

基于 GA - SVR 的热源自适应茎流检测与调控系统研究

胡 瑾^{1,2} 孙章彤^{1,2} 冯 盼^{1,3} 杨永霞^{1,2} 卢 苗¹ 侯军英^{1,3}

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 农业农村部农业物联网重点实验室, 陕西杨凌 712100;
3. 陕西省农业信息感知与智能服务重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 茎流测量是研究植物耗水规律的重要手段, 现有茎流传感器多基于热平衡法进行设计, 但在低温天气时, 植物蒸腾作用不明显, 茎流瞬时变化响应不灵敏, 导致测量结果不精确。针对上述问题, 设计了一种热源自适应茎流检测与调控系统。综合考虑不同因素下茎流消耗在热源提供能量占比中变化趋势的建模需求, 设计融合外界温度、茎流速率、横截面积等多环境因子茎流标定嵌套试验。在此基础上, 利用支持向量机回归算法 (Support vector regression, SVR) 和遗传算法 (Genetic algorithm, GA), 建立热源功率自适应模型。结果表明所建模型的最优决定系数与均方根误差分别为 0.989 和 0.015 W。基于 LoRa 无线传感网络构建茎流检测与调控系统, 实现多组温度信息和热源功率的监测, 系统调用移植到嵌入式设备的热源自适应模型动态获取热源功率调控目标值, 并发送至执行控制器, 控制功率调控模块, 实现热源自适应融合的功率动态控制。精度验证试验显示: 在低温段时, 本系统比 FLOW - 32KS 型传感器平均相对误差小 2.64 (6℃)、2.53 (11℃)、3.68 个百分点 (16℃)。在高温段时, 自适应模型修正对结果影响不大, 双系统相对误差互有高低。证明本系统嵌入基于热平衡法的 GA - SVR 算法热源自适应模型后, 能确保茎流消耗能量 Q_f 在输入总能量 P_{in} 中占比稳定, 满足提高热平衡茎流测量精度的需求。

关键词: 茎流; 精准灌溉; 热源自适应模型; 热平衡法; 遗传算法

中图分类号: S126

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298 (2023) 07-0290-10

OSID:



Study of Heat Source Adaptive Stemflow Detection System
Based on GA - SVR

HU Jin^{1,2} SUN Zhang tong^{1,2} FENG Pan^{1,3} YANG Yong xia^{1,2} LU Miao¹ HOU Jun ying^{1,3}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Key Laboratory of Agricultural Internet of Things, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. Shaanxi Key Laboratory of Agricultural Information Awareness and Intelligent Services, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Existing stemflow sensors based on the thermal equilibrium method are not accurate in measurement, and the stemflow response is not sensitive to transient changes when transpiration is not significant or when the external temperature is low. Therefore, an adaptive stemflow detection system of heat source power was proposed. Taking camphor stalks as the object, a nested experiment based on the thermal equilibrium method of stemflow calibration was designed by comprehensively considering the trend of the proportional change of stemflow in heat source energy, and the sample set of stemflow rates with multi-gradient under different environmental factors such as external temperature, stemflow rate and cross-sectional area were collected. A combined prediction model of heat source power based on support vector regression (SVR) and genetic algorithm (GA) was established. The results showed that the GA - SVR had good accuracy and robustness, its root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE) and determination coefficient (R^2) were 0.015 W, 0.012 W and 0.989, respectively. The accuracy verification test suggested that the average relative error of the system was 2.64 percentage points (6℃), 2.53 percentage points (11℃) and 3.68 percentage points (16℃) smaller than that of the FLOW - 32KS sensor in the low-temperature section. The adaptive model had a small effect on the correction of the results in the high-temperature section which was similar to FLOW - 32KS. It was demonstrated that

收稿日期: 2022 - 11 - 01 修回日期: 2022 - 12 - 08

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFD1100602) 和陕西省重点研发计划项目 (2021ZDLNY03 - 02)

作者简介: 胡瑾 (1980 -), 女, 教授, 主要从事设施光环境调控和智能信息处理研究, E-mail: hujin007@nwsuaf.edu.cn

the stemflow detection system improved the accuracy of the heat balance stemflow measurement after embedding the GA-SVR heat source power adaptive model.

Key words: stemflow; precision irrigation; adaptive model of heat source; thermal equilibrium method; genetic algorithm

0 引言

我国水资源严重缺乏,人均水资源量 2 300 m³,仅为世界平均水平的 28%。且农林业耗水量约占全国总耗水量的 3/4。节约灌溉用水是改善我国水资源不足的关键^[1-2]。现有农林业灌溉调控系统大多基于土壤水分监测反馈灌溉^[3-4],一定程度上降低了农业用水的损失率,但土壤水分并不能反映作物真实需水情况^[5]。大量研究表明,在对作物生长水分消耗量及蒸腾能力的精准监测方面,反映作物需水能力最好的生物量是茎杆液流,简称茎流(Stemflow)。作为植物一种复杂生理机能,茎流指的是在植物冠层蒸腾拉力作用下,单位时间通过被测量茎杆横截面的水的总量,可用来确定植物蒸腾和需水量,并作为反馈进行灌溉。基于蒸腾作用的茎流测量已成为研究植物耗水规律的重要手段^[6-9],通过测量茎流量不仅能确定植物需水量与需水规律,也能反映植物的生理状态、活跃度等。通过分析不同环境因素下的试验数据,为后续构建需水预测模型提供数据支持,研发低成本、高精度的茎流传感器已成为灌溉精准化的关键问题之一。

现有茎流传感器研究中,热技术法因其可实时、精准、高时间分辨率对植物茎杆茎流量进行测量,借助热技术监测草本植物茎秆或木本植物茎秆液流变化推算植物蒸腾耗水的方法不仅在草本和农作物耗水领域得到广泛应用,也在乔木灌木植物耗水研究方面得到了广泛应用^[10-11]。目前主要的热技术方法有热脉冲、热扩散、激光热脉冲和热平衡法等^[12]。前两种方法将热脉冲作为植物茎杆液流的示踪物,以安装在茎杆的电阻线为热源,上方或下方感温元件感知茎流到达时间或测量上下温度探针之间的电压差来搭建传感器,但均需将探头以插针形式置入待测茎杆边材内^[13],对植物茎杆造成伤害。同时“因伤效应”造成损伤部位热传导性能降低,导致测量茎流速率偏小^[14],而且其也难以解释热电偶自身受外界温度变化而导致的误差^[15-16]。后两种方法均为非侵入式,激光热脉冲传感器采用激光二极管代替加热金属丝,红外温度计代替热敏电阻,避免持续放热对植物茎杆造成伤害,但造价高昂,不能大范围应用于现代农业,只适用于实验室高精度检测^[17]。热平衡法茎流传感器制备相对简单,操作也

更为方便,近年来已成为国内外茎流传感器研究的热点,并已出现基于热平衡法的茎流测量反馈灌溉系统^[18-19],研究证明,加入此系统后提升了灌溉效果,但在使用中发现该传感器仍存在问题,如在低温天气等外界温度较低、植物蒸腾作用不明显情况下,因向外横向传导的热量相对较多,沿茎杆向上传导热量较少,导致沿茎杆径向上的热电偶测得温差较小,测量结果不精确,茎流瞬时变化响应不灵敏。由于茎流消耗能量 Q_f 与多因素存在耦合关系,且引入调整热源功率,从而提升 Q_f 占比,相对于仅提升 Q_f 值,能有效提升信噪比,因此基于能量守恒定律,引入热源功率自适应模型,稳定茎流消耗能量 Q_f 在输入总能量 P_{in} 中所占比重,是提高热平衡茎流测量方法精度的关键。

针对上述问题,本文首先探究外界环境温度、茎流速率和茎杆截面积与茎流消耗能量 Q_f 在输入总能量 P_{in} 占比中的互作耦合关系,以不同横截面积的香樟茎杆为试验对象,依据热平衡法测量茎流的基本原理,设计茎流标定嵌套试验,采集多梯度下流经茎杆的液体质量。其次,基于 GA-SVR 优化的热源自适应模型来制备智能茎流检测装置,实现自适应调整热源功率,从而确保茎流消耗能量占比稳定。

1 热源功率自适应模型

1.1 热平衡法测茎流原理

基于能量守恒定律的热平衡法测量植物茎杆茎流速率原理如图 1 所示。图中, P_{in} 为加热片(热源)输入总能量, Q_f 为通过茎杆液体消耗的能量, Q_s 为通过横向、径向等扩散的能量, Q_u 、 Q_d 分别为径向(向上、向下)热扩散的能量, Q_r 为通过泡沫隔热套向外的横向导热能量, dT_u 、 dT_d 分别为茎杆上下两方通过热电偶产生的温度差。其中,内层封装了加热片及热电堆等,为减少外界环境因素的干扰,使用时,需将封装起来的加热片、热电堆紧紧包裹植物茎杆,包裹材料起到隔绝温度、辐射对探测器的影响作用^[20]。加热片提供稳定热源,待测植物茎杆通过横向、径向和茎流消耗能量,从而达到稳定状态。通过求出被茎流带走的热量来计算茎杆内液体流量。

由于输入热量等于各部分扩散量之和,能量平衡方程可表示为

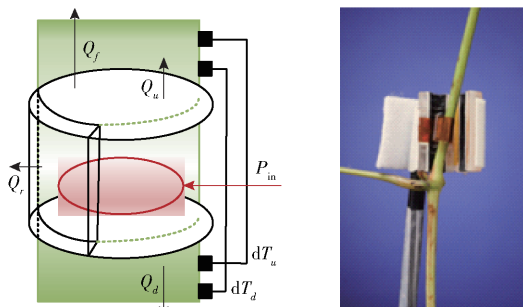


图 1 热平衡法原理图

Fig.1 Schematic of heat balance method

$$P_{in} = Q_f + Q_s \tag{1}$$

其中
$$Q_s = Q_u + Q_d + Q_r + S \tag{2}$$

$$Q_u = K_{st} A (dT_u / dX) \tag{3}$$

$$Q_r = K_{sh} E \tag{4}$$

式中 S ——储存在茎杆的极少部分能量(可忽略)
 K_{st} ——植物茎杆的热导率, $W/(m \cdot K)$
 A ——植物茎杆的横截面积, cm^2
 dX ——茎杆上下两方热电偶的距离, mm
 K_{sh} ——鞘传导率, W/V
 E ——热电堆输出电压, V

通过功率检测模块可计算得到热源输入功率 P_{in} 和横向热散失量 Q_r , 通过热传导的傅里叶热扩散定律可计算得到径向扩散掉的能量 Q_u 、 Q_d 。 K_{sh} 可通过零点设置的方式获取, 即凌晨时植物蒸腾作用最小, 默认此时茎流量为零, 采用凌晨记录的最小值或夜间平均值。

茎流量 F 满足公式

$$Q_f = P_{in} Q_u Q_d Q_r \tag{5}$$

$$Q_u = C_p (T_u T_d) \tag{6}$$

式中 C_p ——水比热容

因茎流量是通过计算茎杆茎流消耗能量推导所得, 为保证测量精度, 针对不同植物, 需在不同环境下试验其有效热传导量占热源输入能量的比例阈值, 从式(1)、(3)中发现可调控变量 A 、 P_{in} 、 dT_u 均影响茎流消耗能量的计算, 因此选择植物茎杆横截面积、环境温度、热源功率一同嵌套试验, 建立不同因素下的茎流消耗能量占比及上下两组热电偶温度差模型, 为热源自适应模型的研究提供数据支持与基础。

1.2 试验设计与数据获取

试验于 2021 年 4—6 月在西北农林科技大学农业农村部农业物联网重点实验室 (34°07'39"N, 107°59'50"E, 海拔 648 m) 进行。为减少环境因素的影响, 在可设置恒温环境的人工气候箱 (RGL - P500D - CO₂ 型, 达斯卡特公司) 试验。以直径 6 ~ 18 mm 新鲜香樟茎杆为试验材料, 长约 200 mm。茎

流速率标定平台采用刘安等^[21]建立的基于称量法的茎流标定方法, 采集装置的探头外壳采用泡沫隔热材料, 以最大程度避免外界环境对检测设备本身的干扰, 内层包括加热片、两组热电堆等, 外部使用热电偶测量空气温度。使用 ESJ110 - 5A 型电子分析天平采集液体质量。多路无纸记录仪 (MIK - R200D 型, MEACON) 和 ABF 功率可调直流高精度恒流恒压电源分别记录热电偶温度和控制加热片功率。试验装置示意图如图 2 所示。

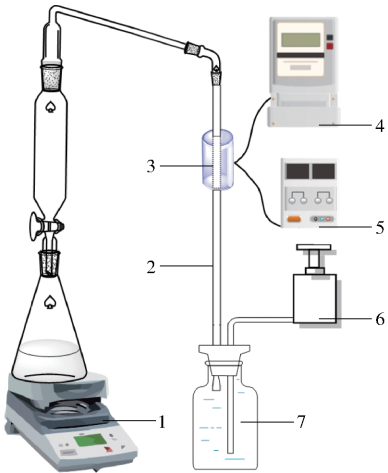


图 2 试验装置示意图

Fig.2 Schematic of test device

1. 电子分析天平 2. 香樟茎杆 3. 探头 4. 无纸记录仪 5. 恒流恒压源 6. 加压罐 7. 营养液

试验中将香樟茎杆下部和橡胶导管末端插入装满营养液的密封透明玻璃瓶中进行固定, 茎杆上端用一根橡胶导管连接将茎液导入称量容器。加压罐设置为可调整高度的储存营养液的罐瓶, 通过液体的压强公式计算高度 h , 改变加压罐与密封玻璃瓶的相对高度, 来使密闭玻璃瓶的压强改变。利用电子分析天平测量试验过程中流经香樟茎杆的液体质量。由于外界环境温度、茎杆截面积、茎流速率、热功率等因素都会影响测量精度, 故设置多因素耦合条件下的茎流测试试验梯度如表 1 所示。其中, 温度梯度参考植物的三基点温度^[22], 设置温度范围在 5 ~ 40℃ 内, 以 5℃ 为步长, 共 8 个温度梯度。茎杆直径范围设置在 6 ~ 18 mm 之间, 以 2 mm 为步长, 共 7 个直径梯度。参考当前常用 FLOW - 32KS 型的包裹设备将加热片功率设置为 0.15 ~ 0.9 W 之

表 1 试验参数梯度设置

Tab.1 Gradient setting of test parameters

自变量	设置参数值
外界环境温度/℃	5、10、15、20、25、30、35、40
茎杆直径/mm	6、8、10、12、14、16、18
热源功率/W	0.15、0.3、0.45、0.6、0.75、0.9
加压罐压力/Pa	0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6

间,以 0.15 W 为步长,共 6 个热源功率梯度。加压罐压力设置为 0.1 ~ 0.6 Pa 之间,步长 0.1 Pa,共 6 个压力梯度,试验累积获取 2 016 组数据。

1.3 试验结果分析

1.3.1 热源功率-茎流消耗能量占比关系分析

基于上述试验数据,分别对不同外界温度、茎流速率和茎杆截面积的关系进行分析,其结果如图 3 所示。从图 3a 可看出,在相同茎杆截面积下,茎流消耗能量占比随着热源功率增加呈下降趋势,证明过高电功率并不能实际提升用于茎流消耗的能量,且在茎杆直径大于约 8 mm 时,加热片功率的增加对茎流消耗能量占比的影响微小。说明茎杆较粗时,在达到植株茎流消耗能量的阈值后,加热片功率的增加不会再影响茎流消耗;在相同加热功率下,茎流消耗能量占比总体随着横截面积增加呈上升趋势,变化不明显,说明当茎杆横截面积较大时,茎流消耗能量占比与树干横截面积关系小。从图 3b 可看出,取茎杆直径为 10 mm 时,在相同温度条件下,茎流消耗能量占比随热源功率增加呈下降趋势,说明过高电功率并不能提升实际用于茎流消耗所使用的能量。因此为了提供良好的茎流消耗能量占比,保证茎流测量的精度,不能盲目地增加热源功率;在

相同加热功率下,茎流消耗能量占比随着外界温度升高呈增加趋势,说明在外界环境温度低时,能量主要以横向扩散的方式消耗,随着温度升高,蒸腾作用增强,更多能量径向流动,作为茎流消耗被利用。因此需要在外界温度低时,适当减小热源功率来提高茎流消耗能量占比。

1.3.2 热源功率-上下两组热电偶温度差趋势分析

由于不同外界温度、茎流速率、茎杆截面积对上下两组热电偶温度差产生影响,因此对其相关关系进行分析。从图 4a 可看出,在相同加热功率下,随着横截面积增大,上下两组热电偶温度差减小,且随着增大加热片功率,温度差的变化趋势更大,说明随着横截面积增大,能量横向传导的热量相对较多,沿树干向上传导热量较少,导致树干径向上的热电偶测得温差较小。从图 4b 可看出,在相同加热功率下,随着外界温度升高,上下两组热电偶温度差增加,且在相同外界温度下,随着加热片功率增大,温度差随之增大。因此在外界温度高时,需降低加热功率,防止温度差过高造成植物损伤;在外界温度低时,为保证测量精度,需适当增加加热功率,使上下两组热电偶温度差在合理范围。因此需综合考虑温度差、横截面积及环境温度等不同因素,从而对加热片

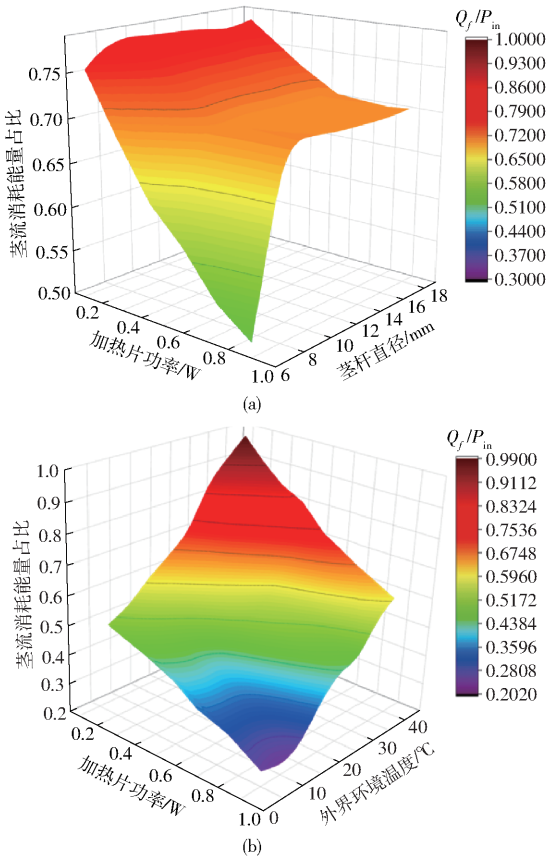


图 3 热源功率-茎流消耗能量占比关系

Fig. 3 Relationship between heat source power and stem flow consumption

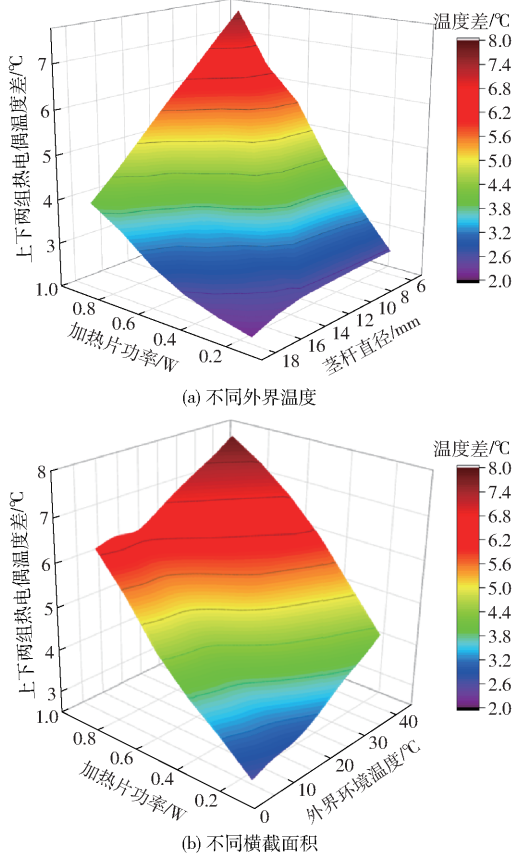


图 4 热源功率-热电偶温度差关系

Fig. 4 Relationship between heat source power - temperature difference between thermocouples

功率进行约束选择。

1.4 模型构建与结果对比

综合考虑试验结果,为了保证可变功率茎流仪的测量精度,依照有效热传导量需大于热源输入能量的 5% 或温度差大于 2.5℃,确保被测部位温差恒定的原则^[11],以 390 组原始试验数据作为样本集,利用 GA-SVR 算法构建热源功率自适应模型,以植物茎杆横截面积 A 、热电堆平均温度差、外界温度、上下两点温度差 dA 和 dB 、上下两组热电偶的温度差 dC 作为输入,以加热片功率作为输出,其算法流程如图 5 所示。

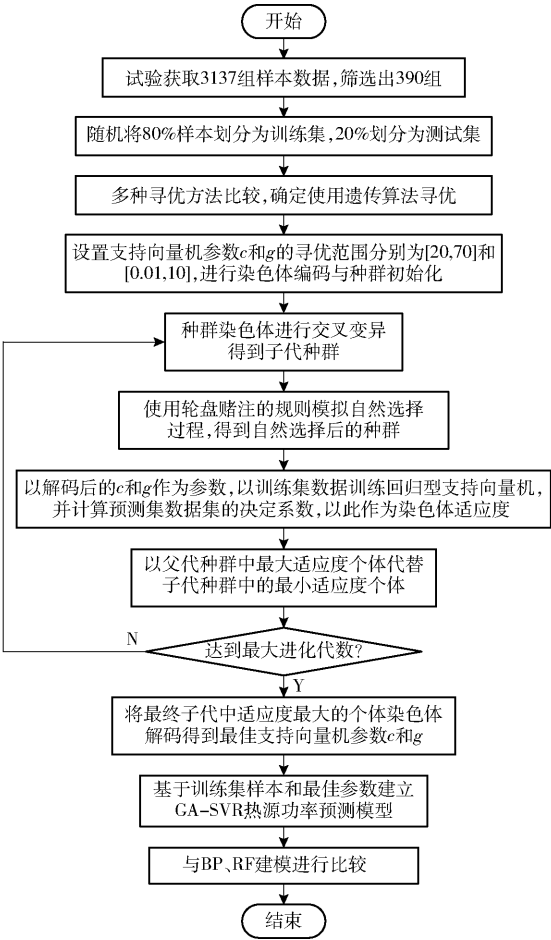


图5 遗传算法优化的回归型支持向量机算法流程图

Fig.5 Flowchart of support vector machine based on improved genetic algorithm

利用支持向量机对模型训练前,需对不同维度样本数据分别作归一化处理,避免因数据差异过大导致样本不均衡,使得最终模型偏离准确超平面。归一化区间选择为 $[0.2,0.8]$ ^[23]。将归一化后的样本集数据的 80% 作为训练集,20% 作为测试集,分别用于模型训练和泛化能力评价。归一化公式为

$$x' = \frac{0.6(x - X_{\min})}{X_{\max} - X_{\min}} + 0.2 \tag{7}$$

式中 x ——待归一化的原始数据

x' ——归一化后的待处理数据

$X_{\max}$ 、 $X_{\min}$ ——输入数据中某维度的最大、最小值

SVR 核函数的选择对于其性能的表现有至关重要的作用^[24],尤其是针对线性不可分的数据。核函数通过将空间内线性不可分的数据映射到高维的特征空间,使得数据在特征空间内可分,本模型特征数为 6,样本数量为 390,因此选用高斯径向基核函数 Rbf。正则化参数 c 与核函数参数 g 对模型拟合结果也有较大影响。正则化参数 c 是惩罚系数,即对误差的宽容度^[25]。 c 越高,说明越不能容忍出现误差,易过拟合; c 越小,越易欠拟合。核函数参数 g 是选择 Rbf 核函数自带的参数,隐含地决定了数据映射到新特征空间的分布。 g 越大,支持向量越少; g 越小,支持向量越多。支持向量的个数影响训练与预测的速度。

通过前期网格搜索寻优,多次试参后发现,设置 c 的索引范围为 $[20, 70]$, g 为 $[0.01, 10]$,遗传算法同时设置 c 的基因个数为 8 个, g 的基因个数为 7 个。算法进化曲线如图 6 所示。当网络进化到最终收敛时,模型达到最大决定系数,参数 c 和 g 最佳解分别为 59.645 6 和 0.327 1。模型训练过程中未出现振荡,证明遗传算法对支持向量机参数优化效果明显。

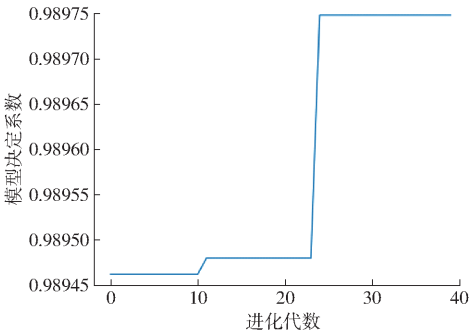


图6 遗传算法进化曲线

Fig.6 Improved genetic algorithm evolution curve

对于给定的训练样本集,利用 GA-SVR 算法进行拟合,得到最终热源功率预测初始模型,将各模型参数代入,最终获得融合核技巧的热源功率预测模型。

$$P_{\text{in}} = f(X) = \omega^T X + b' \tag{8}$$

其中
$$f(X) = \sum_{i=1}^m (\hat{\alpha}_i - \alpha_i) K(X, X^p) + b^* \tag{9}$$

$$K(X, X^p) = \exp\left(-\frac{\|X - X^p\|^2}{2\delta^2}\right) = \exp(-g \|X - X^p\|^2) \tag{10}$$

$$X = (A^{(1)}, C^{(2)}, T^{(3)}, dA^{(4)}, dB^{(5)}, dC^{(6)})$$

式中 P_{in} ——模型输出,即热源功率

ω ——模型系数矩阵
 $K(X, X^p)$ ——核函数
 X ——待变换样本
 X^p ——核函数中心
 b' ——模型偏置项
 $\hat{\alpha}_i, \alpha_i$ ——求解过程的拉格朗日乘子
 b^* ——使用核技巧后的模型偏置项

基于模型对测试集的预测值与真实值拟合结果的拟合方程斜率为 0.997 7, 接近于 1, 而其截距为 0.001 0, 近似为 0, 说明 GA 优化的模型结果精确且泛化能力更强, 其对未知数据的预测结果与真实值相关性更高。为了验证利用 GA-SVR 算法所建立模型的性能, 与常用的基于网格寻优的 SVR、后向传播 (Back propagation, BP) 神经网络、随机森林 (Random forest, RF) 算法进行了对比, 结果如表 2 所示。

表 2 不同算法的性能比较

算法	训练集			测试集		
	均方根	平均绝	决定系数	均方根	平均绝	决定系数
	误差/	对误		误差/	对误	
	W	差/W		W	差/W	
BP 神经网络	0.056	0.036	0.856	0.042	0.028	0.898
随机森林	0.086	0.03	0.874	0.044	0.027	0.902
网格寻优 SVR	0.045	0.021	0.868	0.048	0.036	0.914
GA-SVR	0.014	0.013	0.971	0.015	0.012	0.989

网格寻优 SVR 算法在建模精度方面明显优于 BP 神经网络算法和随机森林算法, 说明其具有高拟合精度和泛化能力, 但由于模型参数的优化过程影响, 网格搜索在大数据集和多参数下非常耗时。而遗传算法作为一种随机全局搜索和优化的算法, 训练速度快, 因此采用遗传算法对支持向量机参数进行优化, GA-SVR 算法决定系数为 0.989, 均方根误差为 0.015 W, 均是上述方法中的最优结果, 从而验证了方法的优越性。

2 监测系统设计与验证

本系统采用模块化设计, 开发了基于 LoRa 无线通信的热源自适应茎流检测及调控系统, 包括传感器检测及热源功率控制子系统和数据分析决策及可视化子系统, 其结构框图如图 7 所示。其中, 传感器子系统包括环境温度及上下 T 型热电偶温度传感器、热源功率检测传感器, 分别采集环境温度及茎杆液体通过上下两方热电偶细微的温度变化及实时电路的电流和功率, 并将其感知信息通过 LoRa 无线通信传输至决策系统; 决策系统

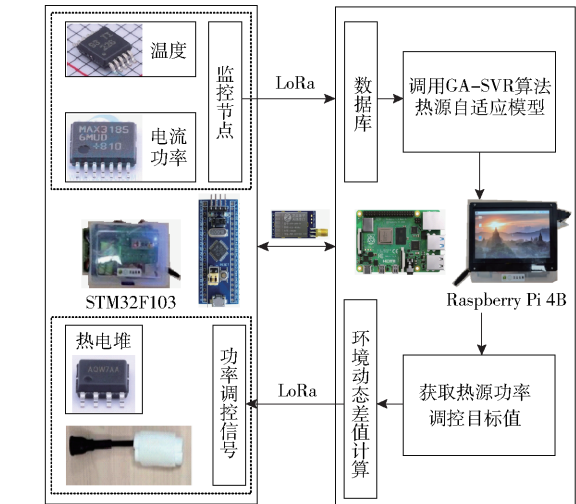


图 7 传感器设计实现流程图
Fig. 7 Sensor design and implementation process

调用移植到嵌入式设备的 GA-SVR 热源自适应模型动态获取热源功率调控目标值, 并发送至执行控制器, 控制功率调控模块, 实现热源自适应融合的功率动态控制。

2.1 系统硬件设计

2.1.1 监控节点

监控节点以 STM32F103 芯片为核心, 实现数据采集与传输、热源功率调控等功能。采用模块化设计, 主要包括电源单元、中央处理单元、串口单元、无线通信单元、时钟单元、温度检测、热源功率检测及控制等模块。具有汇聚实时环境信息, 发送检测数据, 接收实时调整后的热源功率数据, 下发调功率命令等功能, 结构如图 8 所示。其中, 环境因子采集及处理模块主要监测热源功率和热电偶温度。功率检测模块对热源的电路进行分流, 将分流的微小电流和电压通过 INA226 芯片进行检测, 检测后的信号以 SPI 通信协议输入给微处理器控制单元, 再通过分流比例计算出真实电流。所选用的 INA226 是基于 SMBUS 通信的高精度双向电流监控芯片, 实现对监控电路电流和功率读取。温度检测模块选用 MAX31856-T 型热电偶, 可直接将被测量转换为电压输出, 可灵敏反映细微温度变化, 通过 SCLK 引脚时钟控制与微处理器的数据移动。功率调控模块基于脉冲宽度调制技术, 为避免输出端对输入端的干扰, 在电路设计中加入光耦, 采用集成低温漂电阻的 SY8750 芯片设计电路, 利用场效应管构成共集放大电路, 实现 PWM 信号对热源功率进行调节, 实现热源自适应融合的功率动态控制。

2.1.2 决策节点

决策节点以 Raspberry Pi 4B 为核心, 实现人机交互及数据显示、存储等功能。接收 LoRa 无线传输的感知信息后, 调用移植到嵌入式设备的 GA-

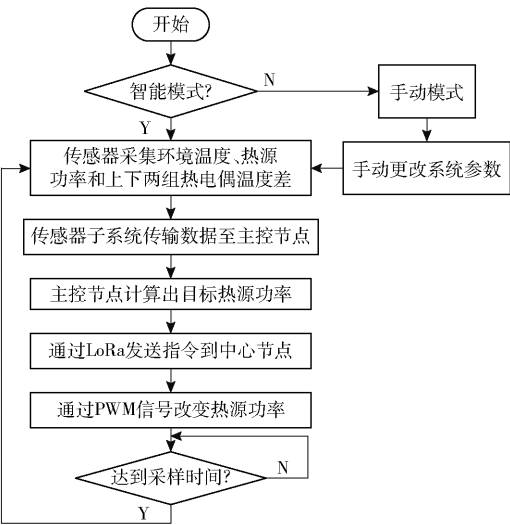


图 11 决策节点流程图
Fig. 11 Decision node flowchart

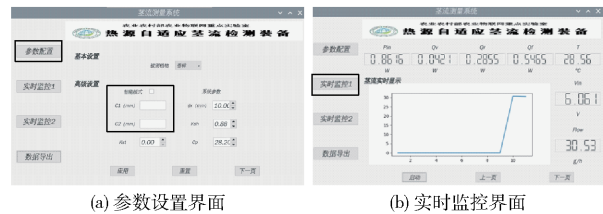


图 12 参数配置、实时检测界面

Fig. 12 Parameter configuration and real-time detection interface

3 系统验证

为验证本文模型精度,基于标定平台将本茎流检测装置测量结果和现有茎流传感器测量结果与真实茎流值进行对比。在人工气候箱(RGL-P500D-CO₂型,达斯卡特公司)的同一应用场景下进行试验,设置不同环境温度的对照试验,并比较双系统测量结果与真实茎流量的误差。本次试验利用热源自适应茎流测量装置、FLOW-32KS型茎流传感器、ESJ110-5A型电子分析天平搭建试验平台,即可

获取双系统实时所测茎流值,茎流速率标定平台采用刘安等^[21]建立的基于称量法的茎流标定方法,验证试验装置示意图如图 13 所示,为防止下方探头加热对上方探头测量结果造成影响,将仅以被测部分温差恒定作为依据的 FLOW-32KS 型传感器放置在下部,将嵌入热源自适应模型的本系统放置在上部。嵌入热源自适应模型后,不需被测部位温差恒定,系统可根据当前温度自适应调整功率,得到更准确的茎流值。同时,本系统探头下端与 FLOW-32KS 型传感器探头上端距离 50 mm,可进一步减小可能潜在的微弱影响。

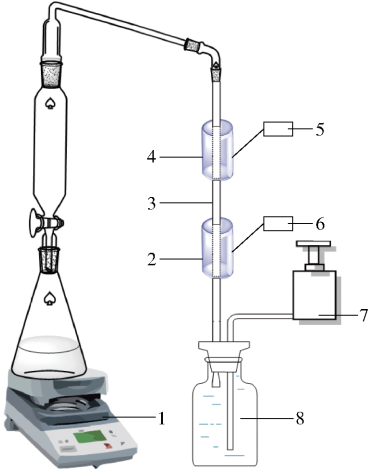


图 13 验证试验装置示意图

Fig. 13 Schematic of verification test device

1. 电子分析天平 2、4. 探头 3. 香樟茎杆 5. 本系统 6. FLOW-32KS 型传感器 7. 加压罐 8. 营养液

为验证不同温度及蒸腾拉力下,本系统与现有热平衡茎流传感器的误差,设计了不同外界环境温度与加压罐压力的嵌套试验,外界环境温度梯度为 6、11、16、21、26、31、36、41℃ 共 8 组;加压罐的压力梯度为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 Pa,共 6 组。以茎流真实值作为标准,两系统与标准值的标定试验误差结果如表 3 所示。

表 3 标定试验误差统计
Tab.3 Error statistics of control test

温度/℃	传感器压力/Pa											
	0.1		0.2		0.3		0.4		0.5		0.6	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
6	10.85	7.00	6.85	4.83	8.31	6.25	6.32	4.21	5.96	2.76	5.71	3.31
11	9.14	6.34	6.67	4.91	8.00	4.98	5.24	3.90	4.60	1.54	3.94	3.65
16	9.04	6.67	8.91	4.86	8.19	3.56	4.84	2.97	4.90	4.27	3.23	2.68
21	7.06	6.77	6.64	4.91	6.75	6.09	4.54	4.20	3.66	3.16	5.02	2.14
26	6.85	5.61	6.23	6.44	6.93	7.30	4.12	3.18	5.19	2.63	3.40	2.67
31	9.01	8.97	6.33	6.99	5.95	6.20	4.03	2.87	4.19	2.96	5.21	3.65
36	8.47	8.27	8.65	8.16	5.35	6.51	7.07	5.13	4.19	2.18	4.07	3.29
41	8.81	9.77	7.72	8.12	7.82	7.29	6.65	4.97	5.94	3.99	5.44	3.54

注: A 为 FLOW-32KS 型传感器,B 为本系统。

从表 3 可以看出,两系统误差均在 11% 以内,符合测量要求。对其影响程度进一步分析可知,在外界环境温度较低时,本系统测量误差有显著下降,相比 FLOW-32KS 型传感器平均相对误差小 2.64 (6℃)、2.53 (11℃)、3.68 个百分点 (16℃),精度提升效果明显;在适宜温度区间 (21~26℃) 时,本系统测量误差相比 FLOW-32KS 型传感器小,但显著性不高;在高温段 (31~41℃) 时,由于外界温度高,横向扩散能量减小,自适应模型修正对结果影响不大,双系统相对误差互有高低,且两者相对误差均在 2 个百分点以内。证明本系统嵌入基于热平衡法的 GA-SVR 算法热源自适应模型后,能够在外界环境温度较低,蒸腾作用不明显环境下,通过自适应调整热源功率,提升茎流测量精度。

图 14 为本系统实时监测演示。随后于 2021 年 9—10 月,选择低温天气进行全天验证试验,测量时长为 72 h,采样频率设置为 4 次/h。取 10 月 15—17 日 (陕西省咸阳市:6~14℃) 数据,绘制测量结果对

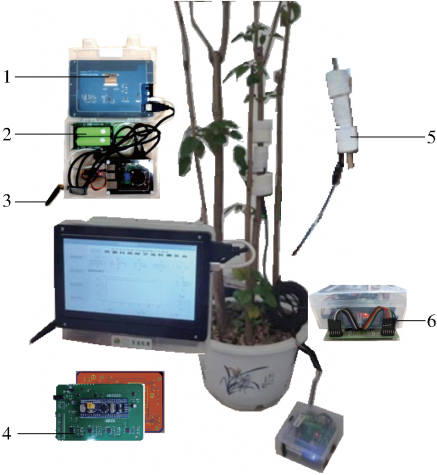


图 14 双通道可拆卸茎流传感器运行图
Fig. 14 Physical map of dual-channel detachable stem flow sensor

1. 触摸屏 2. 18650 锂电池 3. LoRa 模块 4. 数据检测及调控模块 5. 茎流数据采集节点 6. 数据终端

比见图 15,两者决定系数 R^2 达到 0.98,均方根误差为 4.23 g/h,相对于 FLOW-32KS 型传感器,热源自适应茎流系统测量结果整体偏大,规律与标定试验相同,更加接近真实茎流。

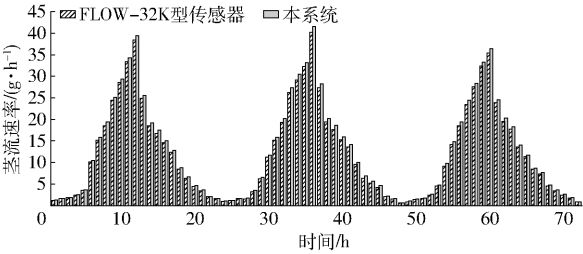


图 15 全天茎流试验对比结果
Fig. 15 Comparison results of all-day stem flow test

4 结论

(1)探究了香樟茎杆在不同外界环境温度、茎流速率、茎杆截面积的热源功率-茎流消耗量占比关系、上下两组热电偶温度差趋势变化,发现当茎杆截面积达到 50 mm²时,对茎流消耗的能量占比的影响微小。且有效热传导量须不小于热源输入能量的 15%,这为建立热源自适应模型提供依据,证明了本方法提高茎流检测精度的可行性。本热源自适应模型通用于茎杆包含边材的木本植物,但针对较软的草本植物,需选择不同茎杆横截面积、环境温度、热源功率等进行前期标定嵌套试验,针对性精确量化模型的构建。

(2)设计了一种基于热源自适应的茎流传感器。采用 GA 遗传算法优化 SVR 模型,以外界环境温度、茎流速率、茎杆截面积等为输入,加热片功率为输出构建热源自适应模型并开展了茎流精度试验,显示在茎流速率较低或环境温度低时,本系统平均相对误差更小,能确保茎流消耗能量在输入总能量中占比稳定,满足提高热平衡茎流测量精度的需求,为干旱低温气候并存的干旱、半干旱荒漠区布局管理、以及灌溉决策提供科学依据。

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.

[2] 俞双恩, 李偲, 高世凯, 等. 水稻控制灌排模式的节水高产减排控污效果[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 128-136. YU Shuang'en, LI Si, GAO Shikai, et al. Effect of controlled irrigation and drainage on water saving, nitrogen and phosphorus loss reduction with high yield in paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(7): 128-136. (in Chinese)

[3] 蔡甲冰, 许迪, 司南, 等. 基于冠层温度和土壤墒情的实时监测与灌溉决策系统[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 133-139. CAI Jiabing, XU Di, SI Nan, et al. Real-time monitoring system of crop canopy temperature and soil moisture for irrigation decision-making[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 133-139. (in Chinese)

[4] 王应海. 土壤含水量(土壤湿度)数据在智能灌溉决策系统中的应用研究[J]. 节水灌溉, 2017(4): 105-106. WANG Yinghai. Application of soil moisture content data in intelligent irrigation decision system[J]. Water Saving Irrigation, 2017(4): 105-106. (in Chinese)

[5] 姚远, 刘瑞轩, 张胜, 等. 林木蒸腾耗水量测算方法的比较与应用[J]. 应用生态学报, 2021, 32(8): 2989-2998. YAO Yuan, LIU Ruixuan, ZHANG Sheng, et al. Comparison and application of calculation methods for water consumption of tree transpiration[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(8): 2989-2998. (in Chinese)

[6] 刘笑吟,王冠依,杨士红,等. 不同时间尺度节水灌溉水稻腾发量特征与影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 91-100, 170.
LIU Xiaoyin, WANG Guanyi, YANG Shihong, et al. Influence factors and characteristics of transpiration and evaporation in water-saving irrigation paddy field under different temporal scales[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 91-100, 170. (in Chinese)

[7] 孟圆,王哲,夏辉,等. 不同基质下番茄耗水规律及生长指标数学模拟研究[J]. 节水灌溉, 2020(12): 37-41.
MENG Yuan, WANG Zhe, XIA Hui, et al. Numerical simulation of water consumption and growth index of tomato under different substrates[J]. Water Saving Irrigation, 2020(12): 37-41. (in Chinese)

[8] 马龙龙,杜灵通,丹杨,等. 基于茎流-蒸渗仪法的荒漠草原带人工灌丛群落蒸散特征[J]. 植物生态学报,2020,44(8): 807-818.
MA Longlong, DU Lingtong, DAN Yang, et al. Characteristics of evapotranspiration in planted shrub communities in desert steppe zone based on sap flow and lysimeter methods[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2020,44(8):807-818. (in Chinese)

[9] 陈楚奕. 非侵入式植物可穿戴茎流传感器研究[D]. 杭州: 浙江大学,2020.
CHEN Chuyi. Study of non-invasive plant wearable sap flow sensor[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese)

[10] 杨睿. 灌溉决策方法对河西地区滴灌春玉米生长和产量的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学,2022.
YANG Rui. Effects of irrigation decision-making methods on growth and yield of drip-irrigated spring maize in the Hexi Region [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022. (in Chinese)

[11] 赵燕东,高超,张新,等. 植物水分胁迫实时在线检测方法研究进展[J]. 农业机械学报, 2016,47(7):290-300.
ZHAO Yandong, GAO Chao, ZHANG Xin, et al. Review of real-time detecting methods of water stress for plants[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(7):290-300. (in Chinese)

[12] 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 Xiping, et al. Development and application of thermal methods in measuring stem sap flow[J]. Forestry Science, 2006,42(8): 102-108. (in Chinese)

[13] BAKER J M, BAVEL C. Measurement of mass flow of water in the stems of herbaceous plants[J]. Cell Environment, 1987, 10(9): 777-782.

[14] GRANIER A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J]. Tree Physiology, 1988,3(4): 309-320.

[15] BURGESS S S O, ADAMS M A, TURNER N C,et al. An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants[J]. Tree Physiology, 2001,21(9): 589-598.

[16] JUDD L A, JACKSON B E, FDNTENO W C. Measuring root hydraulic parameters of container-grown herbaceous and woody plants using the hydraulic conductance flow meter[J]. Hortscience, 2016,51(2): 192-196.

[17] PERRY W L, LODGE D M, FEDER J L. Importance of hybridization between indigenous and nonindigenous freshwater species: an overlooked threat to North American biodiversity[J]. Systematic Biology, 2002(2):255-275.

[18] 李双,肖洪浪,王芳,等. 热平衡茎流仪测量精度及误差来源分析[J]. 中国沙漠, 2014,34(6):1544-1551.
LI Shuang, XIAO Honglang, WANG Fang, et al. Accuracy and error sources of the stem heat balance method in sap flow measurements[J]. Journal of Desert Research, 2014,34(6):1544-1551. (in Chinese)

[19] TAKAGI K, HARAZONO Y, NOGUCHI S,et al. Evaluation of the transpiration rate of lotus using the stem heat-balance method[J]. Aquatic Botany, 2006, 85(2):129-136.

[20] ČERMÁ J K, DEML M, PENKA M. A new method of sap flow rate determination in trees[J]. Biologia Plantarum, 1973, 15(3):171-178.

[21] 刘安,刘旭,黄岚,等. 基于热平衡法检测植物茎流传感器的标定[J]. 农业工程学报,2010,26(增刊2): 6-10.
LIU An, LIU Xu, HUANG Lan, et al. A calibration method for stem-flow sensor based on heat balance[J]. Transactions of the CSAE,2010,26(Supp.2): 6-10. (in Chinese)

[22] 郑彦佳,徐琳,于瑶. 光温耦合的中国温带地区旱柳花期时空格局模拟[J]. 生态学报,2020,40(17):6147-6160.
ZHENG Yanjia,XU Lin,YU Yao. Modeling spatio-temporal patterns of *Salix matsudana* flowering dates based on temperature and photoperiod in temperate zone of China[J]. Acta Ecologica Sinica,2020,40(17):6147-6160. (in Chinese)

[23] 胡瑾,高攀,陈丹艳,等. 融合暗荧光参数的茄子叶片光合速率预测模型构建[J]. 农业机械学报,2020,51(4):328-336.
HU Jin, GAO Pan, CHEN Danyan, et al. Establishment of photosynthetic rate prediction model for eggplant leaves fused with dark fluorescence parameters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(4):328-336. (in Chinese)

[24] 胡瑾,荆昊男,高攀,等. 融合黄瓜光质需求的设施光环境智能调控模型[J]. 农业机械学报,2019,50(9):329-336.
HU Jin, JING Haonan, GAO Pan, et al. Intelligent regulation model of light environment for facility cucumbers with light quality demand[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(9):329-336. (in Chinese)

[25] 田东,韦鑫化,王悦,等. 基于 MA-ARIMA-GASVR 的食用菌温室温度预测[J]. 农业工程学报,2020,36(3):190-197.
TIAN Dong, WEI Xinhua, WANG Yue, et al. Prediction of temperature in edible fungi greenhouse based on MA-ARIMA-GASVR[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(3):190-197. (in Chinese)

[26] KHUTSOANE O, ABU-MAHFOUZ A M, ISONG B. IoT devices and applications based on LoRa/LoRaWAN[C]//Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2017.

[27] RAODRIGUEZ J R, DIXON J W, ESPINOZA J R, et al. PWM regenerative rectifiers: state of the art[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(1):5-22.