公式进行修正,研究成果可为实桥螺杆张拉和施工阶段螺杆紧固力的损失识别提供技术支持。

1 超声测量螺杆紧固力原理

基于声弹性效应的超声纵波法检测螺杆紧固力时,其测量原理如图1(a)所示。超声波换能器产生的超声波 P 透射进入螺杆头形成超声波 P_1 ,超声波 P_1 沿螺杆杆件传播到螺杆尾部反射一次,形成反射波 P_2 ; P_2 再沿螺杆杆件返回到超声探头,进入超声波换能器形成超声信号,并记录回波声时。当螺杆处于受力状态时如图1(b)所示,超声波在螺杆杆件内的传播受到影响,导致反射波 P_2 回到超声波换能器的时间与无应力状态下反射波 P_2 回到超声波换能器的时间不同,所测得的回波声时也不同,这两种状态下回波声时之间的差称为声时差。

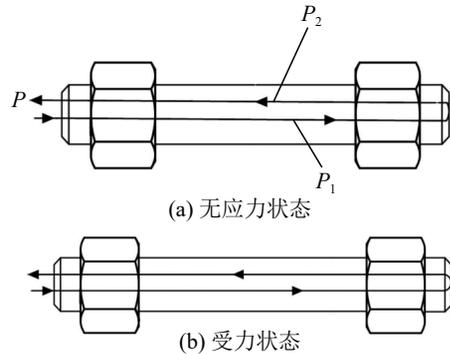


图1 无应力状态和受力状态时螺杆中超声波传播示意图
Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic propagation in screw with and without stress

根据声弹性效应,螺杆紧固力与超声纵波波速存在线性对应关系,温度与声速同样存在线性变化关系^[19],即:

$$V_T = V_0(1 - \alpha\Delta T) \quad (1)$$

式中: V_T 为有应力时螺杆内声速(此时温度为 T); V_0 为无应力时声速(此时初始温度为 T_0); $\Delta T = T - T_0$ 为温度变化量; α 为温度对超声波的影响系数,一般情况下, $\alpha\Delta T$ 远小于1。

已有研究表明,温度对基于超声的螺杆紧固力识别的影响体现在两个方面:(1)温度变化使螺杆的物理长度发生改变,导致超声波的回波时间发生变化;(2)材料的弹性参数受温度影响,使超声波波速发生变化,如温度升高,钢材的弹性模量降低,超声回波声时变长。此外螺杆端部对超声测量也有影响,在进行超声测量时,端部平面与螺杆长度方向应严格垂直,否则超声波传播方向与螺杆长度方向存在夹角,使得超声波传播距离变长,还会导致超声波在螺杆侧面发生折射,影响信号质量。

本文仅研究温度对超声回波声时的影响。

2 单螺杆足尺试验

2.1 试验概况

广西龙门大桥的 MJ45 型螺杆设计紧固力 $N=705$ kN，直径 $D=45$ mm，长度 $L=1\ 020$ mm，弹性模量 $E=210$ Gpa。先开展了单根螺杆足尺试验。试验装置包括螺栓拉伸器和套筒，其中拉伸器用来对螺杆施加拉力，套筒用来模拟受压的主缆系统。采用超声波测试系统对螺杆进行超声标定，超声波测试系统包括超声波换能器、单波探头和温度探头，超声纵波的激发频率为 2 MHz，测量的标准差在 1 ns 以内。在螺杆锚固端螺母与套筒之间安装压力传感器 (长沙金马测控 JMZX-3110HAT，精度为 0.2%)，通过数据采集仪读取压力传感器的压力值作为螺杆紧固力的真实值，单根螺杆超声标定试验装置如图 2 所示。

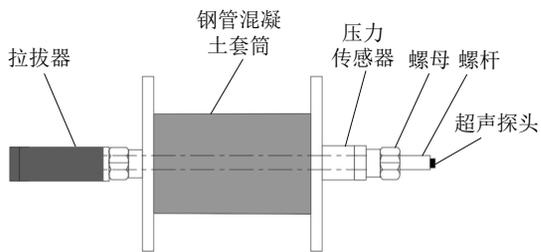


图 2 单根螺杆超声标定试验装置示意图
Fig.2 Schematic diagram of ultrasonic calibration test device for single screw

为研究超声回波声时随温度变化的影响，在环境试验室内进行温度试验，将螺杆张拉系统置于环境试验室，温度分别设定 40 °C、33 °C、24 °C、8 °C 以及 3 °C，利用螺栓拉伸器逐级施加荷载，套筒作为持力构件，得到不同温度下，螺杆紧固力与回波声时的变化关系。室内单螺杆试验装置设置如图 3 所示。

单螺杆足尺实验具体试验步骤为：

- (1) 将试验装置置于环境试验室，设定温度值，静置 2 h，使螺杆温度稳定；
- (2) 待螺杆温度达到设定值，利用超声测试系统获得初始应力状态下的声时；
- (3) 以 100 kN 的张拉等级逐级张拉并持荷，待压力采集箱读数稳定后，读取螺杆锚固端压力传感器的压力作为螺杆的有效紧固力，并采集各级张拉力下的回波声时；
- (4) 当荷载张拉至 800 kN 时，为最终的拉力，本次试验结束；

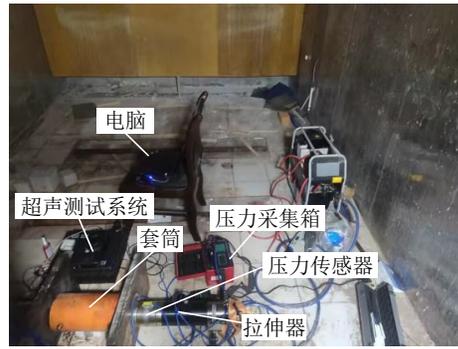


图 3 环境试验箱内超声测试设备照片
Fig.3 Photo of ultrasonic testing equipment in environmental laboratory

(5) 每根螺杆在同一温度下测量 3 次并取均值作为最终的试验值，设定不同温度，重复步骤 (1)~(4)。

2.2 单根螺杆超声标定试验结果

基于以上试验过程，得到不同温度下超声回波声时与拉力(螺杆紧固力)的关系如图 4 所示。由图 4 可知，螺杆张拉力与超声回波声时成正比关系，即拉力越大，超声波回波声时越大；在同一温度下，螺杆的拉力与回波声时呈线性关系，即螺杆在每级拉力下的回波声时与上一级拉力下的回波声时之差相同，也就是说，在相同温度下，如果螺杆的拉力差相同则回波声时差相同；在不同温度下，若螺杆拉力差相同则回波声时差也相同，即各曲线斜率相同，不受温度影响；温度变化对螺杆绝对声时有一定影响，即温度不同，螺杆在同一张力下的超声回波声时不同，温度越高所测得回波声时越大。

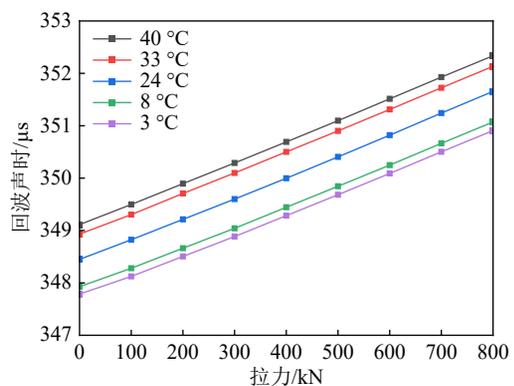


图 4 不同温度下回波声时随螺杆紧固力变化的标定结果
Fig.4 Calibration results of echo sound time varying with screw tightening force under different temperatures

令基准温度 $T_0=24$ °C，通过上述试验实测得到螺杆无应力声时为 348.448 9 μs ，已知螺杆长度为 1 020 mm，通过螺杆长度除以无应力声时得到其无应力声速 $V_0=2.927\ 2$ mm· μs^{-1} ；实测螺杆温度 $T=40$ °C 下螺杆无应力声时为 349.112 8 μs ，以同样方

法计算得到其无应力声速 $V_i=2.9217 \text{ mm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$; 将结果代入式 (1) 可以判定单根螺杆超声标定试验结果与超声理论计算公式吻合, 说明试验是正确的。

由图 4 拟合不同温度下的声时与拉力的关系表达式:

$$t = KF + t_0 \quad (2)$$

式中: t 为超声法测量已紧固螺杆的回波声时, 单位 μs ; F 为螺杆拉力, 单位为 kN ; t_0 为无应力回波声时, 单位为 μs 。 K 为回波声时与螺杆拉力关系的斜率, 取 5 个温度下的平均斜率为 $3.9345 \times 10^{-3} \mu\text{s}\cdot\text{kN}^{-1}$ 。

将图 4 中的温度以及所对应的无应力状态下回波声时进行拟合, 得到无应力声时与温度的关系表达式:

$$t_0 = 3.6922 \times 10^{-2}T + 347.6342 \quad (3)$$

式中: T 为测试时的螺杆温度。

将式 (3) 代入式 (2), 可得:

$$t = KF + 3.6922 \times 10^{-2}T + 347.6342 \quad (4)$$

则螺杆紧固力 F 可表示为

$$F = (t - 3.6922 \times 10^{-2}T - 347.6342) / K \quad (5)$$

这样通过测得环境温度以及该温度下螺杆回波声时, 代入式 (5), 可实现螺杆紧固力识别。

3 多螺杆足尺模型试验

3.1 试验概况

基于超声测试应与该桥实际工程结合, 为进一步验证螺杆轴力与超声回波声时的关系, 以及单根螺杆超声标定试验结果的准确性, 在单根螺杆轴力超声标定后, 采用索夹足尺模型进行试验验证。龙门大桥主缆采用 127 股高强钢丝索股, 如图 5(a) 所示, 考虑到在室内试验中主缆不易锚固且耗资巨大, 因此采用钢管混凝土代替中间部分主缆, 外层用实桥的索股包裹。为保证索夹内主缆部分的空隙率, 将外层索股由 36 根改成 40 根, 并改为圆周排列, 将空隙部分填入镀锌高强钢丝, 如图 5(b) 所示, 方便试验操作。

足尺模型试验的步骤如下:

- (1) 将索夹固定在支撑架上, 安装好螺杆及螺母;
- (2) 在螺杆下部螺母与垫圈之间设置压力传感器;
- (3) 将超声探头与温度探头分别安装在螺杆下部端部与侧面, 并与电脑相连;
- (4) 利用螺栓拉伸器对上部螺杆张拉至设计状态, 并用扭矩扳手拧紧上部螺母;

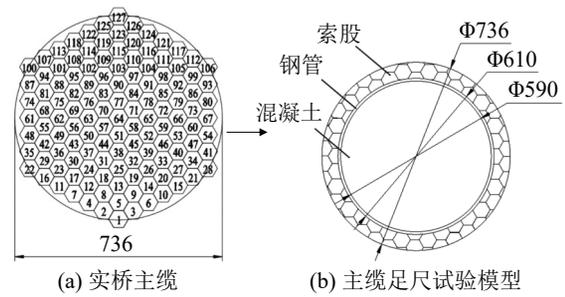


图 5 龙门大桥的主缆尺寸及足尺试验模型 (单位: mm)
Fig.5 Main cable dimension and full-scale test model of Longmen Bridge (unit: mm)

(5) 最后利用超声测试系统和压力采集箱分别采集螺杆回波声时与压力传感器的压力。

超声测试系统示意图如图 6 所示。室内足尺试验装置如图 7 所示。

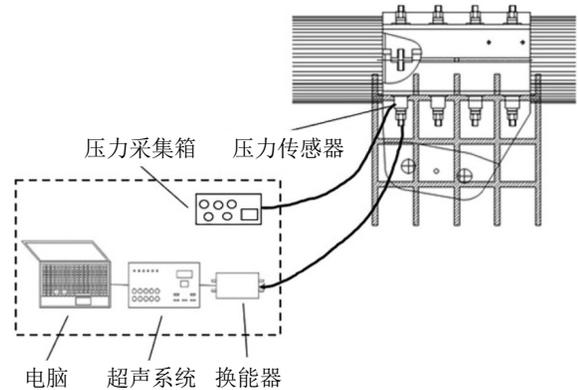


图 6 螺杆紧固力及其相应超声测试系统示意图
Fig.6 Schematic diagram of test system for screw tightening force and ultrasonic



图 7 室内足尺试验现场照片
Fig.7 Photo of indoor full scale test

利用两个拉伸器对螺杆进行张拉, 螺杆张拉顺序及螺杆编号平面示意图如图 8 所示。螺杆张拉顺序为 $(R_2, L_3) \rightarrow (R_3, L_2) \rightarrow (R_1, L_4) \rightarrow (R_4, L_1)$ 。待全部螺杆张拉完毕后, 利用螺栓拉伸器将螺杆张拉到 700 kN, 拧紧螺母, 记录超声回波声时、测试温度以及压力传感器的压力。按照 $R_1 \sim R_4$ 、 $L_4 \sim L_1$ 顺序依次测试各螺杆超声波声时。

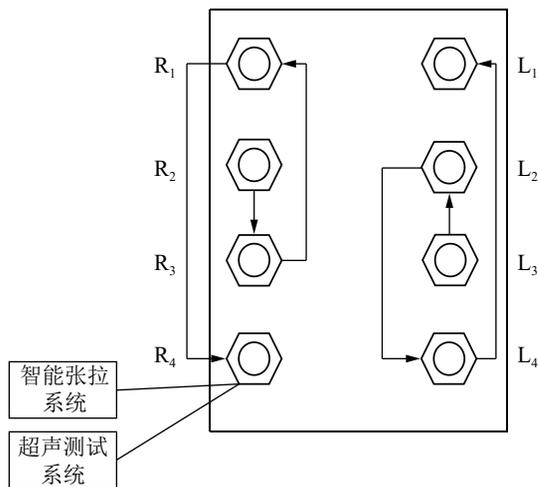


图 8 螺栓张拉及超声测试平面示意图

Fig.8 Plan diagram of screw tightening and ultrasonic test

3.2 试验数据分析

足尺试验螺栓力回波声时的测试结果如表 1 所示，利用图 4 中的标定数据进行线性内插得到拟合螺栓紧固力，并与压力传感器的螺栓实测紧固力进

行对比，结果一并列入表 1。

由表 1 可知，在相同的温度下，利用压力传感器测得的 8 根螺栓紧固力差异明显，实测回波声时最大相差 $0.9874 \mu\text{s}$ ，压力传感器实测螺栓紧固力最大相差 70.8 kN 。这部分损失主要来自油压卸载后螺母回缩、螺栓松弛以及超声测量系统本身的测量误差。同时由于索夹螺栓紧固时采用非同步紧固，就会产生分批张拉效应，即螺栓安装过程中由于采用非同步的紧固，被连接件存在相互作用影响，后紧固的螺栓使被连接件发生形变，从而影响先紧固螺栓的紧固力。

同时，由表 1 可知，压力传感器实测螺栓紧固力结果与采用内插法得到的拟合结果也存在偏差，拟合螺栓紧固力与压力传感器实测的螺栓紧固力最大偏差约为 16%。这是因为单根螺栓的超声标定是在较为理想的情况下得到的超声回波声时与紧固力之间的关系，未考虑索夹与螺栓之间的耦合作用和采用其他材料参数的差异，同时足尺试验中索夹螺栓紧固力的测量精度也受多种因素影响。

表 1 足尺试验螺栓力及其相应超声回波声时的测试结果

Table 1 Test results of screw force with full scale model and corresponding ultrasonic echo time

螺栓编号	测试温度/ $^{\circ}\text{C}$	实测回波声时/ μs	拟合螺栓紧固力/ kN	压力传感器实测紧固力/ kN	紧固力拟合值与实测值偏差/%
R ₁	7.7	350.583 3	672.0	634.3	-5.94
R ₂	7.7	350.875 2	744.4	659.5	-12.87
R ₃	7.7	350.346 4	611.9	679.4	+9.93
R ₄	7.7	349.887 8	527.7	608.6	+13.29
L ₄	7.7	349.956 3	563.4	661.1	+14.78
L ₃	7.7	350.251 3	586.6	696.5	+15.78
L ₂	7.7	350.215 6	576.2	646.3	+10.85
L ₁	7.7	350.268 1	587.9	651.5	+9.76

基于足尺试验结果，对拟合螺栓紧固力与压力传感器实测螺栓紧固力产生的误差进行分析，可知后 6 组数据误差占主导，为保证超声法在实桥螺栓紧固力识别上的准确性，对 L₁~L₄、R₃、R₄ 这 6 组数据误差取均值，对所提出的温度与螺栓紧固力超声检测公式进行校正，得到螺栓紧固力预测模型：

$$F = \beta \left[(t - 3.6922 \times 10^{-2} - 347.6342) / K \right] \quad (6)$$

式中： β 为修正参数，本文中取 1.12。

需要注意的是，在成桥运营之后，由于螺栓表面的涂装、端面部分锈蚀等问题，测量时需要进行一定程度的磨平处理，此时可以针对每一根待测螺栓进行超声标定，以保证测量的精度，并留存数据用作后期检测时的参考。为了提高测量精度，满足实际需求，在实际工程中需进行大量试验，对待检测螺栓进行多次超声检测以获得准确的回波声时，基于实际工程中螺栓紧固力检测数据，对所提出的

螺栓紧固力预测模型进行优化，以满足实际应用需求。

4 结论

本文对超声纵波法测量索夹螺栓紧固力的温度因素进行了试验分析，通过室内温度标定试验，明确温度与回波声时之间的相互关系，以足尺试验结果对所提出的温度与螺栓紧固力超声检测公式进行校正。本文得到的具体结论如下：

(1) 螺栓拉力与超声回波声时成正比，在同一温度下，螺栓的拉力与回波声时呈线性变化；当螺栓的应力差相同时，则回波声时差相同，回波声时差不受温度影响， K 为 $3.9345 \times 10^{-3} \mu\text{s} \cdot \text{kN}^{-1}$ ；温度变化对绝对声时有一定影响，温度不同，螺栓同一张力下的超声回波声时不同，温度越高所测得回波

声时越大。

(2) 本文建立了单根螺杆紧固力在不同温度下超声波声时与温度的关系公式, 并经过足尺试验进行验证, 提出了修正系数为 1.12。

(3) 本文的研究结果可为龙门大桥螺杆紧固力检测提供依据, 也可为其他索夹螺杆紧固力的检测提供参考。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 公路缆索结构体系桥梁养护技术规范: JTG/T 5122-2021[S]. 北京: 人民交通出版社, 2021.
- [2] 蒋树勤, 周勇军, 曹资源, 等. 基于拉拔法的索夹螺杆紧固力检测试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2024, **44**(6): 72-80.
JIANG Shuqing, ZHOU Yongjun, CAO Ziyuan, et al. Experiment on dection of preload force in bolt clamp by pulling method[J]. Journal of Chang'an university (Natural Science Edition), 2024, **44**(6): 72-80.
- [3] 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): 307-313.
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): 307-313.
- [4] 蓝伟生, 畅卫杰, 陈永伟, 等. 运营期大跨度悬索桥索夹螺杆紧固力检测与补张关键技术[J]. 世界桥梁, 2022, **50**(5): 117-123.
LAN Weisheng, CHANG Weijie, CHEN Yongwei, et al. Cable clamp bolt tightening force inspection and key supplementary tensioning techniques for in-service long-span suspension bridge[J]. World Bridges, 2022, **50**(5): 117-123.
- [5] 李相亨. 高强螺栓预拉力超声双波法测量技术研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2022.
LI Xiangheng. Study on ultrasonic double wave method measurement technology of high strength bolt pre-tension[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2022.
- [6] 潘勤学, 常梅乐, 潘瑞鹏, 等. 螺栓轴向应力的非线性超声检测技术研究[J]. 机械工程学报, 2021, **57**(22): 88-95.
PAN Qinxue, CHANG Meile, PAN Ruipeng, et al. Research on nonlinear ultrasonic testing technology of bolt axial stress[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, **57**(22): 88-95.
- [7] 刘家斌, 王雪梅, 倪文波. 螺栓轴向应力-超声波渡越时间自动标定系统研究[J]. 中国测试, 2020, **46**(3): 91-96.
LIU Jiabin, WANG Xuemei, NI Wenbo. Research on automatic calibration system of bolt axial stress-ultrasonic time of flight[J]. China Measurement & Test, 2020, **46**(3): 91-96.
- [8] 孙新亚, 胡锦涛, 谢朝阳. 钢结构工程中高强度螺栓轴向应力的超声测量技术[J]. 科技风, 2019(36): 93.
SUN Xinya, HU Jindong, XIE Chaoyang. Technology Wind, 2019(36): 93.
- [9] 何少阳. 大跨度悬索桥索夹螺杆张力检测与思考[J]. 工程建设与设计, 2021(23): 187-189.
HE Shaoyang. Testing and thinking on the tension of screw clamp of long-span suspension bridge[J]. Construction & Design for Engineering, 2021(23): 187-189.
- [10] 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.
JIA Xue, WANG Xuemei, GAN Wencheng, et al. Research on calibration of bolt's axial stress based on acoustoelastic effect[J]. China Measurement & Test, 2018, **44**(3): 23-27.
- [11] 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.
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.
- [12] 胡可宁, 陈义, 伊建军, 等. 悬索桥索夹螺杆轴力超声检测系统的研制[J]. 公路工程, 2023, **48**(1): 55-59.
HU Kening, CHEN Yi, YI Jianjun, et al. R & D of ultrasonic testing system for axial force of bolts in cable clamps of suspension bridge[J]. Highway Engineering, 2023, **48**(1): 55-59.
- [13] 伊建军, 高天, 荆国强, 等. 悬索桥已紧固索夹螺杆轴力超声纵波测量方法[J]. 桥梁建设, 2021, **51**(6): 39-44.
YI Jianjun, GAO Tian, JING Guoqiang, et al. Ultrasonic longitudinal wave inspection method for axial forces of bolts in cable clamps of suspension bridge[J]. Bridge Construction, 2021, **51**(6): 39-44.
- [14] 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**(S1): 68-73.
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**(S1): 68-73.
- [15] 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.
CHEN Xin, ZHU Jinsong, 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.
- [16] 张东波, 王波, 汪正兴, 等. 悬索桥缆索钢丝损伤超声导波检测数值模拟[J]. 声学技术, 2019, **38**(4): 395-402.
ZHANG Dongbo, WANG Bo, WANG Zhengxing, et al. Numerical simulation of ultrasonic guided wave detection for cable steel wire damage of suspension bridge[J]. Technical Acoustics, 2019, **38**(4): 395-402.
- [17] 徐春广, 李焕新, 王俊峰, 等. 残余应力的超声横纵波检测方法[J]. 声学学报, 2017, **42**(2): 195-204.
XU Chunguang, LI Huanxin, WANG Junfeng, et al. Ultrasonic shear and longitudinal wave testing method of residual stress[J]. Acta Acustica, 2017, **42**(2): 195-204.
- [18] 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): 48-52,64.
DING Xu, WU Xinjun. Development of EMAT based axial load measurement system for in-service bolts[J]. Nondestructive Testing, 2016, **38**(6): 48-52,64.
- [19] 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.
ZHANG Jun, GU Linyi, QIAN Xiaolin, et al. Ultrasonic measurement of high strength bolt axial tension in steel construction[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, **42**(2): 216-220.