

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2021023

基于压电传感技术的木结构连接节点损伤识别

张全景¹, 韩芳^{1,2}, 陈天驰¹

(1. 武汉科技大学理学院, 湖北武汉 430081; 2. 冶金工业过程系统科学湖北省重点实验室, 湖北武汉 430081)



摘要: 针对木结构中常见的榫卯连接与螺栓连接节点, 利用压电传感技术对其进行健康工况和损伤工况的数值模拟研究, 其中榫卯连接考虑榫头的平动、转动、缺损工况, 螺栓连接考虑预紧力松动工况; 对压电片所接收到的信号进行以小波包分解, 并以各频段信号能量的总和作为能量指标, 对不同损伤工况进行定量评估, 最后以螺栓连接为例进行实验验证。数值计算和实验结果均表明, 压电片所接收到的信号能量随损伤程度的不断增加而减小, 利用压电传感技术可以有效识别不同类型连接节点处不同程度的损伤, 该结论可为工程实际提供参考。

关键词: 压电传感技术; 木结构连接节点; 损伤识别; 小波包能量

中图分类号: TN384; TU531.15

文献标识码: A

文章编号: 2096-9694 (2022) 01-0063-05

Damage Detection for Timber Structure Joints Based on Piezoelectric Sensing Technology

ZHANG Quan-jing¹, HAN Fang^{1,2}, CHEN Tian-chi¹

(1. College of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei;

2. Hubei Province Key Laboratory of Systems Science in Metallurgical Process, Wuhan 430081, Hubei, China)

Abstract: The digital simulations for intact and failure conditions of common timber structure joints of tenon-mortise joints and bolted joints were conducted based on the piezoelectric sensing technology. Specifically, the horizontal movement, rotation, and defects of tenons were considered as the failure load cases for tenon-mortise joints, while the relaxation of pre-tightening force was considered as the failure load case for the bolted joints. Then the failure index, which is the sum of signal energy for different frequency bands decomposed based on wavelet packet analysis, was used to quantitatively evaluate the degree of damage severity. Finally, the experiment of bolted joints was implemented to verify the digitalsimulation results. Both of the digital and the experiment results indicate that the signal energy received by piezoelectric plates gradually decreases with the increase of damage severity. The piezoelectric sensing technology can efficiently detect the local damage at the timber joints, which provide a reference for the engineering practice.

Key words: piezoelectric sensing technology; timber structure joints; damage detection; wavelet packet energy

收稿日期: 2021-03-07; 修改日期: 2021-12-19

基金项目: 冶金工业过程系统科学湖北省重点实验室开放基金“基于压电阻抗技术的木梁损伤识别技术研究”(Y201904)。

作者简介: 张全景 (1998—), 男, 硕士研究生。Email: wustzqj@163.com

通讯作者: 韩芳, 女, 副教授。Email: hanfang@wust.edu.cn

木材作为传统建筑材料,具有绿色环保、可再生、易加工等特点,从古至今都有着非常广泛的应用^[1]。木结构建筑在我国具有悠久的历史,千百年来发展形成了独特、高度成熟的建筑体系^[2],设计精巧的榫卯结构更是向世界展示了华夏建筑文化的魅力。然而,由于在加工或使用过程中,木材会受到气候变化、生物危害以及人为因素的影响,导致木材性质发生不同程度的变化^[3],其中作为木结构的关键承力部位,连接节点受力复杂,会由于材性的变化出现松动、腐烂、开裂、缺损等不同程度的损伤,继而削弱结构整体的强度、刚度和稳定性,最终影响木结构的使用寿命。因此,对连接节点进行实时健康监测和无损检测是保证木结构整体安全性和可靠性的重要条件。

在木结构损伤检测方面,国内外学者先后进行了基于超声波检测^[4]、皮罗钉检测^[5]、阻抗仪检测^[6]、应力波断层扫描仪^[7]、机器视觉缺陷检测^[8]等多种方法的古建筑木构件损伤检测研究。近年来,基于压电智能材料的结构无损检测技术以其频带宽、灵敏度高、成本低、响应快、操作简单等特点,被广泛应用于土木工程、机械工程和航空航天工程等领域。压电传感法的基本原理是在待测结构一侧粘贴压电片A作为驱动器,在另一侧粘贴压电片B作为传感器,通过分析应力波信号的变化来评价结构的健康状态。黄泳水^[9]利用压电传感法对木结构表面裂缝和孔洞等典型损伤模式进行了识别研究;张继承等^[10]通过压电主动传感法研究不同含水率试件,得到应力波能量随木材含水率增加而减小的变化规律;刘孝禹等^[11]验证了压电传感法对轴压荷载作用下木梁进行损伤识别的可行性。然而,相对于金属和混凝土材料,压电传感法对不同类型木结构连接节点的损伤识别研究相对较少。为进一步拓展压电传感无损检测技术在木结构连接节点的应用,本文结合数值仿真和实验研究,建立木结构榫卯连接和螺栓连接的有限元模型,通过设置不同程度的损伤工况,采用小波包能量法定量分析压电传感技术对不同类型连接节点进行损伤识别的可行性,并通过实验进行验证,为实际工程中木结构连接节点的损伤识别提供可行性保证。

1 材料与装置

1.1 试验材料

1) 木材:木梁和榫卯材料采用黄杉(*Pseudotsuga sinensis* Dode),密度 550 kg/m³,顺纹抗压强度 45 MPa,顺纹抗拉强度 135 MPa,顺纹抗剪强度 13.5 MPa,抗弯强度 90 MPa,抗弯弹性模量 10.5 GPa,泊松比 0.35。

2) 螺栓:直径 9.5 mm,不锈钢材质,弹性模量 210 GPa,泊松比 0.3。

3) 榫卯连接:选用直角榫构造,榫卯连接全长 200 mm、宽 175 mm、厚 25 mm、榫长 25 mm。

4) 螺栓连接:选用直径 9.5 mm 的螺栓,连接两块长 200 mm、宽 90 mm、厚 40 mm 的木梁。

5) 压电传感材料:PZT-5 型,材料为锆钛酸铅,常用表征压电材料特性的参数有压电柔度矩阵、介电常数矩阵,压电应变矩阵等,各矩阵具体参数列于表 1。

表1 压电传感器材料参数

Tab.1 Material parameters of the piezoelectric sensor

压电柔度系数/(10 ⁻¹² m ² ·N ⁻¹)					
$S_{11} = S_{22}$	S_{33}	S_{12}	$S_{13} = S_{23}$	$S_{44} = S_{55}$	S_{66}
16.50	20.60	-4.79	-8.50	42.60	42.60
相对介电常数		压电应变常数/(10 ⁻¹² m·V ⁻¹)			
$\epsilon_{r11} = \epsilon_{r22}$	ϵ_{r33}	$d_{31} = d_{32}$	d_{33}	$d_{24} = d_{15}$	
3 130	1 700	-195	450	650	

1.2 验证装置

由数据采集系统(NI USB-6363)、信号功率放大器(Trek model 2100HF)和试件组成(图1)。



图1 螺栓连接试验装置图

Fig.1 Experimental device of bolt connection

1.3 数值仿真分析

1.3.1 模型建立

采用有限元软件 ABAQUS 建立压电-连接节点耦合数值分析模型,选用 C3D8R 模拟连接节点单

元, 采用 C3D8E 模拟压电传感器单元。榫卯连接和螺栓连接的有限元模型如图2所示。在连接节点两侧表面分别粘贴压电片, 其中压电片A作为驱动器, 压电片B作为传感器, 选择厚度方向(方向3)为压电片极化方向。

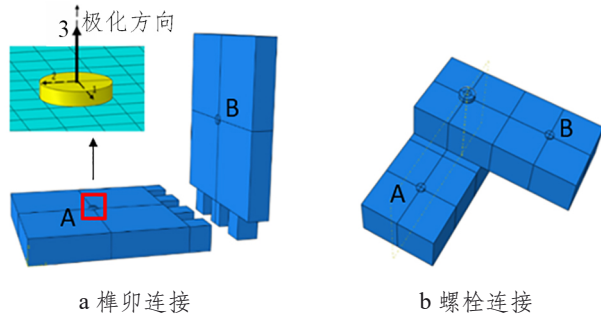


图2 有限元模型

Fig.2 Finite element model

1.3.2 损伤工况设计

对于榫卯连接, 通过设置榫头的平动、转动及缺损以模拟榫卯连接的松动与腐烂损伤(图3); 对于螺栓连接, 仿真计算过程中通过设置螺栓和木材接触面的不同预紧力以定量模拟螺栓连接的松动损伤。为进行对比研究, 每种损伤类型再设置4个不同程度的损伤工况, 共生成损伤工况16个(表2)。

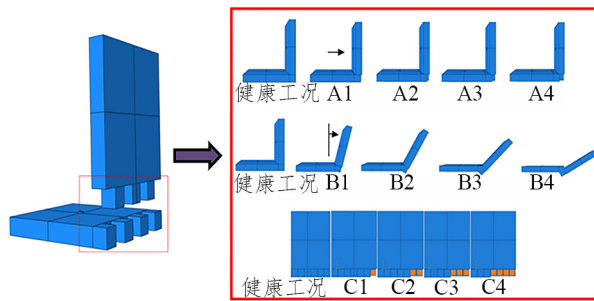


图3 榫卯连接损伤工况示意图

Fig.3 Damage conditions of tenon-and-mortise connections

表2 不同损伤工况参数列表

Tab.2 Parameters of the different damage conditions

连接方式	工况	不同工况水平参数			
		1	2	3	4
榫卯	A 松动损伤(平动)/mm	5	10	15	20
	B 松动损伤(转动)/(°)	15	30	45	60
	C 腐烂损伤(榫头缺损)/个	1	2	3	4
螺栓	D 螺栓松动/N	200	150	100	50

1.3.3 荷载及边界

为简化分析模型, 不考虑压电片与连接节点之间粘接层的影响, 令压电传感器与连接节点的粘结面为零势面, 给驱动器A施加激励信号, 激励信号采用经汉宁窗调制的中心频率为200 kHz、幅值为50 V的五周期正弦波激励信号(图4)。为模拟应力波在实际工程结构中的传播过程, 采用刘晶波^[12]等提出的黏弹性边界, 即在边界处设置弹簧阻尼器吸收边界处应力波, 以减小模型边界的反射影响。边界等效物理系统由下式确定:

$$K_1 = K_2 = \frac{2G}{R} \sum_{i=1}^l A_i \quad (1)$$

$$K_3 = \frac{4G}{R} \sum_{i=1}^l A_i \quad (2)$$

$$C_1 = C_2 = \rho v_s \sum_{i=1}^l A_i \quad (3)$$

$$C_3 = \rho v_p \sum_{i=1}^l A_i \quad (4)$$

式中: K_1 、 K_2 、 K_3 为切向与法向的弹簧刚度系数, C_1 、 C_2 、 C_3 为切向与法向阻尼系数; G 为介质剪切模量; ρ 为介质密度; R 为激励源与黏弹性边界距离; $\sum A_i$ 为黏弹性边界上节点所代表的面积; v_s 、 v_p 为介质中剪切波与纵波波速。

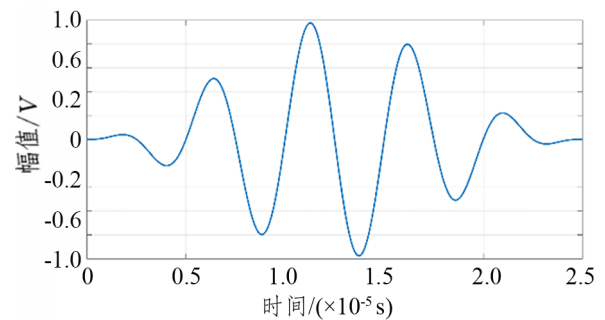


图4 汉宁窗调制正弦波激励信号

Fig.4 Excitation signals in sine waves modulated with a Hanning window

1.3.4 小波包能量法

小波包能量法具有无冗余、无疏漏、效率高的特点, 可对压电传感器采集到的信号时频局部进行有效分析。本文采用小波包能量法对压电片B所采集信号进行处理, 以应力波信号X的能量值作为评定结构损伤状态的依据, 并以小波包分解后各频段信号能量的总和作为信号的能量指标。即:

$$X = X_1 + X_2 + \cdots X_i + \cdots X_{2^n-1} + X_{2^n} \quad (i = 1, 2, \cdots, 2^n) \quad (5)$$

$$X_i = [x_{i,1} \quad x_{i,2} \quad \cdots \quad x_{i,j} \quad \cdots \quad x_{i,m-1} \quad x_{i,m}] \quad (i = 1, 2, \cdots, 2^n; j = 1, 2, \cdots, m) \quad (6)$$

$$E_i = \sum_{j=1}^m x_{ij}^2 \quad (i = 1, 2, \cdots, 2^n) \quad (7)$$

$$E = \sum_{i=1}^{2^n} E_i \quad (8)$$

式中： n 为小波包分解层数； X_i 为分解后的第 i 个频段信号； x_{ij} 为第 i 个频段的第 j 个离散点幅值； E_i 为信号频段 X_i 的能量值； E 为各频段能量值之和。

2 结果分析

2.1 建模结果分析

压电片所激发的应力波在连接节点里传播的云图如图5所示。由图5可知，应力波由纵波和剪切波组成，其中剪切波波速与纵波相比较慢，其幅值较纵波大，并以球面波的形式在介质中传播。以榫卯连接的健康工况为例，得到压电传感器接收到的信号波如图6所示。

选用动态隐式分析步进行分析，时间积分步长根据激励信号的中心频率^[13]确定如下：

$$t \leq \frac{1}{20f_{\max}} \quad (9)$$

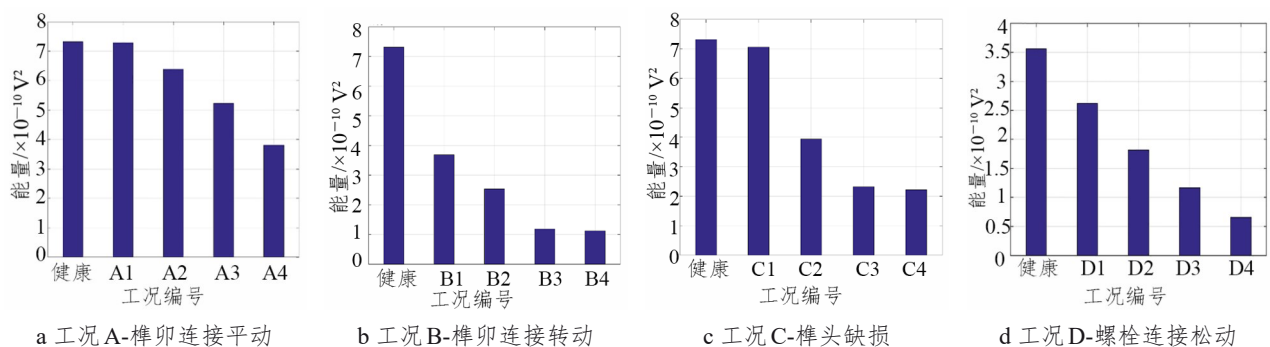


图7 不同损伤工况能量变化

Fig.7 Energy variation under different damage conditions

由图7可见，对于榫卯连接，在相同激励时，平动、转动、榫头缺损三种损伤工况的能量均随损伤程度的加剧而逐渐减小，减小过程呈现非线性变化趋势。对于平动工况，工况A1、A2、A3、A4的能量相对于健康工况仅为99.63%、87.30%、71.50%和52.05%；对于转动工况，工况B1、B2、

B3、B4的能量相对于健康工况仅为50.36%、34.64%、16.24%和15.35%；对于榫头缺损工况，工况C1、C2、C3、C4的能量相对于健康工况仅为96.45%、53.82%、31.68%和30.30%；对于螺栓连接，随着预紧力减小（螺栓松动加剧），能量也显著减小，工况D1、D2、D3、D4的能量相对于健

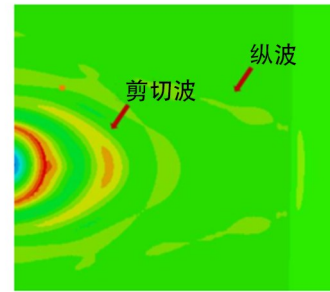


图5 应力波传播云图

Fig.5 The contours of stress wave propagation

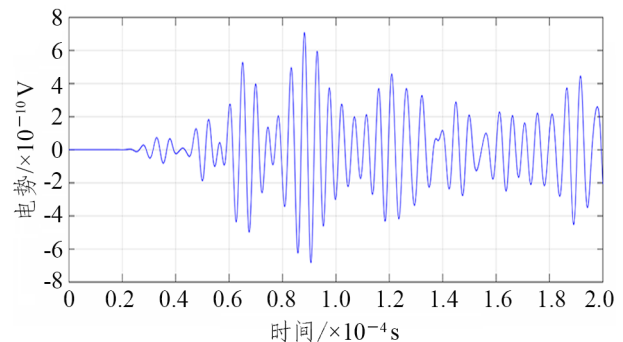


图6 压电传感器接收的信号

Fig.6 The signals of received waves by piezoelectric sensor

其中： t 为时间积分步长； $f_{\max}$ 为激励信号中心的最大频率。

本次计算时间积分步长取 $2 \times 10^{-4} \text{ s}$ ，压电片B上表面电势作为时间历程输出。经过小波包分析后能量变化见图7。

康工况仅为73.47%、51.02%、32.65%和18.37%。以上结果表明, 压电传感技术可以实现对本节点榫卯连接和螺栓连接的损伤识别。基于压电传感技术进行连接节点损伤识别是可行的, 这一趋势可以为连接节点损伤定量分析提供参考。

2.2 验证结果与分析

以螺栓连接为例, 采用压电传感法进行连接节点损伤识别的试验研究。试验环节只能使用扭矩扳手定量施加扭矩以模拟螺栓不同程度的松动工况, 因此, 本试验仅对能量变化趋势进行验证。四种不同预紧工况分别为工况1 (20 N·m)、工况2 (15 N·m)、工况3 (10 N·m) 和工况4 (5 N·m)。激励为幅值5 V的正弦扫频信号 (100~300 kHz), 采样频率为1 MHz, 采样时间为1 s。

螺栓连接由紧到松变化过程中, 压电传感器采集的应力波信号能量如图8所示。由图8可见, 随着螺栓松动加剧, 即从工况1到工况4, 应力波信号波形一致, 但幅值逐渐减小, 说明信号能量也是逐渐降低的, 与数值计算结果规律一致, 表明压电传感法可以有效地实时监测木结构螺栓连接松动情况。

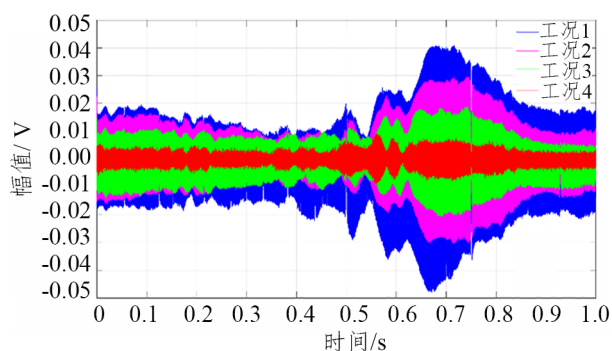


图8 螺栓连接实验能量变化图

Fig.8 Energy variation in the bolt connection experiment

3 结论

1) 对于木结构中榫卯连接的平动、转动和榫头缺损工况, 以及螺栓连接的预紧力松动工况, 压电传感器所接收到的信号能量均随损伤程度的不断增加而逐渐减小。

2) 螺栓连接的损伤识别实验表明, 压电片所接收到的信号幅值和能量均随损伤程度的不断增加而逐渐减小, 与数值结果规律一致。

3) 工程实际中, 使用压电传感技术对不同类型连接节点进行损伤识别是可行的, 可采用小波包能量法定量评估连接节点的损伤状态。

参考文献:

- [1] 费本华, 刘雁. 木结构建筑学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2011.
- [2] 龚迎春, 姜万里, 李明月, 等. 我国木结构产业发展展望[J]. 木材工业, 2019, 33(5): 20-24.
- [3] GONG Y C, LOU W L, LI M Y, et al. Prospects for timber structure industry in China[J]. China Wood Industry, 2019, 33(5): 20-24.
- [3] 徐佳鹤, 王超, 张斌. 我国古建筑木构件及木质文物保护技术发展历程与展望[J]. 木材工业, 2020, 34(6): 39-43, 47.
- [4] XU J H, WANG C, ZHANG B. Review and prospect analysis of conservation techniques in heritage timber structures in China[J]. China Wood Industry, 2020, 34(6): 39-43, 47.
- [4] 张训亚, 姜笑梅, 殷亚方. 不同方向落叶松木材声-超声参数特征及其与密度关系研究[J]. 木材加工机械, 2017, 28(4): 24-28.
- [5] ZHANG X Y, JIANG X M, YIN Y F. Study on acousto-ultrasonic parameters of larch wood in different directions and its density relationship[J]. Wood Processing Machinery, 2017, 28(4): 24-28.
- [5] 黄荣凤, 伍艳梅, 李华, 等. 古建筑旧木材腐朽状况皮罗钉检测结果的定量分析[J]. 林业科学, 2010, 46(10): 114-118.
- [6] HUANG R F, WU Y M, LI H, et al. Quantitative analysis of decaying detected by pilodyn in wood of ancient architecture[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(10): 114-118.
- [6] 李华, 陈勇平, 黎冬青, 等. 古建筑木构件阻力仪检测中影响阻力值的因素探讨[J]. 木材加工机械, 2011, 22(2): 19-21, 26.
- [7] LI H, CHEN Y P, LI D Q, et al. Influencing factors on the results of resistograph of wood components in historical building[J]. Wood Processing Machinery, 2011, 22(2): 19-21, 26.
- [7] 陈勇平, 李华, 黎冬青, 等. 古建筑木材中应力波传播速度的影响因素[J]. 木材工业, 2012, 26(2): 37-40.
- [8] CHEN Y P, LI H, LI D Q, et al. Effects on stress wave speed inside wood members in historical buildings[J]. China Wood Industry, 2012, 26(2): 37-40.
- [8] 郭慧, 盛振湘, 王霄, 等. 基于机器视觉的刨花板表面缺陷检测系统[J]. 木材工业, 2019, 33(3): 18-22.
- [9] GUO H, SHENG Z X, WANG X, et al. A system based on machine vision for detecting surface defects of particleboard[J]. China Wood Industry, 2019, 33(3): 18-22.
- [9] 黄泳水. 基于压电陶瓷的木结构健康监测与损伤识别研究[D]. 荆州: 长江大学, 2019.
- [10] Zhang J C, Li Y, Huang Y S, et al. A feasibility study on timber moisture monitoring using piezoceramic transducer-enabled active sensing[J]. Sensors, 2018, 18(9): 3100.
- [11] 刘孝禹, 饶玉龙, 张继承, 等. 基于压电传感器的木材轴压损伤监测[J]. 压电与声光, 2020, 42(5): 681-685.
- [12] LIU X Y, RAO Y L, ZHANG J C, et al. Timber axial pressure damage monitoring based on piezoceramic sensor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2020, 42(5): 681-685.
- [12] 刘晶波, 王振宇, 杜修力, 等. 波动问题中的三维时域粘弹性人工边界[J]. 工程力学, 2005, 22(6): 46-51.
- [13] LIU J B, WANG Z Y, DU X L, et al. Three-dimensional visco-elastic artificial boundaries in time domain for wave motion problems[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(6): 46-51.
- [13] 李婷. 应力与材料构成对压电纵波在混凝土中的传输影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.

(本文编校 张 鹏、向 琴)