

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.01.003

# 基于频谱分析用针刺仪测定 树木年龄的算法

潘虹<sup>1,2</sup>, 卢军<sup>1\*</sup>, 郭旭展<sup>1</sup>, 唐守正<sup>1\*</sup>, 高瑞东<sup>3</sup>, 徐建军<sup>4</sup>

(1. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091; 2. 信阳师范学院数学与统计学院, 河南 信阳 464000; 3. 管涔山国有林管理局, 山西 宁武 036700; 4. 管涔山国有林管理局羊圈沟林场, 山西 五寨 036200)

**摘要:** [目的] 研究离散谱分析在针刺仪抗钻阻力序列中的应用, 为活立木年龄的微损测定提供方法。[方法] 以山西省羊圈沟林场落叶松为对象, 使用针刺仪在同一水平位置不同方向钻入落叶松, 获取 323 组抗钻阻力值序列作为研究样本, 并在针刺位置 5 cm 内截取 104 个圆盘作为参考样本。选择恰当的窗口, 将抗钻阻力值序列去趋势后, 进行离散谱分解, 寻找代表年度变化的谐波, 将其周期数的一半作为树木年龄估计值。并将频谱分析算法估计的树木年龄以及针刺仪自带软件 DECOM 自动判定年龄分别与相应的圆盘年轮数进行成对数据  $t$  检验。[结果] 根据活立木的胸径大小来选择窗口参数  $Wid$ , 将频谱分析算法应用于 323 组活立木的抗钻阻力序列, 该算法估计树木年龄与实测年龄非常接近。频谱分析算法估计年龄的最小相对误差为 0, 最大相对误差为 27.98%, 平均相对误差为 -0.35%。经过成对数据  $t$  检验得到  $t$  值为 0.85, 说明该算法估计树木年龄均值与真实年龄均值之间无显著差异。而针刺仪自带 DECOM 软件自动分析估计年龄结果相对误差较大, 最小相对误差为 -7.69%, 最大相对误差达到 -84.78%, 平均相对误差达到 -40.49%, 与实际年龄进行成对数据  $t$  检验得到  $t$  值为 20.25, 差异显著。[结论] 频谱分析应用于针刺仪抗钻阻力值序列来估计树木年龄, 能够比较准确地估计落叶松年龄, 提高了针刺仪测定活立木年龄的精度, 为活立木年龄的微损测定提供了一种有效途径。

**关键词:** 树木年龄; 针刺仪; 抗钻阻力值; 傅里叶级数; 离散谱分析

**中图分类号:** S758

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2021)01-0019-07

活立木年龄微损测定是目前林业生产研究中最重要和最基础的共性难题, 对森林管护、森林经营以及古树保护等都具有重要的理论和实践意义<sup>[1-4]</sup>。传统的测定树木年龄的方法具有破坏性<sup>[5-6]</sup>, 并增加树木致病感染的风险<sup>[7-10]</sup>; 无损测定树木年龄的方法如建立数学模型和查数轮生枝法等<sup>[11-15]</sup>, 准确性较低。目前, 在我国实行天然林保护的的环境中, 亟需一种微损的测定树木年龄的方法。

针刺仪是估计树木年龄的微损工具, 将针刺仪

应用于活立木, 可以获得相对阻力剖面<sup>[16]</sup>。针刺仪的基本工作原理是基于抗钻阻力与木材密度之间的线性关系, 根据剖面曲线波峰波谷的趋势能反映年轮内部早材和晚材的界限<sup>[17]</sup>, 峰值和谷值分别代表早材和晚材, 可以用相对阻力剖面图来估计树木年龄以及树木生长率<sup>[18-20]</sup>, 由于针叶树和阔叶树的树干材质不同, 导致针刺仪钻入阻力变化不同, 针叶树种的阻力变化比阔叶树种的阻力变化更明显, 峰谷的区分度更好, 能更准确地表示树木生长的变

收稿日期: 2020-03-15 修回日期: 2020-06-11

基金项目: 国家重点研发计划项目“长白山次生林抚育更新技术与示范”(2017YFC0504101); 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); 国家重点研发计划项目(2017YFD060040302); 国家自然科学基金项目面上项目(31470641; 31872704)

\* 通讯作者: 卢军, 主要研究方向: 林分生长与收获模型。Email: junlu@ifrit.ac.cn; 唐守正, 主要研究方向: 森林经理和林业统计等。Email: stang@caf.ac.cn

化,所以本研究选取针叶树中的华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr)作为研究对象。虽然使用针刺仪自带 DECOM 软件对抗钻阻力剖面图进行分析,可以自动检测年轮边界,估计树木年龄,但是误差很大,不能应用于林业实际生产,基于抗钻阻力值序列来估算树木年龄的方法鲜见报道。

数字信号处理是将复杂的信号用简单的基本的信号表示,从而将复杂的信号分析转化成对基本信号的分析<sup>[21]</sup>。已经实际应用于广泛的学科领域,如语音处理、电话信道传输、图像处理和传输等<sup>[22-23]</sup>。傅里叶变换是数字信号频域分析的一种重要方法,可以将时域的信号用虚指数信号表示,反映了信号的时域与频域之间的关系<sup>[24-25]</sup>,是信号分析中不可或缺的重要工具,在各个领域都有广泛应用<sup>[26-27]</sup>。

针刺仪钻入活立木获取的抗钻阻力值序列,可以看做离散周期信号,从而可以考虑利用数字信号处理对其进行分析,来寻找树木年度变化的信息。本研究以德国 RINNTECH 公司生产的树木针刺仪(Resistograph 4452P/S)钻入华北落叶松获取的抗钻阻力值序列为研究对象,利用数字信号处理中的傅里叶变换,对抗钻阻力值序列进行离散谱分解,

通过确定代表树木年龄变化的谐波的周期数来估计树木的年龄。

## 1 样品采集

2017年10月,在山西省羊圈沟林场的华北落叶松人工林中,按径阶大、中、小至少各选3株,优势木各选2株,共52株样木进行针刺试验。用针刺仪在每株样木胸径1.3 m处4个方向钻入,获取有效抗钻阻力值序列208组。2018年6月,在相同的样木上,使用针刺仪在距离地面0.2 m处和0.5 m处分别从两个不同方向钻入,获取有效抗钻阻力数据115组,两次试验共获取有效抗钻阻力数据323组作为研究对象。

最后将样木伐倒,在树干上标明南北向,并分别在0.2 m、0.5 m和1.3 m针刺位置5 cm内截取圆盘,在圆盘非工作面上标明南北方向,并以分式形式登记,分子为样地号和解析木号,分母为圆盘号和断面高度,共获取有效圆盘104个。对圆盘进行抛光,打磨,扫描,用WinDENDRO年轮分析系统结合人工判读方式获取圆盘年轮数,圆盘的年龄分布和径阶分布见表1和表2。

表1 圆盘年龄分布汇总

Table 1 Summary of disc age distribution

年龄 Age/a	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
圆盘个数 Disc number	1	1	4	4	8	20	12	27	20	7

表2 圆盘径阶分布汇总

Table 2 Summary of disc radial distribution

径阶 Diameter class/cm	9~11	11~13	13~15	15~17	17~20	20~23	23~26
圆盘个数 Disc number	15	18	11	12	22	17	9

## 2 利用频谱分析测定树木年龄的原理与方法

### 2.1 频谱分析原理

假设每年生长近似相同,针刺仪钻入活立木获取的相对阻力剖面记录为时间序列 $z = \{z_1, z_2, \dots, z_k, \dots, z_n\}$ , $n$ 为针刺仪测量点的序列号,假设时间间隔为 $\delta$ ,则序列 $z$ 是总时间长度为 $T = n\delta$ 的离散周期信号,以下将针刺仪抗钻阻力序列称为离散周期信号 $z$ 。

离散时间信号 $z$ 中包含3个部分的信息:趋

势、年度变化、噪音。利用频谱分析估计树木年龄的基本思路:将离散时间信号 $z$ 去趋势后,进行谱分析,确定代表年度变化的谐波信息。根据傅里叶分析可知,在时间 $T$ 上,信号 $z$ 可以分解成各种频率三角函数的和,由于树木生长1年对应1个峰,1个周期内有1个峰,估计树木的年龄取决于峰的数量,峰值和谷值分别代表早材和晚材。所以在这些三角函数中找到代表年度变化的周期数 $f$ ,也就确定了周期 $P$ 和年龄 $A$ ,周期 $P$ 在本研究中是指树木生长1年所对应的抗钻阻力值序列长度,即由

$T = PA, T = fA$ , 可得  $P = f$ 。因次, 估计树木年龄关键是确定代表年度变化的周期数。

## 2.2 利用频谱分析估计树木年龄的方法

估计树木年龄的基本思想是将抗钻阻力序列利用平滑器去趋势, 然后再用傅里叶变换做频谱分析, 给出 $k$ 次谐波的系数, 求出 $k$ 次谐波的振幅, 树木的年龄规律在振幅较大的谐波中得以体现。设定振幅比 $\varepsilon$ , 寻找与最大振幅比值大于 $\varepsilon$ 的振幅所对应的 $k$ 次谐波的周期数 $k$ 。

**2.2.1 Savitzky-Golay 平滑器** Savitzky A 和 Golay M 在 1964 年提出了一种基于多项式拟合的方法来设计的形式简单的滤波器<sup>[20]</sup>, 对抗钻阻力值所组成的离散周期信号 $z$ , 把其中任一段数据测量点位置记为向量  $m = -M, \dots, 0, \dots, M$ , 测量点处对应的数据用一个 $p$ 阶多项式拟合:

$$g = c_0 + c_1 m + c_2 m^2 + \dots + c_p m^p = \sum_{k=0}^p c_k m^k, \quad p \leq 2M \quad (1)$$

共有 $2M+1$ 点数据, 多项式拟合阶数为 $p$ , 这种滤波器称为 Savitzky-Golay 平滑器, 该平滑器允许窗长可以较大, 且对于大部分数据的平滑都比较有效。使用该平滑滤波器对信号 $z$ 滤波, 可以求取趋势项, 用信号 $z$ 减去趋势项, 就得到所期望的去趋势后的信号, 记为  $x = \{x_0, x_1, \dots, x_k, \dots, x_{n-1}\}$ 。

**2.2.2 傅里叶级数与傅里叶变换** 利用离散傅里叶级数, 实现抗钻阻力序列经过去趋势后所得到的新的序列 $x$ 从时域到频域的映射, 利用离散的傅里叶变换, 将长度为 $n$ 的时域序列 $x$ 表示成 $n$ 项虚指数信号的加权和, 从而反映离散时间信号 $x$ 中不同谐波分量的分布规律。

离散时间信号 $x$ 的离散傅里叶级数系数表示为:

$$X_k = \sum_{j=0}^{n-1} x_j e^{-i \frac{2\pi}{n} k j}, \quad k = 0, 1, \dots, n-1. \quad (2)$$

离散时间信号 $x$ 的逆离散傅里叶级数系数表示为:

$$Y_k = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} x_j e^{i \frac{2\pi}{n} k j}, \quad k = 0, 1, \dots, n-1. \quad (3)$$

**2.2.3 离散时间信号的频谱分析** 针刺仪获取的抗钻阻力值序列 $z$ 经过去趋势后得到离散周期信号 $x$ , 记为:

$$\{x_i, i = 0, \dots, n-1\} = \{f(t_i), i = 1, \dots, n\}. \quad (4)$$

其谐波分解(谱分解)表示为

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^q a_k \cos\left(k \frac{2\pi}{n} t\right) + \sum_{k=1}^r b_k \sin\left(k \frac{2\pi}{n} t\right). \quad (5)$$

系数的估计公式为:

$$a_0 = \frac{2}{n} \sum_{j=1}^n f(t_j) = \frac{2}{n} \sum_{j=1}^n x_j; \quad (6)$$

$$a_k = \frac{2}{n} \sum_{j=1}^n f(t_j) \cos\left(k \frac{2\pi}{n} (j-1)\right) = \frac{2}{n} \sum_{j=1}^{n-1} x_j \cos\left(k \frac{2\pi}{n} j\right), \quad k = 1, \dots, q; \quad (7)$$

$$b_k = \frac{2}{n} \sum_{j=1}^n f(t_j) \sin\left(k \frac{2\pi}{n} (j-1)\right) = \frac{2}{n} \sum_{j=0}^{n-1} x_j \sin\left(k \frac{2\pi}{n} j\right), \quad k = 1, \dots, r. \quad (8)$$

其中  $q = \lfloor \frac{n}{2} \rfloor, r = n - q - 1$ , 时间单位  $\delta = 1$ 。周期为  $\frac{n}{k}$ , 频率为  $\frac{k}{n}$ 。

当  $n = 2q + 1$  时,  $q = r$ , 上面 3 个估计系数的等式成立。

当  $n = 2q$  时,  $r = q - 1$  对于前  $q - 1$  项系数, 即  $k < q$ , 上面 3 个等式仍然成立, 但是对于第  $q$  项系数, 即  $k = q$ , 令

$$a_q = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (-1)^j f(t_j), \quad b_q = 0. \quad (9)$$

用离散傅里叶级数系数表示离散谱分解系数, 估计公式为:

$$a_f = \frac{a_0}{2} = \frac{1}{n} X_0; a_k = \frac{1}{n} (X_k + X_{n-k}); b_k = \frac{1}{ni} (X_{n-k} - X_k). \quad (10)$$

用逆离散傅里叶级数系数表示离散谱分解系数, 估计公式为:

$$a_f = \frac{a_0}{2} = Y_0; a_k = Y_k + Y_{n-k}; b_k = \frac{1}{i} (Y_k + Y_{n-k}). \quad (11)$$

记:  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_q)$ , 其中  $\alpha_i = \text{Re}(b_i), i = 1, 2, \dots, q$ ;  $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_q)$ , 其中  $\beta_i = \text{Re}(b_i), i = 1, 2, \dots, q$ 。

将第 $k$ 谐波的振幅记为 $M_k$ , 即

$$M_k = \sqrt{\alpha_k^2 + \beta_k^2}, \quad k = 1, 2, \dots, q. \quad (12)$$

谐波周期数为 $k$ , 说明波峰出现的次数为 $k$ 。若代表年龄变换为第 $k$ 次谐波, 则树木的估计年龄为

谐波的次数 $k$ 。将所有谐波的振幅及对应的周期数用矩阵表示:

$$\text{令向量 } M = \begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_q \end{pmatrix}, N = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ q \end{pmatrix}, \text{ 将向量 } M \text{ 和}$$

$N$ 作为矩阵 $P$ 的第一列和第二列, 即

$$P = (M \quad N). \quad (13)$$

矩阵 $P$ 的每一行表示振幅和对应的周期数。

按照振幅从大到小进行排序后记为 $M_{i_1}, M_{i_2}, \dots, M_{i_q}$ , 则振幅从大到小相对应的周期数为 $i_1, i_2, \dots, i_q$ , 为原序列 $1, 2, \dots, q$ 的重新排列后的序列。令

$$M_1 = \begin{pmatrix} M_{i_1} \\ M_{i_2} \\ \vdots \\ M_{i_q} \end{pmatrix}, N_1 = \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_q \end{pmatrix}, \quad (14)$$

将向量 $M_1$ 和 $N_1$ 作为矩阵 $P_1$ 的第一列和第二列, 即

$$P_1 = (M_1 \quad N_1). \quad (15)$$

设定阈值为 $\varepsilon = 0.85$ , 如果 $\frac{M_{i_j}}{M_{i_1}} > \varepsilon$ 且 $\frac{M_{i_{j+1}}}{M_{i_1}} < \varepsilon$ , 则记

$$M_2 = \begin{pmatrix} M_{i_1} \\ M_{i_2} \\ \vdots \\ M_{i_j} \end{pmatrix}, N_2 = \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_j \end{pmatrix}. \quad (16)$$

将向量 $M_2$ 和 $N_2$ 作为矩阵 $P_2$ 的第一列和第二列, 即

$$P_2 = (M_2 \quad N_2). \quad (17)$$

则矩阵 $P_2$ 是由矩阵 $P_1$ 的前 $j$ 行组成, 向量 $N_2$ 是与最大振幅比大于 $\varepsilon$ 的所有的振幅按照从大到小排列组成。向量 $M_2$ 是每个振幅所对应的周期数。

将向量 $M_2$ 中所有分量取均值, 记为 $\delta$ , 即

$$\delta = \frac{M_{i_1} + M_{i_2} + \dots + M_{i_j}}{j}. \quad (18)$$

则 $\delta$ 表示树木的年龄估计值。频谱分析估计树木年龄的流程图(图1):

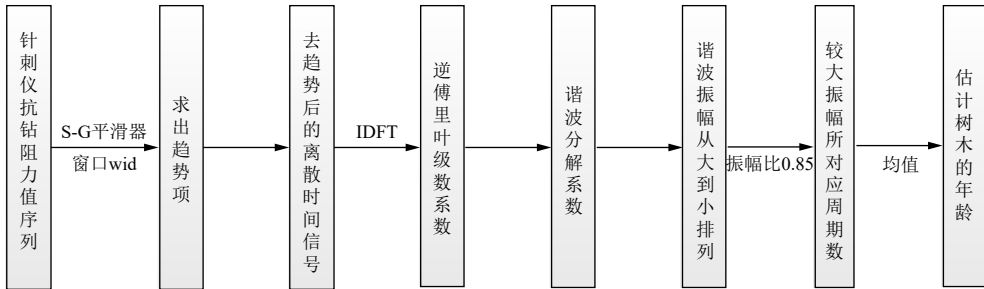


图1 频谱分析估计树木年龄流程

Fig. 1 Flow chart of tree age estimation by spectrum analysis

2.2.4 步骤输入: 针刺仪钻入活立木获取的相对阻力值序列 $z = \{z_1, z_2, \dots, z_k, \dots, z_n\}$ 。

step1 给定窗口大小 $Wid$ , 将针刺仪获取的抗钻阻力序列 $z$ 为离散时间信号, 经过 Savitzky-Golay 平滑器, 进行去趋势后得到离散时间信号 $x$ 。

step2 利用公式(3)求出逆傅里叶变换求出离散时间信号 $x$ 的逆傅里叶级数系数。

step3 利用公式(11)求出离散时间信号 $x$ 的谐波分解系数。

step4 求出所有谐波的振幅, 并按照从大到小进行排列, 与所对应的谐波的周期数作为行向量写入矩阵 $P_1$ 。

step5 给定振幅比 $\varepsilon = 0.85$ , 将所有与最大振幅比值大于 $\varepsilon$ 的振幅以及对应的周期数作为行写入矩

阵 $P_2$ 。

step6 求出矩阵 $P_2$ 的第一列向量的均值 $\delta$ , 作为树木年龄的估计值。

输出: 树木年龄估计值 $\delta$ 。

以上过程通过 MATLAB 编程实现。

### 3 结果

对 104 个圆盘所对应的抗钻阻力值序列进行频谱分析, 首先根据圆盘直径大小, 选择相应窗口值 $Wid$ , 如表3所示, 对原始抗钻阻力值序列进行去趋势得到相应的离散周期信号, 然后对其进行离散谱分析, 计算得到所有谐波的振幅, 将所有的振幅与对应的周期数作图可以看出全频谱分布情况, 设定振幅比为 0.85, 求出与最大振幅比大于 0.85



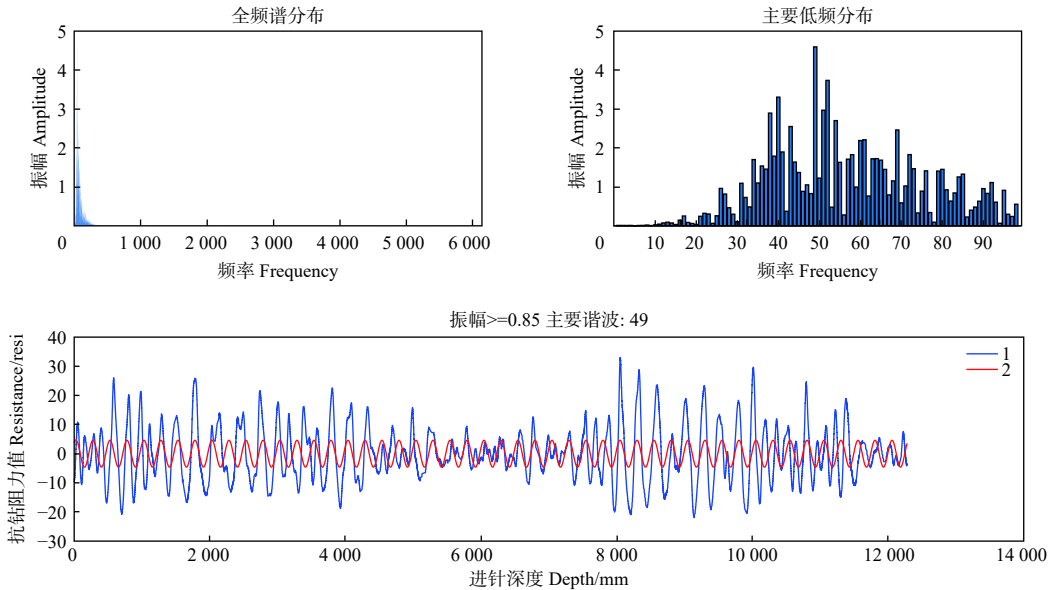
的所有振幅都对应的周期数。以数据 1699 为例, 数据 1699 是使用针刺仪在落叶松 6 胸径处获取的数据, 其胸径为 14.7 cm, 设定相应窗口为 501, 进行去趋势获取相应的离散时间信号记为  $x_{1699}$ , 对  $x_{1699}$  进行离散谱分析, 可以得到所有谐波的振幅, 谐波次数与对应振幅做直方图可以看出全频谱分布

情况, 见图 2。设定振幅比为 0.85 后, 计算出该数据第 49 次谐波所对应的振幅满足条件, 说明第 49 次谐波的周期变化代表树木年龄变化, 因第 49 次谐波所对应的周期数为 49, 从而可以将周期数的一半作为该株落叶松胸径处的估计年龄, 为 24.5 a, 实测年龄为 25 a, 精度较好。

表 3 参数 *Wid* 选择依据

Table 3 The selection basis of parameter *Wid*

径阶 Diameter class/cm	9~11	11~13	13~15	15~17	17~20	20~23	23~26
窗口参数 <i>Wid</i> Window parameter <i>Wid</i>	301	401	501	601	701	801	901



注: 1 表示针刺仪原始抗钻阻力数据去趋势后的信号; 2 表示频谱分析中与最大振幅比值大于 0.85 的谐波。

Note: 1 represents the signal after the original drilling Resistograph data detrended; 2 represents the harmonic in the spectrum analysis whose ratio to the maximum amplitude is greater than 0.85.

图 2 数据编号 1699 频谱分析过程

Fig. 2 Spectrum analysis process of 1699 data number

根据每个圆盘的直径选择相应的窗口大小, 对原始抗钻阻力值序列去趋势后进行离散谱分析, 可以得到每组抗钻阻力值所对应的的周期数的平均数  $\delta$ , 试验过程中, 每个圆盘针刺获取的抗钻阻力值为 2 组或者 4 组, 将对应的 2 组或者 4 组值的频谱分析结果取均值, 作为圆盘的频谱分析算法估计年龄, 所有圆盘频谱分析算法估计年龄与实测年龄对比见图 3。

每个圆盘的频谱分析算法估计年龄与实测年龄的相对误差分布见图 4, 针刺仪自带软件 DECOM 自动判读年龄结果误差较大, 误差范围是 -25 a 至 2 a 之间, 平均误差是 -12 a, 相对误差大多集中在

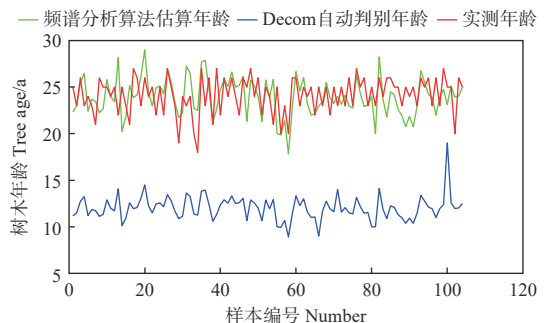


图 3 频谱分析算法估计年龄与 DECOM 判定年龄对比

Fig. 3 Comparisons of age estimation by spectrum analysis algorithms and DECOM judgment test

-20%至-60%之间,最小相对误差为-7.69%,最大相对误差达到-84.78%,平均相对误差达到-49.98%。圆盘的实测年龄范围是18~27 a,频谱分析算法估计年龄误差范围是-5~6 a之间,平均误差是-0.25 a,平均绝对误差是2 a;相对误差分布大多集中在-10%至10%之间,最小相对误差为0,最大相对误差为25.69%,平均相对误差为-0.35%。

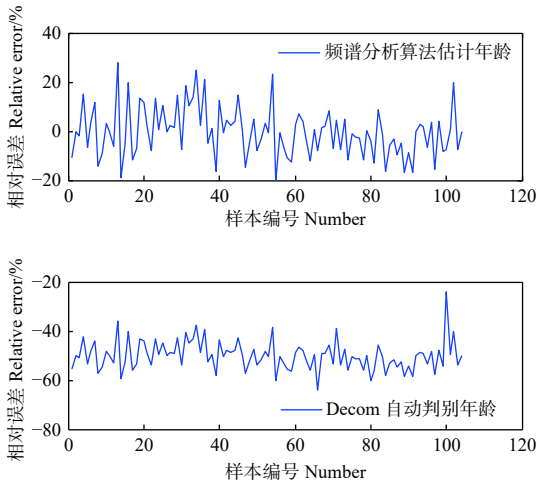


图4 频谱分析算法估计年龄与DECOM判定年龄绝对误差分布

Fig. 4 Relative error distribution map of age estimation by spectrum analysis algorithms and DECOM judgment test

分别对真实年龄与软件自动判别年龄(第1对)、真实年龄与算法估计年龄(第2对)进行成对数据t检验。第一对数据检验得到的 $t$ 值为20.25,给定显著性水平 $\delta=0.05$ ,查表可得 $t_{1-\delta/2}(n-1)=t_{0.975}(9)=2.2622$ ,由于 $|t|>2.2622$ ,故拒绝原假设,即可视为DECOM判定树木年龄均值与真实年龄均值之间有显著差异,此时检验的 $p$ 值为 $2.2 \times 10^{-6}$ 。第二对数据检验得到 $t$ 值为0.85,由于 $|t|<2.2622$ ,故不能拒绝原假设,说明频谱分析算法估计树木的年龄均值与树木的真实年龄均值无显著差异,此时检验的 $p$ 值为0.3949。

## 4 结论

通过给出的频谱分析算法,将针刺仪获取的华北落叶松抗钻阻力值序列作为输入,根据树木的径阶给定窗口参数后,可得出活立木年龄的估计值,且精度较好,提高了针刺仪测定华北落叶松年龄的精度,改进了针刺仪自带DECOM软件识别树木年轮边界准确率低,过于依赖人工经验的缺点,可

以作为一种微损的估计华北落叶松年龄的有效方法,为活立木年龄的微损测定开辟了新的途径。

## 参考文献:

- [1] 岳剑云,杜常健,纪敬,等.银杏枝条部位和年龄对不定根形成的影响及其与非结构碳水化合物含量的关系[J].林业科学研究,2018,31(5):153-158.
- [2] Hall D B, Clutter M. Multivariate multilevel nonlinear mixed effects models for timber yield predictions[J]. Biometrics, 2004, 60(1): 16-24.
- [3] Thuring E, Kaufmann E, Frisullo R, et al. Evaluation of the growth function of an empirical forest scenario model[J]. Forest Ecology & Management, 2005, 204(1): 53-68.
- [4] Michel A K, Winter S. Tree microhabitat structures as indicators of biodiversity in Douglas-fir forests of different stand ages and management histories in the Pacific Northwest, U. S. A[J]. Forest Ecology & Management, 2009, 257(6): 1453-1464.
- [5] Wong C M, Lertzman K P. Errors in estimating tree age: implications for studies of stand dynamics[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2001, 31(31): 1262-1271.
- [6] Rozas V. Tree age estimates in *Fagus sylvatica* and *Quercus robur* testing previous and improved methods[J]. Plant Ecology, 2003, 167(2): 193-212.
- [7] 张贵宝. 高强度薄板拉深模具结构分析关键技术研究及应用[D]. 上海:上海交通大学,2008.
- [8] Szewczyk G, Wąsik R, Leszczyński 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, 2018(34): 249-253.
- [9] Seo J W, Choi E B, Ju J D, et al. The association of intra-annual cambial activities of *Pinus koraiensis* and *Chamaecyparis pisifera* planted in Mt. Worak with climatic factors[J]. Journal of the Korean Wood Science & Technology, 2017, 45(1): 43-52.
- [10] Jeong H M, Kim Y J, Seo J W. Relationships between vessel-lumen-area time series of *Quercus* spp. at Mt. Songni and corresponding climatic factors[J]. Journal of the Korean Wood Science and Technology, 2017, 45(1): 72-84.
- [11] 陈永富. 基准年龄立地质量评价的影响分析[J]. 林业科学研究, 2010, 23(2): 283-287.
- [12] Carey V J, Wang Y G. Mixed-effects models in S and S-Plus[J]. Publications of the American Statistical Association, 2000, 96(455): 1135-1136.
- [13] Loewenstein E F, Johnson P S, Garrett H E. Age and diameter structure of a managed uneven-aged oak forest[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2000, 30(7): 1060-1070.
- [14] Trotsiuk V, Hobi M L, Commarmot B. Age structure and disturbance dynamics of the relic virgin beech forest Uholka (Ukrainian Carpathians)[J]. Forest Ecology & Management, 2012, 265(1): 181-190.
- [15] Oberhuber W, Kofler W. Topographic influences on radial growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) at small spatial scales[J]. Plant Ecology, 2000, 146(2): 229-238.
- [16] Wang S Y, Chiu C M, Lin C J. Application of the drilling resistance method for annual ring characteristics: evaluation of *Taiwania (Taiwania cryptomerioides)* trees grown with different thinning and pruning treatments[J]. Journal of Wood Science, 2003, 49(2): 116-124.

- [17] Konguvel E, Kannan M. A survey on FFT/IFFT processors for next generation telecommunication systems[J]. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 2018, 27(3): 53-56.
- [18] Orozco-Aguilar L, Nitschke C R, Livesley S J, *et al.* Testing the accuracy of resistance drilling to assess tree growth rate and the relationship to past climatic conditions[J]. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2018, 36: 1-12.
- [19] Oh J A, Seo J W, Kim B R. Verifying the possibility of investigating tree ages using resistograph[J]. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 2019, 47(1): 90-100.
- [20] 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.
- [21] Proakis J G, Manolakis D G. Digital signal processing: principles, algorithms, and applications. A flexible growth function for empirical use[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1996, 10(2): 290-301.
- [22] Zhang L, Zhang L, Zhang L. Application research of digital media image processing technology based on wavelet transform[J]. *Eurasip Journal on Image and Video Processing*, 2018, 2018(1): 138-147.
- [23] Delfina M, Donato P, Rocco Z. Learning the harmonic analysis: is visualization an effective approach[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2019(2019): 32967-32998.
- [24] Haykin S. Signals and Systems[M]. 2nd Edition. New Jersey: Wiley, 2002.
- [25] 欧阳华,卜乐平,杨忠林.音频演示在傅里叶原理教学中的应用[J]. *中国电子教育*, 2011, 2011(4): 57-60.
- [26] Chung M K, Dalton K M, Shen L, *et al.* Weighted fourier series representation and its application to quantifying the amount of gray matter[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2007, 26(4): 566-581.
- [27] Wang S, Zhao W, Zhang G, *et al.* Fourier series approach for the vibration of euler-bernoulli beam under moving distributed force: application to train gust[J]. *Shock and Vibration*, 2019, 2019: 1-21.

## Tree Age Estimation Algorithm Based on Spectrum Analysis by Resistograph

PAN Hong<sup>1,2</sup>, LU Jun<sup>1</sup>, GUO Xu-zhan<sup>1</sup>, TANG Shou-zheng<sup>1</sup>, GAO Rui-dong<sup>3</sup>, XU Jian-jun<sup>4</sup>

(1. Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. School of Mathematics and Statistics, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, Henan, China; 3. Guancenshan State Owned Forest Administration, Ningwu 036700, Shanxi, China; 4. Yangjuangou Forest Farm, Guancenshan State Owned Forest Administration, Wuzhai 036200, Shanxi, China)

**Abstract:** [Objective] To study the application of discrete spectrum analysis in the Resistograph drill resistance sequence, and provide a method and basis for estimating the age of standing trees. [Method] Taking *Larix principis-rupprechtii* in Yangjuangou Forest Farm of Shanxi Province as the research object, 323 sets of drilling resistance series obtained by Resistograph drilling *L. principis-rupprechtii* in the same horizontal position and different directions was used as the research sample, and 104 stem discs were taken within 5 cm of the drilling position as reference samples. After detrending the Resistograph drill resistance sequence, the discrete spectrum decomposition was carried out to find the harmonic representing the annual change, and half of its period duration was taken as the tree age estimation. The results estimated by spectrum analysis algorithm, or auto-recognized by DECOM software were analyzed with the corresponding number of disc rings using paired data test. [Result] According to DBH size of living trees, the window parameters were selected, and the spectrum analysis algorithm was applied to the drilling resistance series of 323 groups of living trees, the algorithm estimating tree age closed to the actual age. The relative error distribution of the algorithm was mostly between -10% and 10%, the minimum relative error was 0, the maximum relative error was 27.98%, and the average relative error was -0.35%. Through paired data t-test, it was found that t-value was 0.85, indicating that there was no significant difference between the mean age estimated by the algorithm and the true mean age of trees. The relative error of the automatic analysis by DECOM software was large, mostly concentrated between -20% and -60%. The minimum relative error, the maximum relative error and the average relative error were -7.69%, -84.78% and -40.49%. Through paired data t-test, it was found that t-value was 20.25, indicating that there was significant difference between the mean age estimated by DECOM software and the mean tree age of trees. [Conclusion] The method of applying spectrum analysis to the drilling resistance data sequence can accurately estimate the age of *L. principis-rupprechtii*, improve the accuracy of measuring the standing age by Resistograph, which provides an effective way for micro-damage measurement of standing tree age.

**Keywords:** tree age; resistograph; drilling resistance data; Fourier series; discrete spectral decomposition