

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.06.021

张庆松, 吴文娟. 基于传感器部署优化的农业温室环境低功耗监测方法 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(6): 236-247.

基于传感器部署优化的农业温室环境 低功耗监测方法

张庆松¹, 吴文娟²

1. 重庆科创职业学院 人工智能学院, 重庆 永川 402160;

2. 天津师范大学 计算机与信息工程学院, 天津 300387

摘要: 由于农业温室环境的设计模式较为多样, 对传感器监测点的部署造成了较大的影响, 导致监测结果准确度不高。为了缓解传感器部署不良的问题, 提出基于传感器部署优化的农业温室环境低功耗监测方法。通过在农业温室环境内随机部署传感器监测点, 并结合虚拟势场理论计算相邻传感器之间的虚拟力。建立部署优化的模糊规则, 通过多次求解得到传感器部署优化策略。设计传感器数据在传输过程中的低功耗传输模式, 利用传输得到的数据分析相应的农业温室环境状态。经过实践测试可知, 应用该方法得到的监测结果与实际值高度一致, 准确度较高, 满足农业温室环境管理的现实需求。

关键词: 农业温室环境; 温室环境监测; 低功耗监测; 传感器部署优化; 传感器; 监测方法

中图分类号: TP212; S625

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2025)06-0236-12

A Low Power Monitoring Method for Agricultural Greenhouse Environment Based on Sensor Deployment Optimization

ZHANG Qingsong¹, WU Wenjuan²

1. College of Artificial Intelligence and Big Data, Chongqing College of Science and Creation,
Yongchuan Chongqing 402160, China;

2. College of Computer and Information Engineering, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China

Abstract: Due to the diverse design patterns of agricultural greenhouse environments, the deployment of sensor monitoring points has been greatly affected, resulting in low accuracy of monitoring results. In order to alleviate the problem of poor sensor deployment, a low-power monitoring method for agricultural greenhouse environment based on sensor deployment optimization is proposed. By randomly deploying sensor

收稿日期: 2024-05-06

基金项目: 2023 年重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202305404); 国家重点研发计划项目(2022YFD2001700)。

作者简介: 张庆松, 副教授, 主要从事单片机技术及无线传感器技术等研究。

monitoring points in agricultural greenhouse environments and combining virtual potential field theory to calculate virtual forces between adjacent sensors, a fuzzy rule for deployment optimization is established, and the deployment optimization strategy of sensors is obtained through multiple solutions. Designed a low-power transmission mode in process of sensor data transmission, and used the transmitted data to analyze the corresponding agricultural greenhouse environment status. Through practical testing, it is known that the monitoring results obtained by applying this method were highly consistent with the actual values, with high accuracy, and meet the practical needs of agricultural greenhouse environment management.

Key words: agricultural greenhouse environment; greenhouse environment monitoring; low power monitoring; sensor deployment optimization; sensors; monitoring methods

在部分气候条件较为恶劣的地区,温室种植成为了实现农业可持续发展的重要途径。在温室中,不仅可以更加准确地把握植物生长所需的关键因素,从而缩短作物的生长周期,还有助于减少土地资源浪费,大幅度提高土地利用效率^[1]。基于诸多应用优势,温室环境的建立成为农业生产环节中备受青睐的作物种植方式。为了能够更加优化温室的基本环境,对其进行监测十分重要^[2-5]。通过精准的温室环境监测,可为种植人员提供更加高效的管理手段。对此,很多研究人员提出了温室环境的监测方法。

文献[6]提出一种基于物联网的温室监测和控制系统,通过整合多种传感器(如温度传感器、空气质量传感器等)实现对温室环境的实时监测和控制,帮助农民通过智能手机远程监控并做出决策,优化作物生长条件。尽管物联网技术为温室管理带来了便利,但在系统可靠性、传感器数据准确性、网络安全、设备维护和成本效益等方面仍是需要考虑和解决的问题。文献[7]利用物联网和图像识别技术,分析北京市 5 000 个设施温室数据,建立生产状态识别和作物品种识别模型,集成到管理平台以支持精准监管和决策,推动农业振兴。在实际应用中,对温室环境的图像采集,可能会受到光照条件及作物遮挡等因素的影响,导致难以有效地识别出图像信息,从而降低对温室环境监测的准确度。文献[8]提出一种先验知识引导深度学习的耕地非农化监测方法,通过融入先验知识的 SRAM-SegFormer 网络模型,实现对耕地中非法占用现象的精准化、自动化监测。文献[9]使用国产高分辨率遥感影像分析京津冀地区农业大棚的现状和变化,通过 ArcGIS 软件解译并提取农业大棚的位置、规模、类型及空间分布信息,对比两年数据掌握了农业大棚新增和拆除情况。然而,卫星数据的重访周期较长,对于温室环境的实时变化可能难以实现快速响应,捕捉不到突变特征,导致环境监测准确度不足。

考虑到上述文献提出的温室环境监测方法在实际应用中存在不同的弊端,监测结果的准确度未能满足预期需求,本研究结合传感器应用,提出一种基于传感器部署优化的农业温室环境低功耗监测方法,以期通过优化农业温室环境内的传感器部署策略,实现较为准确的低功耗监测过程。

1 农业温室环境低功耗监测方法设计理论基础

本研究设计的农业温室环境低功耗监测方法主要包括传感器部署优化、低功耗传输模式设计、数据分析与温室环境状态监测等方面。通过这些技术手段的综合应用,实现对农业温室环境的低功耗、高精度监测,为现代农业发展提供有力支持。

1.1 传感器部署优化

农业温室环境设计模式多样,对传感器监测点的部署造成较大影响,可能导致监测结果准确度不高。为了解决部署不良的问题,引入虚拟势场理论。该理论通过计算相邻传感器之间的虚拟力,模拟物理场中的力学现象,从而优化传感器的空间分布。在虚拟势场理论的基础上,建立部署优化的模糊规则。这些规则考虑了传感器之间的相互作用、环境因素(如温度、湿度、光照等)及作物生长需求,通过多次求解得到传感器的部署优化策略。

1.2 低功耗传输模式设计

为了实现传感器数据的低功耗传输,选择适当的低功耗通信技术,如 LoRaWAN、Narrowband IoT

(NB-IoT)等。这些技术具有较远的传输距离、较低的功耗和较好的穿透能力,适用于农业温室环境监测。

传感器在非工作状态下进入睡眠模式,以降低功耗。通过合理安排传感器唤醒时间和频率,在保证数据实时性的同时降低功耗。

在数据传输过程中,采用数据压缩算法、数据筛选算法等优化方法,减少传输数据大小和频率,从而降低功耗。

1.3 数据分析与温室环境状态监测

通过低功耗传输模式获取传感器数据,实时反映农业温室环境的温湿度、光照等参数,并对这些数据进行统计分析,了解温室环境的实时状态,为作物生长提供有力支持。

基于收集的数据,建立温室环境状态监测系统。该系统能够实时监测温室环境的各项参数,并通过预设阈值或模型判断环境状态是否适宜作物生长,一旦环境参数超出预设范围,系统将自动发出警报,提醒农户及时采取措施。

2 农业温室环境低功耗监测方法设计

基于以上理论基础,为了实现农业温室低功耗监测,本研究通过随机部署传感器并应用虚拟势场理论优化部署位置,同时设计低功耗数据传输模式提高监测准确性和效率,具体框架如图 1 所示。

传感器网络层负责实时采集环境参数,并将数据发送给中央控制系统;中央控制系统接收数据并进行处理、分析和存储,同时与部署优化模块和用户交互层进行交互;部署优化模块根据温室环境和传感器网络布局的信息,计算优化后的传感器节点部署策略;用户交互层则为用户提供实时监测结果和决策支持信息。

2.1 基于传感器部署优化定义温室环境监测点

本研究为了确保有效获取农业温室环境的各个部位及各个项目的传感器监测数据,对环境内的传感器部署策略进行了优化,得到了优化后的温室环境监测点。

在不考虑农业温室环境区域边界的情况下,将多个传感器随机布置在监测区域内^[10]。计算此时传感器的初始监测覆盖情况,具体方法如公式(1)所示。

$$\lambda_0 = 1 - \left(1 - \frac{\beta R^2}{A}\right)^N \quad (1)$$

式中: λ_0 表示传感器的初始覆盖率, N 表示随机部署策略下的传感器测点数量, β 表示传感器感知的偏移角度, R 表示传感器设备的感知半径, A 表示农业温室环境的总监测面积。

在此基础上引入虚拟势场理论,结合传感器部署的初始覆盖率,构建每个传感器测点的虚拟势场。将每个传感器节点视为带电粒子,并且带电量完全一致,则相应的虚拟势场构建如图 2 所示^[11-12]。

根据图 2 所示的传感器部署虚拟势场,计算两个传感器部署节点之间的虚拟力,方法如公式(2)所示。

$$F_{12} = -k \frac{1}{d_{12}^2} \frac{\lambda_0}{\|F_1 - F_2\|} \quad (2)$$

式中: F_{12} 表示传感器部署节点 1 和 2 之间的虚拟力, k 表示虚拟力系数, d_{12} 表示传感器部署节点 1 和 2 之间的间距, F_1 和 F_2 分别表示传感器部署节点 1 和 2 向势场外方向的虚拟力大小。

将计算所得的虚拟力结果与传感器的初始部署策略耦合,以合并映射的方法构建相应的模糊集,进而引入模糊逻辑规则寻优传感器的部署策略^[13-14]。其中,模糊规则隶属度函数的定义方法如公式(3)所示。

$$H = \text{SUP} \frac{[\mu(F_{12}) - \mu(\vec{F})]}{T} \quad (3)$$

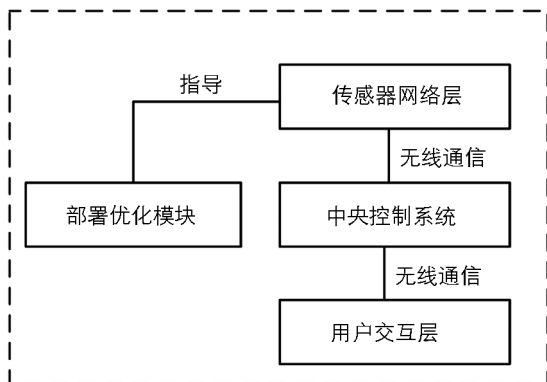


图 1 本研究方法框架

式中: H 表示模糊规则隶属度函数, $\vec{F}$ 表示传感器部署节点的势场虚拟力均值, μ 表示虚拟力模糊度, T 表示模糊集合质心, SUP 表示模糊集合的上确界。

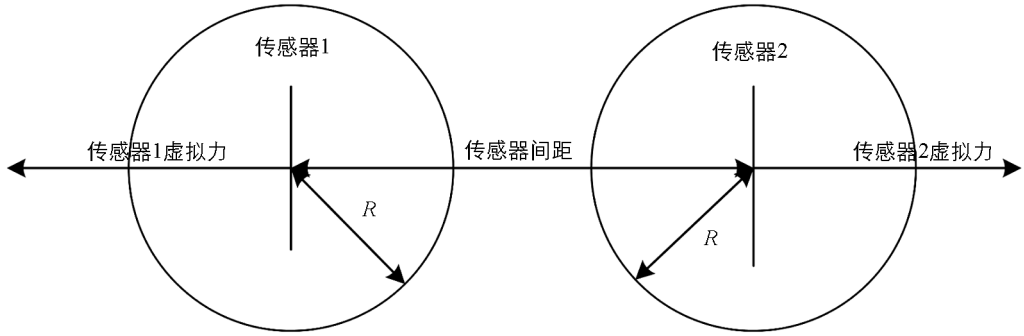


图 2 传感器部署虚拟势场

根据模糊集合的隶属度函数, 将模糊集合中的模糊点集作最小和乘积运算^[15], 以此求解传感器部署的最优策略, 求解方法如公式(4)所示。

$$y(i) = \rho_0 \lambda_0 + f \frac{H(\vec{F}_0)}{H(\vec{F}_n)} \exp\left(-\frac{1}{\|\vec{F}\|}\right) \quad (4)$$

式中: $y(i)$ 表示相应的部署优化策略, i 表示随机的传感器部署节点, ρ_0 表示初始部署策略的传感器节点密度, $H(\vec{F}_0)$ 和 $H(\vec{F}_n)$ 分别表示初次和第 n 次求解的模糊隶属度函数值, f 表示模糊求解的最大移动步长, $\|\vec{F}\|$ 表示虚拟力的模长。

根据模糊求解输出的传感器部署优化策略, 对优化后的覆盖率进行判定^[16-17]。当覆盖率能够监测温室环境的主要区域时, 输出为最终的优化策略。

通过上述步骤, 完成对传感器部署策略的优化, 并在相应的节点定义农业温室环境监测的测点。

2.2 低功耗传感器设计

传感器在持续监测环境参数的过程中会消耗大量能量, 特别是在温室这样需要 24 h 监测的环境中尤甚。长时间运行可能导致传感器电量迅速耗尽, 影响监测的连续性和稳定性。低功耗设计能够延长传感器使用寿命, 减少能源浪费, 保证监测的持续性^[18-20]。基于此, 本研究对农业温室环境内传感器数据的传输方法进行设计, 实现了低功耗传感器数据传输。

在传感器数据传输过程中, 不同传输阶段的功耗情况并不一致^[21]。解析每个阶段的传感器功耗, 如图 3 所示。

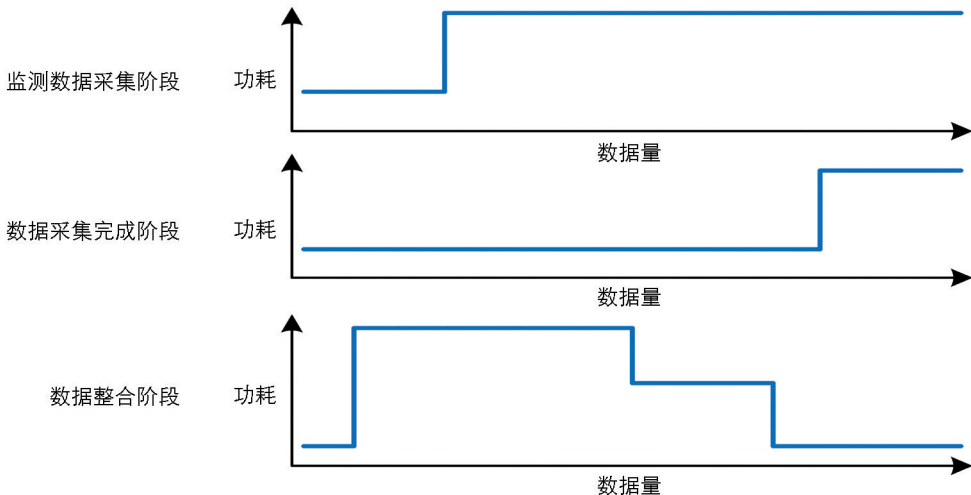


图 3 传感器阶段功耗解析

由图 3 可知, 在传感器采集环境监测数据阶段及数据采集完成阶段的功耗值均较为稳定, 仅存在一个

波动点,而传感器数据整合阶段则不太稳定。本研究主要面向传感器数据整合阶段的功耗进行降低设计。计算传感器数据的有效负载符号数,如公式(5)所示。

$$p = y(i) \max \left(c \frac{S \cdot L}{t} \right)^{\delta} \quad (5)$$

式中: p 表示传感器数据的有效负载符号数, c 表示符号周期, t 表示传感器数据的前导码时间, S 表示数据字节数, L 表示数据报头长度, δ 表示扩频因子。

以公式(5)的计算结果定义传感器数据的前导码及报头符号数量。定义传感器数据传输的数据包格式如图4所示^[22]。

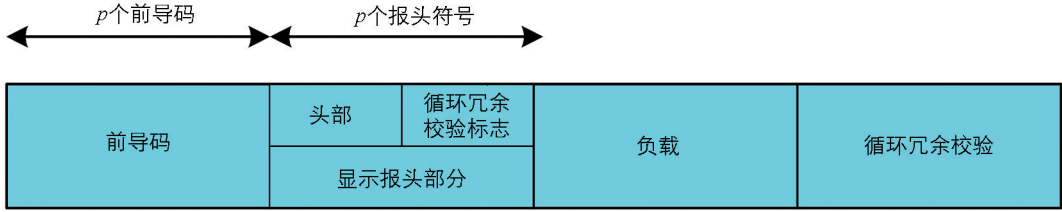


图4 传感器数据包格式

根据图4所示的数据包格式,本研究将其中的前导码部分进行多段分割处理。这一过程前导码分割阈值的计算如公式(6)所示。

$$\epsilon = (p + l)t \quad (6)$$

式中: ϵ 表示前导码分割阈值, l 表示传感器数据的传输距离。

通过对传感器数据前导码进行分割,以多组前导码引领传感器采集的监测数据包,简化数据传输格式。

通过上述步骤,实现对农业温室环境传感器数据的低功耗传输。

2.3 结合传感数据分析农业温室环境状态

低功耗设计往往意味着传感器在数据采集、传输和处理方面的能力有所限制,这可能导致采集到的数据不够全面或准确。此外,低功耗设计还可能影响传感器的响应速度和灵敏度,使其在某些极端环境条件下无法及时捕捉环境变化。因此,为了对农业生产提供更加准确、可靠和科学的决策支持,分析传输得到的传感器数据,并对农业温室环境实时状态进行监测^[23]。

由于传感器监测数据中包含少量的不确定性数据,本研究采用熵衡量方法处理传感器数据。将传输的传感器数据视为一个离散随机变量,则该数据的不确定性熵可以按照公式(7)所示的方法计算^[24]。

$$G(x) = - \sum_{x=1}^p P(x) \log_2 P(x) \quad (7)$$

式中: x 表示传输的温室环境传感器监测数据, $G(x)$ 表示该数据的不确定性熵, $P(x)$ 表示该数据的离散概率。

采用公式(7)的计算结果对该数据所对应的数据包进行编码,并以此求解数据包中的平均位数。在此基础上,利用数据不确定性熵的对称性计算该数据包中的连续熵,如公式(8)所示^[25-26]。

$$\hat{G}(x) = - \int_x P(x) \log_2 (1 - P_0) dx \quad (8)$$

式中: $\hat{G}(x)$ 表示含传感器数据 x 的数据包的连续熵, P_0 表示数据熵的置信概率。

通过上述步骤对传感器监测中的不确定性数据进行处理。在此基础上,结合处理后的传感器监测数据分析相应的农业温室环境状态。

计算传感器数据相应的温室环境指数。本研究将同一类型传感器的监测数据整合,以其在同一时间节点下的均值计算农业温室环境的监测指数,具体的计算方法如公式(9)所示。

$$\alpha(\tilde{t}) = Q \exp \left(\frac{\hat{G}(x) - \bar{G}(t)}{m^2} \right)^{\theta} \quad (9)$$

式中： $\hat{t}$ 表示监测时间， $\alpha(\hat{t})$ 表示相应时间点的农业温室环境监测指数， Q 表示监测项目的常量因子， $\overline{G}(t)$ 表示该时间点下所有同类型传感器的监测数据连续熵均值， m 表示在优化的传感器部署策略下，同类型传感器的数量， θ 表示监测项目的环境概率系数。

根据公式(9)的计算结果，分析得出传感器监测数据所适应的农业温室环境状态。
通过上述步骤，完成基于传感器部署优化的农业温室环境低功耗监测方法的研究设计。

3 农业温室环境监测实践

3.1 农业温室环境

本次实验于农业基地中开展，该农业基地包含 5 座日光温室，整体走向为东西走向，相邻温室的间隔距离约为 10 m，如图 5a 所示。

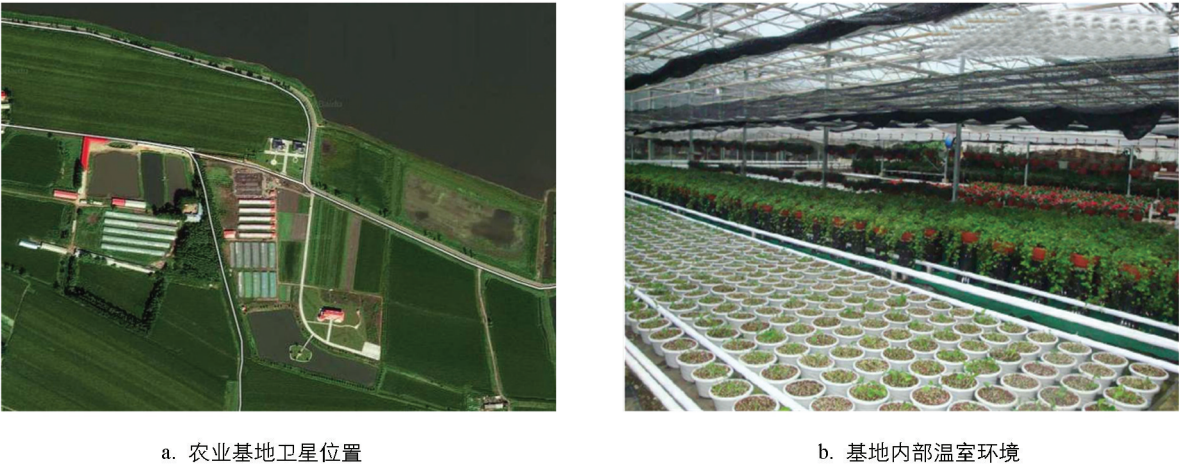


图 5 农业温室环境

本次实验选用最北端的日光温室作为环境监测对象，其内部环境如图 5b 所示。所选用的日光温室东西长度平均约为 60 m，南北跨度约为 8 m。其余的农业温室环境参数如表 1 所示。

表 1 农业温室环境参数

序号	项目	环境参数
1	北墙高度/m	2.7
2	北墙后坡仰角度数/(°)	36
3	砖墙	12
	北墙结构/cm 苯板	5
	砖墙	37
4	北墙后窗数量/个	6
5	北墙后窗尺寸/cm	60×60
6	温室环境最高点/m	3.8
7	拱梁间距/m	1
8	侧窗下沿间距/m	0.2
9	侧窗最大开窗幅度/m	0.6
10	天窗数量/个	6
11	天窗最大开窗幅度/m	1

获取该农业基地所处地区的历史气象数据信息，分析实验区域的外环境状况。由分析可知，该区域属温带大陆性季风气候，冬夏两季的平均温差较大，分别约为 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。实验区域在夏季时温热湿润多雨，冬季则降雨较少，年平均降雨量为 762.416 mm ，日照率为 48.7% 。夏季平均风速约为 2.9 m/s 、冬季平均风速约为 3.6 m/s 。

在上述环境下，设计本次农业温室环境的监测实验。

3.2 实验仪器设备

根据本次实验的农业温室环境监测需求，分别选用不同类型的传感器型号。

选用盛思锐贸易(深圳)有限公司生产的 SHT40I-AD1F 型号温湿度传感器，该型号传感器利用 CMOSens ©技术能够获取复杂环境下的温湿度数据信息。选用武汉中科能慧科技发展有限公司生产的 NHZD10 型号光照传感器，该型号传感器采用进口专用光照度传感核心，具有较强的抗外界干扰能力。选用山东仁科测控技术有限公司生产的 RS-WS- *-TR-1 型号土壤温度水分传感器，该型号传感器以土壤实际烘干称质量标定的方法得到相应的监测数据。选用深圳市子元工业技术有限公司生产的 ZY500 二氧化碳传感器，该型号传感器利用热传导原理获取环境中的二氧化碳浓度数据，结合电磁兼容的电路设计，增强了传感器的抗干扰能力。

上述实验选用的各类型传感器的主要技术参数如表 2 所示。

表 2 实验选用传感器的主要技术参数

传感器类型	参数项	技术参数
温湿度传感器	操作相对湿度范围	0~100%
	响应时间	4 s
	典型温度精度	0.2 °C
	典型相对湿度精度	2%
光照传感器	线性度	±2%
	量程	0~200 klx
	功耗	≤15 mW
	精确度	±5%
土壤温度水分传感器	工作温度	-40 °C~85 °C
	土壤水分分辨率	0.1%
	土壤温度分辨率	0.1 °C
	功耗	0.5 W
二氧化碳传感器	重复度	≤2%
	精度	≤±1%~3%
	零点漂移	≤±1%
	分辨率	0.1%
	恢复时间	≤10 s

表中选用的传感器根据本次实验需求分别准备不同的数量。

3.3 实验步骤设计

完成上述准备后，按照下述步骤开展本次农业温室环境的监测实验：

步骤 1：环境分析与准备

选定北端日光温室作为环境监测对象，了解其内部环境布局 and 结构特点。根据表 1 温室环境参数，评估温室内的潜在监测需求。

步骤 2：传感器选择与布置

根据实验需求选择表 2 的传感器，并设计传感器部署方案，确保传感器能够覆盖温室内的关键区域。

步骤 3：数据采集系统搭建

建立数据采集系统，将传感器与数据采集器连接，确保数据能够实时传输和记录。对数据采集系统进行校准和测试，确保数据的准确性和可靠性。

步骤 4：数据监测与记录

启动数据采集系统，开始实时监测温室内的环境参数。记录传感器采集数据，并定时保存数据，以备后续分析使用。

步骤 5：数据分析与结果展示

将分析结果以图表、报告等形式进行展示，方便相关人员了解温室环境状况。

3.4 农业温室环境监测

在该农业温室环境下，采用本研究方法对其进行短时间的监测，测试时长设计为 24 h。根据农业温室环境结构，采用本研究方法优化 4 个类型传感器的部署方式。优化后，传感器部署的测点分布情况如图 6 所示。

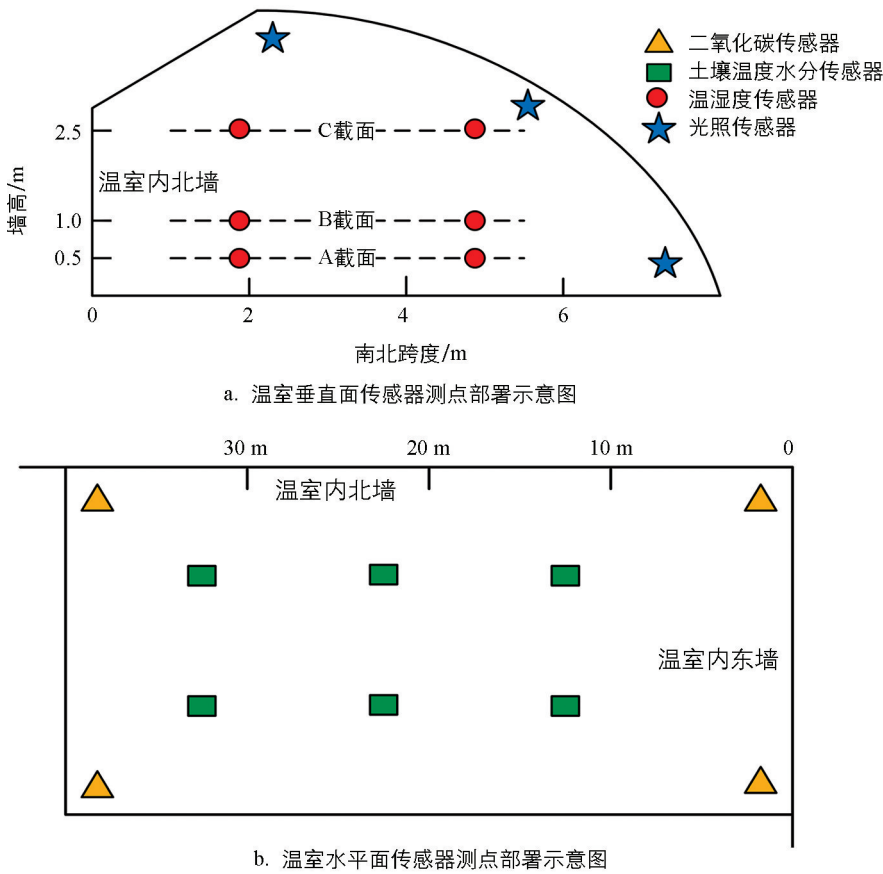


图 6 传感器部署优化测点

根据不同类型传感器在实际应用中的监测目标，本研究将其部署点位优化在温室环境中的不同点位。其中，土壤温度水分传感器平均分布在温室地面的点位；温湿度传感器则在其上方监测温室中的空气数据；二氧化碳传感器部署在温室环境中的 4 个角点，基于二氧化碳较空气质量大的原理，放置于地面上进行监测；光照传感器的部署则根据不同高度下温室光照强度不同设置 3 个高度的部署点位。利用优化部署传感器设备获取 24 h 内的监测数据，并采用本研究方法对其预处理与状态参数进行分析。

温室环境指数是一个综合性的指标，用于量化评估农业温室内的环境条件。在本研究中，该指数通过

整合同一类型传感器在同一时间节点下的监测数据,并计算其均值获得,如公式(9)所示。根据公式(9)可以得出一个能够反映温室整体环境状况的数值,该指数不仅可以帮助农户及时了解温室内的环境条件,还可以为科学研究和决策提供有力支持。经本研究方法处理及分析后,得到该时段农业温室环境的监测结果,如图 7 所示。

由图 7 可知,在本次监测时段的农业温室环境中,展现出的各类型监测指数均存在一定的变化。根据本研究的监测,农业温室环境二氧化碳指数呈现出时间段形式的规律变化,每天 0—6 时以及 12—18 时的二氧化碳指数较高,说明在该时段温室环境中种植作物的光合作用较弱,释放二氧化碳较多,其余时段则相反。与之相应的,监测所得的温室环境光照指数则在同样时段内呈现出相反的变化规律,说明在该时段内温室环境中调控的光照强度以满足作物生长需求为目标,在作物光合作用较强时相应地增加了光照强度,规律地调节温室环境的光照。监测所得的温室环境空气温湿度指数则较为恒定,说明该温室能够为农作物生长设置较为稳定的生长环境。在监测时段中,温室土壤温湿度指数波动幅度较大,出现了多次急剧下降又急剧上升的变化状态,说明作物在生长过程中汲取了大量的土壤水分,又通过温室中水分浇灌设备较为快速地完成了土壤水分补充,满足作物生长需求。

将得到的监测结果与本次实验时段内农业温室环境调控的参数变化情况对比可知,本研究监测的各项数据与调控数据比较一致。由此可见,本研究方法能够较为有效地对农业温室环境进行监测。

3.5 测试结果分析

为了进一步检验本研究在实践应用中的有效性,分别采用文献[6]、文献[7]及文献[8]的温室环境监测方法为对照组设计监测有效性对比实验,并以监测数据的偏离度为指标分析不同监测方法的有效性。为了减少对比实验结果的误差,设计 15 d 的对比监测实验,且每组中农业温室环境均保持一致,确保实验变量的唯一性。每个轮次实验的监测时长均设置为 24 h。

监测覆盖范围可以衡量不同监测系统能够覆盖的农业温室环境范围。实验时,首先测试本研究方法、文献[6]方法、文献[7]方法以及文献[8]方法的监测覆盖范围,结果如图 8 所示。

由图 8 可知,本研究方法表现出最高的覆盖范围,达到了 95%,证明了本研究提出的基于传感器部署优化的方法在提升监测覆盖范围方面的有效性。文献[6]方法和文献[8]方法虽然也达到了较高的覆盖范围,但均低于本研究方法,表明在相同条件下本研究方法能够更有效地部署传感器,从而实现对农业温室环境更全面的监测。文献[7]方法的覆盖范围最低,仅为 75%,可能是因为传感器部署策略不够优化,导致部分区域未能得到有效监测。

经过多轮次的对比测试,得到不同温室环境监测方法的对比指标,结果如图 9 所示。

经过多轮次的温室环境监测对比实验后,得到如图 9 所示的监测数据偏离度结果。经分析可知,文献[7]及文献[8]方法所表现出的监测数据偏离度较为接近,但在 0—12 时的时段内文献[8]方法监测结果的数据偏离度略低于文献[7]方法,说明该方法更适用于在凌晨至中午时段的温室环境监测。文献[6]方法则与文献[8]方法相反,在 12—24 时的时段内表现出了更低的数据偏离度,说明该方法更适用于下午及深夜时段的温室环境监测。本研究方法在全天 24 h 的各个时间段均呈现出了更低的数据偏离度,说明本研究方法不仅适用时段更长,并且监测结果的准确度更高。

为了进一步验证本研究方法在农业温室环境监测方面的性能,以监测功耗和监测时长为指标进行实

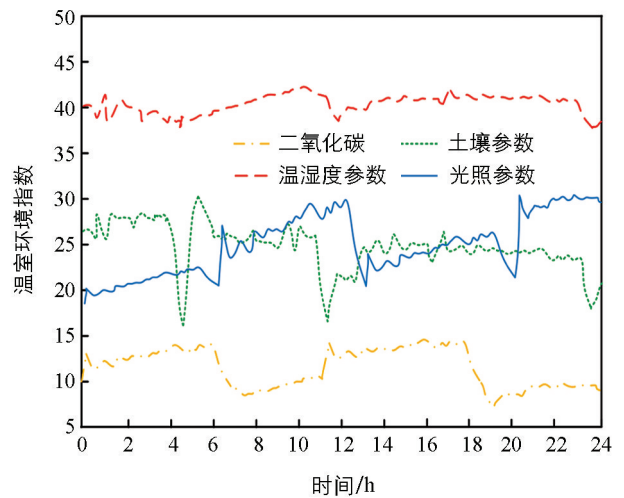


图 7 农业温室环境监测指数

验。其中，监测功耗用于衡量监测方法在运行过程中的能耗情况。低功耗的监测方法能够延长设备使用寿命，减少能源成本并提高可靠性。监测时长反映了监测方法能够持续工作的时间长度。更长的监测时长意味着对应方法能够提供更持久、更稳定的监测服务，减少因设备频繁更换或充电造成的中断。本研究基于传感器部署优化的农业温室环境低功耗监测方法、文献[2]、文献[3]及文献[4]监测方法，实验结果如表 3 所示。

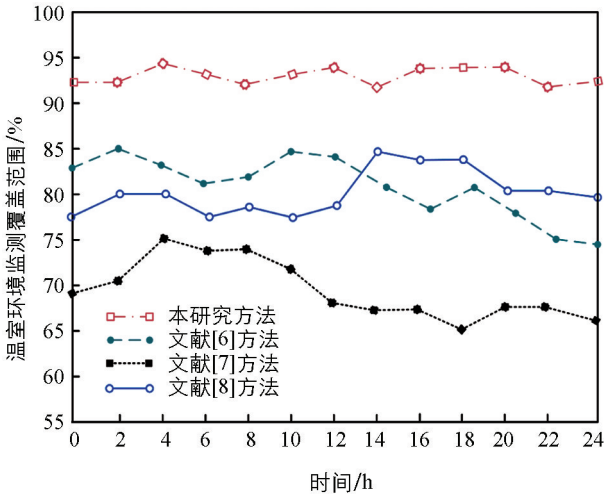


图 8 温室环境监测覆盖范围对比

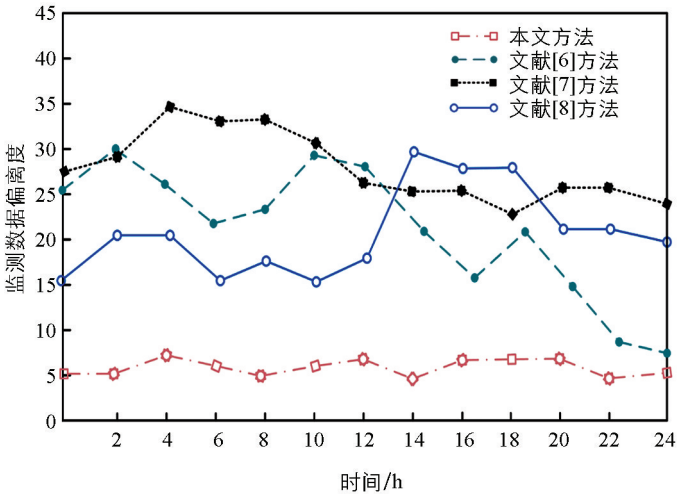


图 9 温室环境监测有效性对比

表 3 监测功耗和监测时长分析

监测方法	监测功耗/mW	监测时长/h	监测方法	监测功耗/mW	监测时长/h
本研究方法	100	1 000	文献[3]方法	120	900
文献[2]方法	150	800	文献[4]方法	130	750

由表 3 可知，本研究方法在功耗方面表现最佳，为 100 mW，低于其他 3 种方法，表明本研究方法在节能方面具有优势，能够有效降低能源消耗。文献[2]方法的功耗最高，达到 150 mW；文献[3]方法和文献[4]方法的功耗介于本研究方法和文献[2]方法之间，分别为 120 mW 和 130 mW。本研究方法的监测时长最长，达到 1 000 h，显示出良好的持久性，得益于低功耗设计和优化的传感器部署策略。文献[3]方法的监测时长次之，为 900 h；文献[2]方法和文献[4]方法监测时长相对较短，分别为 800 h 和 750 h。本研究方法在监测功耗和监测时长方面均表现出较大的优势，应用本研究方法有助于降低能源消耗，延长设备使用寿命，并为农业温室环境提供稳定、持久的监测服务。

考虑到本研究设计以低功耗为目标的农业温室环境监测方法，主要使用了虚拟势场和模糊规则两种方法。为了验证本研究方法的有效性，判断虚拟势场强度和模糊规则覆盖率两个关键因素对监测效果的影响。其中，虚拟势场强度用来描述传感器之间的相互作用力大小，可以反映出传感器网络的紧密程度和平衡性。模糊规则覆盖率指建立的部署优化模糊规则在实际传感器部署中的适用程度和有效性，可以评价规则对传感器部署的指导作用。实验分为两组进行，一组仅考虑虚拟势场强度的影响，另一组则同时考虑虚拟势场强度和模糊规则覆盖率的影响。通过对比两组实验结果，评估模糊规则在提升传感器部署优化中的重要作用，结果如表 4 所示。

由表 4A 组数据可以看出，随着虚拟势场强度增加，监测结果的准确度也在逐步提高，说明虚拟势场强度增强有助于提升传感器部署的合理性，从而提高监测的准确度。在稳定性方面，强虚拟势场强度下的实验组(A2 和 A3)表现出更高的稳定性，说明虚拟势场强度增强有助于减少监测结果波动。在功耗方面，随着虚拟势场强度增加，平均功耗也略有上升，这是因为更强的虚拟势场需要更多能量来维持和

优化传感器的部署。

对比 A、B、C 这 3 组数据,可以发现在相同虚拟势场强度下,模糊规则覆盖率提高有助于提升监测结果的准确度和稳定性,证明了模糊规则在优化传感器部署中的有效性。特别是在弱虚拟势场强度下(C 组),模糊规则覆盖率提升对准确度和稳定性的改善效果更为显著,说明模糊规则在不良部署条件下具有更强的鲁棒性。

对照组 D1 数据表明,在没有虚拟势场和模糊规则优化的情况下监测结果准确度较低,稳定性差,进一步证明了本研究方法中虚拟势场强度和模糊规则覆盖率在提升监测效果方面的重要作用。综合 A、B、C 这 3 组数据可以看出,在虚拟势场强度和模糊规则覆盖率都较高的情况下(如 A3),监测结果的准确度和稳定性达到最佳,同时功耗也在可接受范围内,为本研究方法的实际应用提供了有力的支持。

综上所述,本研究内容在农业温室环境的监测实践中表现出了更高的有效性,具备更好的应用前景。

表 4 虚拟势场强度和模糊规则覆盖率对监测效果的影响

实验组	虚拟势场强度	模糊规则覆盖率	准确度	稳定性	平均功耗/W
A1	强	低	0.85	中等	1.5
A2	强	中	0.90	高	1.6
A3	强	高	0.95	高	1.7
B1	中	低	0.78	低	1.3
B2	中	中	0.82	中等	1.4
B3	中	高	0.88	高	1.5
C1	弱	低	0.70	低	1.2
C2	弱	中	0.75	中等	1.3
C3	弱	高	0.80	高	1.4
D1	对照	无	0.65	低	1.1

4 结语

本研究主要设计了以低功耗为目标的农业温室环境监测方法,通过随机部署传感器并结合虚拟势场理论进行部署优化,有效解决了农业温室环境设计中模式多样性导致监测准确度不高的问题。经过实验测试可知,本研究方法通过优化传感器部署策略不仅降低了监测所需的功耗值,还有效提高了相应的监测准确度。因此,应用该方法得到的监测结果与实际值高度一致,显著提高了监测准确度,满足了农业温室环境管理的现实需求。

参考文献:

[1] 吴传程,赵春江,吴华瑞,等. 大型蔬菜温室无线监测网络覆盖优化方法研究 [J]. 中国农机化学报, 2021, 42(4): 49-54.

[2] 沈艺敏. 基于物联网的温室农业种植环境监控系统研究 [J]. 农机化研究, 2022, 44(6): 209-213.

[3] 李燕. 云计算下的温室监控系统应用布局 [J]. 农机化研究, 2023, 45(1): 229-233.

[4] 胡海锋. 基于大数据分析的温室管控系统优化研究 [J]. 农机化研究, 2023, 45(7): 214-218.

[5] 范茂,杨学亭,张健,等. 不同水稻品种对重庆地区稻田温室气体排放的影响 [J]. 南方农业学报, 2025, 56(1): 204-213.

[6] DHARANI M, BHARATHI M, PRAVEENA K, et al. Intelligent IoT-Based Greenhouse Monitoring and Control System [J]. I-Manager's Journal on Electronics Engineering, 2022, 12(4): 9-14.

[7] 肖帅,郭嘉,芦天罡,等. 基于图像识别技术的北京市设施温室动态监测研究 [J]. 农业工程, 2023, 13(10): 21-26.

[8] 谭敏, 林惠晶, 郝明. 先验知识引导深度学习的耕地范围建筑物和大棚房监测方法 [J]. 地球信息科学学报, 2023, 25(11): 2293-2302.

[9] 窦雅娟. 基于国产卫星数据的京津冀地区农业大棚遥感监测 [J]. 智慧农业导刊, 2023, 3(13): 1-4.

[10] 鄂高阳, 韩芳, 秦秉希, 等. 遥感技术在农业资源与土壤环境综合监测上的应用 [J]. 山东农业科学, 2024, 56(3): 163-170.

[11] 杨妮, 邓树林, 樊艳红, 等. 叶绿素荧光遥感反演及其农业监测应用研究进展 [J]. 江苏农业科学, 2023, 51(14): 1-13.

[12] 李强, 李维刚, 周森, 等. 区块链存储与加密技术在农业生态及环境监测中的应用 [J]. 四川农业与农机, 2021(5): 64-66.

[13] 马丁, 封志宏, 秦益文. 基于能量均衡化的通信节点区域优化仿真 [J]. 计算机仿真, 2022, 39(4): 193-196.

[14] 陈婷婷, 赵世忠. 多传感器信息融合模糊控制模型设计 [J]. 传感技术学报, 2023, 36(6): 911-915.

[15] 张志鹏, 符栋伟, 凌明. 基于动态占空比采样的低功耗奶牛运动监测耳标设计 [J]. 电子器件, 2022, 45(6): 1510-1516.

[16] 冯昭阳, 武泽慧, 吕卓, 等. 基于能量优化的 Windows 模糊测试系统 [J]. 计算机工程与设计, 2023, 44(10): 2926-2934.

[17] 卢哲钰, 刘维, 翁思扬, 等. 基于模糊测试生成多样化的数据库隔离级别测试案例 [J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2023(5): 51-64.

[18] 刘羽飞, 何勇, 刘飞, 等. 农业传感器技术在我国的应用和市场: 现状与未来展望 [J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2023, 49(3): 293-304.

[19] 林甄, 谢金冶, 田硕, 等. 基于农业物联网的无线通信技术实验研究 [J]. 农机化研究, 2022, 44(6): 188-193.

[20] 李洪兵, 罗洋, 张颖, 等. 基于模糊 PID 控制的 NB-IoT 果蔬农业物联网系统设计与试验 [J]. 中国农机化学报, 2023, 44(1): 162-171.

[21] 陈新岗, 赵蕊, 马志鹏, 等. 输电线低功耗监测设备混合供电电源设计 [J]. 中国测试, 2022, 48(10): 109-116.

[22] 赵岩, 张永成, 康军, 等. 一种低功耗的 NB-IoT 温湿度采集器设计 [J]. 中国测试, 2022, 48(9): 140-144, 157.

[23] 洗进, 洗允廷. 基于 STM32 的智慧农业大棚系统设计 [J]. 现代电子技术, 2023, 46(4): 70-74.

[24] 王琳, 吕萍, 贾峤. 基于熵值法的农业经济高质量发展评价研究 ——以辽宁省为例 [J]. 农业经济, 2023(2): 3-6.

[25] 刘作鹏. 极化天线方式下的农业无线监测设备应用研究 [J]. 农机化研究, 2023, 45(9): 193-196.

[26] 赵建豪, 宋华, 南新元. 室内障碍环境下空气质量监测异构 WSN 部署 [J]. 河北科技大学学报, 2024, 45(1): 91-100.

责任编辑 夏娟

周梦媛

