

多测点无损检测法评估古建木材抗弯强度

王忠铖, 杨娜[†]

(北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 为了提高无损检测手段预测古建木材抗弯强度的精度, 用应力波仪和阻力仪对藏青杨旧材抗弯试样进行了多测点无损检测, 通过对比试样抗弯强度, 分析了无损指标与木材抗弯强度的相关性, 讨论了测试手段、测点位置、测点数量对相关系数的影响, 以及多参数时预测模型的最优自变量组合。结果表明: 增加测点数量可提高无损指标与木材抗弯强度的相关系数; 当自变量较多时, 逐步回归法适合应用于确定最优自变量组合, 同时避免自变量共线性问题; 相较于一元线性模型, 使用最优自变量组合确定的多元线性模型可使无损指标与抗弯强度的相关系数和校正决定系数分别提高 20.54% 和 42.92%, 表明多测点无损检测法可以有效提高木材抗弯强度预测的准确性。

关键词: 古建木材; 无损检测; 抗弯强度; 逐步回归法; 多元模型

中图分类号: TU366.2

文献标志码: A

Evaluation of Bending Strength of Ancient Building Wood by Multi-point Nondestructive Testing Method

WANG Zhongcheng, YANG Na[†]

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of nondestructive testing methods to predict the bending strength of ancient building wood, multi-point nondestructive test was carried out on ancient Tibetan Populus cathayana bending specimens with stress wave detector and resistograph detector. By comparing the bending strength of the specimens, the correlation between nondestructive testing index and the bending strength was analyzed. The influence of measuring method, location and number of measuring points on the correlation coefficient, as well as the optimal combination of independent variables in the multivariate model were discussed. The results indicate that the correlation coefficient between nondestructive index and bending strength increases with the increasing of the number of measuring points; the stepwise regression method can quickly determine the optimal combination of independent variables in the multivariate model, while avoiding the colinearity of independent variables. Compared with the univariate linear model, multivariate linear model determined by the optimal combination of independent variables can increase the correlation coefficients and adjust R square between nondestructive index and the bending strength by 20.54% and 42.92%, respectively, which proves that the multi-point nondestructive testing method can effectively improve the

* 收稿日期: 2021-01-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778045), National Natural Science Foundation of China(51778045); 北京自然科学基金重点资助项目(8151003), Beijing Natural Science Foundation of China(8151003); 高等学校学科创新引智计划(B13002), Project of China from Ministry of Education and the Bureau of Foreign Expert of China(B13002)

作者简介: 王忠铖(1990—), 男, 河北邯郸人, 北京交通大学博士研究生

[†] 通信联系人, E-mail: nyang@bjtu.edu.cn

prediction accuracy of bending strength of ancient building wood.

Key words: ancient building wood; nondestructive test; bending strength; stepwise regression method; multivariate model

无损检测是勘查木材内部残损状况的常用方法^[1-4]。由于其对结构损伤较小,且适合现场操作,因此被越来越多地应用于木结构或木构件的损伤勘查中。古建筑木材的力学性质是评价结构健康状况的重要指标^[5-6],但可供开展破坏性力学试验的原材料十分有限,因此对于古建筑木结构的现场勘查、木材力学性质评估等工作,无损检测发挥了不可替代的作用。

抗弯强度是木材重要的力学参数,近年来,学者发现无损检测(Nondestructive test, NDT)指标与木材抗弯强度之间存在一定的相关性。朱磊等^[7-8]发现落叶松旧材抗弯强度与应力波速的相关系数为0.38,低于新材的0.47;黄荣凤等^[9]对针钻阻力数据进行了细分,发现阻力曲线的均值、波峰、波谷数据与局部腐朽的落叶松旧材抗弯强度的相关系数分别为0.58、0.44和0.59;张厚江等^[10]发现在95%置信度水平下,波阻模量与落叶松旧材抗弯强度的决定系数仅为0.26;李鑫^[11]区分了针钻前进阻力与旋转阻力,发现由前进阻力确定的波阻模量与杉木旧材抗弯强度的决定系数为0.64,旋转阻力仅为0.34;王晓欢^[12]通过频谱分析发现落叶松、软木松旧材抗弯强度与纵向动弹性模量的相关系数均大于0.81;于子绚^[13]发现落叶松、云杉、软木松旧材抗弯强度与动弹性模量相关系数均大于0.76。旧材的树种、尺寸、含水率、材质状况等差异是导致无损检测指标与旧材抗弯强度相关系数离散性较大的原因之一。除此之外,现有研究大多仅测试试样单一位置的无损指标,而抗弯试样尺寸较大,试样中不同位置的木材年轮宽度、早晚材占比、纹理方向等特性并不统一,因此单一测点

的无损指标往往无法反映整根试样的抗弯性质。

本文首先采用力学试验法测量了古建筑木结构旧材料的抗弯强度,然后采用“多手段、多位置”结合的方法获得了抗弯试样的无损检测指标,通过对二者进行相关性分析,讨论了测试手段、测点位置、测点数量对无损检测指标预测古建筑旧材抗弯强度的影响,以及多参数时预测模型最优自变量组合的确定方法,旨在为提高无损检测法评估古建木材抗弯强度提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本文所使用的旧材为某藏式古建筑木结构替换下来的梁构件,构件服役期约为300年,树种为藏青杨(*Tibetan Populus cathayana*),构件尺寸长约4 000 mm,宽约215 mm,高约275 mm。从梁的跨中位置和梁端位置根据《木材物理力学试验锯解及试样截取方法》(GB/T 1929—2009)和《木材抗弯强度试验方法》(GB/T 1936.1—2009)制取抗弯试样120条,从中选取无疵试样59条。

1.2 试验方法

本文对此梁构件力学性质的关注点是在其实际环境中的抗弯强度,因此未进行含水率调整。试样制备完成后,首先进行含水率测试,测试位置见图1;随后进行基本力学性能测试,获得试样抗弯强度 σ_b ;最后,在已破坏的试样上开展应力波顺纹垂测、应力波顺纹端测、应力波横纹测试、阻力仪测试等四类无损检测,如图2(a)~(d)所示,分别获得垂测波速 v_{sc} 、端测波速 v_{sd} 、横纹波速 v_h 和前进阻力 F_r 。

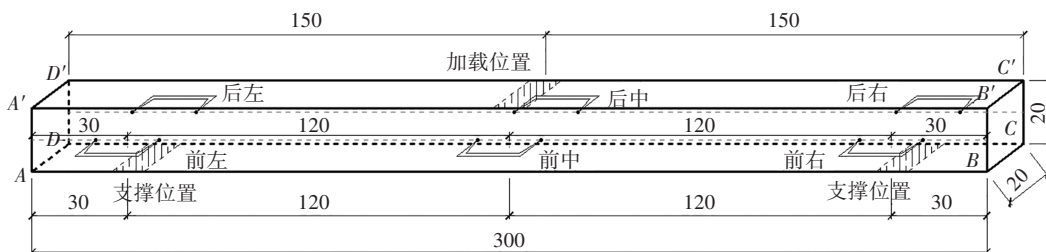


图1 含水率测试位置示意图(单位:mm)

Fig.1 Schematic diagram of water content test location (unit: mm)

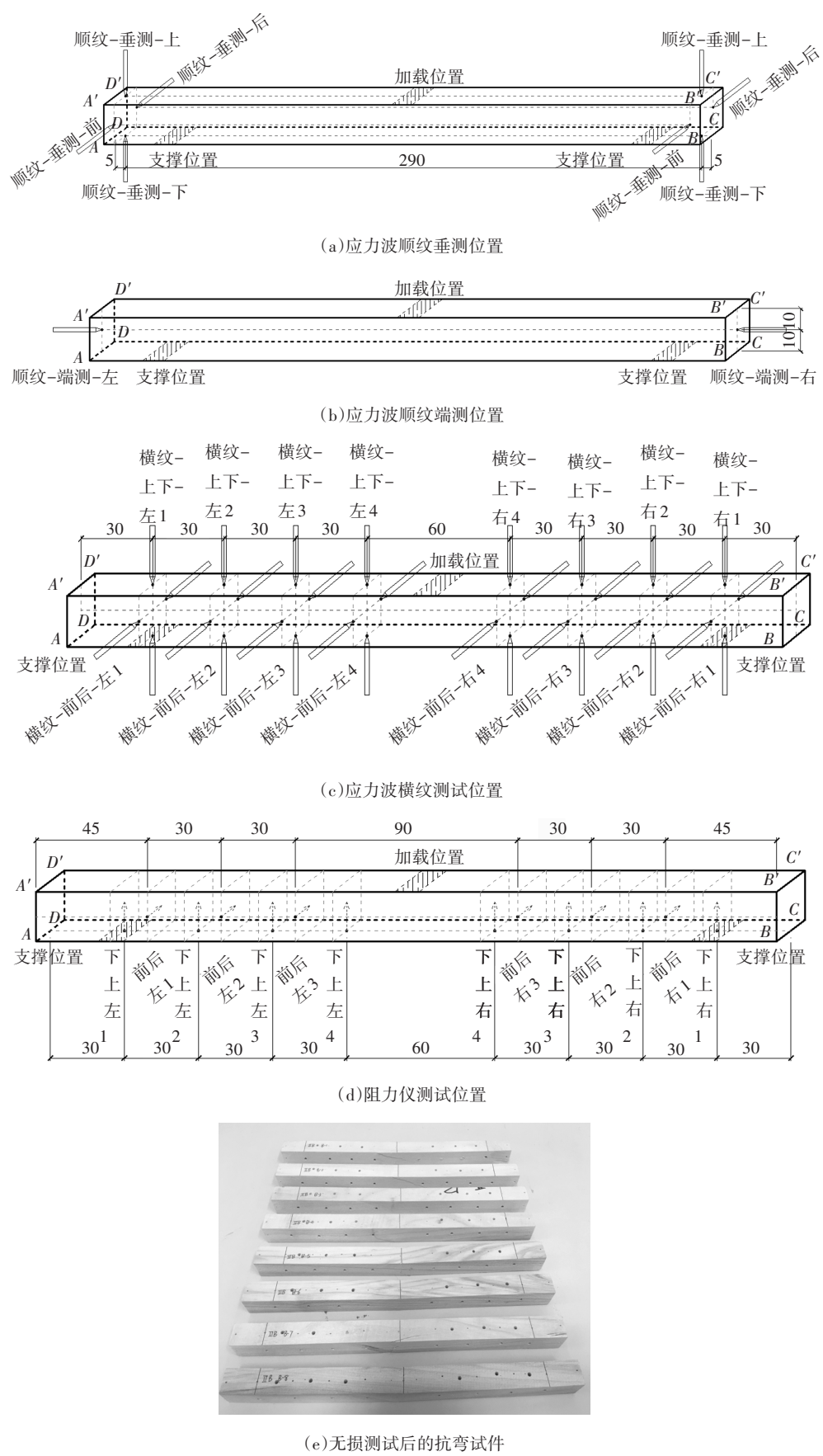


图2 抗弯试样无损检测位置示意图及测试后照片(单位:mm)

Fig.2 Schematic diagram and the photo of the nondestructive test position of the bending specimen (unit:mm)

使用匈牙利 FAKOPP 公司生产的 Microsecond Timer 一维应力波检测仪测试应力波在试样中传播的平均速度. 本文中 v_{sc} 测试 4 个位置, 记做为 v_{sc-i} , $i=1, 2, 3, 4$, 分别对应上、下、前、后 4 个面上顺纹垂测应力波波速; v_{sd} 测试 1 个位置; v_h 测试 16 个位置, 记做 v_{h-ij} , $i, j=1, 2, 3, 4$, 其中 i 表示根据测试方向和位置确定的测试组, $i=1, 2, 3, 4$ 分别对应上下方向试样左侧组、上下方向试样右侧组、前后方向试样左侧组、前后方向试样右侧组, j 表示每组中的测试位置点, 其中 $j=1$ 表示支座位置测试点, $j=2, 3, 4$ 依次向试样跨中递进 30 mm.

使用德国 Rinntech 公司生产的 Resistograph 阻力仪测试钻针在前进路径上受到的阻力^[11]. 本文中, 通过对钻入路径上所有阻力进行求和作为该测试点的阻力值 F_r . 对每一根抗弯试样进行 14 个位置的阻力仪测试, 其中由下向上钻入的测试有 8 个位置, 记做 F_{ix-ij} , 其中 $i=1, 2$, 分别对应由下向上试样左侧组、由下向上试样右侧组, $j=1, 2, 3, 4$, 表示每组中测试点的位置, $j=1$ 表示支座位置测点, $j=2, 3, 4$ 依次向试样跨中递进 30 mm. 由前向后方向的测试有 6 个位置, 记做 F_{iq-mn} , 其中 $m=1, 2$, 分别对应由前向后试样左侧组、由前向后试样右侧组, $n=1, 2, 3$, 表示每组中测试点位置, $n=1$ 表示由支座位置向跨中偏移 15 mm 位置处的测点, $n=2, 3$ 依次向试样跨中递进 30 mm.

除应力波速和针钻阻力外, 波阻模量 Fv^2 同样为常用的无损检测指标, 本文中波阻模量以符号 M 表示.

$$M = F_r \cdot v_{sd}^2$$

(1)

式中: F_r 为针钻阻力, res; v_{sd} 为顺纹端测波速, m/s. 本文仅测试一个 v_{sd} 值, 因此 M 的个数与阻力仪测试数据的个数相同, 记做 M_{ix-ij} 和 M_{iq-mn} , 下标定义同针钻阻力.

2 结果与分析

2.1 藏青杨旧材无疵试样的抗弯强度

由藏青杨旧梁制备的无疵试样的抗弯强度试验结果列于表 1. 作为对比, 表中同时列出了《木结构设计手册》^[14]中给出的甘肃青杨树种新材抗弯强度参考值.

对比可见, 藏青杨旧材虽然经历了 300 年左右的服役期, 但其无疵试样的抗弯强度仅比甘肃青杨新材低 7.75%; 而变异系数却比甘肃青杨新材高 20.00%. 由此可见, 长期服役并不一定会使木材的抗

弯强度显著下降, 但受环境及荷载因素的影响, 木材抗弯强度的离散性会明显增大^[15].

表 1 旧材无疵试样抗弯强度与新材对比

Tab.1 Comparison of defectless specimen between aged and new poplar

材料	试样数量	抗弯强度/MPa		变异系数/%
		均值	标准差	
藏青杨旧材	59	61.53	6.5	10.56
甘肃青杨新材	—	66.70	—	8.8

2.2 无损指标与抗弯强度的一元线性相关性分析

现有文献中关于无损检测指标与木材物理力学参数相关性的研究大多基于一元线性相关性分析, 其回归模型具有简单明了、方便易用等优点. 本文首先分析了无损指标均值与抗弯强度在 0.05 显著性水平下的一元线性相关性, 结果统计于表 2.

由表 2 可以看出, 应力波速与木材试样的抗弯强度不存在显著相关性, 与现有研究结论存在一定差异, 可能与抗弯试样的树种、尺寸、材质状况有关. 波阻模量与抗弯强度的相关系数高于阻力值与抗弯强度的相关系数, 其中前后方向波阻模量与抗弯强度的相关系数最高, 为 0.482, 校正决定系数为 0.219. 此外, 对于这两类无损指标, 前后测试方向与抗弯强度的相关系数均高于下上测试方向, 这是由于抗弯试样为弦向受弯, 抗弯强度由所有年轮中早晚材特征共同决定, 而钻针由前向后钻入可以反映所有年轮中早晚材的特性, 因此与抗弯强度的相关性更高.

前后方向阻力均值及前后方向波阻模量均值与试样抗弯强度的关系如图 3 所示.

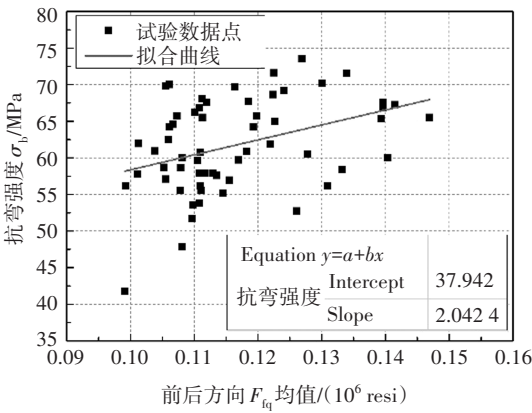
2.3 无损指标与抗弯强度的多元线性相关性分析

增加模型中自变量的个数, 在理论上可以提高相关系数, 但自变量过多又会增加不必要的测试工作量, 同时增加对木构件的损伤. 因此, 在更高的相关系数和更少的工作量间应尽量做到平衡. 此外, 由于木材纹理的差别, 不同测点得到的无损指标与木材性质间可能存在差别. 本节讨论了增加测点数量对模型相关系数的影响, 以及在测点数量相同时, 不同测点位置对模型相关系数的影响.

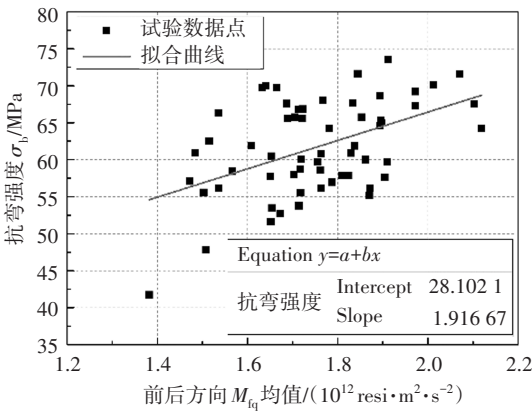
将应力波横纹上下、前后波速, 阻力仪下上、前后方向阻力值, 下上、前后方向波阻模量共计 6 类无损参数进行不同测点数量、不同对称测点位置的组合, 并分别与抗弯强度进行相关性分析. 将得到的相关系数进行对比, 结果如图 4 所示.

表2 抗弯强度与无损检测指标的一元线性相关性分析
Tab.2 Unary linear correlation analysis of σ_b and NDT index

序号	无损检测手段	对比组	自变量	显著性水平	P 值	是否显著相关	Pearson 相关系数	校正决定系数
1	应力波仪	顺纹方向,垂测,均值	$\bar{v}_{sc-i} (i=1,2,3,4)$	0.05	0.768	否	-0.038	-0.015
2		顺纹方向,垂测,顶、底面,均值	$\bar{v}_{sc-i} (i=1,2)$	0.05	0.756	否	0.040	-0.015
3		顺纹方向,垂测,前、后面,均值	$\bar{v}_{sc-i} (i=3,4)$	0.05	0.400	否	-0.109	-0.005
4		顺纹方向,端测	v_{sd}	0.05	0.538	否	0.080	-0.010
5		横纹方向,均值	$\bar{v}_{h-ij} (i,j=1,2,3,4)$	0.05	0.294	否	0.138	0.002
6		横纹方向,探针上下布置,均值	$\bar{v}_{h-ij} (i=1,2; j=1,2,3,4)$	0.05	0.219	否	0.161	0.009
7		横纹方向,探针前后布置,均值	$\bar{v}_{h-ij} (i=3,4; j=1,2,3,4)$	0.05	0.490	否	0.091	-0.009
8	阻力仪	阻力,均值	$\bar{F}_{ix-ij} + \bar{F}_{iq-mn} (i=1,2; j=1,2,3,4; m=1,2; n=1,2,3)$	0.05	0.027	是	0.288	0.067
9		阻力,由下向上测试,均值	$\bar{F}_{ix-ij} (i=1,2; j=1,2,3,4)$	0.05	0.141	否	0.194	0.021
10		阻力,由前向后测试,均值	$\bar{F}_{iq-mn} (m=1,2; n=1,2,3)$	0.05	0.003	是	0.380	0.129
11	应力波仪和阻力仪	波阻模量,均值	$\bar{M}_{ix-ij} + \bar{M}_{iq-mn} (i=1,2; j=1,2,3,4; m=1,2; n=1,2,3)$	0.05	0.001	是	0.406	0.150
12		波阻模量,由下向上测试,均值	$\bar{M}_{ix-ij} (i=1,2; j=1,2,3,4)$	0.05	0.027	是	0.289	0.067
13		波阻模量,由前向后测试,均值	$\bar{M}_{iq-mn} (m=1,2; n=1,2,3)$	0.05	1.09E-04	是	0.482	0.219



(a)前后方向阻力均值与抗弯强度的关系



(b)前后方向波阻模量均值与抗弯强度的关系

图3 前后方向阻力值均值及波阻模量均值与抗弯强度的关系

Fig.3 Correlation between mean F_{iq} , mean M_{iq} and σ_b

由图4(a)可见,随着测点数量的增加,模型与抗弯强度的相关系数逐渐升高;当测点数量一致时,前后方向波阻模量与抗弯强度的相关系数高于其他无损指标. 由图4(b)~(d)可见,对于阻力值和波阻模量两类无损指标,前后方向测试指标与抗弯强度的相关系数普遍高于下上方向,与前文结论一致. 不同测点位置同样会影响无损指标与抗弯强度的相关系数,由图4(b)可见,对于前后方向波阻模量、阻力值

两类无损指标,左、右测点3的自变量组合与抗弯强度的相关系数略低于左、右测点1或2的组合,这是由于测点3靠近试样跨中的破坏位置,与试样木材原始材质状况差异最大;对于下上方向的波阻模量、阻力值两类无损参数,随着测点由试样两端向跨中过渡,相关系数逐渐降低,同样与靠近跨中处木材材质状况与原始状况差异较大有关.

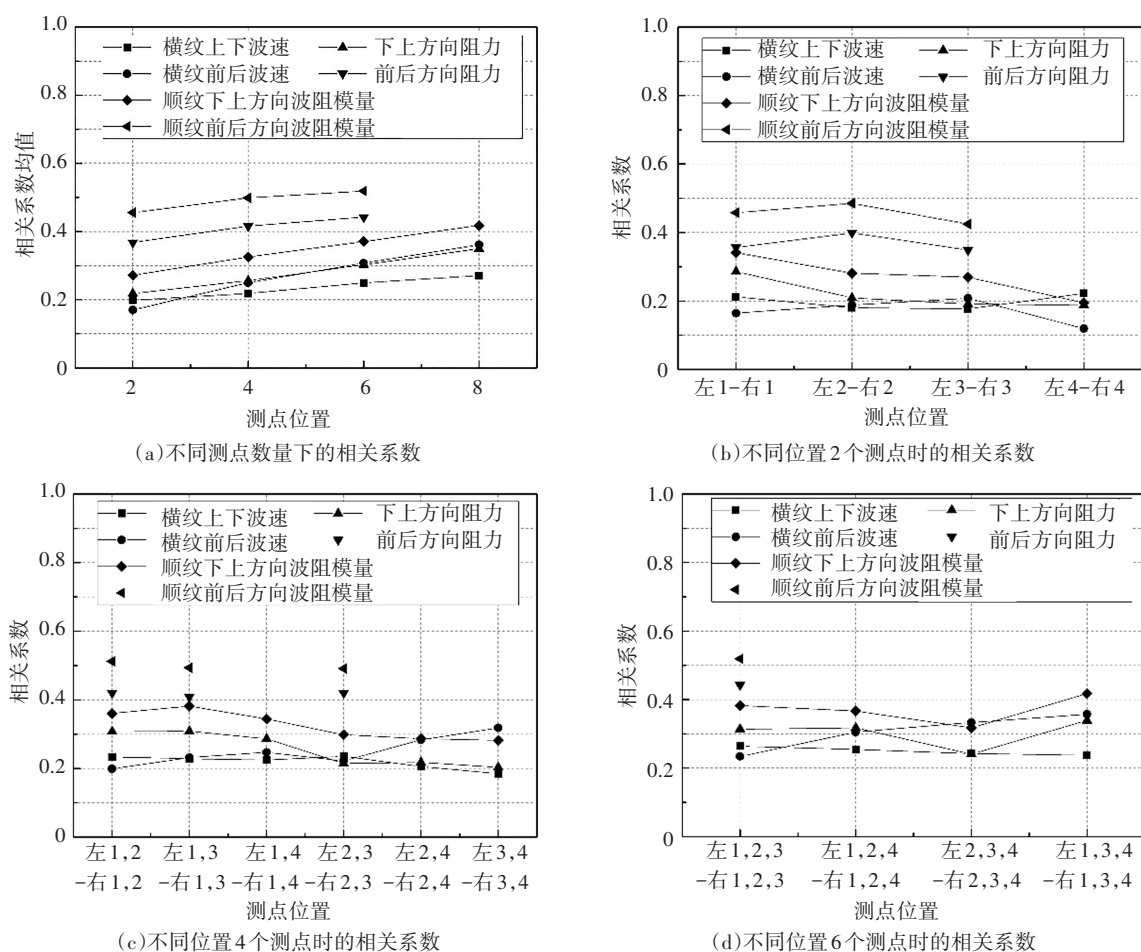


图4 不同测点数量、位置时无损检测指标与抗弯强度的相关系数

Fig. 4 Correlation coefficient of NDT index and σ_b for different number and location of measuring points

2.4 预测抗弯强度参数的最优自变量组合

逐步回归法(Stepwise regression method)^[16]是回归分析中常用的寻找最优自变量组合的统计学方法.其基本思想是将自变量逐个引入模型,每引入一个自变量进行一次F检验,并对所有已选入的自变量逐一进行t检验,当较早引入的自变量由于后面自变量的引入变得不再显著时,将其删除,从而保证每次在引入新的自变量之前回归方程中仅包含显著变量.逐步回归的过程是一个反复的过程,直到既没有显著变量选入回归方程,也没有不显著变量从方程中剔除为止,从而保证最后所得的所有自变量的集合是最优的.本文中自变量共计75类,使用SPSS分析软件进行多自变量下木材物理力学参数预测的逐步回归分析,表3、表4分别为预测抗弯强度的逐步回归分析结果及模型参数,其中B为非标准化系数,VIF为方差膨胀系数.

由表3可见,使用前后方向试样右侧测点波阻模量均值和试样左侧测点1上下横纹波速这两种无损指标的组合(后称强度SR模型)时,相关系数可达

表3 无损指标与抗弯强度的逐步回归分析结果

Tab.3 Stepwise regression analysis results of NDT index and σ_b

模型	R	R ²	Adj. R ²	估计标准误差	Durbin-Watson (U)
1	0.502 ^a	0.252	0.239	5.555 73	—
2	0.581 ^b	0.337	0.313	5.277 78	1.362

注:a代表预测变量(常量),波阻模量前后右均值;b代表预测变量(常量),波阻模量前后右均值,横波上下左1.

表4 无损指标与抗弯强度的逐步回归模型参数

Tab.4 Stepwise regression model parameters of NDT index and σ_b

模型	非标准化系数		显著性	共线性统计	
	B	标准误差		容许	VIF
1(常量)	31.779	6.948	0.000	—	—
波阻模量前后右均值	1.705E-11	0.000	0.000	1.000	1.000
2(常量)	6.176	11.683	0.599	—	—
波阻模量前后右均值	1.828E-11	0.000	0.000	0.985	1.016
横波上下左1	0.048	0.018	0.010	0.985	1.016

到最大值 0.581,校正决定系数为 0.313,较前后方向波阻模量均值的一元模型分别提高 20.54% 和 42.92%,表明多测点无损检测法可以有效提高木材抗弯强度预测的准确性。

3 结 论

1)增加测点数量可使无损指标与藏青杨旧材抗弯强度间的相关系数提高,但同时需要考虑增加测点数量对增大工作量以及增大木材损伤的影响。

2)当自变量指标较多时,逐步回归法可有效提高确定最优自变量组合的效率,同时避免自变量共线性的问题。

3)在预测抗弯强度时,由前后方向测得的波阻模量或阻力值优于由下向上方向测得的波阻模量或阻力值。

4)对于藏青杨旧材抗弯强度的预测,建议参考强度 SR 模型,相关系数为 0.581,校正决定系数为 0.313。

参考文献

- [1] 段新芳,李玉栋,王平.无损检测技术在木材保护中的应用[J].木材工业,2002,16(5):14-16.
DUAN X F, LI Y D, WANG P. Review of NDE technology as applied to wood preservation [J]. China Wood Industry, 2002, 16(5):14-16. (In Chinese)
- [2] 孙燕良,张厚江,朱磊,等.木构件材料力学性能快速检测研究[J].西北林学院学报,2012,27(2):245-248.
SUN Y L, ZHANG H J, ZHU L, *et al.* Rapid test on mechanical properties of wooden components [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(2):245-248. (In Chinese)
- [3] 张甜.杉木超声波无损检测试验研究[D].南京:南京工业大学,2015:12-18.
ZHANG T. Chinese-fir non-destructive testing based on ultrasonic wave [D]. Nanjing: Nanjing Tech University, 2015: 12-18. (In Chinese)
- [4] 曹磊,周先雁,曾丹.基于无损检测的胶合木梁弹性模量评价[J].公路工程,2015,40(6):207-209.
CAO L, ZHOU X Y, ZENG D. Based on nondestruction of evaluation of modulus of elasticity of glulam beam [J]. Highway Engineering, 2015, 40(6): 207-209. (In Chinese)
- [5] 白晓彬,杨娜.长期监测中藏式古建筑木梁应变-温度模型分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2017,44(11):117-125.
BAI X B, YANG N. Strain-temperature model analysis of Tibetan ancient timber beam in long-term monitoring [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(11):117-125. (In Chinese)
- [6] 白晓彬,杨娜,常鹏.燕尾榫约束古建木梁环境温度效应试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2020,47(3):63-72.
BAI X B, YANG N, CHANG P. Experimental analysis of ancient timber beam with dovetail joint restraint under environmental temperature effect [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(3):63-72. (In Chinese)
- [7] 朱磊.基于应力波的古建筑木构件材料力学性能检测技术研究[D].北京:北京林业大学,2012:17-19.
ZHU L. Determining the mechanical properties of ancient architectural timber with stress waves [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012: 17-19. (In Chinese)
- [8] 朱磊,张厚江,孙燕良,等.基于应力波和微钻阻力的古建筑木构件材料力学性能检测[J].东北林业大学学报,2011,39(10):81-83.
ZHU L, ZHANG H J, SUN Y L, *et al.* Determination of mechanical properties of ancient architectural timber based on stress wave and micro-drilling [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(10):81-83. (In Chinese)
- [9] 黄荣凤,王晓欢,李华,等.古建筑木材内部腐朽状况阻力仪检测结果的定量分析[J].北京林业大学学报,2007,35(6):167-171.
HUANG R F, WANG X H, LI H, *et al.* Quantitative analysis on the detected results by resistograph on inside wood decay of ancient architecture [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 35(6):167-171. (In Chinese)
- [10] 张厚江,朱磊,孙燕良,等.古建筑木构件材料主要力学性能检测方法研究[J].北京林业大学学报,2011,39(5):126-129.
ZHANG H J, ZHU L, SUN Y L, *et al.* Determining main mechanical properties of ancient architectural timber [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2011, 39(5):126-129. (In Chinese)
- [11] 李鑫.古建筑木构件材质性能与残损检测关键技术研究[D].北京:北京工业大学,2015:86-92.
LI X. Key technology research on material performance and damage detection for wooden components of ancient chinese building [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015: 86-92. (In Chinese)
- [12] 王晓欢.古建筑旧木材材性变化及其无损检测研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2006:35-36.
WANG X H. Study on the variety and the NDE of aged wood physical and mechanical properties of ancient architecture [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2006: 35-36. (In Chinese)
- [13] 于子绚.应力波检测古建旧木缺陷技术研究[D].北京:北京林业大学,2009:55-58.
YU Z X. Study on impulse stress wave technology to check ancient wood components in defects [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009: 55-58. (In Chinese)
- [14] 龙卫国.木结构设计手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2005:656.
LONG W G. Wood structure design manual [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005: 656. (In Chinese)
- [15] CAVALLI A, CIBECCHINI D, TOGNI M, *et al.* A review on the mechanical properties of aged wood and salvaged timber [J]. Construction & Building Materials, 2016, 114(1):681-687.
- [16] LIAO X, LI Q, YANG X, *et al.* Multiobjective optimization for crash safety design of vehicles using stepwise regression model [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2007, 35(6):561-569.