

近红外光谱分析的实木板材节子形态反演

于慧伶¹, 张 淼², 侯弘毅², 张怡卓^{2*}

1. 东北林业大学信息与计算机工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040

2. 东北林业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040

摘 要 节子影响着实木板材力学性能, 如何准确刻画出节子在实木板材内部的形态, 进而计算出实木板材力学性能是一个具有应用价值的科学问题。目前, 基于机器视觉的缺陷检测方法实现了实木板材表面缺陷检测与识别, 超声波检测方法可以判断出实木板材中缺陷的存在, X-ray 虽然可以全面的掌握实木信息, 但其检测成本较高。近红外光谱分析具有结构丰富, 测试方便、无损快速的特点, 但是, 光谱中存在的冗余与非线性信息影响建模精准度, 提出一种基于 Isomap 和小波神经网络融合的节子倾角辨识方法, 利用 Isomap 完成光谱信息非线性降维, 运用小波神经网络建立节子边缘的物质成分与倾角间的非线性关联, 通过边缘多点倾角反演出节子在实木板材内部的形态。首先, 采用 Pablo 提出的节子斜圆锥模型, 并结合图像处理提取实木板材表面的节子缺陷区域, 计算出相应中心位置; 提取节子边缘的多点位置, 采集光谱信息并完成基线漂移和去噪处理; 然后, 利用 K-S 划分校正样本集, 运用主成分与马氏距离结合剔除异常光谱; 接着, 运用 Isomap 方法设定降维数和邻近数, 通过 PLS 完成不同光谱维度的快速建模, 进而迭代出理想光谱特征; 最后, 应用具有局部信息优化能力的小波神经网络建立节子边缘光谱与该点倾角间的非线性关系, 构建出 1 个 12 输入、1 输出的网络模型, 并运用梯度修正网络参数; 将节子倾角预测结果输入 Solidworks 软件完成节子椎体形态的三维呈现。实验采用落叶松实木板材作为对象, 选取并采集了 40 个节子的 160 组光谱数据, 通过测量上、下表面节子的相对空间位置, 计算出边缘点倾角数值并进行建模分析, 实验结果表明: 采用 S-G 平滑与一阶导数进行光谱预处理, 得到的光谱轮廓更清晰、吸收峰更明显; 采用 Isomap 特征降维方法, 选取非线性降维数 $d=12$ 、邻近数 $k=19$ 时, SECV 最小, 可以消除光谱信息的冗余数据; 采用小波神经网络建立的节子倾角非线性模型, 其预测相关系数为 0.88, 预测标准差为 7.65, 相对分析误差为 2.14; 可以实现节子在实木板材内部的形态反演, 可以为力学性能预测提供量化分析手段。

关键词 实木板材; 缺陷形态; 近红外光谱分析; ISOMAP; 小波神经网络

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)08-2618-06

引 言

节子是木材生长缺陷, 破坏了木材的均匀性和完整性, 不仅影响产品外观, 而且影响板材的力学性能。近年来, 由于无损检测技术具有非破坏、灵活、可靠的特点, 机器视觉、超声波检测、X-ray 扫描以及激光成像等方法已应用于实木缺陷的检测研究。Gonzalo A Ruz^[1] 搭建了自动视觉检测 (AVI) 系统, 实现了 11 种缺陷类别图像集的正确分类; Zhang^[2-3] 针对实木表面缺陷与纹理开展了分类研究, 应用图

像分割提取缺陷, 利用 PCA 和 SOM 完成缺陷特征融合与识别; 利用双树复小波提取实木图像频谱信息, 运用 PSO 和 CS 完成特征降维和纹理、缺陷类别的快速分类。超声波检测是根据声波信号在实木板材中给出的节子信息进行木材性能的定性估算。彭辉^[4] 以 6 个树种木材为研究对象, 考察了密度和含水率对木材轴向声速的影响, 分析了参数间的相关性; 杨慧敏^[5] 构建了缺陷的超声波检测系统并对不同木材进行了测试, 在不同含水率下, 探讨了超声波参数的检测精度。Olsson^[6] 提出应用激光成像技术测量实木表面纤维角, 进而预测木材缺陷状态和估算木材相关力学性能。X-ray 扫

收稿日期: 2018-07-13, 修订日期: 2018-11-20

基金项目: 国家林业局 948 项目 (2015-4-52), 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2572017DB05), 黑龙江省自然科学基金项目 (C2017005) 资助

作者简介: 于慧伶, 1980 年生, 东北林业大学信息与计算机工程学院副教授 e-mail: yhl2016@163.com

* 通讯联系人 e-mail: Zhangyz@nefu.edu.cn

描与机器视觉技术可以全面掌握实木板材的密度分布和缺陷形态信息,但设备复杂,成本较高;Mohamad^[7]应用该技术测量了实木板材的缺陷形态、缺陷密度与净木密度,通过计算缺陷的 KDR 参数,估算了木材的 MOE 和 MOR 力学参数。

近红外光谱分析通过检测木材含氢基团,即 C—H, N—H, O—H 物质含量,进而判断木材相关物理与化学性质。梁浩^[8]分析了近红外光谱与实木地板缺陷类型的相关性,并通过贝叶斯神经网络实现了缺陷的识别;Yang^[9]采用近红外光谱结合 SIMCA 法分别建立了桉树的缺陷识别模型;张怡卓等^[10-11]采用近红外光谱,分别利用 GN 样本优选与 CPLS 建模、Isomap-PLS 方法预测了蒙古栎的相关力学性能。尽管近红外光谱分析可以对实木板材力学性能和缺陷类别进行预测和识别,但是如何应用该技术完成缺陷板材力学性能分析尚未开展。我们重点研究基于近红外光谱分析技术的缺陷形态分析方法,采用 Pablo 提出的节子三维斜圆锥模型^[12],通过采集缺陷边缘的近红外光谱信息,构建缺陷斜圆锥入射角与缺陷成分变化的数值光系,利用边缘的多点角度信息定量预测缺陷在实木板材内部的形态,进而为含有缺陷的实木板材力学性能的定量预测提供理论支持。

1 实验部分

1.1 材料与方法

针对缺陷的内部形态,采用 Pablo 提出的三维节子模型,即把节子理想成斜圆锥^[12]的缺陷形态如图 1 所示,该基本模型需要 3 个参数来确定,分别为 O , A 和 θ 。其中, O 为缺陷在实木板材表面所呈现的椭圆中心位置; A 为实木板材表面缺陷的边缘点, OA 距离可以通过图像处理技术进行计算; θ 为缺陷边缘上 A 点的倾角。物理上,可以通过缺陷在实木板材上、下表面的相对位置计算出缺陷的内部形态,进而计算出 θ 值,该值作为数据样本真值与近红外光谱数据建立关联,完成缺陷边缘点倾角的预测。理论上,随着缺陷边缘信息采集的增加,缺陷形态与实际情况越逼近。

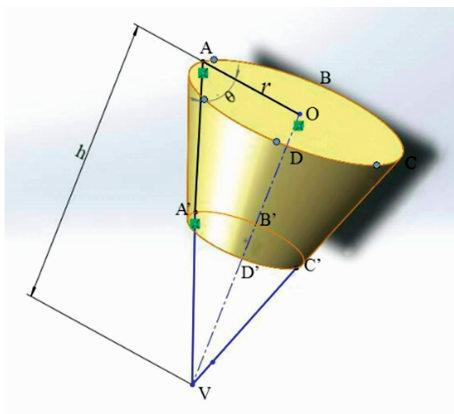


图 1 缺陷斜圆锥形态测量示意图

Fig. 1 The schematic diagram for measuring the shape of a defect

实验选用落叶松 (*Larix gmelinii*) 经加工处理后制成板材,从中选出含缺陷、无明显颜色差异试样 40 个并进行编号。运用 NIRQuest512 型近红外光纤光谱仪和 Spectra Suite 软件采集缺陷边缘 4 点的近红外光谱信息,得到 160 组数据。光谱仪采集波长范围为 900~1 700 nm,共 117 个波段,数据采样间隔小于 16 nm 光谱分辨率。实验环境温度 20 ℃、平均相对湿度 50%、光线均匀。使用两分叉光纤探头采集试样表面的近红外光谱,光源使用钨光源。为了提高建模的精度,采用了异常样本剔除、样本集划分、光谱信息的基线漂移与去噪处理、光谱特征波长提取等预处理;在缺陷边缘倾角预测时,采用小波神经网络建立光谱数据和倾角度之间的关系;最后,应用 SolidWorks 完成数据的三维呈现,完成缺陷形态模拟。具体流程如图 2。

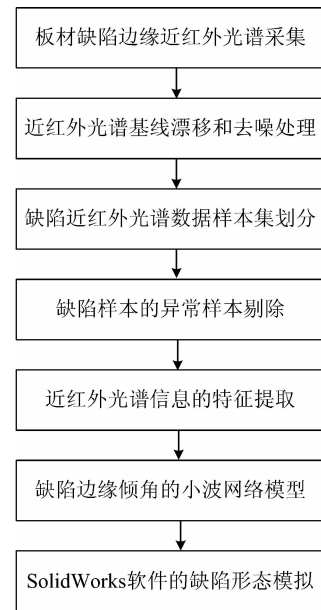


图 2 实验流程

Fig. 2 The experimental process

1.2 缺陷样本的近红外光谱预处理

1.2.1 光谱信息基线漂移、去噪处理

为了消除板材缺陷边缘光谱的基线漂移和光谱重叠,以便可以明显地看出光谱的变化趋势,首先对缺陷样本的近红外光谱进行一阶导数处理得到导数光谱,方法如式(1)

$$x_{t, 1st} = \frac{x_t - x_{t+g}}{g} \quad (1)$$

式中, x_t 为波长 t 处的离散光谱, g 为窗口宽度。

然后,采用 S-G 平滑处理去掉光谱高频噪声,提高信噪比,计算波长 t 处经平滑后的平均值公式如式(2)

$$x_{t, smooth} = \bar{x}_t = \frac{1}{H} \sum_{i=-w}^{+w} x_{t+i} h_i$$

$$H = \sum_{i=-w}^{+w} h_i \quad (2)$$

式中, h_i 为 S-G 平滑系数, H 为归一化因子。

1.2.2 样本集划分

对于分布不均匀的缺陷光谱样本,中间样本容易导致预

测结果偏离真实值,呈现出“均值化”现象,在此,采用 K-S 方法完成校正集划分。基于 K-S 的缺陷光谱样本集划分方法如下:

- (1) 在缺陷光谱样本 n 中,设置校正集样本个数 m ;
- (2) 计算光谱之间的欧式距离 l_{ij} ,选择 l_{ij} 最大的样本 n_1 和 n_2 进入校正集;
- (3) 分别计算其余光谱与校正集光谱的距离,并取最小值构成集合 l 。 $l = \min(l_{1v}, l_{2v}, \dots, l_{qv})$,其中, $1 \sim q$ 表示选入校正集样本的编号, v 表示剩余的待选样本的编号;
- (4) 选取 l 中最大值对应的样本进入校正集,该样本为距离已有校正样本最远的样本;
- (5) 依次重复进行步骤(3)和步骤(4),直至校正集样本个数达到预先设定的数目 m 。

1.2.3 异常样本剔除

异常缺陷样本的剔除可以提高模型的预测能力,在此采用主成分与马氏距离结合的方法完成异常样本的剔除。将缺陷边缘点样本光谱与平均光谱在主成分空间中相似度低的样本视为异常,通过选用不同的权重系数 e 值对阈值范围进行大小调整,并采用模型预测结果来剔除异常样本。该方法计算奇异样本存在的阈值范围如式(3)

$$At = \bar{A} + e \times \sigma \quad (3)$$

式(3)中, A_i 为阈值范围, \bar{A} 为近红外光谱数据到平均光谱在主成分空间中的马氏矩阵平均值; σ 为 A 的标准差; e 为调整阈值范围的权重系数。

缺陷边缘点样本 i 的光谱数据为 A_i ,当 $A_i - A_i$ 值越小,表明两者相似度越高;反之亦然。因此, e 值越大,相似度随之增高;反之,相似度越低。

1.2.4 特征波长提取

光谱数据预处理后,为了提高模型的准确度,需要对采集到的近红外光谱信息进行特征波长提取,删除冗余信息。前期研究表明, Isomap 算法具有很好的非线性降维能力^[12],故采用 Isomap 进行缺陷边缘样本点的特征波长提取。Isomap 算法主要分为三个步骤:首先,设定降维数 d 和近邻数 k ,通过构建的数据邻域图中的最短路径获取近似的测地距离;然后,采用 MDS 求出 d 维数据;最后,有效输出低维嵌入,将 d 维数据和角度真值作为模型输入,通过求取最小误差得到特征波长。

1.3 基于小波网络的板材缺陷角度预测模型

小波网络采用小波基函数代替了 BP 网络隐含层的激活函数,使得小波网络具有提取局部信息的优点,完成了 BP 网络的权值与阈值的优化,克服了 BP 网络易受局部极值影响^[13]。小波神经网络的网络结构如图 3 所示。

图 3 中, X_1, X_2, \dots, X_k 是小波神经网络的输入参数,即缺陷样本点优选出的特征波长点, Y 是小波神经网络的预测输出,其数值为缺陷点的倾角。在输入信号序列为 $x_i (i = 1, 2, \dots, k)$ 时,小波神经网络的隐含层输出计算公式为

$$h(j) = h_j \left[\frac{\sum_{i=1}^k \omega_{ij} x_i - b_j}{a_j} \right] \quad (4)$$

式中, $h(j)$ 为小波神经网络的隐含层第 j 个节点的输出, ω_{ij}

为小波神经网络的输入层和隐含层的连接权值, h_j 为小波基函数, b_j 为 h_j 的平移因子, a_j 为 h_j 的伸缩因子。

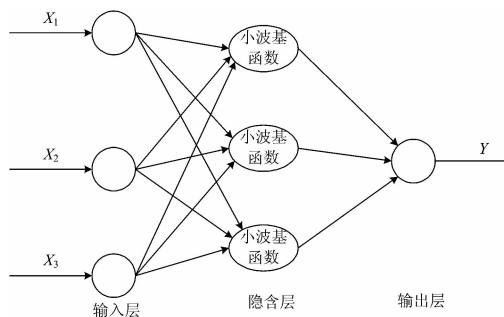


图 3 小波神经网络结构

Fig. 3 The structure of wavelet network

小波神经网络输出层的计算公式如式(5)所示

$$y(k) = \sum_{i=1}^l \omega_{ik} h(i) \quad k = 1, 2, \dots, p \quad (5)$$

式中, ω_{ik} 为隐含层到输出层的连接权值, $h(i)$ 为第 i 个隐含层节点的输出, l 为隐含层节点数, p 为输出层节点数。

小波神经网络采用梯度修正法修正网络的权值和小波基函数参数,通过该修正算法的修正使小波神经网络预测输出与期望输出逐渐逼近,两者之间的误差越来越小。

2 结果与讨论

2.1 缺陷样本的近红外光谱预处理

一阶导数、S-G 平滑相结合对板材缺陷样本的近红外光谱预处理结果见图 4。处理后光谱图主要吸收峰更明显,同时滤除了更多的高频噪声带来的干扰,光谱轮廓更加清晰、平滑。

对采集到的 160 个板材缺陷样本,利用 K-S 方法将校正集个数与预测集个数之比设为 3:1,得到校正集样本为 120 个,预测集样本为 40 个;采用主成分结合马氏距离取权重系数 e ,设定权重系数 e 分别为(3, 2.5, 2, 1.75, 1.5, 1.25, 1, 0.5),随着 e 由大变小,剔除缺陷样本的个数由少变多,剔除异常缺陷样本后,用 PLS 方法建模选取主成分数,当 e 为 1.25 时,相关系数 r 最大为 0.76,此时,共剔除 19 个异常缺陷样本,其中校正集中剔除了 17 个异常样本,预测集中剔除了 2 个异常样本,剔除异常样本结果如图 5 所示。

在采用 Isomap 算法对板材缺陷边缘光谱特征降维时,设定降维数范围 d 为 1~15,近邻 k 的范围为 2~20,选取 d 和 k 的不同组合对数据降维效果进行测试,模型选用传统的 PLS,结果见图 6。由图 6 可知,当 $k=19, d=12$ 时,具有最小的 SECV 值,SECV 为 12.53,此时,缺陷角度预测相关系数 r 为 0.83,预测相对分析误差 RPD 为 1.80。

2.2 小波神经网络预测板材缺陷角度

将 Isomap 优化后的 12 维数据作为输入,输出为 1 维数据,采用小波神经网络模型预测板材缺陷角度,经过多次试验确定隐含层节点为 14,小波基函数采用 Morlet 函数,设定的学习速率、期望误差、学习次数分别为 0.01, 0.001 和

1 000, 运用 103 个样本进行训练, 网络收敛后, 对 38 个样本进行预测, 预测结果如图 7 所示。此时, 预测参数 r , SEP, RPD 分别为 0.89, 7.65 和 2.14。图 9 为全波长作用下的小波网络预测结果, 其预测参数 r , SEP 和 RPD 分别为 0.41, 19.33 和 1.09。参数对比表明, 基于 Isomap 特征优选后的小波网络预测结果更为准确。

数 r , RPD 均高于 PLS 和 BP 模型的预测结果, 且 SEP 最小。实验表明, 近红外光谱数据与缺陷倾角间存在一定的非线性关系, 小波神经网络预测结果优于 PLS 线性模型; 由于 BP 网络需要节点设置与优化, 因此, 网络预测较小波网络预测精度低。

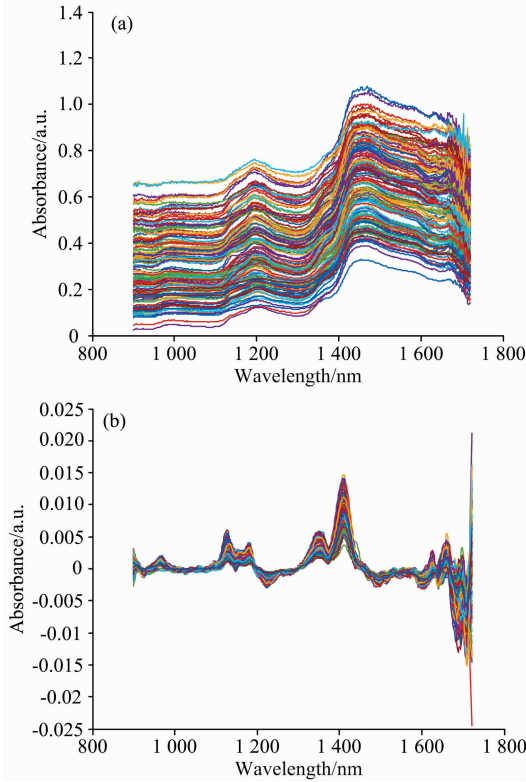


图 4 一阶导+S-G 平滑的落叶松缺陷样本光谱
(a): 预处理前的缺陷样本光谱图;
(b): 预处理后的缺陷样本光谱图

Fig. 4 Defect sample spectrum based on first order and S-G smooth processing

(a): Spectrum of detect samples before pretreatment;
(b): Spectrum of detect samples after pretreatment

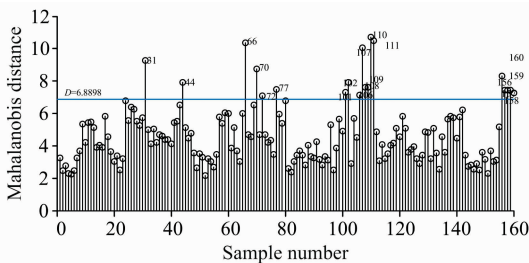


图 5 PCA 结合马氏距离剔除异常缺陷样本

Fig. 5 The elimination of abnormal defect samples using PCA and Mahalanobis distance

为了验证小波网络的优越性, 分别选用了 PLS、BP 网络与小波网络预测结果进行了比较, 3 个模型的相关参数如表 1 所示。小波神经网络模型预测板材缺陷角度的预测相关系

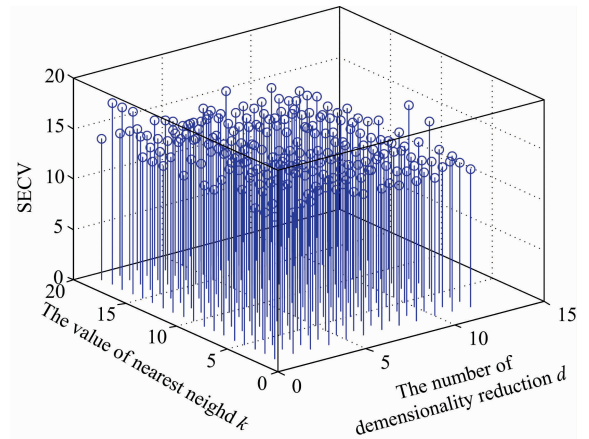


图 6 在不同 d 和 k 关系下的 Isomap-PLS 模型的 SECv
Fig. 6 The SECv values based on Isomap-PLS with different d and K

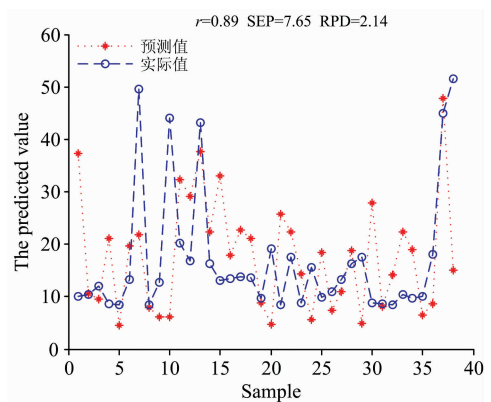


图 7 基于 Isomap 的小波网络预测结果
Fig. 7 The predictions of Wavelet network based on Isomap

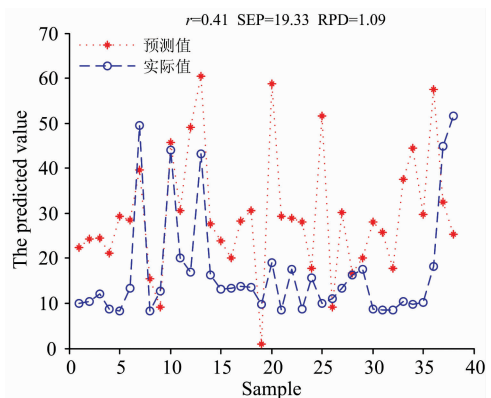


图 8 基于全光谱的小波网络预测结果
Fig. 8 The predictions of wavelet network based on full spectrum

表 1 不同建模方法对节子角度的预测结果

Table 1 The comparison of predicted knot angles based on different models

参数	PLS	BP 网络	小波网络
r	0.83	0.61	0.89
SEP	12.53	13.08	7.65
RPD	1.80	1.25	2.14

表 2 节子缺陷形态参数

Table 2 The parameters of the knot

采样点	采样点到中心距离/mm	倾斜度 $\theta/(\circ)$
1	11	36.06
2	9	36.06
3	14	42.67
4	11	39.51

2.3 板材缺陷三维形态反演

缺陷样本图片如图 9 所示, 测量板材缺陷边缘的 4 点光谱数据, 通过模型预测得到相应的缺陷倾角, 具体数如表 2 所示。将 4 个缺陷点的空间信息和倾角数据输入 SolidWorks2016 软件中反演出缺陷的形态, 如图 10 所示。

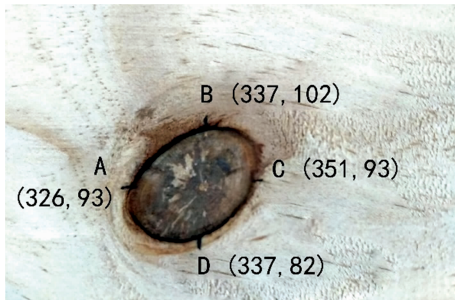


图 9 节子样本边缘采样点

Fig. 9 Sampling points on knot edge

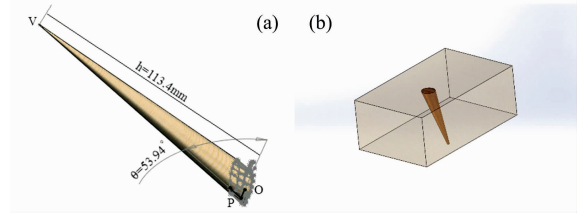


图 10 节子形态模拟

(a): SolidWorks 绘制斜圆锥形态; (b): 节子板材示意图

Fig. 10 The simulation of defect shape

(a): Oblique cone drawing based on Sdidworks;

(b): The sketch of knot board

3 结 论

将近红外光谱分析和模式识别技术应用在木材缺陷检测中, 为板材缺陷形态检测提供了一种新的可行方法, 为定量

分析节子对板材力学性能影响提供了参考依据。实验结果表明, 采用 S-G 平滑、一阶导相结合的方法对近红外光谱数据进行预处理, 可以得到更为清晰、平滑的光谱; 采用 Isomap 非线性降维方法实现了特征波长的有效提取, 提高了缺陷倾角的建模精度; 采用小波网络非线性建模方法实现了缺陷边缘倾角的有效建模, 利用 SolidWorks2016 软件绘制出了板材缺陷相对应的斜圆锥, 实现了对缺陷形态的模拟。建模过程中, 由于缺陷边缘定位上会存在一定的测量误差, 训练集的误差导致了缺陷倾角预测的不精准, 在后续阶段的研究中, 将重点研究缺陷边缘的精准定位和缺陷倾角的鲁棒性建模。

References

- [1] Ruz G A, Estevez P A, Ramirez P A. International Journal of Systems Science, 2009, 40(2): 163.
- [2] Zhang Yizhuo, Xu Chao, Li Chao, et. al. Journal of Forestry Research, 2015, 26(3): 745.
- [3] Zhang Yizhuo, Liu Sijia, Cao Jun, et. al. Wood Science and Technology, 2016, 50(3): 297.
- [4] PENG Hui, JIANG Jia-li, ZHAN Tian-yi, et al(彭 辉, 蒋佳荔, 詹天翼, 等). Scientia Silvae Sinicae(林业科学), 2016, 52(10): 117.
- [5] YANG Hui-min, WANG Li-hai(杨慧敏, 王立海). Journal of Northeast Forestry University(东北林业大学), 2015, 43(8): 114.
- [6] Olsson A, Oscarsson J, Serrano E, et al. European Journal of Wood Products, 2013, 71(3): 319.
- [7] Hittawe M M, Sidibe D, Meriaudeau F. Proceedings of SPIE, 2015, 9534: 95340L.
- [8] LIANG Hao, CAO Jun, LIN Xue, et al(梁 浩, 曹 军, 林 雪, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2017, 37(7): 2041.
- [9] Yang Zhong, Zhang Mao Mao, Chen Ling, et al. Bioresources, 2015, 10(2): 3314.
- [10] ZHANG Yi-zhuo, SU Yao-wen, LI Chao, et al(张怡卓, 苏耀文, 李 超, 等). Journal of Forestry Engineering(林业工程学报), 2016, 1(6): 17.
- [11] ZHANG Yi-zhuo, SU Yao-wen, LI Chao, et al(张怡卓, 苏耀文, 李 超, 等). Journal of Beijing Forestry University(北京林业大学学报), 2016, 38(8): 99.
- [12] Pablo Guindos, Manuel Guaita. Wood Science and Technology, 2013, 47(3): 585.
- [13] SHU Xiao-hua, SHEN Zhen-kang, ZENG Guang-sheng, et al(舒小华, 沈振康, 曾广胜, 等). Computer Engineering and Applications(计算机工程与应用), 2012, 48(31): 191.

The Inversion of Knots in Solid Wood Plates Based on Near-Infrared Spectroscopy

YU Hui-ling¹, ZHANG Miao², HOU Hong-yi², ZHANG Yi-zhuo^{2*}

1. College of Information and Computer Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract Knots affect the mechanical properties of solid wood plates. The accurate description of knots in wood plates and the calculation of wood board mechanical properties have been issues with great practical value. Nowadays, machine vision method is used to detect the defects on wood surface, ultrasonic testing is used to determine the existence of defects, and X-ray method can give a full description of solid wood, but the cost is high. The near infrared spectroscopy analysis technology has the characteristics of rich structure, convenient testing and being nondestructive, but the redundancy and nonlinear information in the spectrum affect the precision of the modeling. In this paper, a method of identifying the knots based on the fusion of Isomap and wavelet neural networks is proposed, and the nonlinear dimensionality reduction is completed by Isomap. The nonlinear relation is modelled by the wavelet neural network between the material and the angle of the knot edge, and the shape structure of the knot inside the wood plate is performed by the multi-point angle of the edge. First, the method uses the cone model to express the knot structure proposed by Pablo. Knots are extracted by machine vision method from the image, and their center positions are obtained by calculation. Then, the information of multi-point position about the edges of knots is extracted and processed by the baseline drift and denoising methods. After that, abnormal spectrums are eliminated by combining PCA and mahalanobis distance, the calibration sample sets are divided by K-S, and effective spectral information are extracted through Isomap, which set the dimensionality reduction and adjacent number, and the fast modeling of different spectral dimensions is completed through PLS, and then the ideal spectral feathers are iterated. Finally, wavelet network is used to establish the relationship between the edge spectrum and their inclination angel of the knots, and the 3D status of these knots is realized by Solidworks software. In this experiment, 160 sets of spectral data of 40 knots were collected from Larix gmelinii plates. After measuring the relative spatial position of the upper and lower surfaces of knots, true inclination angles of every point were obtained. The result of the experiment reveals that S-G smoothing and first order derivative can give clear outline in spectral pre-processing and the absorption peak is more obvious. When Isomap method is for dimension reduction, with non-linear dimension reduction number $d=12$, the nearest neighbor number $k=19$, the SECV is the minimum and the redundant data of spectrum is eliminated. When wavelet neural network is used to build the model of nonlinear inclination angles of knots, the correlation coefficient is 0.88, the prediction standard deviation is 7.65, and the relative analysis error is 2.14. This method can realize the inversion of knot structure in wood plates, and can provide quantitative analysis means for the prediction of mechanical properties.

Keywords Solid wood plate; Knot status; Near infrared spectrum; Isomap; Wavelet neural network

(Received Jul. 13, 2018; accepted Nov. 20, 2018)

* Corresponding author