doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.04.005

# 基于微钻阻力的树木年轮测量方法研究

姚建峰<sup>1</sup> 赵燕东<sup>2</sup> 符利勇<sup>3,4</sup> 宋新宇<sup>5</sup> 卢 军<sup>3,4</sup> 黎沙沙<sup>1</sup> (1.信阳师范学院计算机与信息技术学院,信阳 464000; 2.北京林业大学工学院,北京 100083;

3. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091;

4. 国家林业和草原局森林经营与生长模拟重点实验室, 北京 100091;

5. 信阳师范学院数学与统计学院, 信阳 464000)

**摘要:**针对前期研制的微钻阻力仪存在钻针钻入树木方向偏离直线方向、无法准确获取树木年轮宽度等问题,对微 钻阻力仪的机械结构和软件算法进行了改进,提出了改进钻针形状和增加钻针支撑挡片的改进措施,给出了年轮 宽度的计算方法。分别使用自制微钻阻力仪、Resistograph 650 - s 型微钻阻力仪、Lintab 6 型高精度树木年轮分析仪 测量 9 个马尾松圆盘的年轮信息,以 Lintab 6 型树木年轮分析仪测试结果作为真值,分别计算自制微钻阻力仪和 Resistograph 650 - s 型微钻阻力仪的年轮识别错误率和年轮宽度测量精度。结果表明:2 个微钻阻力仪的平均年轮 宽度的测量精度达 85% 左右,说明使用微钻阻力法测量树木年轮宽度可行;自制微钻阻力仪的年轮识别错误率比 Resistograph 650 - s 型微钻阻力仪低 12.7 个百分点,年轮宽度测量精度比 Resistograph 650 - s 型微钻阻力仪高 1.47 个百分点,说明自制微钻阻力仪机械结构设计合理,年轮识别方法可行。

关键词:微钻阻力仪;树木年轮;钻针阻力;峰谷算法

中图分类号: S758.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)04-0052-08



# Tree-rings Measurement Method Based on Micro Drill Resistance

YAO Jianfeng<sup>1</sup> ZHAO Yandong<sup>2</sup> FU Liyong<sup>3,4</sup> SONG Xinyu<sup>5</sup> LU Jun<sup>3,4</sup> LI Shasha<sup>1</sup>

(1. College of Computer and Information Technology, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China

2. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3. Research Institute of Forest Resources Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China 4. Key Laboratory of Forest Management and Growth Modelling,

National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China

5. School of Mathematics and Statistics, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

Abstract: In view of the problems of the micro drill resistance instrument developed in the early stage, such as the direction of the drill drilling into the tree deviated from the straight line, the width of tree-rings cannot be obtained accurately, the mechanical structure and software algorithm of the micro drill resistance instrument were redesigned, the improvement measures of changing the drill shape and adding the drill support baffle were put forward, and the calculation method of the tree-rings' width was given. The principle and the expression method of drill resistance of self-made micro drill resistance instrument was described. The number of tree-rings and the width of tree-rings of nine *Pinus massoniana* discs were tested by self-made micro drill resistance instrument, Resistograph 650 - s and Lintab 6 respectively. The results measured by Lintab 6 were taken as the true value. The tree-rings recognition error rate and the measurement accuracy of tree-rings' width of self-made micro drilling resistance instrument and Resistograph 650 - s were calculated respectively. Most boundaries of tree-rings identified by the two micro drill resistance instruments corresponded to the late wood position of the tree-rings. The measurement accuracy of tree-rings width of self-made micro drill resistance instrument was 86.40%.

收稿日期: 2022-01-15 修回日期: 2022-02-10

基金项目:河南省科技发展计划项目(212102110209)、河南省高等学校重点科研项目(22A220002)和中央级公益性科研院所基本科研业 务费专项资金重点项目(CAFYBB2018SZ007)

作者简介:姚建峰(1980—),男,讲师,博士,主要从事树木年轮微损测量仪器研究,E-mail: 249749251@ qq. com

通信作者: 宋新宇(1961-), 男, 教授, 博士, 主要从事生态种群模型研究, E-mail: xysong88@163. com

The measurement accuracy of tree-rings width of Resistograph 650 - s was 84.93%. And the average accuracy of the tree-rings width measured by the two instruments was as high as 85%, which showed that the micro drill resistance instrumentwas feasible to measure the number of tree-rings and the width of tree-rings. The error rate of tree-rings recognition of self-made micro drill resistance instrument was 12.7 percentage points lower than that of Resistograph 650 - s, and the measurement accuracy of tree-rings width of self-made micro drill resistance instrument was 12.7 percentage points lower than that of Resistograph 650 - s, and the measurement accuracy of tree-rings width of self-made micro drill resistance instrument was 1.47 percentage points higher than that of Resistograph 650 - s, which indicated that the mechanical structure design of self-made micro drill resistance instrument was reasonable and the tree-rings recognition method was feasible.

Key words: micro drill resistance instrument; tree-rings; drill resistance; peak-valley algorithm

### 0 引言

在温带和亚热带地区,树木生长受季节影响比 较大。在生长季早期,树木生长较快,所形成木材的 密度较小,颜色较浅,通常把这部分木材称为"早 材"。在生长季晚期,所形成木材的密度较大,颜色 较深,通常把这部分木材称为"晚材"。当年的晚材 与次年的早材之间界限分明,呈现纹轮,称该纹轮为 年轮线。树干任意一处从髓心到形成层的年轮线数 目就是该处树干生长的年龄,相邻年轮线之间的距 离称为年轮宽度[1]。因此,树木年轮不仅记录了树 木的年龄,还记录了气候、环境和森林经营等综合外 界因子对树木生长的影响<sup>[2-3]</sup>。通过建立树木年轮 与气候因子之间的数学模型,可重现过去的气候环 境变化,甚至可能预期未来的气候变化规律<sup>[4]</sup>。同 时,树木年龄是森林资源调查的一项基本指标,是林 业生产中重要的时间指标,在预估蓄积量和生长量、 确定林分龄级和龄组、调整林分龄级配置、评价森林 碳汇潜力、制定森林经营方案等方面具有重要意 义[5-8]。目前测量树木年轮常用生长锥法。生长锥 法取样木芯速度较慢,且对树木生长有一定的负面 影响,因此,不能使用生长锥大范围地测量树木年 轮。科研人员试图寻找一种无损、快速的测量方法 来代替生长锥法<sup>[9]</sup>。微钻阻力仪是使用电机控制 钻针匀速钻入树木并实时记录钻针阻力的一种仪 器<sup>[10]</sup>。钻针阻力与木材密度正相关。当钻针钻入 晚材部分时,钻针阻力较大;当钻针钻入早材部分 时,钻针阻力较小。当钻针沿径向方向钻入树木时, 钻针阻力呈峰谷交替规律变化。因此,根据钻针阻 力峰谷特征可获取树木年轮信息[11]。针头宽度仅 3 mm,对树木损伤很小<sup>[9]</sup>,是取代生长锥成为测量 树木年轮的最佳仪器。

目前世界上使用的微钻阻力仪主要由德国 Rinntech和 IML(Instrumenta Mechanik Labor)公司 生产。由于这两个厂家生产的微钻阻力仪钻针阻力 中含有大量的噪声信号,钻针阻力中的波峰不能与 树木年轮的晚材一一对应,年轮识别主要通过人工 完成,年轮识别工作量大。唐守正院士团队研究了 微钻阻力仪工作原理及其在树木年轮测量方面的应 用,并取得一系列成果<sup>[12-18]</sup>。但是,由于钻针振动, 钻针有时偏离直线方向钻入树木,钻针阻力波峰位 置与年轮晚材位置存在错位情况,所以,根据阻力波 形图不能获取精确的年轮宽度信息。本文在前期研 究基础上,对微钻阻力仪的钻针形状、钻针支撑挡片 和峰谷年轮识别算法做进一步改进,以提高所研制 的微钻阻力仪测量树木年轮的精度。

### 1 微钻阻力仪机械部件改进设计

微钻阻力仪钻针由 2 个电机控制:直流电机控 制钻针旋转速度,步进电机控制钻针进给速度。微 钻阻力仪的机械传动结构如图 1 所示。钻针通过钻 针夹与直流电机轴相连。传动丝杆与步进电机轴相 连。丝杆滑块中心有一个螺纹孔,丝杆滑块通过螺 纹孔嵌套在传动丝杆上。直流电机固定在丝杆滑块 上。当步进电机旋转时,步进电机带动传动丝杆同 步旋转,使丝杆滑块在直线导轨上移动,从而带动钻 针移动<sup>[18]</sup>。



图1 机械传动结构图

 Fig. 1
 Mechanical transmission structure diagram

 1.步进电机
 2.联轴器
 3.后丝杆支撑座
 4.直流电机
 5.钻

 针夹
 6.传动丝杆
 7.直线导轨
 8.钻针
 9.钻针套头
 10.前

 丝杆支撑座
 11.丝杆滑块

钻针针头宽度为 3 mm, 钻针针杆直径为 1.5 mm<sup>[10]</sup>,针头宽度是针杆直径的 2 倍,因此,钻针

阻力主要集中在钻针针头上。德国 Rinntech 公司生 产的钻针形状如图 2 所示。



Fig. 2 Structure and size of drill needle

树木晚材呈圆弧形状,钻针距离树木髓心越近, 钻针所切削晚材部分的弧度越大。晚材部分密度较 大,钻针阻力较大:早材部分密度较小,钻针阻力较 小。由于钻针针尖长度仅 0.3 mm,钻针针尖过短, 当钻针针尖两边的阻力差异较大时,钻针针尖不能 固定钻针进给方向,导致钻针易向阻力较小的早材 部分倾斜,使钻针不能沿直线方向钻入树木。因此, 仅通过钻入点和钻出点的位置无法确定钻针路径。 如果钻针针尖过长,当年轮宽度较窄时,钻针针头可 能同时跨越多个年轮,使钻针阻力不能清晰地反映 出树木年轮信息。为了使钻针尽量沿直线方向钻入 树木,同时使钻针阻力可测量年轮宽度大干0.5 mm 以上的年轮信息,本设计将钻针针尖的长度改为 0.5 mm。同时使用日本生产的高强度铬钼钢 SCM435 制作钻针, 以减小钻针的振动幅度和弯曲 程度。改进前后钻针针头形状如图3所示。



(a) 改进前
 (b) 改进后
 图 3 钻针改进前后形状对比
 Fig. 3 Comparison of drill shape before and after improvement

由于钻针又细又长,当钻针高速旋转时,钻针易 振动、弯曲、变形,因此,需要设计钻针支撑挡片减小 钻针振动幅度。文献[14]中提出的钻针支撑挡片 设计方案所使用的金属片长达1.5m,不易加工,且 加工精度难以得到保证。因此,本文提出一种新的 钻针支撑挡片设计方案。该设计方案中使用最长的 金属片仅0.8m,易加工,有效提高了钻针支撑挡片 的加工精度。单个钻针支撑挡片的结构如图4 所示。

钻针从前横向支撑片中间的钻针孔穿过,直线 导杆从前横向支撑片和后横向支撑片两边的直线导 杆孔穿过。钻针支撑挡片可在直线导杆上移动。多 个长度和高度不同的钻针支撑挡片可叠加在一起。 钻针支撑挡片组装示意图如图5所示。



图 4 钻针支撑挡片结构示意图

Fig. 4 Schematic of baffle plate for supporting drill needle 1. 前横向支撑片 2. 后横向支撑片 3. 直线导杆孔 4. 钻针孔 5. 支撑挡片连接片



Fig. 5 Assembly diagram of baffle plate for supporting drill needle

当直流电机座在起始位置时,钻针支撑挡片尾端的横向支撑片叠加在一起,钻针支撑挡片前端的 横向支撑片均匀分布在直线导杆上。当直流电机座 向前移动时,直流电机座推动钻针支撑挡片前端的 横向支撑片从而推动钻针支撑挡片向前移动,使钻 针支撑挡片前端的横向支撑片逐步叠加在一起。当 直流电机座移动到直线导轨的最前端时,所有钻针 支撑挡片前端的横向支撑片叠加在一起,钻针支撑 挡片尾端的横向支撑片均匀分布在直线导杆上。当 直流电机座后退时,直流电机座推动钻针支撑挡片 尾端的横向支撑片从而使钻针支撑挡片向后移动。

当钻针钻入晚材部分时,晚材密度增大,钻针阻 力增大,直流电机转速降低,直流电机控制器增加直 流电机电压,从而使直流电机电枢电流和功率增加, 使电机转速上升;当钻针钻入早材部分时,早材密度 减小,钻针阻力减小,直流电机转速升高,直流电机 控制器减小直流电机电压,从而使直流电机电枢电 流和功率减小,使电机转速降低。因此,直流电机的 电压、电流和功率与钻针阻力正相关,可用直流电机 的电压、电流和功率与钻针阻力正相关,可用直流电机 的电压、电流和功率与钻针阻力正相关,可用直流电机 的电压、电流和功率与钻针阻力正相关,可用直流电机 的电压、电流和功率与钻针阻力正相关,可用直流电机 的电压、电流和功率与钻针阻力正相关,可用直流电机 的电压、电流和功率与钻针阻力正相关,可用直流电机

$$U_1 = Un_0/n$$
 (1)  
式中  $U_1$ ——修正后的首流电机电压、V

U-----直流电机电压,V

n<sub>0</sub>——直流电机设定转速,r/min

n——直流电机实际转速,r/min

# 2 峰谷年轮识别算法改进设计

自制微钻阻力仪使用峰谷年轮识别算法识别树 木年轮<sup>[14-15]</sup>。峰谷年轮识别算法是根据钻针阻力 波形图中波峰与波谷之间的差值来识别钻针阻力波 形图中的波峰是否为年轮信号。该算法需要设置波 峰与波谷之间差值的阈值。当波峰与相邻波谷之间 的差值大于或者等于设定的阈值时,则判别该波峰 是树木年轮信号;当波峰与相邻波谷之间的差值小 于阈值时,则判别该波峰是噪声信号。把树木年轮 信号的个数作为测量路径的年轮数,把树木年轮信 号波峰极大值点作为早晚材之间的分界点,把每个 树木年轮信号波峰极大值点与下一个相邻的树木年 轮信号波峰极大值点之间的距离作为年轮宽度。使 用 C 语言编写峰谷年轮识别函数实现峰谷年轮识 别算法。峰谷年轮识别函数的定义如下:

int Peak\_Vally(float a[][2], int k, float b[][3], float d[], float det)

峰谷年轮识别函数中,形式参数 a 是二维数组, 用于存储钻针阻力的测量数据,第1列存储阻力的 序号,第2列存储阻力;形式参数 k 存储钻针阻力的 个数;形式参数 b 是二维数组,用于存储波峰和波谷 的阻力数据,第1列存储阻力的序号,第2列存储阻 力,第3列存储波峰或者波谷的标志,如果该阻力数 据是波峰,该数组元素为1,如果该阻力数据是波 谷,该数组元素为0;形式参数 d 是一维数组,用于 存储年轮宽度;形式参数 det 是波峰与波谷之间差 值的阈值 Δ;函数返回值是树木年轮信号的个数,即 数组 b 中波峰的个数。

阈值设定值要合理,如果阈值设定值过大,则把 部分波峰与波谷差值较小的有效年轮信号判别为噪 声信号;如果阈值设定值过小,则把部分波峰与波谷 差值较大的噪声信号判别为有效的年轮信号。本文 以每个测量数据的识别年轮误差最小的阈值作为该 测量数据的最优阈值,把每个测量数据最优阈值的 平均值作为所有测试数据的最优阈值,然后以该阈 值预估每个测量数据的年轮数。具体方法如下:

(1)设置最优阈值的寻优范围:把测量数据波 形图与圆盘图像对比,初步确定哪些波峰是树木年 轮信号,哪些波峰是噪声信号,把树木年轮信号中波 峰与波谷差值的最大值作为最优阈值的最大值  $\Delta_{max}$ ,树木年轮信号中波峰与波谷差值的最小值作 为最优阈值的最小值 $\Delta_{min}$ 。当波峰与波谷之间的差 值大于 $\Delta_{max}$ ,把该波峰作为一个有效的年轮信号,当 波峰与波谷之间的差值小于 $\Delta_{min}$ ,把该波峰作为一 个噪声信号。

(2)设置寻优步长:为了使获得的最优阈值较精确,需要尽量减小寻优步长。但是,当寻优步长过小时,寻优时间过长。因此,本设计把寻优范围进行200等分,即步长设置为Δ<sub>max</sub>与Δ<sub>min</sub>差值的0.5%。

(3)寻找每个测量数据的最优阈值:以每个测量数据和寻优范围内的每个阈值作为参数调用峰谷 年轮识别函数,以预测年轮精度最高的阈值作为该 测量数据的最优阈值。

(4)计算每个测量数据最优阈值的平均值,将 该值作为所有测试数据的最优阈值Δ。

(5)以每个测量数据和Δ作为参数调用峰谷年 轮识别函数。

使用峰谷年轮识别算法处理阻力数据的流程如 图 6 所示。



Fig. 6 Flow chart of peak-valley algorithm

使用自适应低通滤波器对原始钻针阻力数据进行滤波处理,然后根据钻针路径长度和树皮厚度,选取钻针路径上木质部部分的钻针阻力数据,调用峰谷年轮识别函数获取每个年轮的波峰和波谷点的数据和年轮宽度,最后使用 R 语言绘制每个阻力数据的年轮识别图。

# 3 性能试验

## 3.1 试验仪器

试验仪器主要有自制的微钻阻力仪、德国 Rinntech公司生产的 Resistograph 650 - s 型微钻阻 力仪和 Lintab 6 型高精度树木年轮分析仪。自制微 钻阻力仪的钻针旋转速度设置为 3 500 r/min,钻针 进给速度设置为 30 cm/min,钻针阻力采样间距为 0.005 mm,测量长度为 500 mm。Resistograph 650 - s 型微钻阻力仪钻针进给速度是 60 cm/min,钻针阻 力采样间距为 0.01 mm。Lintab 6 型高精度树木年 轮分析仪的分辨率是0.01 mm,测量长度为560 mm。

#### 3.2 试验方法

3.2.1 试验样品加工方法和处理方法

2020年9月在信阳师范学院校内天然次生林 中采样9棵近2个月内枯死的马尾松作为试验材 料,在树高1.3m附近无明显缺陷位置截取10cm 厚的圆盘,并记录圆盘北向方向。使用打磨机打磨 圆盘直至年轮线清晰可见为止。在圆盘光面分别使 用红色、蓝色的铅笔标记东西、南北方向,两个方向 都要经过圆盘髓心。使用扫描仪扫描圆盘图像,使 用 Lintab 6 测量每个圆盘东西、南北2个方向上的 年轮数和年轮宽度。

3.2.2 钻针阻力取样方法

分别使用 2 个微钻阻力仪沿圆盘东西、南北 2 个方向钻入圆盘,尽量使钻针路径经过圆盘髓心。 在同一个方向上,2 个仪器的钻入点在垂直方向上 相距 2 cm 左右,以防止 2 个仪器钻针路径重合。记 录钻针路径长度和钻针钻入圆盘、钻出圆盘处的树 皮厚度。

# **3.2.3** Resistograph 650 - s 型微钻阻力仪年轮宽度 测量方法

使用 Resistograph 650 - s 型微钻阻力仪自带的 DECOM 软件识别树木年轮。首先根据钻针路径长 度和树皮厚度,选取钻针路径上木质部部分的钻针 阻力数据,然后使用 DECOM 软件自动识别树木年 轮,最后保存每个测量数据的年轮识别结果图和年 轮宽度数据。

3.2.4 微钻阻力仪年轮识别误差计算方法

对照钻针路径圆盘图和钻针阻力年轮识别图, 如果钻针阻力年轮识别图中的年轮线与圆盘图中的 晚材位置相对应,则把该年轮线标记为正确的年轮 线;如果钻针阻力年轮识别图中的年轮线与圆盘图 中的早材位置相对应,则把该年轮线标记为错误的 年轮线;如果圆盘图的晚材位置没有对应的年轮线, 则把该年轮标记为未能识别的年轮。保存钻针路径 圆盘图和钻针阻力年轮识别图的匹配图,并分别统 计每个测量数据识别正确的年轮线个数 $m_1$ 、识别错 误的年轮线个数 $m_2$ 和未能识别晚材的个数 $m_3$ 。每 个测量路径上使用 Lintab 6 测量的晚材个数为m, 每个阻力测量数据的年轮误判率 $e_1$ 、年轮漏判率 $e_2$ 和年轮识别错误率e计算式为

$$e_1 = m_2 / m \times 100\%$$
 (2)

$$e_2 = m_3 / m \times 100\%$$
 (3)

$$e = e_1 + e_2 \tag{4}$$

3.2.5 微钻阻力仪年轮宽度测量精度计算方法 对照钻针路径圆盘图和钻针阻力年轮识别图, 在圆盘图像晚材位置标记漏判的年轮,在年轮识别 图中标记正确识别的年轮分界线和错误识别的年轮 分界线。如果钻针阻力图中相邻 2 个正确识别的 年轮分界线之间正好对应圆盘图中的 1 个年轮, 则把这 2 个正确识别年轮分界线之间的距离作为 微钻阻力仪测量的年轮宽度 $w_1$ ,把 Lintab 6 测量的 年轮宽度作为微钻阻力仪所识别年轮的宽度真值  $w_2$ ;如果钻针阻力图中相邻 2 个正确识别的年轮 分界线之间与圆盘图中多个年轮相对应,即正确 识别的 2 个年轮线之间存在漏测的年轮,则把这 2 个年轮分界线之间的距离作为微钻阻力仪测量的 年轮宽度 $w_1$ ,把 Lintab 6 测量的多个年轮宽度和作 为微钻阻力仪所识别年轮的宽度真值 $w_2$ 。相邻的 2 个正确识别年轮线测量年轮宽度的精度 $\varepsilon_0$ 计算 公式为

$$\varepsilon_0 = 1 - |w_1 - w_2| / w_2 \tag{5}$$

把每个测量数据每2个正确识别年轮线测量年 轮宽度精度  $\varepsilon_0$ 的平均值作为每个测量数据的年轮 宽度的测量精度  $\varepsilon_0$ 。

### 4 试验结果与分析

#### 4.1 自制微钻阻力仪年轮测量结果

根据钻针阻力曲线与圆盘年轮图像的对比分 析,确定最优阈值的最大值 $\Delta_{max}$ 为2.01 V,最优阈值 的最小值 $\Delta_{min}$ 为0.01 V,寻优步长设置为0.01 V,各 测试数据的最优阈值如表1所示。所有测试数据最 优阈值的平均值为0.68 V。把阈值设置为0.68 V, 调用峰谷年轮识别函数,记录各数据的测试结果,绘 制年轮识别图。通过与圆盘年轮图像对比,在圆盘 图像晚材位置标记漏判的年轮,在年轮分界线上标 记误判的年轮,然后计算年轮识别的漏判率、误判 率、错误率和年轮宽度测量精度。表1 为各测试数 据的年轮识别结果,图7 为其中一个测试数据的年 轮识别匹配图。从图7 中可以看出,峰谷年轮算法 可正确识别圆盘图中约90%的年轮。

#### 4.2 Resistograph 650-s 型微钻阻力仪年轮测量结果

使用 DECOM 软件年轮识别模块自动识别各测 量数据的年轮,记录各数据的测试结果,保存年轮识 别图。通过与圆盘年轮图像对比,在圆盘图像晚材 位置标记漏判的年轮,在年轮分界线上标记误判的 年轮,然后计算 Resistograph 650 - s 型微钻阻力仪 年轮识别的漏判率、误判率、错误率和年轮宽度测量 精度。表 2 为 Resistograph 650 - s 型微钻阻力仪年 轮识别结果,图 8 为其中一个测试数据的年轮识别 匹配图。从图 8 中可以看出,DECOM 软件可正确识 别圆盘图中约 75% 的年轮。

#### 57

Tab. 1 Results of tree-rings measurement measured by self-made micro drill resistance instrument

圆盘号	方向	晚材数	最优阈值/V	测量晚材数	漏判率/%	误判率/%	错误率/%	宽度测量精度/%
1	东西	42	0.37	35	16.67	0	16.67	91.09
	南北	42	0. 25	30	28.57	0	28.57	90.85
2	东西	44	0. 83	43	6.82	4. 55	11.37	85.24
	南北	44	0.70	44	4.55	4.55	9.10	88.90
3	东西	44	1.05	47	4.55	11.36	15.91	83.28
	南北	44	1.01	49	6.82	18.18	25.00	82.67
4	东西	42	0. 54	38	9. 52	0	9. 52	89.93
	南北	42	0.81	42	4.76	4.76	9. 52	90.37
5	东西	42	0. 82	43	2.38	4.76	7.14	90.11
	南北	42	0. 98	49	0	16.67	16.67	88.70
6	东西	80	0.66	76	7.50	2.50	10.00	82. 58
	南北	80	0. 59	78	7.50	5.00	12.50	75.56
7	东西	78	0.62	75	6.41	2.56	8.97	85.35
	南北	78	0.45	63	20.51	1.28	21.79	86.03
8	东西	76	0. 74	78	2.63	5.26	7.89	83.69
	南北	76	0.33	59	23.68	1.32	25.00	84. 67
9	东西	70	0. 83	75	7.14	14. 29	21.43	87.04
	南北	70	0.69	70	2.86	2.86	5.72	89.16
平均值		57.56	0.68	55.22	9.05	5.55	14.60	86.40



图 7 自制微钻阻力仪年轮匹配图 Fig. 7 Tree-rings matching diagram of self-made micro drill resistance instrument

表 2 Resistograph 650 - s 型微钻阻力仪年轮测量结果 Tab. 2 Results of tree-rings measurement measured by Resistograph 650 - s

			测量酶	漏判	- 足判	错误率/	審度测量
圆盘号	方向	らしつJ 米ケ	お地方	·/雨/·リ 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一	灰八	旧庆十/	地区闲里
		奴	1/1 女义	<u>~</u> †~/ %0	<del>~~</del> ~/ %0	%0	相反/%
1	东西	42	29	30.95	0	30.95	85.12
	南北	42	31	26.19	0	26.19	86.05
2	东西	44	34	25.00	2.27	27.27	86.30
	南北	44	35	20.45	0	20.45	84.39
3	东西	44	31	29.55	0	29.55	89.02
	南北	44	32	27.27	0	27.27	87.82
4	东西	42	28	33.33	0	33.33	88.97
	南北	42	31	26.19	0	26.19	90.91
5	东西	42	34	19.05	0	19.05	88.00
	南北	42	35	19.05	2.38	21.43	80.56
6	东西	80	30	62.50	0	62.50	89.84
	南北	80	55	31.25	0	31.25	79.70
7	东西	78	61	21.79	0	21.79	87.49
	南北	78	66	16.67	1.28	17.95	77.75
8	东西	76	65	17.11	2.63	19.74	71.49
	南北	76	58	23.68	0	23.68	82.87
9	东西	70	49	30.00	0	30.00	89.45
	南北	70	54	22.86	0	22.86	82.96
平均值		57.56	42.11	26.83	0.48	27.30	84.93
平均值		57.56	42.11	26.83	0.48	27.30	84. 93



图 8 Resistograph 650 - s 型微钻阻力仪年轮匹配图 Fig. 8 Tree-rings matching diagram of Resistograph 650 - s

#### 4.3 结果分析

从测试结果可以看出,2个微钻阻力仪所识别 的树木年轮分界线绝大部分都与树木年轮的晚材位 置相对应,2个仪器的平均年轮测量宽度的精度达 85% 左右,说明微钻阻力仪测量树木年轮个数及其 宽度是可行的。但有些测试数据年轮识别错误率较 高,主要有以下原因:①部分年轮早晚材密度差异较 小,钻针阻力峰谷差值较小,特别当年轮宽度小于 1 mm 时,钻针阻力不能清晰地反映出树木年轮信 息,在识别树木年轮时,易把这些峰谷差值较小的波 峰判别为噪声信号,如图9所示,自制微钻阻力仪漏 判的3个树木年轮所对应的波峰的峰谷差值均较 小。②部分树木中存在伪年轮,部分伪年轮的钻针 阻力峰谷差值较大,容易把伪年轮的波峰识别为一 个正常年轮信号,图9中左边第7条年轮分界线对 应的即为伪年轮。③钻针钻入方向偏离树木径向方 向,由于树木年轮一般不是一个规则的圆形,且在实 际操作时,钻针很难通过树木髓心,因此,钻针钻入 晚材的方向有时与年轮线切线方向不垂直,由于钻 针形状是扁平的,导致钻针钻过晚材时,钻针针头与 晚材的接触面积有时增大,有时减小,因此,这部分 钻针阻力峰谷差值较小,特别当树木年轮宽度小于 1 mm 时,钻针针头可能同时跨越多个年轮,易把这 部年轮信号识别为噪声信号,如图 10 中漏判的树木 年轮信号大部分都是由该原因引起的。



图 9 包含早晚材密度差异较小的年轮、窄年轮和 伪年轮的年轮匹配图

Fig. 9 Tree-rings matching diagram included small difference in density between early-wood and late-wood, narrow tree-rings and pseudo tree-rings



图 10 钻针方向偏离树木径向方向的年轮匹配图 Fig. 10 Tree-rings matching diagram of drilling direction deviated from tree radial direction

对比分析 2 个仪器的测量结果,自制微钻阻力 仪年轮识别错误率为 14.60%,年轮宽度的平均测 量精度是 86.40%,Resistograph 650 - s 型微钻阻力 仪年轮识别错误率为 27.30%,年轮宽度的平均测 量精度为 84.93%,自制微钻阻力仪的年轮识别错 误率比 Resistograph 650 - s 型微钻阻力仪低 12.7 个 百分点,年轮宽度测量精度比 Resistograph 650 - s 型微钻阻力仪高 1.47 个百分点,说明自制微钻阻力 仪机械结构设计合理,机械部件加工精度、特别是钻 针加工精度达到现有微钻阻力仪的加工精度,年轮 识别方法可行。

#### 5 讨论

前人研究表明,微钻阻力仪钻针阻力主要由木 材绝干密度决定<sup>[10,19-23]</sup>,当钻针沿径向方向钻入树 木时,钻针阻力可以反映出树木年轮信息。文 献[24]对比分析了生长锥法和微钻阻力法测量 135 棵土耳其松的年轮结果,发现两种方法测量的 年轮宽度的线性相关系数高达 0.97. 大部分年轮边 界一致。文献[15] 给出了峰谷年轮识别算法的具 体过程,并根据生长锥木芯测量的树木年龄,确定每 个阻力数据所对应的峰谷差值的阈值,再使用峰谷 年轮算法预估每个测量数据的树木年龄,研究发现, 峰谷年轮算法预估的树木年龄与生长锥法测量结果 相接近,但该文献没有分析峰谷算法年轮宽度的测 量精度。文献[25]使用中值法去除钻针阻力信号 中的伪波峰,即把所有波峰的峰谷差值的平均值作 为阈值,把峰谷差值小干平均值的波峰作为噪声信 号,选取部分年轮数据分析中值法的测量精度,研究 结果表明中值法测得的年轮宽度与真实年轮宽度差 异很小。本文在前人研究的基础上,对微钻阻力仪 的机械结构和峰谷年轮识别算法做进一步改进,使 用所有测量数据最优阈值的平均值作为峰谷算法的 阈值,提高了微钻阻力仪测量树木年轮宽度的精度。 由于钻针振动、伪年轮、钻针方向偏离树木径向方向 等原因,使得部分树木年轮信号的峰谷差值小于部 分噪声信号的峰谷差值,且不同树木年轮信号的峰 谷差值差异较大,很难找到一个合适的阈值精确识 别所有树木年轮信号。下一步将进一步研究树木年 轮信号和噪声信号在哪些特征上存在显著差异,并 建立这些特征变量与峰谷差值阈值的模型,使阈值 随着年轮特征的变化而变化。

#### 6 结论

(1)阐述了钻针针尖长度对钻针路径弯曲程度 和可识别年轮最小宽度的影响,并对钻针形状进行 了改进,有效减小了钻针路径的弯曲程度。

(2)提出了一种钻针支撑挡片设计方案,提高 了钻针支撑挡片的加工精度,减小了钻针振动幅度。

(3) 对峰谷年轮识别算法进行了改进,提出了 年轮宽度的计算方法。自制微钻阻力仪的年轮识别 错误率比 Resistograph 650 - s 型微钻阻力仪低 12.7 个百分点,年轮宽度测量精度比 Resistograph 650 - s 型微钻阻力仪高 1.47 个百分点,说明本文峰谷年轮 识别方法可行。

#### 参考文献

- [1] 祁承经,赵运林,喻勋林,等.树木年轮学综论[J].中南林业科技大学学报,2017,37(3):1-8,16.
   QI Chengjing, ZHAO Yunlin, YU Xunlin, et al. A comprehensive review on dendrochronology[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017,37(3):1-8,16. (in Chinese)
- [2] 郑淑霞,上官周平.树木年轮与气候变化关系研究[J].林业科学,2006,42(6):100-107.
   ZHENG Shuxia, SHANGGUAN Zhouping. Study on relationship between tree-ring and climatic change [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(6):100-107. (in Chinese)
- [3] 方克艳,陈秋艳,刘昶智,等. 树木年代学的研究进展[J]. 应用生态学报, 2014, 25(7): 1879-1888. FANG Keyan, CHEN Qiuyan, LIU Changzhi, et al. Research advances in dendrochronology[J]. Chinese Journal of Applied

Ecology, 2014, 25(7): 1879 – 1888. (in Chinese)

- [4] 黄荣凤,鲍甫成.异常气候环境变化与树木年轮[J].世界林业研究,2002,15(6):26-31.
   HUANG Rongfeng, BAO Fucheng. Abnormal climate environment and tree rings[J]. World Forestry Research, 2002, 15(6): 26-31. (in Chinese)
- [5] FORTINT L B, CROPPER W P, ZARIN D J. Modeling the complex impacts of timber harvests to find optimal management regimes for Amazon tidal floodplain forests[J]. Plos One, 2015, 10(8):e0136740.
- [6] MIRANDA D L C, HIGUCHI N, TRUMBORE S E, et al. Using radiocarbon-calibrated dendrochronology to improve treecutting cycle estimates for timber management in southern Amazon forests[J]. Trees, 2018, 32(2): 587-602.
- [7] MEDEIROS R D S, VIEIRA G, ALMEIDA D R A D, et al. New information for managing Copaifera multijuga Hayne for oleoresin yield[J]. Forest Ecology and Management, 2018, 414(1):85-98.
- [8] 周蕾, 王绍强, 周涛, 等. 1901—2010 年中国森林碳收支动态:林龄的重要性[J]. 科学通报, 2016, 61(18):2064 2074.

ZHOU Lei, WANG Shaoqiang, ZHOU Tao, et al. Carbon dynamics of China's forests during 1901-2010: the importance of forest age[J]. China Sci. Bull., 2016, 61(18):2064-2074. (in Chinese)

- [9] GAO Shan, WANG Xiping, WIEMANN M C, et al. A critical analysis of methods for rapid and nondestructive determination of wood density in standing trees[J]. Annals of Forest Science, 2017, 74:27.
- [10] RINN F, SCHWEINGRUBER F, SCHAR E. Resistograph and X-ray density charts of wood comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species [J]. Holzforschung, 1996, 50(4): 303-311.
- [11] SZEWCZYK G, WASIK R, LESZCZYNSKI K, et al. Age estimation of different tree species using a special kind of an electrically recording resistance drill[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2018, 34:249-253.
- [12] 姚建峰, 卢军, 郑一力,等. 基于变论域模糊控制算法的树木年轮测量仪直流电机转速控制[J]. 农业工程学报, 2019,35(14):57-63.

YAO Jianfeng, LU Jun, ZHENG Yili, et al. DC motor speed control of annual-ring measuring instrument based on variable universe fuzzy control algorithm [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(14): 57-63. (in Chinese)

- [13] 姚建峰,赵燕东,卢军,等. 基于自适应滤波算法的树木年轮测量方法[J]. 农业机械学报,2020,51(3):216-222.
   YAO Jianfeng, ZHAO Yandong, LU Jun, et al. Annual-ring measurement method based on adaptive filtering algorithm[J].
   Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3):216-222. (in Chinese)
- [14] 姚建峰. 基于微钻阻力法的树木年轮测量仪原理与实现研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2020.
   YAO Jianfeng. Research on principle and realization of tree ring measuring instrument based on micro drill resistance method
   [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2020. (in Chinese)
- [15] 潘虹, 卢军, 郭旭展, 等. 基于峰谷分析算法用针刺仪测定树木年龄的可行性分析[J]. 林业科学研究, 2020, 33(5): 48-54.

PAN Hong, LU Jun, GUO Xuzhan, et al. Feasibility analysis of tree age estimation algorithm using Resistograph based on peak-valley analysis[J]. Forest Research, 2020,33(5):48-54. (in Chinese)

- [16] 潘虹,卢军, 雷相东,等. 基于针刺仪平稳卡尔曼滤波器的树木年龄估计[J]. 林业科学, 2021, 57(6): 14-23.
   PAN Hong, LU Jun, LEI Xiangdong, et al. Tree age estimation based on Resistograph stationary Kalman filter[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(6): 14-23. (in Chinese)
- [17] 潘虹,卢军,郭旭展,等. 基于频谱分析用针刺仪测定树木年龄的算法[J]. 林业科学研究, 2021, 34(1):19-25.
   PAN Hong, LU Jun, GUO Xuzhan, et al. Tree age estimation algorithm based on spectrum analysis by Resistograph[J].
   Forest Research, 2021, 34(1):19-25. (in Chinese)
- [18] 姚建峰,赵燕东,张会儒,等. 树木微钻仪钻针阻力表达方法研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8):271-277,286.
   YAO Jianfeng, ZHAO Yandong, ZHANG Huiru, et al. Drill resistance expression method of tree micro drill instrument[J].
   Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8):271-277,286. (in Chinese)
- [19] ISAAC- RENTON M, STOEHR M, STATLAND C B, et al. Tree breeding and silviculture: douglas-fir volume gains with minimal wood quality loss under variable planting densities[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 465:118094.
- [20] 赵奋成,郭文冰,钟岁英,等. 基于针刺仪测定技术的湿地松木材密度间接选择效果[J]. 林业科学,2018,54(10):172-179.
   ZHAO Fencheng, GUO Wenbing, ZHONG Suiying, et al. Effects of indirect selection on wood density based on Resistograph measurement of Slash pine[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018,54(10):172-179. (in Chinese)
- [21] DOWNES G M, LAUSBERG M, POTTS B M, et al. Application of the IML Resistograph to the infield assessment of basic density in plantation eucalypts[J]. Australian Forestry, 2018, 81(3): 177 - 185.
- [22] NICKOLAS H, WILLIAMS D, DOWNES G, et al. Application of resistance drilling to genetic studies of growth, wood basic density and bark thickness in *Eucalyptus globulus* [J]. Australian Forestry, 2020,83(3):172 - 179.
- [23] ISIK F, LI B. Rapid assessment of wood density of live trees using the Resistograph for selection in tree improvement programs
   [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2003, 33(12):2426-2435.
- [24] GULLER B, GULLER A, KAZAZ G. Is Resistograph an appropriate tool for the annual ring measurement of *Pinus brutia*? [C]//42 International Conference NDE Safety, 2012: 89 - 94.
- [25] 徐群,徐华东,李其哲,等. 基于阻抗仪的红松活立木年轮宽度辨识方法[J].森林工程,2019,35(3):32-35,40.
   XU Qun, XU Huadong, LI Qizhe, et al. A method of identifying ring width of standing tree by using Resistograph detector
   [J]. Forest Engineering, 2019, 35(3):32-35,40. (in Chinese)