doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.026

基于潜热效应的活立木冻融检测传感器设计与实验

(1.北京林业大学工学院,北京100083;2.北京工商大学计算机与信息工程学院,北京100048;

3. 城乡生态环境北京实验室,北京 100083; 4. 林业装备与自动化国家林业局重点实验室,北京 100083)

摘要:针对植物冻融过程中植物水分生理信息(植物水冰含量)难以实时、在线、连续监测及冻融难以准确判断的问题,设计了一种基于潜热效应的活立木冻融检测传感器。通过检测植物冻融过程中潜热释放引起的温度变化对茎干是否冻融进行有效判断,在准确检测冻融点的基础上,根据茎干体积含水率变化计算冻融过程中的茎干体积含冰量及径向冻融深度,同时设计环式弹片探头消除固定式探头对茎干压迫形成的凹槽。标定结果表明,传感器测量结果与真值拟合决定系数超过0.99。静动态特性分析表明,传感器体积含水率和温度测量范围分别为0~ 68.67%、-30~80℃,动态响应时间小于2s。室内冻融模拟实验及室外长期冻融监测表明,传感器能够有效检测植物冻融过程中茎干水分生理参数的变化,可以作为植物冻融的有效监测手段。

Design of Freeze-thaw Detection Sensor for Standing Forest Stock Based on Latent Heat

TIAN Hao¹ GAO Chao² ZHAO Yue^{1,3} ZHENG Yan^{1,4} ZHAO Yandong^{1,4}

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. School of Computer and Information Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China

3. Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, Beijing 100083, China

4. State Forestry Administration Key Laboratory of Forestry Equipment and Automation, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming to solve the problem that plant water physiological information (plant water and ice content) during freeze-thaw process is difficult to be monitored on-line and continuously in real time and judged accurately by freeze-thaw process. A monitoring sensor for freeze-thaw of living standing trees was designed based on latent heat effect, which detected the temperature caused by latent heat release during plant freeze-thaw process. Based on the accurate detection of freeze-thaw point, the ice content and radial freeze-thaw depth of stem volume during freeze-thaw process were calculated according to the change of moisture content of stem volume. At the same time, a circular projectile probe was designed to eliminate the pressure of fixed probe on stem to form a groove. Calibration results showed that the determination coefficient of fitting between the measured results and the true values of the sensor was more than 0.99. Static and dynamic characteristics showed that the measurement range of moisture and temperature of the sensor was from 0 to 68.67% and -30° C to 80° C, respectively, and the dynamic response time was less than 2 s. The results of indoor freeze-thaw simulation experiment and outdoor long-term freeze-thaw monitoring showed that the sensor can effectively detect the changes of water physiological information during plant freeze-thaw process. It provided a device with independent intellectual property rights, realtime continuous monitoring, low cost and easy installation for agricultural and forestry production and plant freeze-thaw assessment.

Key words: latent heat effect; static and dynamic characteristics; standing forest stock freeze-thaw detection; stem volume moisture content; stem volume ice content; radial freeze-thaw depth

收稿日期:2019-07-22 修回日期:2019-09-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0600901)、内蒙古自治区科技计划项目(201802085)和中央高校基本科研业务费专项资金项 目(2019YC15)

作者简介:田昊(1992—),男,博士生,主要从事生态信息智能检测与控制研究, E-mail: thc1015@ bjfu.edu.cn

通信作者:赵燕东(1965一),女,教授,博士生导师,主要从事生态信息智能检测与控制研究,E-mail: yandongzh@ bjfu. edu. cn

0 引言

植物冻融特性对于植物的存活及生长具有重要 作用,是评价植物抗冻能力及进行植物洗育的重要 依据^[1-3]。植物冻融时会引起植物组织结冰,产生 栓塞,进而导致木质部导管内气体和水分含量的变 化及细胞间气体水分含量的变化。同时,冻融过程 中存在热能交换,在结冰及融化时伴随有放热及吸 热现象^[4]。国内外学者对冻融发生的机理已经开 展了广泛的研究,相关研究表明,冻融过程中冰晶产 生的位置决定细胞是否死亡^[5],细胞内冰晶会导致 细胞死亡^[6-9], 而细胞外冰晶可以暂时保护细 胞^[5,10]。因此,在植物冻融过程中检测植物体内冰 晶的形成及变化具有重要意义。早期研究中,主要 通过采集植物样本、在实验室进行解剖、观察植物组 织的内部结构变化、分析植物组织的生化指标来判 断植物的冻融情况,这种方法存在滞后性,难以实时 检测[11-13]。随着科学技术的发展,红外光谱法、核 磁共振成像法、阻抗图谱法等被用于植物冻融检 测^[14-16],这些方法具有测量快速、图像精度高、便于 直观分析的优点,但是对于农林业生产实际来说,难 以实现实时检测,并且设备价格昂贵。安装简便、价 格低廉、可以实时在线检测的植物冻融检测装置成 为一种迫切的需求。KLEPPER 等^[17] 研究了一种 LVDT 传感器,通过无损检测茎干直径的变化实时 监测植物的冻融情况,LVDT 传感器在植物冻融研 究中得到了广泛使用^[18-21]。SEVANTO 等在 2012 年研究了一种 Ultrasonic Emissions 传感器,用于监 测植物冻融过程中的空化。文献[22-25]基于介 电原理,在植物冻融监测上开展了相关传感器的研 究,通过检测植物茎干的水分变化分析茎干体积含 冰量变化,实现对植物冻融变化的分析。但是,植物 冻融变化时,不仅冰水含量的变化影响植物体内水 分的占比,植物自身生命活动也会影响植物体内水 分含量,基于植物水分研究植物含冰量及冻融变化 存在一定误差。因此,本文基于冻融过程中的潜热 效应^[26],设计一款活立木冻融检测传感器,以实现 同步实时监测植物冻融过程中体积含水率及热量变 化,基于潜热效应判断植物冻融过程中的吸热点和 放热点,并在此基础上,结合植物体积含水率变化计 算植物体积含冰量及冻融深度,对植物冻融情况进 行分析。

1 传感器设计

1.1 传感器测量原理

潜热是物质从一个相变化到另一个相吸收或放

出的热量,这是物质在固、液、气三相之间以及不同 的固相之间相互转变时具有的特点之一。植物在冻 融过程中体内水分存在液态水与固态冰之间的相互 转化,因此必然伴随潜热效应的发生,基于潜热效应 进行温度监测,判断植物冻融期间的热量交换及冻 融点,同时基于驻波参量同步测量活立木茎干体积 含水率变化,进而实现植物冻融的准确判断,并根据 植物体内体积含水率计算植物冻融期间植物体内体 积含冰量的变化,避免植物自身生命活动引起体积 含水率变化而造成的计算误差,测量原理如图1所 示。



Fig. 1 Sensor measurement schematic

当植物茎干发生冻融时,茎干内的水分发生固 液转换,潜热效应引起茎干温度的变化,进而导致插 入茎干内部的铂电阻温度的变化,铂电阻的内阻会 随温度线性变化,恒流源向铂电阻的两端提供稳定 幅值的电流,通过电压放大器观察铂电阻两端的电 压,即可等效得到铂电阻的内阻,进而计算得到铂电 阻的温度,铂电阻测温等效电路如图2所示。其中 U1、U2 为放大器。



measurement circuit

根据运算放大器的"虚短"原理可知
$$V_x = A_1(V_{in} - V_1) = A_1(V_{in} - I_x R_{in})$$
 (1)

ī

式中
$$V_x \, V_{in} \, V_1$$
 — 电路各点电压
 R_{in} — 输入电阻
 I_x — 流过铂电阻的电流
 A_1 — U1的开环放大倍数
当 $A_1 = + \infty$ 时,式(1)可化简为
 $I_x = V_{in}/R_{in}$ (2)
运放 U2 输出的电压为

$$V_{out} = A_2 \kappa_x I_x$$
 (3)
式中 V_{out} ——运放 U2 输出的电压
 R_z ——铂电阻的电阻

$$T = KR_x + B \tag{4}$$

式中 T——铂电阻温度

K、B——温度与电阻的关系系数

通过式(2)~(4)可得

$$T = K \frac{R_{\rm in} V_{\rm out}}{A_2 V_{\rm in}} + B \tag{5}$$

当电路及温度测量范围确定时,式中*K*、*B*、*R*_{in}、 *A*₂ 和 *V*_{in}为固定值,因此铂电阻温度 *T* 与电压 *V*_{out}呈 线性关系,因此式(5)化简得

$$T = K' V_{\text{out}} + B' \tag{6}$$

其中 $K' = KR_{in}/(A_2V_{in}), B' = B$,经过标定后即可得 到 $K' 与 B', 通过测量运放 U2 输出的电压 <math>V_{out}$ 并将其 代入式(6)即可计算得茎干温度。

基于潜热效应,通过检测植物茎干温度变化可 以得到植物茎干发生冻融的时刻,进而实现植物冻 融的准确判断,由于水和冰的介电常数分别为81和 3(25℃),当茎干发生冻融时,茎干内冰水比例随之 变化,通过检测发生冻融时茎干体积含水率及冻融 过程中茎干体积含水率的变化可以计算得到茎干中 冰的含量。茎干体积含水率检测如图1所示,当高 频信号源产生的电磁波(100 MHz 正弦波)沿着同轴 传输线传输至环形探头处时,由于茎干中水冰含量 的变化会使得茎干介电常数发生变化,进而使得探 头处阻抗与传输线阻抗不匹配,电磁波在探头处发 生反射,反射波和入射波叠加在一起形成的驻波的 电压幅值与探头处阻抗密切相关,而探头处阻抗与 茎干介电常数相关^[27],因此通过测量同轴传输线的 驻波可以得到茎干的体积含水率^[22]。茎干体积含 水率测量等效电路示意图如图 3 所示。

同轴传输线两端的电压为

$$U = 2A(Z_p - Z)/(Z_p + Z)$$
 (7)
式中 U——同轴传输线两端的电压
A——同轴传输线两端站电压幅值



Z----传输线阻抗

传输线阻抗 Z 为 50 Ω,电压幅值 A 和传输线阻 抗 Z 为恒定值, U 只与 Z_p 相关, $\Box Z_p$ 与介电常数 相关,因此通过测量 U即可表征探针处茎干的介电 常数,进而得到茎干体积含水率。

1.2 传感器机械结构

1.2.1 探头设计

由于植物的生长,茎干也会逐渐变粗,现有的相 关研究中用于茎干体积含水率测量的环形探头安装 后,探头的直径便固定,在一段时间生长后探头会对 茎干产生压迫并在茎干上形成凹痕,最终会影响测 量结果。因此本文提出并设计了新型的环式弹片探 头(图 4a),探头为环形结构,使用 304 不锈钢弹片 (图4b)制作,钢片厚度为0.2 mm,环形探头可以自 动收缩,同时又具有一定的弹性,这样探头在紧密贴 合茎干的同时也可以随着茎干变粗而变化,避免对 茎干造成压迫。同时在环式弹片探头上设计并安装 了铂电阻用于温度同步测量,铂电阻为 PT100,直径 1 mm,长度可根据安装茎干的直径进行定制,复合 设计探头如图 4c 所示,探头整体由 3 个环式弹片探 头组成,上下两个负极,中间的为正极,负极复合有 铂电阻,正极为单独的环式弹片探头,探头整体如 图 4d 所示。



1.2.2 硬件电路设计

传感器硬件系统构成如图 5 所示,主要包括传 感器和采集器两部分。采集器部分包括供电单元、 分时供电单元、模数转换(Analog to digital converter, ADC)采集单元、时钟单元和数据通信单元;传感器 部分包括茎干体积含水率检测单元和茎干温度检测 单元。分时供电单元控制茎干体积含水率检测单元 和温度检测单元的供电,以避免同步检测时存在干 扰引起的测量误差,采集器通过 ADC 采集单元采集 茎干水分检测单元和茎干温度检测单元输出的模拟 信号并换算得到对应的茎干体积含水率及温度,并 基于茎干冻融时潜热效应引起的温度变化判断吸热 和放热点,结合茎干体积含水率计算得到茎干体积 含冰量,之后通过时钟单元和数据通信单元将数据 按设定的时间进行输出,数据通信单元包含 GPRS (General packet radio service)无线传输模块和 RS485 传输模块,因此数据既可以无线传输,也可以 通过有线方式读取,便于不同应用场景的使用。



Fig. 5 Structure schematic of hardware system

1.2.3 整体结构设计

传感器整体结构由测量探头、硬件电路和外壳 组成。探头的组成如1.2.1节中所述,两个探头环 之间间隔为10mm,通过探头环上的螺纹连接件实 现与硬件电路的连接。硬件电路由两层测量电路组 成,底层为传感器电路,顶层为采集器电路。外壳使 用 SolidWorks 软件设计并采用 3D 技术打印制作, 材料为光敏树脂,打印公差为 0.2%。传感器结构 组成及实物如图 6 所示。



2 传感器性能分析

2.1 传感器标定

2.1.1 茎干温度检测单元标定

式(6)中 K'和 B'可以通过理论计算得到,但是 电路温漂及焊接会对测量造成影响,因此需要对茎 干温度传感器进行标定,消除误差。标定中将传感 器放置在 GDJ - 1500B 型高低温交变试验箱内,设 置温度从 - 30~80℃逐渐增加,记录传感器输出电 压,同时将 DS18B20 型温度传感器固定在茎干温度 传感器探头处,记录 DS18B20 型温度传感器测量的 温度,使用最小二乘法拟合测量值,结果如图 7 所 示。由图 7 可看出,拟合决定系数为 0.999 6,高于 0.99,传感器输出电压与温度具有良好的线性关系, 满足使用要求。





2.1.2 茎干体积含水率检测单元标定

从活体植株上截取一段茎干,选取的植株为瓜 栗,用溢水法测量茎干的体积(106 cm³),然后将传 感器安装在茎干上并放入干燥箱中干燥(45℃),每 隔 6 h 取出一次称量并记录传感器的输出电压,直 至茎干完全干燥,通过干燥法计算得到对应的体 积含水率,对测量结果进行拟合,拟合结果如图 8 所示,拟合决定系数为 0.997 6,高于 0.99,说明茎 干体积含水率检测单元输出电压与茎干体积含水 率具有良好的相关性,可以用于表征茎干体积含 水率。



Fig. 8 Stem volume moisture content sensor calibration curve

2.2 静态特性分析

2.2.1 测量范围

从 2.1 节中可以看出,温度传感器测量范围为 -30~80℃,茎干体积含水率测量范围为0~ 68.67%。

2.2.2 分辨率

分辨率表示传感器能有效辨别的最小示值差, 数字仪表分辨率通常决定于 ADC 的位数精度。本 文设计的传感器 ADC 采样模块的位数为 12,分辨 率为 0.000 8 V,体积含水率从 0~68.67% 变化时茎 干体积含水率检测单元输出电压为 0.392~1.750 V, 可知茎干体积含水率检测单元输出电压每改变 1 V

2.2.3 稳定性

代表体积含水率变化 50.57 个百分点,茎干体积含 水率检测单元输出电压通过 ADC 采集后输出至单 片机,因此传感器体积含水率检测分辨率为 0.04%。同理对于茎干温度检测单元,温度 - 30 ~ 80℃变化时茎干温度检测单元输出电压从 1.969 V 增加至 2.905 V,可知茎干温度检测单元输出电压 每改变 1 V 温度变化 128.21℃,因此温度传感器的 检测分辨率为 0.10℃。





次传感器输出结果,共记录2050次,温度测量结果如图9b所示。

从图 9 可以看出,在 2 050 次测量中,传感器输 出体积含水率和温度波动很小,满足测量要求,为进 一步分析传感器输出稳定性,对 2 050 次测量结果 进行统计分析,结果如表 1 所示。可以看出,体积含 水率标准差小于 1%,误差波动小于 2%,稳定性满 足体积含水率测量要求;实验室用恒温箱控温精度 为±1.5℃,而温度测量结果标准差小于 1℃,误差 波动小于 1.5℃,温度波动与恒温箱一致,表明稳定 性满足温度测量要求。

2.3 动态特性分析

动态特性指传感器对随时间变化的输入量的响应特性,将传感器探头置于空气中,待传感器输出稳定后,在一个500 mL的烧杯中装满热水,将传感器探头迅速放入水中,将这一过程的温度与体积含水率视作输入信号,此时输入为一阶阶跃信号,通过测



表 1 稳定性分析 Tab. 1 Stability analysis

为了测试传感器的稳定性,将传感器探头分别

置于空气中(体积含水率默认为0)、水中(体积含水

率默认为100%)和安装在湿茎干上(用保鲜膜包裹

防止茎干水分流失),在室温下每2s记录一次传感

器输出结果,共记录2050次,茎干体积含水率测量

结果如图 9a 所示。同时将传感器空载放置在恒温

		·	·	
检测指标	测试环境	均值	误差范围	标准差
体积含水率/%	空气	1.34	(-1.43,1.43)	0.36
	水中	99.65	(-1.59,1.59)	0.55
	湿茎干	54.09	(-1.51,1.51)	0.80
温度/℃	- 30	- 29. 68	(-1.39,1.39)	0.69
	22	22.22	(-0.99,0.99)	0.48
	50	50.06	(-0.91,0.91)	0.21

量输出随输入的变化得到动态响应特性,用示波器 观测传感器输出信号变化,测量结果如图 10 所示。 可以看出,体积含水率的动态响应时间为 0.296 s, 温度的动态响应时间为 1.88 s,动态响应时间均小 于 2 s。

3 基于潜热效应的冻融检测

3.1 茎干冻融点

液态水和固态冰在转换过程中由于潜热效应会



图 10 传感器动态特性曲线 Fig. 10 Sensor dynamic characteristic curves

吸收或者放出热量,吸热及放热会影响茎干温度变 化速率,通过检测茎干温度及温度变化速率可以对 茎干冻融点进行判别。本文选取瓜栗(直径6 cm、 株高40 cm)为实验对象,在实验室环境下进行茎干 冻融模拟实验,将传感器安装在瓜栗的茎干上,植株

60

50

40

30

20

10

本积含水率/%

放入低温冰箱(DW-40W100型,海尔)中,设置温 度为-30℃,当茎干完全冻结后关闭冰箱电源并打 开冰箱,让植株自然融化,记录整个冻融过程中冰箱 环境温度、茎干温度及茎干体积含水率变化,结果如 图 11 所示。







从图 11 可以看出,在冻结过程中,随着冰箱中 环境温度不断下降,茎干温度也随之下降,当茎干温 度下降至A点时,茎干到达结冰点,茎干开始冻结, 水由液态转变为固态放出热量,导致茎干温度下降 速率明显变缓,同时茎干体积含水率开始下降,随着 水完全结冰,放热结束,茎干温度又开始快速下降。 而在融化过程中, 茎干温度随着冰箱环境温度的上 升而上升,当茎干温度上升至 B 点时,茎干中的水 开始融化,水由固态转变为液态吸收热量,导致茎干 温度上升速率明显变缓,同时茎干体积含水率开始 上升,随着茎干中冰融化完成,吸热停止,茎干温度 又开始快速上升。可以看出 A 和 B 分别为茎干冻 融过程中的冻结点和融化点,由于茎干温度传感器 测量探针只插入茎干直径的1/3处,因此在放热和 吸热结束时,茎干体积含水率依旧保持下降或上升 一段时间后稳定。为了准确判断冻融点,本文提出 用茎温变化率 T. 表征茎干温度的变化速率,即

$$T_{t} = \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{|T_{2} - T_{1}|}{|t_{2} - t_{1}|}$$
(8)

式中 ΔT-----茎干温度差

> - 茎干温度测量时间差 Δt —

T,、T1----茎干温度

 t_2 、 t_1 —— 茎干温度 T_2 、 T_1 对应的测量时间点

冻融过程中的茎干温度变化率如图 12 所示,在 茎干放热过程 $(A ext{ } ext{ } A')$ 和吸热过程 $(B ext{ } ext{ } B')$ 中茎 干温度变化率很小(小于 0.05℃/min)且茎干温度 在-5~0℃之间,因此可以通过检测茎干温度及茎 干温度变化率判断植物是否处于冻融过程,发生冻 融时的起始时间点即为茎干冻融点,图12中A点为 冻结点(10:22), B 点为融化点(21:02)。







3.2 茎干体积含冰量

当检测到冻融点时,表明茎干开始结冰或者融

化,根据结冰点的茎干体积含水率及冻融期间茎干 体积含水率可以计算得到冻融过程中体积含冰量的 变化。根据冻融过程中的茎干体积含水率的变化计 算得到茎干中冰的质量为

$$M_{ice} = (\theta_A - \theta_x) V_{si} \rho_w$$
(9)
式中 θ_A ——结冰点的茎干体积含水率

θ,——冻融过程中的茎干体积含水率

 ρ_w ——水的密度

进而可以计算得茎干体积含冰量为

$$\theta_{ice} = \frac{V_{ice}}{V_{st}} \times 100\% = \frac{M_{ice}}{\rho_{ice}V_{st}} \times 100\% = \frac{(\theta_A - \theta_x)\rho_w}{\rho_{ice}} \times 100\%$$
(10)

式中 V_{ice}——茎干中冰的体积

ρ_{ice}——冰的密度

3.3 茎干径向冻融深度

由于茎干温度传感器测量探针只插入茎干直径的 1/3 处,因此茎干温度有效探测范围为茎干直径的 1/3,从图 11 中可以看出在传感器检测到放热和 吸热完成时,茎干体积含水率依旧保持下降或上升并在一段时间后稳定,说明冻融过程结冰或融化是 沿着茎干的径向方向从外向内进行的,越靠近茎干 外部,结冰或融化越先发生,因此本文提出基于茎干 体积含冰量的茎干径向冻融深度检测,茎干径向冻 融模型如图 13 所示,可得

$$D = R - r \tag{11}$$

$$V_{st} = \pi R^2 H \tag{12}$$

$$V_{ice} = \frac{M_{ice}}{\rho_{ice}} = \frac{\pi (R^2 - r^2) H \theta_A \rho_w}{\rho_{ice}}$$
(13)

式中 D——冻融过程中冻结茎干或融化茎干的径 向深度

R——茎干半径

r——冻融过程中未冻结或未融化部分茎干 的半径

H——传感器测量的茎干长度

根据式(10)可得

进而有

$$r = R \sqrt{1 - \frac{\theta_{ice} \rho_{ice}}{\theta_A \rho_w}}$$
(15)

 $\theta_{ice} = \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \frac{\theta_A \rho_w}{\rho_{irr}}$

代入式(11)求得

$$D = R \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\theta_{ice} \rho_{ice}}{\theta_A \rho_w}} \right)$$
(16)



基于潜热效应通过检测茎干温度及茎干温度变 化率可以对茎干冻融过程中的冻结点及融化点进行 判断,进而在此基础上实现茎干体积含冰量及径向 冻融深度的计算。通过式(10)和式(16)可以得到 实验中瓜栗在冻融过程中的茎干体积含冰量及径向 冻融深度,结果如图 14 所示,可以看出茎干中含冰 量越高,茎干冻融深度越大。

3.4 野外实验

野外实验在黑龙江省哈尔滨市帽儿山东北林业 大学实验林场(127.58°E,45.27°N)进行,将传感器 安装在实验林场的香杨树上,如图 15 所示,香杨树 高 7.5 m,传感器安装高度为 3 m,安装处茎干直径 为 7 cm,每 10 min 采集 1 次数据,监测香杨树从秋 天到春天(2018 年 10 月 1 日—2019 年 4 月 20 日) 的茎干冻融情况,验证传感器在野外长期测量的稳 定性和可靠性,测量结果如图 16 所示。

从图 16 可以看出,从秋天到冬天的过程中,随



图 14 全十 你 融 仲 你 占 你 里 及 你 融 休 反 的 文 化 曲 线

Fig. 14 Changing curves of freeze-thaw ice content and freeze-thaw depth of stem

(14)





着环境的变化,植物生命活力下降,香杨树茎干体积 含水率逐渐下降,同时茎干温度越来越低,在入冬时 节茎干开始出现冻融,植物进入休眠状态,并随着深 冬的到来,茎干体积含冰量逐渐上升,茎干径向冻融 深度也不断增大;在由冬入春的阶段,茎干开始进入 萌芽期,温度升高,植物生命活力逐渐增强,茎干体 积含水率开始增大,植物茎干体积含冰量逐渐下降, 植物体内冰开始融化,到春末,植物的生命活力恢 复,茎干体积含水率恢复到较高水平。同时茎干体 积含冰量每天呈单波峰单波谷的周期变化。结果表 明本文设计的传感器可以有效检测植物冻融变化, 为植物冻融研究提供了一种新的监测手段。

4 结论

(1)设计了一种基于潜热效应的植物冻融检测 传感器,可以实现植物茎干冻融过程中茎干体积含 水率、茎干温度、茎干体积含冰量及径向冻融深度的 测量,为植物冻融监测及研究提供了一种有效的技 术手段。基于潜热效应检测植物冻融过程中因吸热 和放热引起的温度变化,进而实现植物冻融的有效 判断,同时复合茎干体积含水率测量,在对植物冻融 有效判断的基础上,根据得到的冻融点,结合茎干体 积含水率进行茎干体积含冰量及径向冻融深度的计 算。

(2)提出了基于茎干温度及茎干温度变化率的 冻融点的检测,通过判断茎干温度的变化范围及茎 干温度变化率可以有效识别植物冻融点,并有效消 除只根据茎干温度进行判断时由于温度波动异常造 成的误差。针对以往茎干体积含水率测量传感器探 针存在的缺点,设计了一种环式弹片探头,可以有效 避免固定式环形探头长时间安装在茎干上对植物产 生压迫而造成凹槽。

(3)标定结果表明,设计的传感器测量结果与 真值拟合决定系数高于 0.99,通过静态特性及动态 特性实验,表明传感器温度和体积含水率测量范围 分别为 - 30 ~ 80℃、0 ~ 68.67%,分辨率分别为 0.10℃、0.04%,传感器稳定性良好,温度测量动态 响应时间为 1.88 s,体积含水率测量响应时间为 0.296 s,动态响应时间均小于 2 s,表明传感器具有 良好的静动态特性,满足实际使用要求。

(4)通过监测室内瓜栗的冻融变化和室外香杨树从秋到春期间的冻融变化可知,传感器能够有效监测植物冻融过程中茎干体积含水率及温度变化,在冻结过程中茎干体积含冰量增加,径向冻结深度变大;在融化过程中,茎干体积含冰量减小,径向融化深度变大。野外实验表明,长期冻融过程中植物茎干体积含冰量具有单波峰、单波谷的周期变化。说明传感器能够有效监测植物冻融期间水分生理参数的变化,可以作为植物冻融研究的有效监测手段。

参考文献

- [1] STUSHNOFF C. Breeding and selection methods for cold hardiness in deciduous fruit crops [J]. Hortscience, 1972, 7(1): 10 13.
- [2] ASHWORTH E N, WISNIEWSKI M E. Response of fruit tree tissues to freezing temperatures [J]. Hortscience, 1991, 26(5): 501 504.
- [3] PALONEN P, BUSZARD D. Current state of cold hardiness research on fruit crops [J]. Canadian Journal of Plant Science, 1997, 77(3): 399 - 420.
- [4] AMÉGLIO T, COCHARD H, EWERS F W. Stem diameter variations and cold hardiness in walnut trees [J]. Journal of Experimental Botany, 2001, 52(364):2135-2142.

- [5] MAZUR P. Freezing injury in plants [J]. Annual Review of Plant Physiology, 1969, 20(1): 419-448.
- [6] RODRIGO J. Spring frosts in deciduous fruit trees-morphological damage and flower hardiness [J]. Scientia Horticulturae, 2000, 85(3): 155-173.
- [7] BURKE M J, GUSTA L V, QUAMME H A, et al. Freezing and injuring in plants [J]. Annual Review of Plant Physiology, 1976, 27(1): 507 - 528.
- [8] STEPONKUS P L. Role of the plasma membrane in freezing injury and cold acclimation [J]. Annual Review of Plant Physiology, 1984, 35(1): 543 584.
- [9] RODRIGO J. Spring frosts in deciduous fruit trees-morphological damage and flower hardiness [J]. Scientia Horticulturae, 2000, 85(3): 155 - 173.
- [10] GUY C L. Cold acclimation and freezing stress tolerance: role of protein metabolism [J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1990, 41(1): 187-223.
- [11] SPERRY J S, SULLIVAN J E M. Xylem embolism in response to freeze-thaw cycles and water stress in ring-porous, diffuseporous, and conifer species [J]. Plant Physiology, 1992, 100(2): 603-613.
- [12] YANG S C, TYREE M T. A theoretical model of hydraulic conductivity recovery from embolism with comparison to experimental data on Acer saccharum [J]. Plant, Cell and Environment, 1992, 15(6): 633-643.
- [13] HACKE U G, SPERRY J S. Functional and ecological xylem anatomy [J]. Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics, 2001, 4(2): 97-115.
- [14] LIU D, FAUST M, MILLARD M M, et al. States of water in summer-dormant apple buds determined by proton magnetic resonance imaging[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1993, 118(5):632-637.
- [15] GAMBLE G R. Non-invasive determination of freezing effects in blueberry fruit tissue by magnetic resonance imaging [J]. Journal of Food Science, 2010, 59(3):571-573.
- [16] SUNDBLAD L G, ANDERSSON M, GELADI P, et al. Fast, nondestructive measurement of frost hardiness in conifer seedlings by Vis + NIR spectroscopy [J]. Tree Physiology, 2001, 21(11):751-757.
- [17] KLEPPER B, BROWNING V D, TAYLOR H M. Stem diameter in relation to plant water status [J]. Plant Physiology, 1971, 48(6): 683-685.
- [18] MCBURNEY T, COSTIGAN P A. The relationship between stem diameter and water potentials in stems of young cabbage plants [J]. Journal of Experimental Botany, 1984, 35(12): 1787-1793.
- [19] GARNIER E, BERGER A. Testing water potential in peach trees as an indicator of water stress [J]. Journal of Horticultural Science, 1985, 60(1): 47-56.
- [20] WRONSKI E B, HOLMES J W, TURNER N C. Phase and amplitude relations between transpiration, water potential and stem shrinkage [J]. Plant, Cell and Environment, 1985, 8(8): 613-622.
- [21] COCHARD H, FORESTIER S, AMÉGLIO T. A new validation of the scholander pressure chamber technique based on stem diameter variations [J]. Journal of Experimental Botany, 2001, 52(359): 1361-1365.
- [22] 赵燕东,高超,张新,等.基于驻波率原理的植物茎体水分无损检测方法研究[J/OL].农业机械学报,2016,47(1):310-316.
 - ZHAO Yandong, GAO Chao, ZHANG Xin, et al. Non-destructive measurement of plant stem water content based on standing wave ratio[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1):310 316. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160142&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn. 1000-1298.2016.01.042. (in Chinese)
- [23] GAO Chao, ZHAO Yue, ZHAO Yandong. A novel sensor for noninvasive detection of in situ stem water content based on standing wave ratio [J]. Journal of Sensors, 2019, 10: 1-10.
- [24] SUN Y, ZHOU H, SHAN G, et al. Diurnal and seasonal transitions of water and ice content in apple stems: field tracking the radial location of the freezing-and thawing-fronts using a noninvasive smart sensor [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 274(4): 75-84.
- [25] ZHOU H, SUN Y, SHAN G, et al. In situ measurement of stem water content and diurnal storage of an apricot tree with a high frequency inner fringing dielectric sensor [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 250(1):35-46.
- [26] 刘中良,马重芳,孙旋.相变潜热随温度变化对固-液相变过程的影响[J].太阳能学报,2003,24(1):53-57.
- LIU Zhongliang, MA Chongfang, SUN Xuan. The influences of latent heat variation with temperature on solid-liquid phase change processes [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2003, 24(1):53 57. (in Chinese)
- [27] 赵燕东,王一鸣.基于驻波率原理的土壤含水率测量方法[J].农业机械学报,2002,33(4):109-111,121.
 ZHAO Yandong, WANG Yiming. Study on the measurement of soil water content based on the principle of standing-wave ratio
 [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2002,33(4):109-111,121. (in Chinese)