

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.027

# 基于热扩散探针的便携式植物液流监测仪研究

张菊<sup>1</sup> 江朝晖<sup>1</sup> 李博<sup>1</sup> 吴文辉<sup>1</sup> 高健<sup>2</sup>

(1. 安徽农业大学信息与计算机学院, 合肥 230036; 2. 国际竹藤中心, 北京 100102)

**摘要:** 液流是植物重要的生理指标,在蒸腾耗水规律研究及相关应用中需要对液流进行长期、精准的在线监测。针对国外商用液流仪价格偏高,模块化液流仪在体积、性能、野外供电及通信等方面存在诸多不足的问题,运用集成化设计理念,设计了一款基于热扩散原理的便携式植物液流监测仪。采用嵌入式微处理器 STM32 作为主控芯片,以 AD620 和 OP07 组成的低噪声精密放大电路为核心,设计了探针恒流加热、SD 卡存储及 GPRS 通信、太阳能供电和电量监测报警等电路,运用迭代算法获得当天测量电压最大值,即时计算出植物液流密度。现场测试和对比试验表明,该仪器性能稳定,显示、存储、读取、传输和报警等功能正常,测得的液流密度数据准确,与对比仪器 Delta-T 数据采集仪测得结果具有良好的一致性。双探针监测时,在没有光照的情况下可连续工作 7 d,在有光照天气情况下可实现长期连续工作。该液流仪性价比高、使用方便、通道易于扩展,可替代进口产品,在植物水分传输及利用研究、森林生态系统对环境变化的影响监测以及城市绿地水分管理等领域具有良好的应用前景。

**关键词:** 植物液流; 热扩散边材液流探针; 微弱信号检测; 迭代运算

中图分类号: TP216+.1; S237 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)07-0237-07 OSID:



## Design and Experiment of Portable Plant Sap Flow Meter Based on TDP

ZHANG Ju<sup>1</sup> JIANG Zhaohui<sup>1</sup> LI Bo<sup>1</sup> WU Wenhui<sup>1</sup> GAO Jian<sup>2</sup>

(1. College of Information and Computer Science, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

2. International Center for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China)

**Abstract:** Sap flow is an important physiological index of plants. So it is necessary to conduct long-term, accurate and online monitoring of sap flow in the study of water consumption law of transpiration and related applications. In view of the high price of foreign commercial sap flow meter, the modular sap flow meter has many problems in terms of volume, performance, sap power supply and communication, and a portable plant sap flow monitor based on the principle of thermal dissipation was developed by using the integrated design concept. The embedded microprocessor STM32 was taken as the main control module, the AD620 and OP07 composed of low noise precision amplification circuit was taken as the core, and the probe constant current heating, SD card storage and GPRS communication, solar power supply circuit and power monitoring alarm were designed. The maximum measured voltage of the day was obtained by iterative algorithm, and the plant sap flow density was calculated immediately. On-site test and comparative test showed that the instrument had displaying, storing, reading, transmitting and alarming functions normally, the measured sap flow density data was accurate, the performance was stable, and the results obtained by the comparison instrument Delta-T data collector had good consistency. In the dual-channel monitoring, the working time was about 7 days in continuous rainy weather, and it can work for long periods of time under normal weather conditions. The sap flow meter had the advantages of cost-effective, easy to use, easy channel expansion, and can replace imported products. It had good application prospects in the field of plant water transmission and utilization research, the monitoring of the impact of forest ecosystems on environmental changes, and the water management of urban green space.

**Key words:** plant sap flow; TDP; weak signal detection; iterative operation

收稿日期: 2020-01-15 修回日期: 2020-05-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0600101)、安徽省科技攻关项目(1804a07020108、201904a06020056)和安徽农业大学研究生创新基金项目(2020ysj-46)

作者简介: 张菊(1995—),女,博士生,主要从事电子系统设计研究,E-mail: zhangju@ahau.edu.cn

通信作者: 江朝晖(1968—),男,教授,博士,主要从事农业信息检测与处理研究,E-mail: jiangzh@ahau.edu.cn

## 0 引言

植物液流(Sap flow)是指植物体内由于叶片的蒸腾作用引起的植物体失水,从而导致水分通过植物木质部从根部运输到叶片的过程<sup>[1]</sup>。它是土壤-植物-大气连续体水流路径中一个关键的链接,承接了庞大的地下根系所吸收、汇集的土壤水,决定了整个树冠的蒸腾量,可反映植物体内的水分传输状况和植物对水分的利用特征及其对环境的响应<sup>[2]</sup>,同时也是验证、修正蒸腾模型、根系吸水模型的重要参数<sup>[3]</sup>。因此,植物液流量成为分析树木耗水特性、研究树木水分传输机理的关键指标之一<sup>[4]</sup>。现有的检测方法主要有热脉冲法、热平衡法、热扩散法和激光热脉冲法<sup>[5]</sup>。其中,热脉冲式液流计价格过于昂贵,且对液流的响应滞后;热平衡法的测量系统对液流瞬时变化的响应不同步,其测量精度有待提高;激光热脉冲法尚处于研究测试阶段<sup>[6]</sup>。而 Granier 探针在热脉冲法的基础上改造的热扩散法成本低、能耗低、易用、安装简单,具有长期测量潜力<sup>[7-9]</sup>,更适于开展大量的野外监测,可以不破坏植物自然生长条件和正常生长状况,连续测定植物液流。

目前,用于检测植物液流的仪器和方法分为商业化仪器和探针+恒流加热+数采仪组合的模块化仪器,一般需要市电供应,而野外供电较为困难;仪器尚未配备无线通信模块,用户无法实时了解仪器的工作状况;仪器体积大、成本高,不利于规模化使用;同时,仪器只能获得存储探针间的测量电压,需要先导出数据再转换成液流量。

本文设计一款便携式热扩散边材液流探针(Thermal dissipation sap flow velocity probe, TDP)植物液流仪。设计低噪声、高增益的精密放大电路,以提高采集性能,减小体积并降低价格;采用 SD 卡存储数据,并通过 USB 读取和远程无线发送数据,以解决偏远密林通信困难与及时获取监测数据的矛盾;采用太阳能电池板+蓄电池供电模式,以适应野外监测。

## 1 系统设计

热扩散法液流检测的基本原理是将一对 TDP 探针(热电偶)上下排列插入待测植物的边材,其中下探针为参考端,上探针通过加热产生恒定热量,由于植物蒸腾作用随着昼夜、天气等变化,导致液流带走上探针的热量发生改变,因此与下探针的电压差随之变化,通过测量探针间电压差即可估算液流量<sup>[10]</sup>。

树干液流密度  $J_{si}$  计算公式<sup>[11-12]</sup>为

$$J_{si} = a(V_{\max}/V_i - 1)^b \quad (1)$$

式中  $V_{\max}$ ——液流为 0 时的最大电压差

$V_i$ —— $i$  时刻测定的电压差

$a$ 、 $b$ ——方程参数,与植物种类相关

根据上述原理,设计的便携式 TDP 液流仪由 5 部分组成,如图 1 所示,分别为 TDP 探针、恒流源加热模块、信号放大模块、数据采集显示存储发送模块、供电模块。

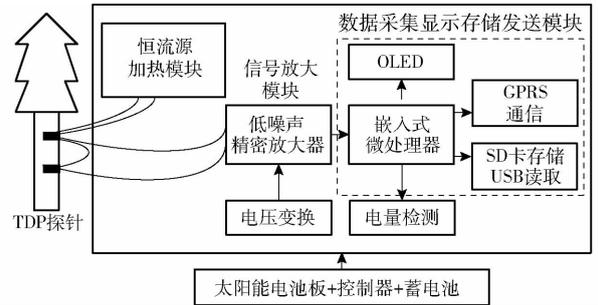


图 1 便携式 TDP 液流仪结构框图

Fig. 1 Structure diagram of portable TDP sap flow meter

经恒流源加热的 TDP 探针输出微弱电压信号,经过精密放大后传给主控微处理器,通过迭代运算和公式运算得出液流密度,然后将数据进行显示、SD 卡存储并通过 USB 读取、GPRS 远程发送到数据库,同时在监测到电源电压小于预设工作电压时,向手机端发送警报信息。

### 1.1 TDP 探针

完整的 Granier 探针系统包括 2 个传感器探针(含针头)、加热电阻丝和 T 型热电偶(铜镍合金)。针头为圆柱形中空,直径 2 mm,不同直径的树干或茎需采用不同长度的探针,常见的探针长度有 20、30、50 mm 等。本文主要针对树干或茎直径较小的植物,如毛竹、细树等,因此采用自制的长 10 mm TDP 探针进行试验,外层紧密缠绕加热电阻丝,然后再套上铝管。热电偶将温度信号转换成热电动势信号,再通过电气仪表(二次仪表)将电动势转换成被测介质的温度。热电偶紧贴于针头内壁中间位置,与内壁绝缘,端头连接测量两个探针温度差异的信号线。上、下探针的热电偶末端连接,持续给上探针提供 120 mA 的电流。下探针作为对照探针不加热,用于测量树干的温度<sup>[13-16]</sup>。

### 1.2 恒流源加热模块

为了实现上探针的持续、稳定加热,采用 LM317 稳压芯片对加热模块进行稳压处理,形成恒流源电路。恒流源是一种常用的能够向负载提供恒定电流的电路模块,被广泛应用于各种测量与控制系统中。LM317 是应用最为广泛的电源集成电路之一,不仅具有固定式三端稳压电路的最简单形式,又具备输

出电压可调的特点,还具有调压范围宽、稳压性能好、噪声低、纹波抑制比高等优点。

以双探针为例,恒流源加热电路如图 2 所示。上探针加热电阻为  $10\ \Omega$ ,加热电流为  $120\ \text{mA}$ <sup>[15]</sup>,则两根探针串联的端电压为  $2.4\ \text{V}$ ,根据公式

$$V_{\text{out}} = 1.25(1 + R_2/R_1) \quad (2)$$

式中  $V_{\text{out}}$ ——输出电压  $R_1$ ——可变电阻

$R_2$ ——稳压器 LM317 第 1、2 脚间的电阻

可知,通过调节电位器 R2 即可获得需要的稳定电压和恒定电流。

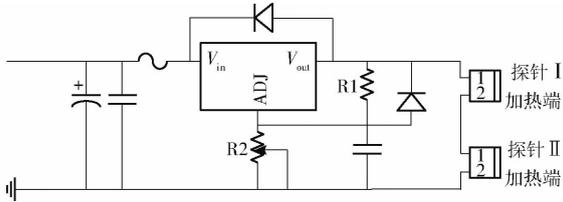


图 2 恒流源加热电路

Fig. 2 Constant current source heating circuit

### 1.3 信号放大模块

TDP 输出的信号为  $0.1\ \text{mV}$  级电压差,幅值较低且易受干扰,而主控模块的 AD 采集通道精度为 12 位,范围为  $0 \sim 3.3\ \text{V}$ ,为了达到采集范围,同时更好地提高系统的抗干扰能力,采用 3 级信号放大电路,如图 3 所示。第 1 级采用低成本、高共模抑制比的单片仪表放大器 AD620 差分放大,第 2、3 级采用低噪声、低输入偏置电流的双极性运放 OP07 反相放大,组成低噪声、高增益的精密放大电路<sup>[17]</sup>。其中,AD620 和 OP07 的增益分别为

$$G = 49.4/R_c + 1 \quad (3)$$

$$A = -R_f/R_i \quad (4)$$

式中  $G$ ——AD620 的增益

$R_c$ ——AD620 的外接电阻

$A$ ——反相放大电路的增益

$R_f$ ——反相放大电路的反馈电阻

$R_i$ ——反相放大电路的输入电阻

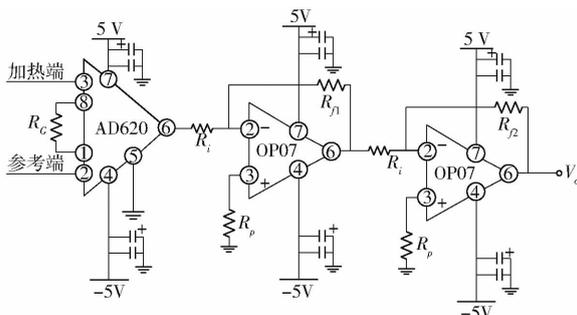


图 3 信号放大电路

Fig. 3 Signal amplification circuit

3 级放大电路的总增益为 3 000 倍,AD620 的增益设为 20,即  $R_c = 2.6\ \text{k}\Omega$ ,第 2 级反相放大增益为

15,第 3 级反相放大增益为 10,即  $R_{f1} = 15\ \text{k}\Omega, R_{f2} = 10\ \text{k}\Omega, R_i = 1\ \text{k}\Omega$ 。

### 1.4 数据采集显示存储发送模块

主控芯片采集数据后对数据进行运算、显示、存储、发送等处理。采用 STM32 作为主控芯片,STM32 是基于 Cortex - M3 的 32 位处理器,主频可达到  $72\ \text{MHz}$ ,内置  $512\ \text{KB}$  的 FLASH 和  $64\ \text{KB}$  的 SRAM,内嵌 3 个 12 位的 AD 转换器,可进行多路模拟信号采集,具有功耗低、价格低、性能高、资源丰富的特点。为了使主控芯片断电后继续计算实时时间,采用实时时钟电路。

采用低功耗 OLED 显示屏。SD 卡采用 SDIO 接口和 FATFS 文件系统,并用 GL827 读卡芯片实现 USB 下载功能。数据远程传输及电量不足报警采用 GPRS 模式。

### 1.5 供电模块

通过太阳能控制器得到  $5\ \text{V}$  和  $12\ \text{V}$  两路电源。各模块供电部分包括: $5\ \text{V}$  电源给 GPRS 模块供电,给正、负电源转换部分供电,通过 AMS1117 - 3.3 模块降压至  $3.3\ \text{V}$  给主控芯片、OLED、SD 卡供电; $12\ \text{V}$  电源通过 DC/DC 变换芯片 XL6009 稳压至  $12\ \text{V}$  给恒流源加热模块供电。其中正、负电源转换部分中输入的  $5\ \text{V}$  电源通过 DC/DC 变换芯片 XL6007 转换为  $9\ \text{V}$  电源,再通过三端集成稳压器 LM7805、LM7905 为信号放大电路提供  $\pm 5\ \text{V}$  电源。电量监测部分主要由分压电路实现,如果电压低于事先设置的阈值则及时通过 AT 指令发送短信给用户,以便及时处理,包括更换电池、人工充电等。

## 2 软件设计

### 2.1 液流计算方法

为减少误差,提高数据准确性,将式(1)中的  $V_i$  由当前值改为  $T$  时间内的平均值,通过不断比较迭代求得每天的测量电压最大值。以单探针为例,液流密度计算方法如图 4 所示。主要步骤如下:

(1)初始化,设置电压最大值  $V_{\text{max}} = 0$ ,设置时间段  $T$ ,求取  $T$  时间内的电压平均值,创建三维数组。

(2)判断日期是否发生改变,若没有发生变化,求取  $T$  时间内的平均值  $V_i$ ,将平均值  $V_i$  与当前最大值  $V_{\text{max}}$  进行比较,如果  $V_i > V_{\text{max}}$ ,将  $V_i$  作为当前最大值  $V_{\text{max}}$  并保存,否则不改变当前最大值  $V_{\text{max}}$ ;同时将该实时时间、 $V_i$  存入三维数组。

(3)若日期发生变化,根据式(1)计算液流密度,将获得的平均值  $V_i$  和液流密度  $J_{si}$  存储到 SD 卡中,并通过 GPRS 发送到数据库,将最大值  $V_{\text{max}}$  置零,数组清零。

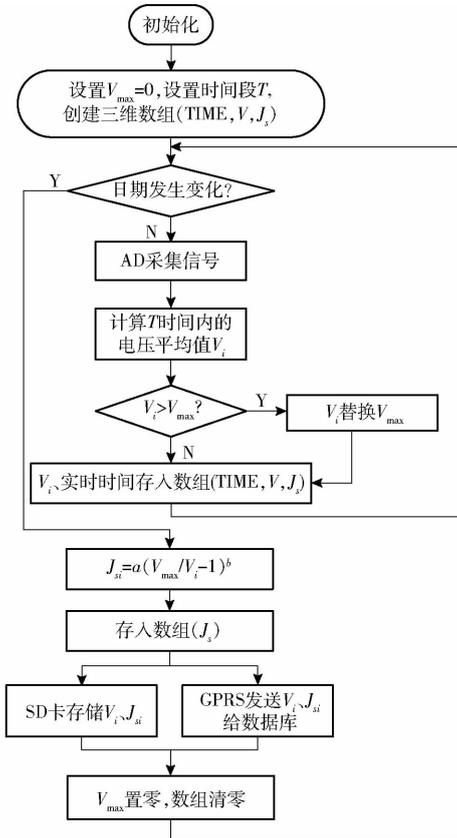


图 4 液流量计算流程图

Fig. 4 Flow chart of sap flow calculation

2.2 通信软件

GPRS 传输设计中使用安信可 A9 模块作为 socket 客户端, 远程服务器作为 socket 服务器端, 采用 JAVA 语言编写网络服务, 建立数据库并与远程服务器连接。

主控模块与 GPRS 模块间通过串口发送 AT 指令, 使 GPRS 模块完成初始化、查询网络、设置网络信息、建立连接和发送数据; 本系统选用 TDP 面向连接协议进行网络通信, 服务器 IP 为自申请的 IP 地址, 端口号设定为 8888。当数据发送完成后, 通过指令查询服务端确定信息接收完成, 并等待下一次数据发送。最后远程服务器完成数据接收, 数据库连接, 使用 SQL 语言按照数据属性填充数据库表格<sup>[18]</sup>。

GPRS 模块在电源电压低于阈值时发送短信给手机端报警, 通信流程如图 5 所示。

3 试验结果与分析

3.1 性能测试

本文设计的液流仪实物如图 6 所示。终端部分的尺寸为 95 mm × 90 mm × 40 mm, 质量约 280 g, 便于携带和使用。采用低频信号发生器模拟输入, 在 0 ~ 50 Hz 频率范围内, 检测误差小于实际值的

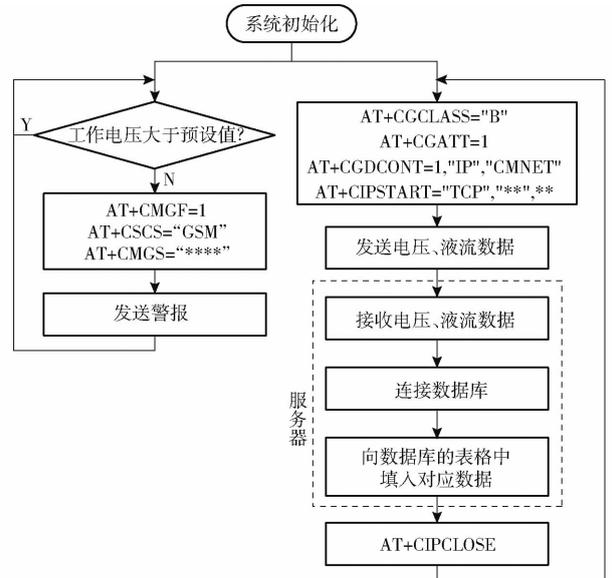


图 5 通信流程图

Fig. 5 Flow chart of communication

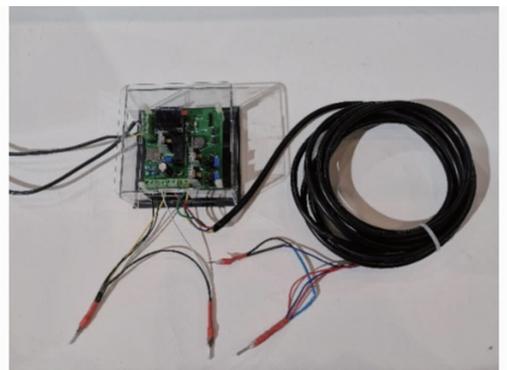


图 6 液流仪实物图

Fig. 6 Physical photograph of sap flow meter

0.1%, 模拟电压分辨率小于 30 μV, 测量线性度和稳定性良好。显示、存储、读取、传输和报警等功能正常、性能稳定。对功耗进行定量测试, 以双探针监测为例, 平均功耗小于 2 W, 采用 12 V 20 A·h 的铅酸蓄电池, 在没有光照的情况下可连续工作 7 d, 在有光照的情况下可实现长期连续工作。

3.2 液流监测

分别在安徽省泾县的毛竹林和安徽农业大学校内的小海棠树上进行实际液流监测和对比试验。

在毛竹上安装 TDP 探针<sup>[19]</sup>, 探针安装示意图如图 7 所示。具体步骤如下:



图 7 探针安装示意图

Fig. 7 Sketches of probe installation

(1) 在毛竹壁厚较大(壁厚大于 10 mm)的立竹基部(地上约 20 cm 处)的垂直竹壁上钻 2 个直径 2.5 mm 的孔,沿毛竹茎秆方向 2 孔间距 10 cm。

(2) TDP 探针外面涂抹 1 层导热硅胶,上探针(3 根外接线)安装于上方孔,下探针(1 根外接线)安装于下方孔。注意上探针安装过程要轻柔,以旋转式插入孔中,下探针可以直接插入。

(3) 上探针的加热线连接恒流源(120 mA)加热模块。

(4) 上、下探针的 2 根数据线接入终端,上探针接信号放大模块正极,下探针接信号放大模块负极。

(5) TDP 探针安装好后需要用硬塑料板包裹加以保护,再外包防辐射膜和遮雨膜以避免外界环境(温度、光照、降雨等)对探针温差信号的影响。

2019 年 12 月在泾县毛竹林试验基地选取 2 根毛竹进行试验,每根毛竹安装上、下 2 组探针,上方使用本文设计的植物液流仪进行监测,下方使用 Delta-T 型数据采集仪(DL2e,英国)进行监测。每 30 s 采集一次电压,每 10 min 对 20 个数据求平均值作为当前电压。式(1)中参数  $a$ 、 $b$  按照文献[17-19]选取,即  $a = 306.5$ ,  $b = 1.746$ 。图 8 为部分试验结果,包括本文设计仪器和对照仪器在 2 根毛竹上获得的电压差及液流密度。

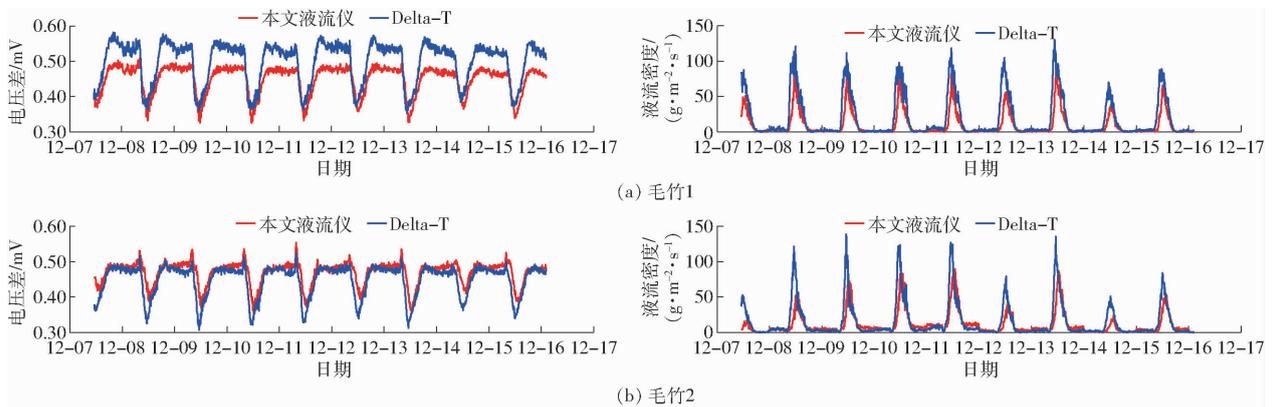


图 8 毛竹液流监测试验数据

Fig. 8 Test data of moso bamboo sap flow monitoring

电压差及液流密度通过 GPRS 传送到后台数据库,数据库片段如图 9 所示。

TIME	V1	J1	V2	J2
2019/12/9 14:52	0.414044	17.25541914	0.4315942	24.40681788
2019/12/9 16:22	0.4385766	8.25529619	0.4667212	10.17359373
2019/12/9 16:32	0.4404565	7.718895001	0.4652576	10.62323967
2019/12/9 15:02	0.4035704	22.36925007	0.4276868	26.4879245
2019/12/9 15:12	0.4098144	19.22027193	0.4413025	19.70178005
2019/12/9 15:22	0.4159376	16.41814399	0.4427258	19.06518935
2019/12/9 15:32	0.4233229	13.39131543	0.4423094	19.25006924
2019/12/9 15:42	0.4215101	14.09989046	0.4502454	15.9149494
2019/12/9 15:52	0.4299963	10.96729409	0.4428468	19.01167589
2019/12/9 16:02	0.4225439	13.69312142	0.4643445	10.90948767
2019/12/9 16:12	0.4356897	9.118801287	0.4616053	11.7949788

图 9 数据库片段

Fig. 9 Part of database

2019 年 6—7 月,在安徽农业大学校园内选择树干较细的海棠树进行单探针监测试验(图 10)。在液流密度计算时,式(1)中参数  $a$ 、 $b$  按照文献[20]选取,即  $a = 119$ ,  $b = 1.23$ 。其他处理与毛竹监测相同,不再赘述。部分试验结果如图 11 所示。

### 3.3 结果分析

LAGERGREN 等<sup>[21]</sup>总结了树干液流量和蒸腾关系的研究成果,指出在正常情况下一天的蒸腾量与液流量几乎相等,因而在日时间尺度上,可以用



图 10 海棠树液流监测试验

Fig. 10 Test of crabapple tree sap flow monitoring

树干液流量表示蒸腾量。

如图 8、11 所示,植物蒸腾耗水的过程表现出周期性的变化特征。电压差曲线呈现白天低、夜晚高,而液流量正好相反,这是由于光照强度越强,气孔就张开或扩大,蒸腾作用就越强。白天光照充足,蒸腾作用越强,带走上探针的热量越多,与参考端的电压差越小;晚上没有光照,植物气孔闭合或是缩小,植物的蒸腾作用变弱,带走上探针的热量变少,与参考端的电压差趋于最大值。因此本试验结果符合文献[22-23]的研究结论:一天

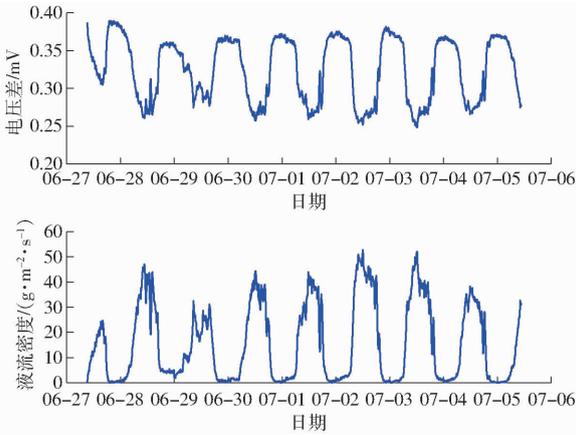


图 11 海棠树液流监测试验数据

Fig. 11 Test data of crabapple tree sap flow monitoring

中各种树木的液流变化曲线呈单峰型、双峰型或多峰型,即早晨和傍晚低,中午前后达高峰,夜间蒸腾停止,液流速率急剧降低,但并不为0。

图8同时给出了本文设计仪器与标准设备的监测结果,经过对比可以看出,毛竹电压差在0.30~0.60 mV之间,液流密度在0~150 g/(m<sup>2</sup>·s)之间,两者变化趋势相同,同样呈现白天高、夜晚低的变化规律。由于探针安装位置不同,本文设计仪器和对照设备的监测结果不可能完全相同。为了定量比较,采用相关系数进行评价。

对于毛竹1,本文设计仪器和对照设备所得电压差的相关系数 $C_{v1}=0.9279$ ,液流密度的相关系

数 $C_{j1}=0.8935$ ;对于毛竹2,两者电压差的相关系数 $C_{v2}=0.8636$ ,液流密度的相关系数 $C_{j2}=0.7882$ 。结果表明本文设计仪器的监测结果可信度较高。

由图11可以看出,小海棠树的电压差为0.25~0.40 mV,液流密度为0~55 g/(m<sup>2</sup>·s),都呈现明显的周期规律,与文献[22]研究相符。由于种类不同、季节不同,海棠树和毛竹的监测结果不便定量比较。

## 4 结论

(1)设计了基于热扩散原理的便携式植物液流监测仪。设计的低噪声、高增益的精密放大电路提高了数据采集的性能,采用迭代算法能够及时获得液流密度。设计了SD卡存储和GPRS通信两种数据传输方案,采用低功耗设计和太阳能供电。

(2)设计的液流仪体积小,易于携带和使用,且成本低、功耗小,利用太阳能供电可实现长期连续工作。

(3)对毛竹、小海棠树等植物的监测及对比试验表明,本文设计的液流仪所测液流密度与前人研究结果一致,且与对照仪器的各项相关系数均不小于0.7882,属于显著相关,结果准确可信。本文设计的液流仪性价比高,通道易于扩展,适用于植物蒸腾耗水规律研究及相关应用。

## 参 考 文 献

- [1] DALEY M J, PHILLIPS N G. Interspecific variation in nighttime transpiration and stomatal conductance in a mixed New England deciduous forest [J]. *Tree Physiology*, 2006, 26(4):411-419.
- [2] 赵春彦, 司建华, 冯起, 等. 树干液流研究进展与展望[J]. *西北林学院学报*, 2015, 30(5):98-105.  
ZHAO Chunyan, SI Jianhua, FENG Qi, et al. Stem sap flow research: progress and prospect [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2015, 30(5):98-105. (in Chinese)
- [3] GONG D, KANG S, ZHANG L, et al. A two-dimensional model of root water uptake for single apple trees and its verification with sap flow and soil water content measurements [J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 83(1):119-129.
- [4] 尹光彩, 周国逸, 王旭, 等. 应用热脉冲系统对桉树人工林液流通量的研究[J]. *生态学报*, 2003, 23(10):1984-1990.  
YIN Guangcai, ZHOU Guoyi, WANG Xu, et al. A study on sap flux density of two eucalyptus (*Eucalyptus urophylla*) plantations in southeastern China by heat-pulse method [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10):1984-1990. (in Chinese)
- [5] BAKER J M, BAVEL C H M V. Measurement of mass flow of water in stems of herbaceous plants [J]. *Plant Cell and Environment*, 2006, 10(9):777-782.
- [6] 李浩, 胡顺军, 朱海, 等. 基于热扩散技术的梭梭树干液流特征研究[J]. *生态学报*, 2017, 37(21):7187-7196.  
LI Hao, HU Shunjun, ZHU Hai, et al. Characterization of stem sap flow *Haloxylon ammodendron* by using thermal dissipation technology [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(21):7187-7196. (in Chinese)
- [7] OLIVERAS I, LLORENS P. Medium-term sap flux monitoring in a Scots pine stand: analysis of the operability of the heat dissipation method for hydrological purposes [J]. *Tree Physiology*, 2001, 21(7):473-480.
- [8] PETERS R L, PATRICK F, FRANK D C, et al. Quantification of uncertainties in conifer sap flow measured with the thermal dissipation method [J]. *New Phytologist*, 2018, 219(4):1283-1299.
- [9] MEI T, FANG D, RÖLL A, et al. The influence of bamboo culm water content on sap flux measurements with thermal dissipation probes: observations and modeling [J]. *Trees*, 2018, 32(2):441-451.
- [10] 郑怀舟, 朱锦懋, 魏霞, 等. 5种热动力学方法在树干液流研究中的应用评述[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*,

- 2007,23(4):119-123.
- ZHENG Huaizhou, ZHU Jinmao, WEI Xia, et al. Review on the five thermodynamic technology applied in the research of sap flow[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2007,23(4):119-123. (in Chinese)
- [11] ZHAO Xiuhua, ZHAO Ping, ZHANG Zhenzhen, et al. Sap flow-based transpiration in *Phyllostachys pubescens*: applicability of the TDP methodology, age effect and rhizome role[J]. Trees, 2017, 31(2):765-779.
- [12] ZHANG Zhenzhen, ZHOU Juan, ZHAO Ping, et al. Validation and in situ application of a modified thermal dissipation probe for evaluating standing water use of a clumped bamboo: *Bambusa chungii*[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 239:15-23.
- [13] 王华田, 马履一. 利用热扩式边材液流探针(TDP)测定树木整株蒸腾耗水量的研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(6):661-667.
- WANG Huatian, MA Lüyi. Measurement of whole tree's water consumption with thermal dissipation sap flow probe (TDP) [J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2002, 26(6):661-667. (in Chinese)
- [14] 赵平, 梅婷婷, 朱丽薇, 等. 不同长度热消散探针测定粉单竹(*Bambusa chungii*)液流的差异分析和原位验证[J]. 生态学杂志, 2014, 33(5):1420-1428.
- ZHAO Ping, MEI Tingting, ZHU Liwei, et al. Difference of measured sap flows of *Bambusa chungii* using thermal dissipation probes at different lengths and their in situ validation [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(5):1420-1428. (in Chinese)
- [15] 赵秀华, 赵平, 周娟, 等. 热消散法(TDP)在5种竹子蒸腾耗水测定中的适用性评价[J]. 热带亚热带植物学报, 2015,23(5):93-101.
- ZHAO Xiuhua, ZHAO Ping, ZHOU Juan, et al. Applicability evaluation of transpiration of five bamboo species by using TDP (thermal dissipation probe) method [J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2015,23(5):93-101. (in Chinese)
- [16] FANG Dongming, MEI Tingting, ALEXANDER R, et al. Water transfer between bamboo culms in the period of sprouting[J]. Frontiers in Plant Science, 2019,10:786.
- [17] 张修太, 胡雪惠, 翟亚芳, 等. 基于PT100的高精度温度采集系统设计与实验研究[J]. 传感技术学报, 2010, 23(6):812-815.
- ZHANG Xiutai, HU Xuehui, ZHAI Yafang, et al. The design and experimental study of high precise temperature acquisition system based on PT100 [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(6):812-815. (in Chinese)
- [18] 江朝晖, 李想, 马友华, 等. 基于ARM和Android的通用化农田信息检测终端研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11):294-300.
- JIANG Zhaohui, LI Xiang, MA Youhua, et al. Universal detecting terminal for farmland information based on ARM and Android [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11):294-300. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20161140&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161140&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.040. (in Chinese)
- [19] 顾大彤, 黄科朝, 何文, 等. 基于热消散技术的毛竹林蒸腾耗水估算[J]. 林业科学, 2019, 55(1):34-40.
- GU Daxing, HUANG Kechao, HE Wen, et al. Estimation of transpiration water consumption of mosobamboo forest based on TDP method [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(1):34-40. (in Chinese)
- [20] 蔡锡安, 赵平, 陆平, 等. Granier树干液流测定系统在树木蒸腾研究中常见问题的解决方案[J]. 热带亚热带植物学报, 2010, 18(3):326-334.
- CAI Xi'an, ZHAO Ping, LU Ping, et al. Solutions to common problems for measurement of tree transpiration using Granier's sap flow system [J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2010, 18(3):326-334. (in Chinese)
- [21] LAGERGREN F, LINDROTH A. Transpiration response to soil moisture in pine and spruce trees in Sweden[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 112(2):67-85.
- [22] 岳广阳, 张铜会, 刘新平, 等. 热技术方法测算树木茎流的发展及应用[J]. 林业科学, 2006, 42(8):102-108.
- YUE Guangyang, ZHANG Tonghui, LIU Xinping, et al. Development and application of thermal methods in measuring stem sap flow [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(8):102-108. (in Chinese)
- [23] 丁访军, 王兵, 赵广东. 毛竹树干液流变化及其与气象因子的关系[J]. 林业科学, 2011, 47(7):73-81.
- DING Fangjun, WANG Bing, ZHAO Guangdong. Sap flow changes of *phyllostachys edulis* and their relationships with meteorological factors [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(7):73-81. (in Chinese)