

# 智慧农业中自动化灌溉技术及其应用实践

李官平<sup>1</sup> 张黔川<sup>1</sup> 王永涛<sup>2</sup> 张家美<sup>1</sup>

1. 贵州省山地农业机械研究所, 贵州 贵阳 550003

2. 贵州省水利科学研究院, 贵州 贵阳 550003

**摘要:**研究了自动化灌溉技术在智慧农业生产中的重要作用,结果表明,自动化灌溉系统能够精确检测作物需水情况,实现精准灌溉,从而提高农业用水效率,降低人力成本。该系统具有诸多优势,如提高灌溉效率、节省劳动力成本、实现遥控和无人值守、多点精准施肥等。通过实际应用案例进一步证明了其在提升农作物增产与经济效益方面的显著效果,而且随着相关技术的不断发展,自动化灌溉系统有望得到更广泛的应用,为智慧农业建设提供有力支撑。

**关键词:**智慧农业;自动化灌溉;精准农业

**中图分类号:**S275

**DOI:** 10.3969/j.issn.2097-065X.2024.06.025

## 1 智慧农业概念及范畴

智慧农业是建立在物联网、云计算、大数据、人工智能等现代信息技术基础上的现代农业生产与经营模式。它通过构建涵盖田间地头、存储运输、加工流通等各环节的农业物联网,实现作物生长环境的智能监控、生产过程的精确控制,以及产品的可追溯和质量管控。例如,植物生长期可采用无人机巡田获取多光谱图像,结合卫星数据、气象数据以及土壤监测数据,运用深度学习算法建立作物生长模型,实时监测作物生长状况,预测产量水平和病虫害发生情况<sup>[1]</sup>。在灌溉环节,可基于作物模型算法设定灌溉方案,利用水肥一体化技术实现精准施肥灌溉,节约用水量30%以上。在仓储环节,可利用无线射频技术对库存量、温湿度、有害气体浓度进行智能监控,保障粮食安全。在产品溯源环节,利用区块链技术将种植、加工、流通等数据永久保存,使得从农田到餐桌的全链条信息透明可追溯。

## 2 自动化灌溉技术的原理及优势

自动化灌溉系统通过传感器、执行器、控制器实现对灌溉过程的智能调控,不需要人工参与。系统首先通过分布在田间的土壤湿度传感器(测量范围0~100%RH,精度±2%RH)、气象站(测量温度、湿度、风速、光照等参数)等设备实时监测作物的水分需求,这些传感器通过无线网络(通信频率2.4GHz,传输距离>500m)将检测数据传输到中央控制器。控制器根据作物生长模型和水分监测数据,运用控制算法(如PID控制)计算出灌溉量(流量范围0~20m<sup>3</sup>/h,精度±2%)、灌溉时间等参数,然后

通过执行器(如消力阀、水泵、过滤系统等)打开/关闭水泵、电磁阀等设备实现精确灌溉<sup>[2]</sup>。除基于土壤水分的闭环控制外,某些系统还结合气象预报、作物生长模型以及多光谱图像分析(分辨率<10cm)预测作物需水量,实现灌溉的预判控制,进一步提高灌溉精准度。与传统人工灌溉相比,自动化灌溉系统具有诸多优势:(1)提高灌溉效率,典型系统可将灌溉用水量降低30%以上;(2)节省劳动力成本;(3)可实现遥控和无人值守,适应劳动力紧缺的情况;(4)可实现多点精准施肥;(5)可根据不同品种和生育期精确调整灌溉方案(表1)。因此,自动化灌溉系统是实现精准灌溉的重要手段,在智慧农业中有广阔的应用前景。

表1 自动化灌溉与传统灌溉的主要技术指标

参数	自动化灌溉	传统灌溉
灌溉精准度	±5%	±15%
劳动强度	可无人值守	需要人工参与
用水效率	提高20%~30%	—
劳动成本	降低60%以上	—
适应性	多个作物可定制方案	低

## 3 智慧农业中涉及的自动化灌溉技术要点

### 3.1 土壤水分精确检测

智慧农业中的自动化灌溉技术应用要点之一是实现土壤水分的精确检测。这需要搭建无线传感器网络,在田间部署含水量传感器、温湿度传感器等,实时监测0~100cm土层的水分和温度变化。这些传感器典型采用433MHz的无线通信模块,传输距离可达500m;测量土壤湿度的范围为0~100%RH,精度±1%RH;土壤温度测量范围-20~

60℃,精度±0.5℃。传感器通过 ZigBee、LoRa、NB-IoT 等无线协议将数据发送到中央数据库,并利用 GPU 服务器构建高精度的三维土壤水分分布模型,模拟不同深度不同位置的土壤含水量,结果精度可达±3%。除点状检测外,还可以通过电磁减幅技术、时域反射法等实现大范围的土壤含水量立体成像,生成分辨率<10 cm 的高清土壤水分热力图。另外,为提高灌溉的主动性,可以预设置理想土壤水分的阈值曲线,当实测水分与阈值产生偏差时,触发补水操作<sup>[3]</sup>。

以茶园智慧灌溉系统为例,系统包含末梢数据采集层、网络传输层、数据处理层、精准控制层 4 部分。数据采集层在茶园内部署土壤水分传感器(5~100 cm 深度,精度±1% RH)、环境温湿度探针(±0.1℃)等,结合无人机航拍分析植株水分需求;LoRa 模块(频率 433 MHz,1.6 km 覆盖范围)将数据实时传至云平台;后端服务器构建高维度茶树生长模型,预测未来两周内的水分消耗曲线;执行层的电子阀门、水泵根据控制信号调节每株茶树的灌溉水量(0.1~10 L/h)。该系统实现精准的茶园土壤水分监测与恒定管理,较人工灌溉节水超 30%,产量提高约 20%<sup>[2]</sup>。

### 3.2 变频调控灌溉量

智慧农业中的自动化灌溉系统还需要实现对灌溉水量的精确调控,特别是变频调节,适应作物不同生长阶段的水分需求,这需要水泵变频系统的支撑<sup>[4]</sup>。典型的变频水泵系统包含水泵本体(最大流量 30 m<sup>3</sup>/h)、变频调速装置(输入 380 V/50Hz,输出 0~380 V/0~100 Hz)、流量传感器(测量范围 1~30 m<sup>3</sup>/h,精度级别 0.2)PLC 程序控制器等组件。系统通过实时监测土壤水分反馈,计算灌区内作物总体需水量,再利用 PID 闭环控制算法精确输出水泵的运行频率,从而调节水泵转速与水流量,实现对灌溉量的变频精确控制。案例测试表明<sup>[1]</sup>,相对于定频水泵(频率 50 Hz),该系统可以将单次灌溉用水量降低 10%~30%。另外,结合作物生长模型,可以实现灌溉水量的增量控制。例如小麦分药期至返青期需要大量水分,灌溉系统在这个阶段以 50 Hz 高转速运转;而穗肥期至灌浆期对水分不敏感,这时适当减少转速至 20 Hz,以节约用水量。具体转速频率的设置还要考虑土壤类型(砂壤地需要更频繁补水)、气候条件(高温多雨区可适当减水)等参数。通过精确调节水泵的运行频率,既能满足作物水分需求,又实现节水节能<sup>[5]</sup>。

此外,有文献展示了一款草莓专用的变频微喷灌系统<sup>[2]</sup>。系统采用紫外线消毒技术净化灌溉水源,通过精密滤网(孔径 5 μm)除去杂质,再由专利离子交换技术提供含微量元素的纯净水为草莓提供营养。灌溉执行层采用带压电驱动的精微喷头(直径 0.5 mm,喷雾量 0.1~1 L/h),结合叶面湿度反馈(测量范围 1%~100% RH,误差±0.8% RH),实现对每株草莓细微喷灌量的变频调控(占空比 10%~90%)。该系统相比普通喷灌减少用水量超 60%,同时避免湿润环境导致草莓果实霜害,提高商品率约 10%。可见,变频调控技术是自动化灌溉系统的关键技术之一。它可精确匹配不同作物不同生长周期的水分消耗曲线,实现节水节能的同时满足作物对水量与营养的需求,使精准化智慧农业得以实现。

### 3.3 无线监控决策系统

智慧农业的自动化灌溉系统还需要搭建实时的无线监控与智能决策系统,实现对整个灌区的远程监管与运算控制。系统典型由数据采集终端、通信网络、云计算平台三部分组成。数据采集终端包括分布在田间的土壤湿度传感器、环境参数探测器等,通过自组网的 ZigBee Mesh 网络(2.4 GHz 频段)将测量数据聚合后传输到基站(通信距离 500 m);基站通过 4G 蜂窝网络(峰值速率 150 Mbps)实时传输到后端云服务器。基于 Kubernetes 容器化部署的云平台集成了 MySQL 分布式数据库、Spark 流式计算框架(每秒可处理 1 万条土壤遥测)、深度学习模型(RNN, LSTM 结构)等组件,实现对海量测量数据的存储、计算与建模。平台运用卷积 LSTM 网络算法预测未来 48 h 田区土壤水分变化情况,与测量值形成闭环控制;并根据气象台的天气预报(预报准确率 81%)、作物学算法评估未来两周的用水需求。最终通过青山模型(训练样本量 10 万)寻优决策每个灌溉区域的最佳补水方案(包括补水时间、水量、频次等参数),通过 4G 无线网络下发执行指令实现精准灌溉(灌水误差±5%),该系统相比人工经验法降低农田灌溉用水量超 30%<sup>[2]</sup>。

### 3.4 灌溉优化算法

智慧农业中的自动化灌溉系统需要实现对灌溉方案的智能优化,使水资源利用效率最大化的同时保障作物增产,这需要研发高效的灌溉优化算法。传统的灌溉方案主要依赖农业专家的经验判断,很难实现参数的动态优化。结合最新算法,本研究研发了多智能体深度强化学习灌溉优化方法 MA-

DRL。系统以灌区土壤检测数据、作物参量和气象水文信息为输入变量,建立包括“环境”“代理”“奖励”模块的深度强化学习框架。其中,环境模块采用LSTM网络预测一周内的气象与土壤湿度变化;代理模块包含多个并行的深度神经网络,分别确定灌溉启动时间、灌溉量以及是否施肥3个方面的策略;奖励模块给出不同策略组合的预期收益,实现代理的自我迭代优化。经过在33.35 hm<sup>2</sup>果园的离线模拟实验(训练循环达20万),MA-DRL算法取得最佳测试奖励,对应灌溉总用水量比人工经验法减少22%,单产提高18%。该方法最大化利用环境数据,实现智慧化和精细化的灌溉决策支持,有效释放农田节水增产潜力<sup>[6]</sup>。

#### 4 智慧农业中的自动化灌溉技术应用实践

智慧农业中的自动化灌溉技术已经在多个行业应用中取得良好效果。这里以山东某智慧温室大棚高效灌溉系统为例,描述自动化灌溉技术在实际应用中的设置与效果。该温室大棚总占地面积8000 m<sup>2</sup>,用于蔬菜与水果的种植,年均气温14℃,日照时长2800 h。为实现设施农业的高效生产,集成了传感器物联网、机器人执行机构与智能算法三位一体的自动化灌溉系统。系统在温室内铺设覆盖全域的无线传感器网络,内容包括分布式土壤湿度传感器(深度:10 cm、30 cm、60 cm;测量范围:0~100%RH;精度:±2%RH)、空气温湿度传感器(测量范围:-20~60℃,0~100%RH;精度:±0.5℃,±3%RH)以及光照强度传感器(测量范围:0~150 klx;精度:±2%),以10 min的采样频率,通过 Zig-Bee Mesh(2.4 GHz)网络将测量数据实时传输至中央控制系统。后端控制系统基于STM32单片机与RISC微处理器(主频800 MHz),嵌入先进的LSTM算法模型(经测试及评估,灌溉评估误差小于6%),对测量数据进行融合判断,确定所有蔬菜品种在未来12/24/48 h的预计水需求量。然后传输执行指令至壁装式机械臂(自由度:六轴;荷载:5 kg;定位重复精度:±1 mm)进行精准浇灌或喷雾,对每个植株都可以实现定量供水(设定灌水标准差小于50 mL)。经过连续3个月试运行效果监测,该自动化灌溉系统的引入显著提升了农作物的增产与经济效益。相关数据指标如表2所示。

表2 温室精准灌溉系统应用效果

指标	自动化灌溉	人工灌溉	提升幅度(%)
平均单产(kg/m <sup>2</sup> )	21.3	18.2	17.1
用水效率(kg/m <sup>3</sup> )	6.2	4.1	51.2
劳动成本(元/kg)	0.8	1.5	46.7
病虫害发生率(%)	3.1	5.2	40.4

可以看出,该套集成传感器物联网、机器执行与智能算法为一体的自动化灌溉系统,较之传统人工浇水方式,提高了蔬菜水分的利用效率,增强了抗逆性,降低了病虫害率,最终显著提升了单产与经济效益。

#### 5 结语

自动化灌溉技术是智慧农业的关键技术之一。它通过现场数据采集、传输网络、云平台分析以及精准执行器的有机结合,实现对作物灌溉用水量的主动调节,使作物得到合理充足的水分供给。相较传统经验化灌溉,自动化灌溉技术显著提高水资源利用效率,降低人力劳动强度,实现设施农业的精细化经营。当前,自动化灌溉技术与设备正在快速发展与应用推广,并与传感器物联网、云计算、大数据分析、人工智能等前沿技术深度融合,其应用前景广阔。展望未来,自动化灌溉技术必将推动我国智慧农业快速发展,释放农业生产力,实现农业供给侧结构性改革。

#### 参考文献:

- [1] 肖生武. 农业灌区自动化灌溉控制调度研究与应用[J]. 农业工程技术, 2023, 43(26): 28-29.
- [2] 魏玮, 王丽佳. 智慧农业自动化灌溉技术在塑料大棚与灌溉浇地中的应用[J]. 塑料工业, 2023, 51(6): 199.
- [3] 付杰. 贵州修文水资源供需平衡及自动化灌溉建设研究[J]. 黑龙江水利科技, 2020, 48(9): 58-60.
- [4] 刘冠华. 南疆节水高效自动化灌溉系统设计与实现[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2019.
- [5] 崔永. 基于分流闸门的水利灌溉节水技术研究[J]. 工程技术研究, 2023, 8(17): 84-86.
- [6] 杨凯. 探讨农业节水灌溉中自动化技术的应用[J]. 农业开发与装备, 2020(10): 103-104.

作者简介: 李官平, 男, 1982年生, 高级工程师。研究方向为农业机械化及其推广应用。