

林木胸径持续测量装置的研制与应用

刘玉童, 张海文, 黄辉, 张加成, 张森, 赵辉*

(东北林业大学机电工程学院, 哈尔滨 150040)

摘 要: 为满足森林生态监测中对树木胸径高频次、自动化测量的迫切需求, 设计并实现一种基于物联网技术的树木胸径持续测量装置。该装置以 ESP32 (由中国的乐鑫公司 (Espressif Systems) 推出的一款集成了 Wi-Fi 和蓝牙功能的低成本、低功耗的微控制器) 为核心组件, 集成高精度位移传感器, 同步带传动结构以及无线通信模块, 完成树木胸径变化数据的实时采集, 同时具备对采集数据的高效存储能力以及稳定远程传输功能。为验证装置性能, 选取 2 株不同树种 (水曲柳与落叶松), 在东北林业大学校园林场开展为期一年的实地实验。监测结果显示, 该系统能够精确反映树木在生长期与休眠期的胸径变化特征, 其测量误差控制在 0.1% 以内, 并且与人工测量结果高度一致 ($R^2=0.91$)。此外, 结合连续胸径数据与实测树高, 采用双变量生物量模型推算单株树木的年度碳汇变化, 为个体树碳储量动态估算提供可靠的技术路径。

关键词: 林木; 位移传感器; 持续测量; 胸径; 碳储量; 生物量; 自动化; 森林生态监测

中图分类号: S771

文献标识码: A

DOI: 10.7525/j.issn.1006-8023.2026.01.014

Development and Application of Continuous Measurement Device for Forest Tree Diameter at Breast Height

LIU Yutong, ZHANG Haiwen, HUANG Hui, ZHANG Jiacheng, ZHANG Sen, ZHAO Hui*

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: To meet the urgent need for high-frequency and automated measurement of tree diameter at breast height in forest ecological monitoring, a continuous measurement device for tree diameter at breast height based on Internet of Things technology is designed and implemented. This device took the ESP32 (a low-cost and low-power microcontroller integrating Wi-Fi and Bluetooth functions launched by Espressif Systems of China) as the core component, integrated high-precision displacement sensors, synchronous belt drive structures and wireless communication modules, and completed the real-time collection of data on the diameter changes of trees at breast height. It simultaneously possessed the efficient storage capacity for collected data as well as the stable remote transmission function. To verify the performance of the device, two different tree species (ash and larch) were selected and a one-year field experiment was carried out in the forest farm on the campus of Northeast Forestry University. The monitoring results showed that this system can accurately reflect the variation characteristics of the diameter at chest height of trees during the growth period and the dormant period. Its measurement error was controlled within 0.1% and was highly consistent with the manual measurement results ($R^2=0.91$). Furthermore, by combining the continuous diameter at breast height data with the measured tree height, a bivariate biomass model was used to calculate the annual carbon sink variation of individual trees, providing a reliable technical path for the dynamic estimation of individual tree carbon storage.

Keywords: Forest trees; displacement sensor; continuous measurement; diameter at breast height; carbon storage; biomass; automation; forest ecological monitoring

收稿日期: 2025-06-06

基金项目: 黑龙江省应用技术与开发计划项目 (GA21A403-5)。

第一作者简介: 刘玉童, 硕士研究生。研究方向为林木胸径持续测量装置的研制与应用。E-mail: 3058849862@qq.com

*通信作者: 赵辉, 博士, 副教授。研究方向为可持续设计制作。E-mail: zhaohv@163.com

引文格式: 刘玉童, 张海文, 黄辉, 等. 林木胸径持续测量装置的研制与应用 [J]. 森林工程, 2026, 42(1): 151-159.

LIU Y T, ZHANG H W, HUANG H, et al. Development and application of continuous measurement device for forest tree diameter at breast height [J]. Forest Engineering, 2026, 42(1): 151-159.

0 引言

随着全球气候问题日益严峻以及人们对生态环境保护意识的不断增强,树木生长监测作为森林生态系统评估和资源管理的重要手段,逐渐受到国内外广泛关注。树木的生长情况不仅反映着生态系统的整体健康水平,也与经济发展和可持续林业利用密切相关。为了实现林业科学研究、资源评估和生态保护等领域的深入发展,获取树木生长信息的准确性和及时性至关重要。因此,高精度、实时性的树木生长动态监测设备应运而生,其专项监测树干直径变化、生长速率以及健康状态等功能,能够为相关领域提供有力支持,具有重要意义^[1-2]。

在实际林业应用中,树木胸径(即距地面1.3 m处树干直径)的测量是判断树木生长状况、估算林分结构及推测树龄等关键指标的重要依据。近年来,随着林业调查技术和数据采集手段的发展,众多基于电子化和智能化的胸径测量方法不断涌现,旨在提升测量效率与精度^[3-4]。目前胸径测量主要分为非接触式和接触式。非接触式是指在未触碰到树木躯干的情况下来测量测立木胸径,如相关研究人员^[5-9]利用遥感影像分析、无人机数据反演、激光雷达扫描以及摄影等测量方式,基于树木点云数据,通过算法反馈,实现了林木胸径的自动提取。上述测量手段虽具备大范围、快速估算能力,但在精度控制方面往往受限于天气变化、光照强弱和地形遮挡等外部因素。同时,此类设备普遍成本较高、系统复杂、携带不便,难以适应森林密集或地形起伏明显的区域作业需求。接触式测量工具主要分为卡测与围测两类,如相关研究人员^[10-14]结合卡测、围测装置,利用嵌入式技术,通过微控制器、传感器和上位机软件的结合,采用接触式方法提取树木直径值,实现树木直径的测量,大大提高了仪器的可靠性,如提高了胸围测量的效率和准确性。但装置普遍存在如测量线材细小易损、设备体积偏大、结构复杂和便携性差等问题。此外,其电路系统设计要求较高,信号处理复杂度大,不利于在基层林业生产实践中推广应用。加之当前多数设备缺乏统一高效的数据管理平台,或依赖后期处理软件进行人工整理,进一步增加了使用成本,限制其在森林资源连续监测中的大规模部署潜力^[15-16]。综上,开发一种便携性强、成本低、精度高、适应性广且能够适用于复杂林地条件的胸径测量装置,已成为当前林业信息化监测领域亟须解决的重要技术难题。

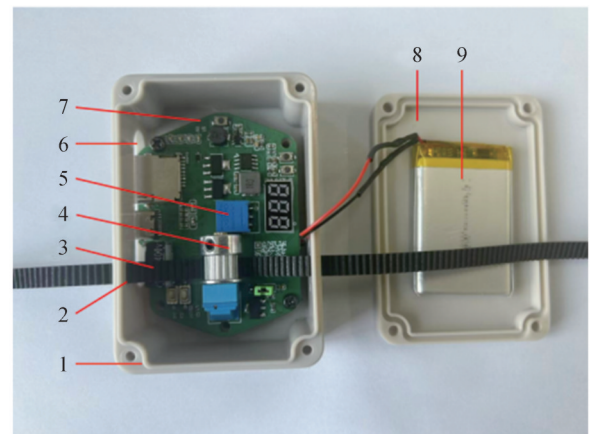
随着嵌入式技术的进步和传感器技术及其应用的不断发展,森林资源调查工作对测量设备提出了新的

要求。为满足这些实际需求,本研究设计了一种基于高精度位移传感器的立木胸径持续测量装置。该装置具有低成本、高精度、低功耗、便携式和易于安装的特点,并配备了一套完善的数据存储、管理和分析软件。通过该系统,能够对树木直径进行系统测量和分析,不仅可以连续、准确地获取胸径数据,还可以精确计算树木碳汇,从而为碳交易提供必要的科学数据支持。

1 装置运行流程与结构

1.1 结构硬件设计

本研究的立木胸径持续测量装置的机械结构如图1所示。该装置总体尺寸为12.5 cm×6.0 cm×6.5 cm,具有结构紧凑的设计特点。立木胸径持续测量装置主要由固定结构、高精度位移传感器、数据采集模块、同步带轮、同步带、供电系统以及保护外壳组成。装置通过齿形带固定于树干胸径高度位置,能够适应不同直径的树木,并最大限度地减少对树木生长的影响。测量部分采用高精度位移传感器,通过同步带精确感应树木周长的微小变化,从而记录树木胸径的动态生长情况。数据采集模块负责定时记录传感器数据,并支持无线传输或本地存储功能,便于后续数据分析与处理。供电系统采用可卸式锂电池(电压5 V,容量10 000 mA·h),便于更换电池,确保装置长期稳定运行。此外,外部设有防水防尘的保护外壳,使装置能够适应各种复杂天气和环境条件。



1. 外壳;2. 齿形带开孔;3. 齿形带;4. 同步带轮;5. 高精度位移传感器;6. 充电接口开孔;7. 印刷电路板;8. 盒盖;9. 电池。

1. Shell; 2. Perforation of toothed belt; 3. Toothed belt; 4. Synchronous pulley; 5. High-precision displacement sensor; 6. Opening holes in the charging interface; 7. Printed circuit board; 8. Box lid; 9. Battery.

图1 胸径测量装置实物

Fig. 1 Physical diagram of the diameter at breast height measuring device

1.2 结构软件设计

本研究设计的林木胸径持续测量装置,其电路结构框图如图 2 所示,装置的软件系统基于 ESP32(由中国的乐鑫公司(Espressif Systems)推出的一款集成了 Wi-Fi 和蓝牙功能的低成本、低功耗的微控制器)平台开发,具备自动采集、存储及上传树木胸径数据的功能,设计充分考虑了系统的稳定性、低功耗特性以及实用性。系统启动后,将自动完成各模块的初始化操作,

包括模拟数字转换器(analog-to-digital converter, ADC)采样、实时时钟配置、SD(secure digital)卡读写功能、Wi-Fi 网络连接、数码管显示控制以及按键交互逻辑等。用户可通过按键操作进入调试模式,以实时查看采样数据,或直接进入正常工作流程。RTC 时钟(real-time clock)代表实时时钟;MQTT(message queuing telemetry transport)代表消息队列遥测传输。

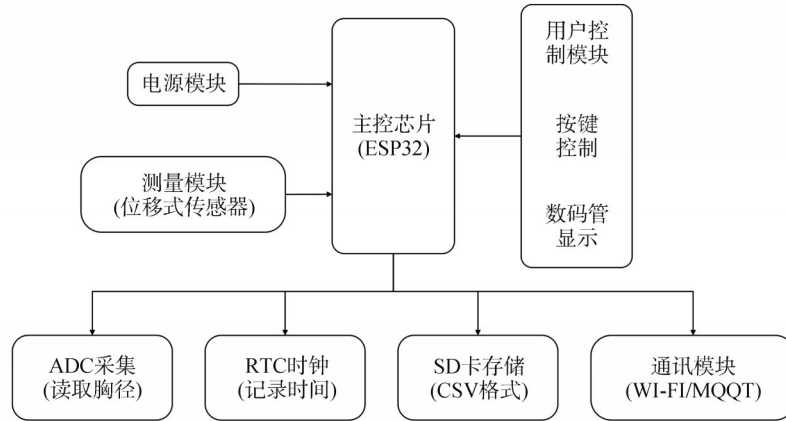


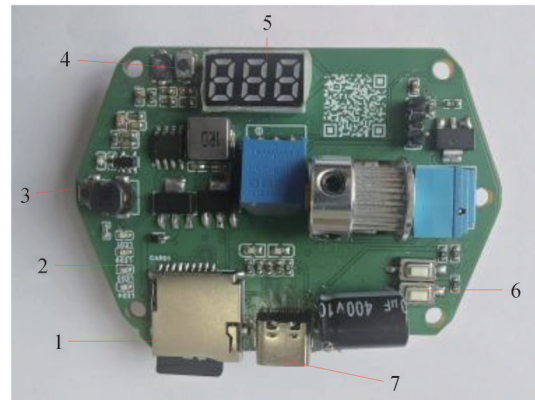
图 2 电路结构

Fig. 2 Circuit structure diagram

在数据采集过程中,系统会对胸径传感器进行多次采样并计算平均值,从而提高测量精度。所得结果将以 CSV(comma-separated values)格式保存至 SD 卡,并通过 MQTT 协议上传至云端服务器,实现远程数据访问与管理。此外,系统集成电压检测与异常重启恢复机制,进一步增强了设备运行的可靠性。为满足野外长期无人值守的需求,软件实现了深度睡眠功能,在完成数据采集与上传任务后自动进入低功耗休眠状态,并按照预设周期唤醒,确保连续监测的高效性。整体架构清晰、功能集成度高,是林业生态监测的理想解决方案。依据电路结构框图所设计的印制电路板如图 3 所示,集成了主控、存储和通信等模块,并提供了传感器、电池等接口。

1.3 装置运行流程

林木胸径持续测量装置的工作逻辑流程框图如图 4 所示。装置开机后,首先进行系统模块初始化,包括 ADC 采样、实时时钟、SD 卡读写和 Wi-Fi 连接等功能配置。随后判断是否进入调试模式,若进入则执行相应调试操作;若不进入,则按照预设程序启动正常工作流程。系统周期性读取时间,采集 ADC 数据以计算实际胸径值,将数据保存至 SD 卡的同时,通过 Wi-Fi 上传至云端服务器。在完成数据采集与上传后,装置自



1. SD 卡槽;2. 充电指示灯;3. 电池激活按钮;4. 数码管控制按键;5. 三位数码管;6 开关;7. Type-c 充电口

1. SD card slot; 2. Charging indicator light; 3. Battery activation button; 4. Digital tube control keys; 5. Three-digit digital tube; 6 Switch; 7. Type-c charging port.

图 3 电路板实物

Fig. 3 Physical picture of the circuit board

动进入深度睡眠模式,等待定时唤醒以开始下一次循环。整个流程体现了装置自动化、智能化的特点,确保了数据采集的高效性与稳定性,为后续的数据分析与处理奠定了坚实基础。当前装置支持 Wi-Fi 联网上传与本地 SD 卡存储双模式,在无网络地区也能实现数据断点续存,并可由巡检人员定期导出数据。此外,装置

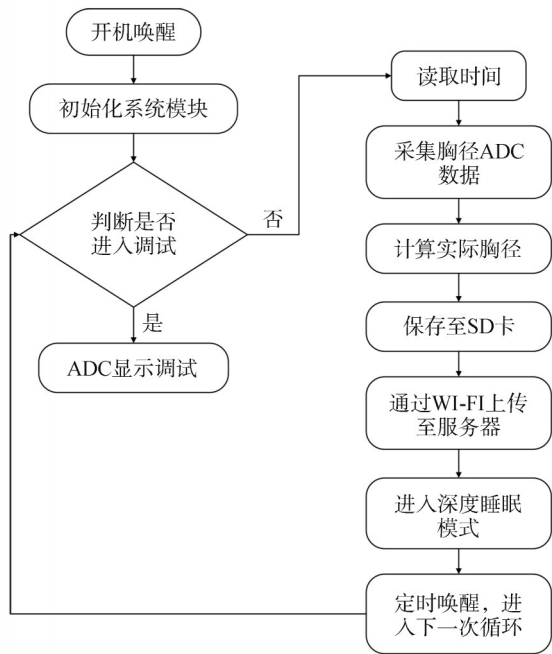


图 4 软件流程框图

Fig. 4 Software flow block diagram

已预留通信模块扩展接口,未来版本计划引入长距离通信(long range, LoRa)或窄带物联网(narrow band internet of things, NB-IoT)等低功耗远距通信技术,以提升其在复杂林区的实际应用能力。

2 胸径测量原理

林木胸径持续测量设备的胸径测量值由胸径测量模块中同步带长度决定,即胸径传感器通过同步带拉伸长度不同而输出不同的电压信号值,本研究设计的胸径传感器原理如图 5 所示(图中 1、2、3 代表引脚,RP 代表可调电阻)。

胸径测量系统由外壳、同步带、同步带轮以及安装于外壳内部的高精度位移传感器组成。在进行树木胸径测量时,同步带向外拉伸并带动同步带轮旋转,树木生长过程中通过中心轴驱动传感器转轴转动。滑动触点与电阻体接触并移动以改变电阻值,齿形带长度的变化量与树木胸径相对应。利用高精度位移传感器可将电阻变量转换为电压变量,并通过 Arduino 芯片读取电压变化值并进行计算,从而获得胸径的实际测量值。

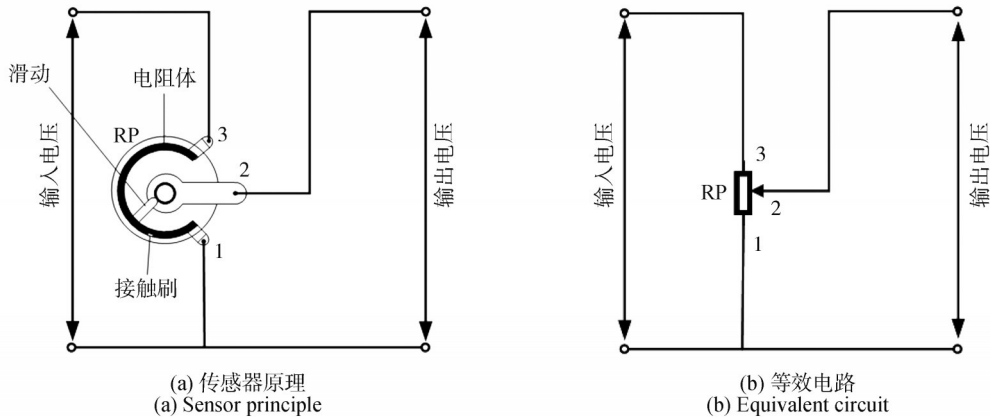


图 5 胸径传感器原理

Fig. 5 Principle of the diameter at breast height sensor

胸径 D 与齿形带长度 L 的关系为

$$D = \frac{L}{\pi} \quad (1)$$

齿形带长度 L 与电阻变化量 R_i 的关系为

$$L = R_i A + B \quad (2)$$

式中: A 为装置电阻系数; B 为实验系数。

电阻变化量 R_i 与测量变化电压关系为

$$R_i = \frac{V_0 R - V_1 R}{V} \quad (3)$$

式中: V_0 为未测量时的初始电压; V_1 为测量时的电压; V 为电源电压; R 为滑动变阻器的最大电阻。

由式(1)一式(3)可推导出胸径 D 与测量时电压 V_1

的关系为

$$D = \frac{A(V_0 R - V_1 R)}{V\pi} + B \quad (4)$$

由于式(4)中的 V_0 、 R 、 V 、 A 都为常量,可将式(4)简化为

$$D = K(V_0 - V_1) + B \quad (5)$$

式中, K 为实验系数,可通过多次实验求得。

由式(5)可看出,测量时电压 V_1 与胸径 D 呈线性相关。

为了保证高精度胸径测量,测量装置基于传感器位移测量原理,结合同步带传动结构,构建了一种将树木胸径变化转换为电压变化的有效方法。通过齿形带

与精密同步带轮啮合的结构设计,确保齿形带拉伸时的出线口始终保持平行,显著提升了拉伸长度与中心轴旋转角度之间的线性对应关系,从而提高了整个系统的测量精度与稳定性。在此基础上,结合电阻变化与电压采样之间的函数关系,推导出胸径与测量电压之间的数学模型,实现对树木胸径连续、高精度监测。

3 实验与评估

在实验资源有限的前提下,本研究选择水曲柳与落叶松作为实验对象,主要考虑其分别代表东北地区阔叶树与针叶树的典型树种,生长节律差异明显,具有代表性。通过对这 2 种树种的测试可验证装置在不同树种结构上的适应能力。本研究作为初步探索选择 2 种典型树种,未来将扩展至更多树种与更复杂的林型场景。

3.1 实验操作流程与地点

实验操作流程,林木胸径测量时将高精度胸径测

量设备围于被测树木距地面高度 1.3 m 胸径处,将齿形带环绕并紧贴设置于树木测量位置外部,使其与凸肩同步带轮紧密啮合,一端固定于防水外壳的一侧。通过输入单元添加预测量树木的编号数据及树木初始胸径。

测量结束时,控制中心根据电位器电阻变化,并据此计算出对应的尺寸;存储单元将数据处理单元计算出的尺寸数据和样木编号数据存储至 SD 卡中保存;数据传输单元将存储单元中的数据传输至外部终端;外部终端通过微信小程序可实现实时对树木胸径的监测。

打开手机端程序,可实时接收测量数据,预设测量样地名称、编号和树种名称等信息,手机 App 可根据预设信息自动编码,也可测量后提取存储的数据,根据样地名称、测量编号、树种名称和测量时间等信息进行调用,在 App 中管理、编辑、调用和导出 Excel 数据并保存。图 6(a)为胸径测量作业实物图,图 6(b)为数据接收 App 结果显示。



(a) 测量作业实物图
(a) Physical diagram of the measurement operation



(b) APP数据接收图
(b) Mini-program data receiving diagram

图 6 胸径测量作业和 APP 数据接收图

Fig. 6 Diagram of diameter at breast height measurement operation and APP data reception

实验地点设置在黑龙江省东北林业大学校园林业示范基地(126°37'15"E, 45°43'10"N)。在同一固定样地,选择了 2 棵不同树种,即水曲柳和落叶松,开展为期一年(2024 年 5 月 1 日至 2025 年 5 月 1 日)的连续测量。在测量开始和结束时,使用围尺进行手动测量,每

棵树测量 3 次,取平均值。此外,在整个测量期间的每半个月用卷尺测量了当时的瞬时树干直径(胸径),并将其与测量设备的数据进行了比较。样本树初始结束胸径数据见表 1。

表1 样本树信息表

Tab. 1 Sample tree information table

树种 Tree species	持续测量装置起始胸径/mm Initiation diameter at breast height of continuous measurement device	传统测量装置起始胸径/mm Initiation diameter at breast height of traditional measurement device	持续测量装置终止胸径/mm Termination diameter at breast height of continuous measurement device	传统测量装置终止胸径/mm Termination diameter at breast height of traditional measurement device	测量误差 Measurement error
水曲柳 <i>Fraxinus mandshurica</i>	170.104	170.0	174.620	174.6	0.088
落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	118.112	118.1	126.418	126.4	0.088

根据测量结果分别计算设备偏差(BIAS, 式中记为 B_{IAS})、相对偏差(relative bias, rBIAS, 式中记为 r_{BIAS})、均方根误差(root mean square error, RMSE, 式中记为 R_{MSE})和相对均方根误差(relative root mean square error, rRMSE, 式中记为 r_{RMSE})评价设备的测量精度, 其公式为

$$B_{IAS} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{n} \right). \quad (6)$$

$$r_{BIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{n} \right)}{\hat{y}_i} \times 100\%. \quad (7)$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}. \quad (8)$$

$$r_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i}{\hat{y}_i} - 1 \right)^2}{n}} \times 100\%. \quad (9)$$

式中: y_i 为传统围尺测量值; \hat{y}_i 为装置测量值; n 为测量次数。

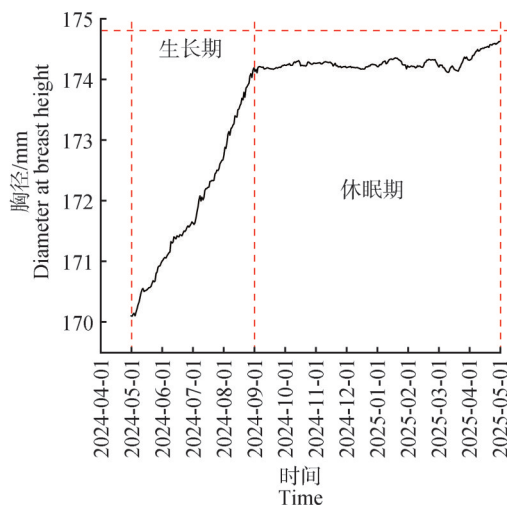
结合公式计算结果, 本装置的平均偏差(BIAS)为

0.037 mm, 相对偏差(rBIAS)为0.025%, 均方根误差(RMSE)为0.088 mm, 相对均方根误差(rRMSE)为0.059%。数据表明, 该装置具有非常好的稳定性水平, 误差为0.059%, 并将误差保持在0.1%的量级内。实测结果表明, 装置精度优于传统围尺, 且装置在真实林地环境下具备良好的适应性和高精度数据采集能力, 为后续胸径动态监测与碳汇估算提供可靠数据基础, 可满足野外环境下对树木胸径高精度监测的实际需求。

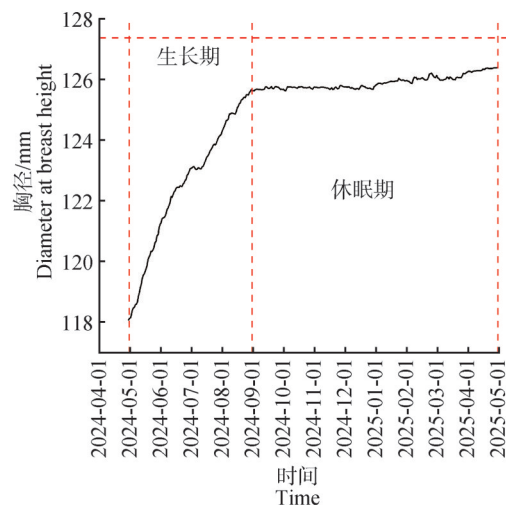
3.2 设备测量结果

3.2.1 水曲柳和落叶松的年度变化

根据胸径连续测量装置获得的数据生成林木胸径年度变化如图7所示, 图7(a)显示了水曲柳在2024年5月1日至2025年5月1日期间的胸径变化, 生长时段2024年5月1日胸径开始逐渐上升, 直至8月31日树木生长变缓, 在此期间, 样木的胸径继续生长, 这被定义为其生长期。休眠时段从2024年9月1日直至监测结束, 样木胸径开始小幅波动, 该阶段被定义为其休眠期。落叶松的生长规律也与水曲柳相似, 如图7(b)所示。



(a) 水曲柳年胸径值变化
(a) Changes in the annual diameter at breast height of ash



(b) 落叶松年胸径值变化
(b) Changes in the annual diameter at breast height of larch

图7 样木年胸径变化

Fig. 7 Changes in the annual diameter at breast height of the sample trees

通过对上述观测结果的分析,得出该地区水曲柳和落叶松的生长和休眠状况,生长时段即生长期(growing period),从 2024-05-01 到 2024-08-31 增长最明显,树木胸径快速上升,水曲柳从约 170.1 mm 增至 174.0 mm 左右,增长幅度达 4.0 mm,约占全年增长的 95%。说明在光照温度充足的夏季树木的生理活动增强树木生长较快。休眠期(dormancy period),从 2024-09-01 到 2025-05-01 胸径曲线波动减缓,略有震荡但无明显增长趋势,甚至有微小下降或停滞。说明在低温或光照不足的冬季,树木生理活动减弱。

3.2.2 水曲柳和落叶松胸径每日变化

水曲柳和落叶松胸径每日增长分析:本研究选取 2024 年 7 月 6 日水曲柳 24 h 胸径生长数据进行分析,如图 8 所示。由图 8(a)可知,6 月 28 日 1:00—5:00,树径值波动较小;6:00—12:00,树径值呈明显的线性上

升趋势;上升至最大值,平均变化相对较快;12:00 至次日 1:00,树径值开始向下波动,单日胸径最高径值为 171.814 mm,最低径值为 171.764 mm。

从以上观察分析可以得出,落叶松在同一时期的生长波动与水曲柳总体上大致相同,由于树种不同,冠幅和冠高等参数存在差异,生长波动在相对时间上会有滞后和超前,由图 8(b)可知,落叶松当日最大胸径为 123.158 mm,最小胸径为 123.102 mm。由每日胸径变化可见,树木在白昼期间因光照、温度和水条件变化,胸径出现有规律波动。这与树木体内水势变化及蒸腾作用密切相关。装置的毫米级分辨能力使得这类微小动态变化得以持续监测,表明该系统不仅适用于生长趋势观测,也具备研究短周期生理反应的潜力。

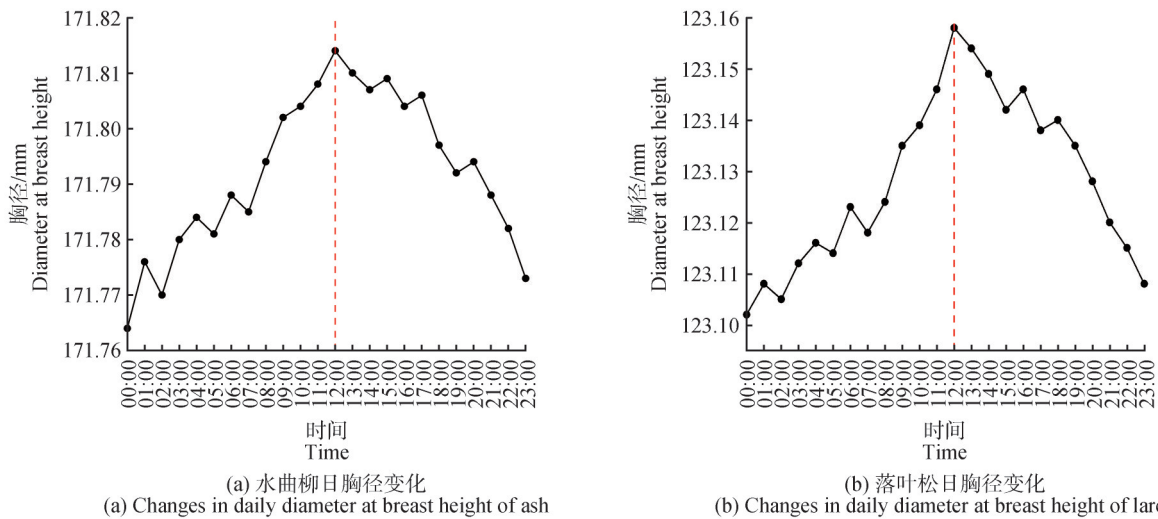


图 8 样木胸径日变化量

Fig. 8 Daily variation in the diameter at breast height of the sample trees

3.2.3 准确计算单棵树的碳汇

以水曲柳、落叶松为例,水曲柳从初始胸径 170.104 mm、树高 8.92 m,一年生长到胸径 174.62 mm、树高 9.5 m;落叶松从初始胸径 118.112 mm,树高 7.62 m,一年生长到胸径 126.418 mm、树高时为 8.28 m。利用已建立林木生物量模型系统^[17-18],结合基于林木胸径持续测量装置提取的胸径和实测树高,选择相应的二元生物量模型,求算目标单木的生物量模型值,再根据相应的含碳系数,可以获得每棵树的每月碳汇,表 2 为树木生长期的每月碳汇。相关公式为

$$W = a(D^2H)^b \quad (10)$$

$$M = WK \quad (11)$$

式中:W 为地上生物量;D 为胸径;H 为树高;K 为含碳

表 2 监测样木碳汇数据表

Tab. 2 Monitoring sample tree carbon sink data table

树种 Tree species	5月 May	6月 June	7月 July	8月 August
水曲柳 <i>Fraxinus mandshurica</i>	0.000 158	0.000 150	0.000 131	0.000 177
落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	0.000 184	0.000 146	0.000 093	0.000 154

系数;a、b 为生物量回归模型中的经验参数;M 为每月碳汇量,t。水曲柳含碳量系数 K 取 0.43,a、b 分别取值 0.001 82、0.974 6;落叶松含碳量系数 K 取 0.52,a、b 分别取值 0.046 2、0.905 0。

4 结论

本研究针对树木胸径连续监测需求,研发了一种集成高精度测量、低功耗运行与远程通信能力的物联网装置。该装置以ESP32为核心,结合同步带轮传动结构和高精度位移传感器,采用软硬件一体化设计,实现毫米级胸径变化采集,支持本地SD卡存储与无线上传,具备高稳定性、强适应性及良好交互性,满足野外长期无人值守的生态监测数据获取需求。需指出,装置初次安装需人工捆绑调试,其后可长期稳定工作,但在完全无人部署方面仍有提升空间。未来版本拟引入自适应固定机构,以实现全流程自动化布设。

实验部分在东北林业大学校园林场开展,对2株不同树种(水曲柳与落叶松)进行了为期一年的连续监测。测量结果清晰呈现出生长期胸径快速增长与休眠期胸径微幅波动的规律,装置测量数据与人工测量数据高度吻合,偏差率低于0.5%, R^2 达到0.91,表明装置具有良好的测量准确性和重复性。此外,结合胸径与树高数据,本研究利用双变量生物量回归模型估算了2株样木的年度碳汇变化,并构建出基于实时胸径数据的单木碳汇估算路径,为林木碳储量动态评价提供了可行手段。

综上所述,本研究研制的胸径持续测量装置在硬件结构、软件系统、测量原理与应用场景上均体现出较强的创新性与实用价值。装置可实现对树木胸径的连续自动化监测,并结合胸径动态数据实现碳汇估算,初步展示了其在林业生态监测、碳汇评估和树木生理研究等方面的应用潜力。在后续研究中可在以下方面进一步优化:引入多参数同步采集(如土壤湿度、气温和光照等)、提升数据通信效率(如接入LoRa或NB-IoT网络)、加入太阳能供电等绿色能源方案,以及开发可视化分析平台,实现大规模林区智能监测系统的建设目标。

参 考 文 献

- [1] 桑宏英. 生态环境保护与林业可持续发展探究[J]. 农村实用技术, 2022(1): 111-112.
SANG H Y. Study on ecological environment protection and forestry sustainable development [J]. Rural Practical Technology, 2022(1): 111-112.
- [2] 刘琳, 吴云飞, 韩哲, 等. 林业生态建设关注度对环境库兹涅茨曲线的影响[J]. 森林工程, 2023, 39(6): 64-74.
LIU L, WU Y F, HAN Z, et al. The impact of forestry ecological construction attention on the environmental Kuznets curve [J]. Forest Engineering, 2023, 39(6): 64-74.
- [3] 杨磊, 徐伟恒, 孔雷, 等. 林木直径测量方法现状与展望[J]. 四川林业科技, 2018, 39(2): 65-70.
YANG L, XU W H, KONG L, et al. The present situation and prospects of tree diameter measuring methods [J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2018, 39(2): 65-70.
- [4] 关炳福. 关于森林资源连续清查工作中提高样木胸径测量精度的探讨[J]. 内蒙古林业调查设计, 2010, 33(5): 63-64.
GUAN B F. Discussion on improving the measurement accuracy of DBH of sample trees in continuous inventory of forest resources [J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2010, 33(5): 63-64.
- [5] 李滨, 刘可宁. 基于无人机光学遥感的森林生物量估算研究[J]. 森林工程, 2022, 38(5): 83-92.
LI B, LIU K N. Forest biomass estimation based on UAV optical remote sensing [J]. Forest Engineering, 2022, 38(5): 83-92.
- [6] 蔡硕, 邢艳秋, 端木嘉龙. 背包式激光雷达滤除低强度点云提取林木胸径[J]. 森林工程, 2021, 37(5): 12-19.
CAI S, XING Y Q, DUANMU J L. Extraction of DBH from filtering out low intensity point cloud by backpack laser scanning [J]. Forest Engineering, 2021, 37(5): 12-19.
- [7] LIU L L, ZHANG A W, XIAO S, et al. Single tree segmentation and diameter at breast height estimation with mobile LiDAR [J]. IEEE Access, 2021, 9: 24314-24325.
- [8] LIAN Y N, FENG Z K, HUAI Y J, et al. Terrestrial videogrammetry for deriving key forest inventory data: A case study in plantation [J]. Remote Sensing, 2021, 13(16): 3138.
- [9] WU X M, ZHOU S Y, XU A J, et al. Passive measurement method of tree diameter at breast height using a smartphone [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 163: 104875.
- [10] 李骞, 董浏畅, 李德豪, 等. 一种便携式树木胸径测量装置的设计[J]. 林业机械与木工设备, 2023, 51(1): 24-27.
LI Q, DONG L C, LI D H, et al. Design of a portable device for measuring DBH of trees [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2023, 51(1): 24-27.
- [11] 孙林豪, 翁卫松, 方陆明, 等. 三段式立木胸径测量方法及装置设计与试验[J]. 林业科学, 2021, 57(5): 130-139.
SUN L H, WENG W S, FANG L M, et al. Design and experiment of three-stage measurement method and device for tree DBH [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(5): 130-139.
- [12] 孙林豪, 冯仲科, 苏珏颖, 等. 便携式高精度立木胸径

- 测量装置研制与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(15):31-41.
- SUN L H, FENG Z K, SU J Y, et al. Development and experiment of the portable high precision measurement device for tree DBH[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(15):31-41.
- [13] 刘海洋, 冯仲科, 呼诺, 等. 手持式高精度立木胸径测量设备设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9):189-194.
- LIU H Y, FENG Z K, HU N, et al. Design and experiment of portable high precision equipment for tree diameter measurement [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9):189-194.
- [14] LI S Y, FANG L M, SUN Y J, et al. Development of measuring device for diameter at breast height of trees [J]. Forests, 2023, 14(2):192.
- [15] LIANG X L, KANKARE V, HYYPPÄ J, et al. Terrestrial laser scanning in forest inventories [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 115:63-77.
- [16] WANG P, LI R H, BU G C, et al. Automated low-cost terrestrial laser scanner for measuring diameters at breast height and heights of plantation trees [J]. PLoS One, 2019, 14(1):e0209888.
- [17] 刘浩然, 范伟伟, 徐永胜, 等. 基于无人机激光雷达点云的单木生物量估测[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(8):92-99.
- LIU H R, FAN W W, XU Y S, et al. Single tree biomass estimation based on UAV LiDAR point cloud [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021, 41(8):92-99.
- [18] 梅雪松, 董灵波, 陈冠谋. 基于结构方程模型的兴安落叶松天然林碳汇量驱动因素[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(9):1-10.
- MEI X S, DONG L B, CHEN G M. Driving factors of carbon sink in natural *Larix gmelinii* forests based on structural equation models [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(9):1-10.