doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.025

基于自适应滤波算法的树木年轮测量方法

姚建峰[1,2]　赵燕东[3]　卢　军[1]　郑一力[3]　高瑞东[4]　唐守正[1]

(1.中国林业科学研究院资源信息研究所,北京 100091;2.信阳师范学院计算机与信息技术学院,信阳 464000;
3.北京林业大学工学院,北京 100083;4.山西省管涔山国有林管理局,忻州 034000)

摘要:为提高树木年轮测量仪的测量精度,提出了一种自适应低通滤波算法对年轮测量仪的直流电机电流信号进行滤波处理。普通低通滤波算法滤波系数固定,当树木年轮宽度发生变化时,既可能保留了部分噪声信号,又可能滤去部分有效的树木年轮信号,因此降低了年轮测量仪的测量精度。自适应低通滤波算法的滤波系数可随滤波器输入值和输出值的变化自动进行调整,提高了噪声滤除效果,减少了有效信号损失。使用自主研发的年轮测量仪测量了大、中、小 3 种径阶的 60 个落叶松圆盘,记录直流电机原始电流信号,分别采用自适应低通滤波算法和普通低通滤波算法对原始电流进行滤波处理,根据滤波后的电流波形图,预估圆盘年龄,并计算 2 种滤波算法的年轮识别正确率。结果表明,自适应低通滤波器年轮识别正确率的平均值为 89.66%,普通低通滤波器年轮识别正确率的平均值为 75.84%;当平均年轮宽度变窄时,自适应低通滤波器的年轮识别正确率从 95.61% 下降到 82.02%,下降了 13.59 个百分点,而普通低通滤波器的年轮识别正确率从 86.37% 下降到 62.30%,下降了 24.07 个百分点。表明自适应低通滤波器年轮识别正确率高,自适应能力强,年轮识别精度稳定。

关键词:年轮测量仪;电流滤波;低通滤波器;自适应滤波器

中图分类号:S758.7　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2020)03-0216-07　　**OSID**:

Annual-ring Measurement Method Based on Adaptive Filtering Algorithm

YAO Jianfeng[1,2]　ZHAO Yandong[3]　LU Jun[1]　ZHENG Yili[3]　GAO Ruidong[4]　TANG Shouzheng[1]

(1. *Research Institute of Forest Resources Information Techniques*, *Chinese Academy of Forestry*, *Beijing* 100091, *China*
2. *College of Computer and Information Technology*, *Xinyang Normal University*, *Xinyang* 464000, *China*
3. *School of Technology*, *Beijing Forestry University*, *Beijing* 100083, *China*
4. *Guancenshan State-owned Forest Administration of Shanxi Province*, *Xinzhou* 034000, *China*)

Abstract: In order to improve the accuracy of annual-ring measuring instrument, a new adaptive low-pass filtering algorithm was proposed to filter the direct current (DC) motor current signal of annual-ring measuring instrument. The filter coefficients of ordinary low-pass filtering algorithm were fixed. When the annual-ring width was changed, the current fileted by ordinary low-pass filter may not only retain part of the noise signal, but also filter part of the effective annual-ring signal, which reduced the accuracy of the annual-ring measuring instrument. The filter coefficients of the adaptive low-pass filter algorithm can be adjusted automatically with the changes of the input and output values of the filter, which can improve the effect of noise filtering and reduce the loss of effective signals. Totally 60 larch discs, including large, medium and small diameter orders were measured by self-manufactured annual-ring measuring instrument. The original current signals of DC motor were recorded. The adaptive low-pass filtering algorithm and the ordinary low-pass filtering algorithm were used to filter the original current signals of DC motor respectively. According to the filtered current waveform, the disc age was estimated, and the annual-ring recognition accuracy of the two filtering algorithms was calculated. The average annual-ring recognition accuracy of adaptive low-pass filter was 89.66%, and that of ordinary low-pass filter was 75.84%. The average annual-ring recognition accuracy of adaptive low-pass filter was 13.82 percentage points higher than that of ordinary low-pass filter. When the average ring width became more narrow, the

收稿日期:2019-07-22　修回日期:2019-10-10

基金项目: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)和国家重点研发计划项目(2017YFD0600403)

作者简介:姚建峰(1980—),男,博士生,信阳师范学院讲师,主要从事林业装备自动化研究,E-mail:249749251@qq.com

通信作者:唐守正(1941—),男,研究员,中国科学院院士,主要从事林业统计和生物数学模型研究,E-mail:stang@caf.ac.cn

annual-ring recognition accuracy of the adaptive low-pass filter was decreased by 13.59 percentage points from 95.61% to 82.02%, while that of the ordinary low-pass filter was decreased by 24.07 percentage points from 86.37% to 62.30%. The experiment results showed that the adaptive low-pass filter had high annual-ring recognition accuracy, strong self-adaptive ability and stable annual-ring recognition accuracy.

Key words: annual-ring measuring instrument; current filtering; low-pass filter; adaptive filter

0　引言

树木年龄是森林资源调查中的基本调查因子之一，是建立树木生长模型、评价立地质量、制定森林经营方案的基础数据。随着树木年轮学的不断发展，树木年轮学已广泛应用于林学、森林经理学、生态学、气候学、环境学等领域[1-4]。

目前，测量树木年轮最常用的方法是生长锥法。生长锥法测量精度高，但是取样树芯困难、速度慢，且对树木生长有一定的负面影响[5]。本团队设计的树木年轮测量仪可微损、快速测量树木年轮，其机械结构类似于德国 Rinntech 公司生产的 Resistograph 系列树木针刺仪的结构[6-7]，通过直流电机带动钻针钻入树木，并用直流电机电枢电流表示钻针阻力。由于直流电机电流信号中含有大量的高频噪声信号，使直流电机原始电流曲线图不能直观地反映树木年轮信息，因此，需要对直流电机电流进行滤波处理。普通低通滤波器滤波参数固定[8]，当树木年轮宽度发生变化时，使有效年轮信号频率、噪声信号频率发生变化，因此，滤波后的电流信号中既可能保留了较多的噪声信号，同时又可能滤去有效的树木年轮信号。因此，普通低通滤波器不适合用于年轮测量仪直流电机电流信号的滤波处理。自适应低通滤波器可以通过自动更新滤波系数来调节滤波特性，以达到滤波要求，具有很强的自适应能力，且不需要精确的数学模型，已经广泛应用于系统识别、预测、噪声消除和反演建模等领域[9-15]。本文利用自适应算法的思想[16-17]，在普通低通滤波算法的基础上，提出一种自适应低通滤波算法，根据原始信号变化幅度和滤波后输出信号变化幅度自动更新低通滤波器滤波系数。

1　原理与方法

1.1　树木年轮测量仪机械结构和工作原理

年轮测量仪由 2 个电机控制，一个电机控制钻针的旋转，另一个电机控制钻针的前进。控制钻针旋转的电机称为旋转电机，旋转电机一般使用直流电机。控制钻针前进的电机称为推进电机，推进电机一般使用步进电机。钻针通过钻针夹与旋转电机轴连接，旋转电机固定在滑动基座上，推进电机轴与传动丝杆连接，滑动基座与传动丝杆连接。当推进电机旋转时，带动传动丝杆转动，从而带动滑动基座在传动丝杆上移动。年轮测量仪机械传动结构图如图 1 所示，实物图如图 2 所示，试验操作图如图 3 所示。

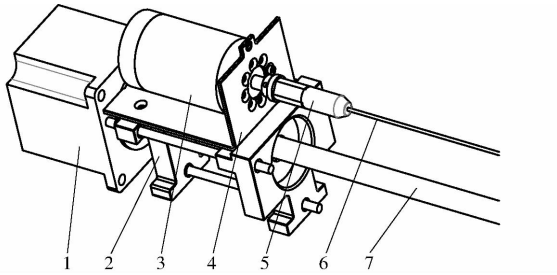


图 1　年轮测量仪机械结构图

Fig. 1　Mechanical structure diagram of annual-ring measuring instrument

1. 推进电机　2. 滑动基座　3. 旋转电机　4. 电机座　5. 钻针夹　6. 钻针　7. 传动丝杆

图 2　年轮测量仪实物图

Fig. 2　Physical picture of annual-ring measuring instrument

图 3　年轮测量仪操作图

Fig. 3　Picture of operating annual-ring measuring instrument

当旋转电机恒速旋转时，钻针阻力与旋转电机电枢电流成正比[18]。因此，可利用旋转电机电枢电流表示钻针阻力。钻针为德国 Rinntech 公司生产的树木针刺仪钻针[7]，钻针形状如图 4 所示。钻针针头宽 3 mm，钻针针杆直径 1.5 mm，因此，钻针阻力主要集中在钻针针头上。钻针阻力与钻针针头切割处的树木微密度正相关。当钻针钻入晚材部分时，晚材密度较大，钻针所受阻力较大，因而，旋转电机电流较大；当钻针钻入早材部分时，早材密度较小，钻针所受阻力较小，因而，旋转电机电流较小。因

此,可以通过旋转电机电流变化情况确定树木年轮。当钻针钻入树木方向与树木年轮线切线方向垂直时,钻针切割晚材的面积最大,且切割面积平稳变化,钻针所受阻力平稳变化,钻针切割树木晚材部分时所受的阻力最大。

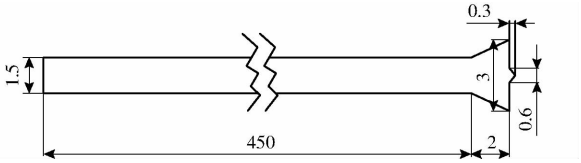


图 4 钻针形状示意图

Fig. 4 Geometry of drill needle

1.2 直流电机电流测量方法

年轮测量仪采用串联电阻法测量电机电枢回路电流。在电机电枢回路中串联一个 10 mΩ 高精密采样电阻,根据欧姆定理,电枢回路电流与采样电阻两端的电压成正比。采样电阻两端的电压信号经放大器放大后,输入到 DSP(Digital signal processing)处理器的 A/D(Analog/Digital)转换接口中。DSP 处理器的 A/D 转换器是 12 位,转换后的数据范围是[0,4 095]。

1.3 试验样本与试验方法

试验样本是 2018 年 6 月在山西省忻州市五寨县羊圈沟林场华北落叶松人工林采集的圆盘。该落叶松人工林造林时间是 1988 年,因此,采样时树龄为 30 a。按树木直径大(胸径大于等于 16 cm)、中(胸径在 10 ~ 16 cm)、小(胸径小于等于 10 cm)各选 10 株,样木随机分布在落叶松人工林内,尽量涵盖不同的坡向和海拔。在树干高 0.5 m 和 1.3 m 处各截取厚度为 5 ~ 7 cm 圆盘,共截取 60 个圆盘。

用年轮测量仪对 60 个华北落叶松圆盘进行测试,每个圆盘分别测量 2 次。本次试验电流采样周期是 1 ms,钻针前进速度是 10 cm/min,因此 2 个连续采样点之间的距离是 0.001 67 mm。由于钻针路径大部分没有经过髓心,一般要偏离髓心 2 ~ 4 个年轮,所以测量时记录测量路径去皮树干直径和测量路径年轮数。先调试电流限幅预处理系数,使电流经过限幅预处理后能滤去原始电流中的突变电流噪声信号。然后调试普通低通滤波器滤波系数 α,使滤波器对所有经过预处理后的电流信号滤波后,电流波形图能反映出 70% 左右的圆盘年轮信息,且滤波后电流波形图变化平滑,毛刺较少。最后调试自适应低通滤波器中各参数的系数,进一步优化滤波效果。

2 数据处理

2.1 直流电机电流限幅预处理

电机原始电流信号中存在时间极短、幅度变化很大的突变噪声信号。为了消除突变噪声信号,在对电流滤波处理之前,需要对电流进行限幅预处理,限制两次相邻采样电流的最大变化幅度[19]。限幅预处理是把第 k 次电流采样值 $x(k)$ 与第 $k-1$ 次采样值 $x(k-1)$ 相减,求出其变化量。如果变化量的绝对值大于 $\lambda x(k-1)$(λ 为限幅系数),则变化量取 $\lambda x(k-1)$。λ 取值非常重要,如果 λ 取值过大,突变噪声信号无法得到有效抑制,如果 λ 取值过小,可能滤除部分变化比较大的有效电流信号。图 5 是用年轮测量仪测量一个直径为 14 cm 圆盘的直流电

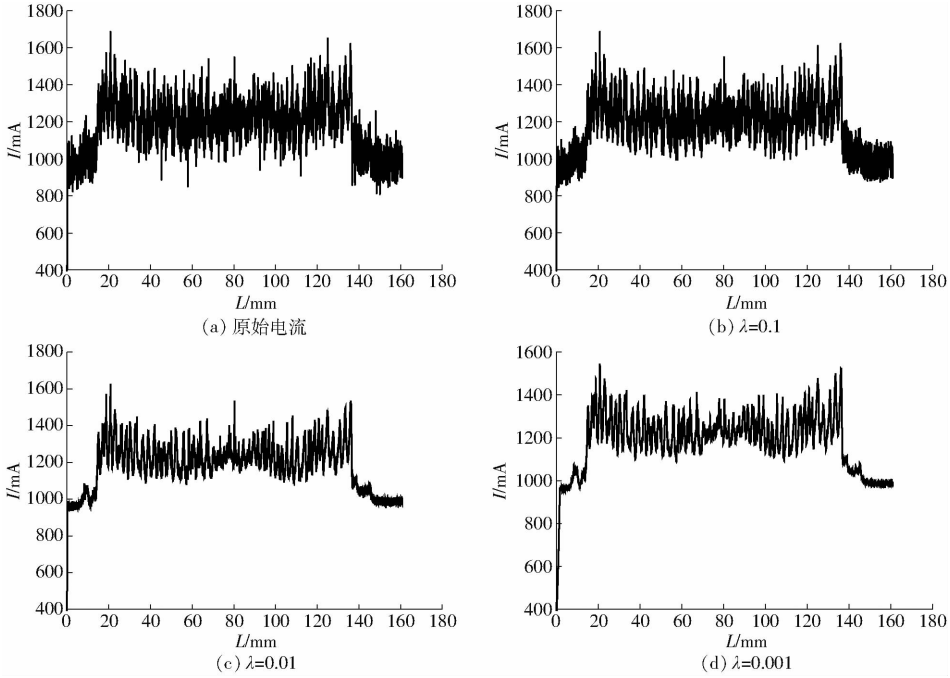


图 5 λ 对电流限幅预处理的影响

Fig. 5 Effect of λ on current limiting pretreatment

机电流曲线图，横坐标表示钻针前进路径的长度 L，纵坐标表示直流电机的电流 I。从图 5 可以看出，当 λ 取 0.1 时，限幅预处理后的电流仍含有大量的突变噪声信号；当 λ 取 0.001 时，突变噪声信号得到有效抑制，但是当电机真实电流信号急剧上升或者急剧下降时，限幅预处理后的电流信号变化缓慢。经大量测试，本试验 λ 取 0.01 比较合适。

2.2　低通滤波器对限幅后电流信号的滤波处理

低通滤波算法是将硬件 RC（Resistance capacitance）低通滤波器的微分方程用差分方程来表示[20-22]，其数学表达式为

$$y(k) = (1-\alpha)y(k-1) + \alpha x(k) \tag{1}$$

其中

$$\alpha = 2\pi f_l / f_s \tag{2}$$

式中　k——采样序号

$x(k)$——滤波器第 k 次滤波输入值

$y(k)$——滤波器第 k 次滤波输出值

α——滤波系数

f_l——滤波器截止频率

f_s——原始信号采样频率

在大部分应用领域，噪声信号的频率和有效信号的频率是动态变化的，所以很难确定滤波器的截止频率。通常情况下，一般根据应用系统的需要调试参数 α，使滤波效果满足应用系统的要求。α 的取值范围是[0,1]，α 越小，截止频率越低，输入值 $x(k)$ 在输出值 $y(k)$ 中的比例越小，滤波器平稳度越高，灵敏度越低，滤波效果越好。但当 α 取值过小、滤波器灵敏度过低时，会产生滤波器的输出滞后于输入的变化趋势。对落叶松圆盘的限幅预处理后的电流信号进行滤波分析，低通滤波器中 α 取 0.01 比较合适。

2.3　自适应低通滤波器对限幅后电流信号的滤波处理

普通低通滤波器调试好后，滤波系数不变，滤波器的截止频率也不变。自适应滤波器根据原始信号变化幅度和滤波后输出信号变化幅度，自动更新低通滤波器滤波系数。当输入值变化幅度增大时，减小滤波系数，以提高滤波器平稳度；当滤波后输出值变化幅度增大时，增大滤波系数，以提高滤波器的灵敏度。自适应低通滤波器滤波系数 α 的计算公式为

$$\alpha = \frac{\lambda_2 |y(k-1) - y(k-2)| + b_2}{\lambda_1 |x(k) - x(k-1)| + b_1 + \lambda_2 |y(k-1) - y(k-2)| + b_2} \tag{3}$$

式中　λ_1——滤波器输入值变化量影响因子

λ_2——滤波器输出值变化量影响因子

b_1——滤波器输入值影响基数

b_2——滤波器输出值影响基数

当 λ_1 越大时，α 受滤波器输入值变化量影响越大；当 λ_2 越大时，α 受滤波器输出值变化量影响越大。b_1、b_2 的数量级与输入量变化量、输出量变化量的数量级相近，且要求 $\alpha_0 = b_1/(b_0 + b_1)$，$\alpha_0$ 是没有使用自适应滤波算法时调试好的滤波系数。经过大量测试，对各参数取不同的值，对华北落叶松圆盘进行滤波处理，对比各参数取不同值时滤波效果的差异，最后确定 $\lambda_1 = 0.5$、$\lambda_2 = 8$、$b_1 = 99$、$b_2 = 1$。

3　试验与结果分析

在 120 个样本数据中，按照树木径阶大、中、小分别统计测量路径处的去皮树干平均直径、测量路径处的平均年轮数、平均年轮宽度以及普通低通滤波器和自适应低通滤波器识别年轮的正确率，统计结果如表 1 所示。

表 1　年轮分析结果统计

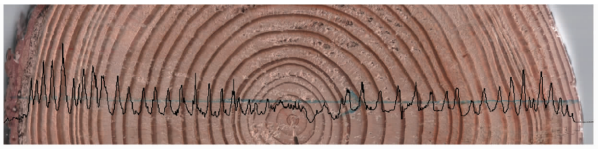
Tab.1　Statistical of annual-rings analysis results

径阶	去皮树干平均直径/mm	平均年轮数	平均年轮宽度/mm	普通低通滤波器年轮识别正确率/%	自适应低通滤波器年轮识别正确率/%
大	173.0	46.0	3.80	86.37	95.61
中	128.0	46.0	2.80	78.84	91.36
小	81.0	42.0	1.90	62.30	82.02
平均值	127.3	44.7	2.83	75.84	89.66

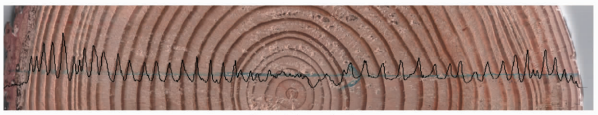
3.1　大径阶圆盘

对于大径阶圆盘，自适应低通滤波器的年轮识别正确率是 95.61%，普通低通滤波器的年轮识别正确率是 86.37%。尽管自适应低通滤波器的正确率比普通低通滤波器的正确率高 9.24 个百分点，但是普通低通滤波器的正确率也能达到 86.37%，基本上能识别大部分年轮。主要因为对于大径阶圆盘，年轮比较宽，平均年轮宽度达 3.8 mm，最窄年轮宽度达 2 mm，由于年轮测量仪每毫米采样 600 个电流数据，最窄的年轮也能采样 1 200 个数据。由于本试验普通低通滤波器的滤波系数 α 为 0.01，所以，只需要 100 次采样就能从电流的最小值跳变到最大值。所以，即使是普通低通滤波器，也能识别大部分的树木年轮。对于大径阶圆盘，不能识别的年轮主要位于圆盘髓心附近。髓心部分年轮不容易识别的原因如下：① 髓心附近，树木的晚材宽度比较窄，晚材密度比较小，导致钻针钻过晚材部分的电流值变化不大，波峰不明显。② 一般情况下，钻针路径很难通过树木髓心，越靠近髓心，钻针路径偏离年

轮线切线的垂直方向越远,导致钻针钻过晚材部分时阻力发生波动,电流值也发生波动。以一个直径为 172 mm 的圆盘为例,分别分析普通低通滤波器滤波后的电流曲线图和自适应低通滤波器滤波后的电流曲线图与圆盘年轮的匹配情况,从而显示自适应低通滤波器和普通低通滤波器对大径阶圆盘的滤波效果差异。图 6a 为自适应低通滤波器的年轮分析图,图 6b 为普通低通滤波器的年轮分析图。从图 6a 中可以看出,在髓心附近,自适应低通滤波器滤波后的电流变化幅值较大,分析出来的年轮数可能比实际年轮数大;从图 6b 中可以看出,在髓心附近,普通低通滤波器滤波后的波峰与波谷变化幅值较小,分析出来的年轮数可能比实际年轮数小。该圆盘右半部分没有树皮,当钻针钻出圆盘时,圆盘边缘部分破裂,导致最后一个年轮不能识别。



(a) 自适应低通滤波器



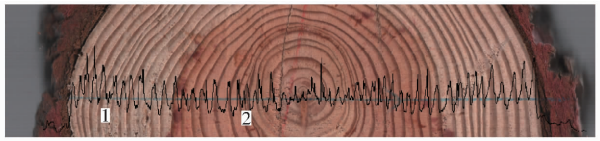
(b) 普通低通滤波器

图 6 大径阶圆盘年轮分析示例图

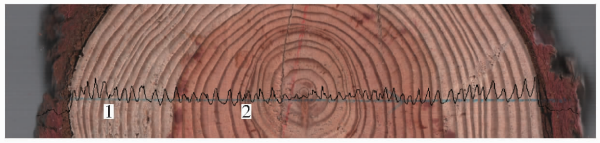
Fig. 6 Example of diagram of annual-ring analysis of large diameter disc

3.2 中径阶圆盘

对于中径阶圆盘,自适应低通滤波器的年轮识别正确率是 91.36%,普通低通滤波器的年轮识别正确率是 78.84%。自适应低通滤波器的正确率比普通低通滤波器的正确率高 12.52 个百分点。自适应低通滤波器的识别正确率比较高,但普通低通滤波器的识别正确率偏低。尽管中径阶圆盘的年轮平均宽度达 2.80 mm,但是由于有些年份气候异常(如干旱),有些年轮的宽度小于 1 mm,导致普通低通滤波器难以识别。以一个直径为 121 mm 的圆盘为例,分别分析普通低通滤波器滤波后的电流曲线图和自适应低通滤波器滤波后的电流曲线图与圆盘年轮的匹配情况,显示自适应低通滤波器和普通低通滤波器对中径阶圆盘的滤波效果差异。图 7a 为自适应低通滤波器滤波后的电流信号年轮分析图,图 7b 为普通低通滤波器滤波后的电流信号年轮分析图。在图 7 中,标有 1、2 的位置处,在自适应低通滤波器滤波后的电流波形图中有较为明显的波峰,而普通低通滤波器不明显,从而导致普通低通滤波器年轮识别正确率偏低。



(a) 自适应低通滤波器



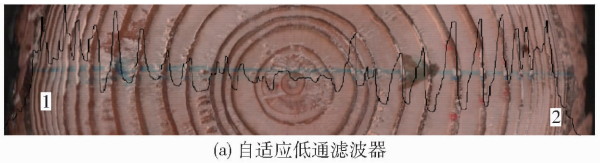
(b) 普通低通滤波器

图 7 中径阶圆盘年轮分析示例图

Fig. 7 Example of diagram of annual-ring analysis of medium diameter disc

3.3 小径阶圆盘

对于小径阶圆盘,自适应低通滤波器的年轮识别正确率是 82.02%,普通低通滤波器的年轮识别正确率是 62.30%。尽管自适应低通滤波器的正确率比普通的低通滤波算法的正确率高 19.72 个百分点,但自适应低通滤波器的正确率仍偏低。对于小径阶树木,当森林郁闭后,小径阶树木是被压木,生长缓慢,边材部分的平均年轮宽度小于 1 mm。由于钻针针头有 0.3 mm 长的针尖,当钻针针头没有钻出上一个年轮的晚材部分时,钻针针尖已经进入了下一个年轮的晚材,再加上钻针钻入方向可能偏离年轮线切线方向的垂直方向、钻针抖动等原因,使钻针针尖阻力不能反映窄年轮的早、晚材之间的密度变化,导致 2 种滤波算法的年轮识别正确率都偏低。以一个直径为 70 mm 的圆盘为例,分别分析普通低通滤波器滤波后的电流曲线图和自适应低通滤波器滤波后的电流曲线图与圆盘年轮的匹配情况,显示自适应低通滤波器和普通低通滤波器对小径阶圆盘滤波效果的差异。图 8a 为自适应低通滤波器年轮分析图,图 8b 为普通低通滤波器年轮分析图。在图 8 中,在标有 1 的位置处,自适应低通滤波器滤波后的电流波形图中有小的波峰,而普通低通滤波器则几乎没有波峰,所以自适应低通滤波器的年轮识别正确率高于普通低通滤波器;在标有 2 的位置处,



(a) 自适应低通滤波器

(b) 普通低通滤波器

图 8 小径阶圆盘年轮分析示例图

Fig. 8 Example of diagram of annual-ring analysis of small diameter disc

2 种滤波算法都不能识别出有效的年轮信号，所以，对于小径阶圆盘，2 种滤波算法的年轮识别正确率都偏低。

当平均年轮宽度从 3.8 mm（大径阶圆盘）下降到 1.9 mm（小径阶圆盘）时，自适应低通滤波器的年轮识别正确率从 95.61% 下降到 82.02%，下降了 13.59 个百分点，而普通低通滤波器的年轮识别正确率从 86.37% 下降到 62.30%，下降了 24.07 个百分点。

4　结论

（1）设计了一种便携式树木年轮微损测量仪，通过落叶松圆盘试验验证了该设备的可行性。

（2）提出的自适应低通滤波算法可通过自动更新滤波系数来调节低通滤波器的滤波特性。当低通滤波器的输入值变化较大时，减小滤波系数，提高滤波器的平稳度；当低通滤波器的输出值变化较大时，增加滤波系数，提高滤波器的灵敏度。因此，自适应低通滤波算法具有很强的自适应能力。

（3）对年轮测量仪直流电机电流进行滤波处理，使用自适应低通滤波器的年轮平均识别正确率达到 89.66%，普通低通滤波器的年轮平均识别正确率为 75.84%。

（4）当树木年轮宽度变窄时，自适应低通滤波器的年轮识别正确率降低了 13.59 个百分点，而普通低通滤波器的年轮识别正确率降低了 24.07 个百分点。因此，自适应低通滤波器的年轮识别正确率比普通低通滤波器稳定。

参　考　文　献

[1] 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)

[2] 郑永宏，张永，邵雪梅，等. 大别山地区黄山松和油松树轮宽度的气候意义[J]. 地理科学进展，2012，31(1)：72－77.
ZHENG Yonghong, ZHANG Yong, SHAO Xuemei, et al. Climate significance of tree ring width of *Huangshan Pine* and *Chinese Pine* in the Dabie Mountains[J]. Progress in Geography, 2012, 31(1): 72－77. (in Chinese)

[3] 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)

[4] 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)

[5] 王庭魁，刘自强，王耀明. X 射线无损检测树木年轮的研究[J]. 东北林业大学学报，1987，15(2)：97－101.
WANG Tingkui, LIU Ziqiang, WANG Yaoming. Non-destructive detection of annual rings in wood by X-ray transmissive technique[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1987, 15(2): 97－101. (in Chinese)

[6] RINN F, SCHWEINGRUBER F H, SCHÄR 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.

[7] RINN F. Basics of micro-resistance drilling for timber inspection[J]. Holztechnologie, 2012, 53(3): 24－29.

[8] 赵毅. 数字滤波的滑动平均法和低通滤波法[J]. 仪表技术，2001(5)：40，46.
ZHAO Yi. Sliding mean method and low pass filtering method of digital filter[J]. Instrumentation Technology, 2001(5): 40, 46. (in Chinese)

[9] SEN M K, BOB H L, WENSHUN T. 数字信号处理原理、实现及应用[M]. 北京：清华大学出版社，2017：205－239.

[10] YANG Yuanxi, GAO Weiguang. A new learning statistic for adaptive filter based on predicted residuals[J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(8): 833－837.

[11] 王丽芳，陈益平. 基于 DSP 的自适应滤波器的实现[J]. 计算机仿真，2009，26(9)：281－284.
WANG Lifang, CHEN Yiping. Implemenation of adaptive filter based on DSP[J]. Computer Simulation, 2009, 26(9): 281－284. (in Chinese)

[12] 李军，赵畅. 基于核自适应滤波的无线传感网络定位算法研究[J/OL]. 农业机械学报，2018，49(4)：241－248.
LI Jun, ZHAO Chang. Wireless sensor network location based on kernel adaptive filtering[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 241－248. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180427&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.027. (in Chinese)

[13] WANG Jiajun, XU Feiyun. Improved adaptive filter and its application in acoustic emission signals[J]. Journal of Southeast University, 2019, 35(1): 43－50.

[14] 张海鹏，李杰，张波，等. 自适应互补滤波水下高度测量技术[J]. 中国测试，2019，45(7)：46－50.
ZHANG Haipeng, LI Jie, ZHANG Bo, et al. Underwater height measurement technology based on adaptive complementary filtering[J]. China Measurement and Test, 2019, 45(7): 46－50. (in Chinese)

[15] ZHANG Shan, ZOU Zaojian. Algorithm simulation of ship dynamic positioning using adaptive fading memory filter[J]. Journal of Ship Mechanics, 2017, 21(12): 1497－1506.

[16] 胡春华，李萍萍，金成磊，等. 基于自适应差分进化算法拟合圆的树干胸径测量方法[J/OL]. 农业机械学报，2018，49(9)：183－188.

HU Chunhua, LI Pingping, JIN Chenglei, et al. Measurement of tree diameter at breast height based on adaptive differential evolution algorithm for circle fitting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 183 - 188. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180922&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.022. (in Chinese)

[17] 余文利,邓小雷,姚鑫骅,等. 基于改进的自适应渐消 UKF 机床主轴热平衡试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(4):363 - 373.
YU Wenli, DENG Xiaolei, YAO Xinhua, et al. Thermal equilibrium test of machine tool spindle based on modified adaptive fading unscented Kalman filter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4):363 - 373. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190442&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.042. (in Chinese)

[18] 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)

[19] 牛余朋,成曙. 单片机数字滤波算法研究[J]. 中国测试技术,2005,31(6):97 - 99.
NIU Yupeng, CHENG Shu. Research on algorithm of digtal filter[J]. China Measurement Technology, 2005,31(6):97 - 99. (in Chinese)

[20] NÚNEZ-DURÁN H. A fast 80X86 assembly language module to low-pass filter digital data[J]. International Journal of Biomedical Computing, 1991, 29(1): 67 - 74.

[21] 王勇,孙冬野,漆正刚. 基于一阶惯性滤波的电喷发动机氧传感器老化模拟方法[J]. 吉林大学学报(工学版),2017,47(4):1040 - 1047.
WANG Yong, SUN Dongye, QI Zhenggang. Aging simulation method for EFI engine oxygen sensor based on first order inertial filter algorithm[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2017, 47(4): 1040 - 1047. (in Chinese)

[22] 赵阳, 娄小平, 刘锋, 等. 自适应 MEMS 加速度计滤波算法[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(11): 120 - 122.
ZHAO Yang, LOU Xiaoping, LIU Feng, et al. Adaptive filtering algorithm of MEMS accelerometer[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016, 35(11): 120 - 122. (in Chinese)

(上接第 362 页)

[11] 胡传皓,曾国强,葛良全,等. Si - PIN 与 CdTe 探测器应用于 X 射线荧光能谱测量的研究[J]. 光谱学与光谱分析,2017,37(1):262 - 266.
HU Chuanhao, ZENG Guoqiang, GE Lianquan, et al. Study on Si - PIN and CdTe detectors used inenergy dispersive X-ray fluorecence measurements[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(1):262 - 266. (in Chinese)

[12] 刘会强. 磷钼酸喹啉重量法测定磷含量原理剖析及不确定度评价[J]. 煤炭与化工,2017,40(6):71 - 76.
LIU Huiqiang. Analysis of the principle of determination of phosphorus content by acid quinoline weight method and uncertainty evaluation[J]. Coal and Chemical Industry, 2017, 40(6):71 - 76. (in Chinese)

[13] 赵奉奎,王爱民. 能量色散 X 射线荧光光谱仪现状[J]. 核技术,2013,36(10):100402.
ZHAO Fenkui, WANG Aimin. Research status of energy dispersive X-ray fluorscence spectrometer[J]. Nuclear Techniques, 2013, 36(10):100402. (in Chinese)

[14] 庞海榕,邓玉福,孟德川,等. EDXRF 法测定石灰岩矿中 Ca 含量[J]. 核电子学与探测技术,2017,37(2):167 - 170.
PANG Hairong, DENG Yufu, MENG Dechuan, et al. Indirect determination of calcuim in limestone using EDXRF analysis[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2017, 37(2):167 - 170. (in Chinese)

[15] 郭成,赖万昌,胡媛,等. X 射线管激发 X 荧光光谱连续本底扣除方法研究[J]. 光谱学与光谱分析,2016,36(4):1235 - 1239.
GUO Cheng, LAI Wanchang, HU Yuan, et al. Research on the background subtraction method for X-ray fluorescence spectrum with X-ray tube excitation[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(4):1235 - 1239. (in Chinese)

[16] 刘江斌,党亮,殷桃刚. 粉末压片—X 射线荧光光谱分析中区域地球化学样品制备和标准曲线建立的几点认识[J]. 甘肃地质,2015,24(4):84 - 87.
LIU Jiangbin, DANG Liang, YIN Taogang. Geochemical sample preparation and establishment of standard curve for X-ray fluorescence spectrometery analysis with pressend powder pellet[J]. Gansu Geology, 2015, 24(4):84 - 87. (in Chinese)

[17] 李德林,李志得. 能量色散 X 射线校准及不确定度评定[J]. 中国测试,2017,43(1):33 - 36.
LI Delin, LI Zhide. Calibration of energy dispersive X-ray fluorescence spectrometer and evaluation of measurement uncertainty [J]. China Measurement & Test, 2017, 43(1):33 - 36. (in Chinese)

[18] ZHAO F, WANG A. A background subtraction approach based on complex wavelet transforms in EDXRF[J]. X-Ray Spectrometry, 2015, 44(2):6 - 7.

[19] 范宁,易婵娟. 采用磷钼酸喹啉重量法测定磷[J]. 磷肥与复肥,2002,17(6):66.

[20] 吉昂,卓尚军,李国会. 能量色散 X 射线荧光光谱[M]. 北京:科学出版社,2011:326 - 335.