

文章编号:1673-887X(2026)06-0006-04

基于菲涅尔聚光光伏的日光温室 温湿度智能控制系统设计与仿真

高炜琦,常卓雅,高晋武
(兰州交通大学,甘肃 兰州 730070)

摘要 针对山西省日光温室生产中存在的季节温差大、市电依赖强及人工决策等问题,依据《日光温室全产业链管理技术规范 番茄(NY/T 3744—2020)》及果菜类生长需求,集成菲涅尔透镜高倍聚光技术,设计以光伏供电、单片机为核心的温湿度智能控制系统。该系统采用聚光光伏、充放电控制器及蓄电池供电,驱动风机、卷膜器和补光灯;控制方案融合PID控制、阈值决策与蓄电池保护规则。MATLAB动态仿真表明:春夏季典型气象条件下,以番茄为例,系统温湿度控制精度满足要求,日发电量可满足全天负载,且蓄电池始终处于安全工作状态。

关键词 菲涅尔透镜聚光光伏;日光温室;温湿度智能控制系统

中图分类号 S24

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1673-887X.2026.06.002

Design and Simulation of an Intelligent Temperature and Humidity Control System for a Solar Greenhouse Based on Fresnel Lens High-concentration Photovoltaic

Gao Weiqi, Chang Zhuoya, Gao Jinwu

(Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: To address large seasonal temperature differences, heavy grid dependence, and manual decision-making in solar greenhouses in Shanxi Province, this study designed an intelligent temperature and humidity control system based on the NY/T 3744-2020 standard and fruit vegetable growth requirements. The system integrated Fresnel lens high-concentration photovoltaic (CPV) technology, using PV power, a charge/discharge controller, and a battery to drive fans, film rollers, and supplemental lights. The control strategy combines PID control, threshold decision-making, and battery protection rules. MATLAB dynamic simulations under typical spring and summer weather conditions (using tomatoes as an example) showed that the system achieved the required temperature and humidity control accuracy, daily power generation meets the full-day load demand, and the battery remains in a safe operating state.

Key words: Fresnel lens high-concentration photovoltaic; solar greenhouse; intelligent temperature and humidity control system

设施农业是现代农业的重要组成部分,日光温室因其充分利用太阳辐射、保温性能好等特点,在中国北方地区广泛用于蔬菜越冬及早春生产^[1]。山西光热资源较为丰富,适宜发展日光温室的果菜类作物周年生产。但是,山西地形复杂、海拔差异大,气候具有大陆性显著、四季分明、昼夜温差大等特点。李海涛等^[2]对山西日光温室冬季温度的连续观测表明,土墙温室室内最高气温可达47.5℃,而砖墙温室最低气温可降至-1.5℃,且不同天气条件下温室内外温度相关性显著。

传统温室依赖人工经验进行温湿度调控,控制精度差、劳动强度大,并且农村地区配电网接入成本高、供电可靠性存在隐患。郭鹏等^[3]对山西光伏发电潜力

的分析表明,中部和北部地区年等效利用小时数超过了1 400 h,整体光照资源较为丰富。丰富的光照资源,结合光伏发电技术,为解决此类问题提供了新途径。

PID控制因成本低、工程调整方便,已在农业温室温度控制中得到应用^[4]。模糊PID、神经网络PID、自适应PID等改进算法的发展,提升了控制精度和鲁棒性^[5]。结合分时目标值切换和阈值决策规则,可在不增加控制系统复杂度前提下,满足不同生长阶段的温湿度需求。

本研究的主要内容为:依据《日光温室全产业链管理技术规范 番茄(NY/T 3744—2020)》^[6]和山西省地方气候特点,设置温湿度控制目标;建立“高倍聚光光伏—蓄电池”供电系统;设计PID控制策略并进行

收稿日期 2025-10-10

作者简介 高炜琦(1998-),男,山西长治人,硕士研究生在读,研究方向为聚光太阳能发电技术。

MATLAB 仿真验证;分析仿真结果,评估系统的控制精度和能源自给能力。

1 温湿度智能控制系统总体方案设计

1.1 系统结构

系统由能源层、感知层、控制层和执行层4个层次构成。系统工作流程见图1。

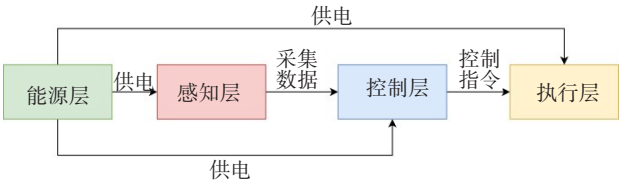


图1 系统工作流程图

Fig.1 System workflow diagram

1.1.1 能源层

菲涅尔透镜阵列将太阳辐射聚焦至高效多结光伏电池表面,光伏组件将太阳辐射转化为直流电,经最大功率点跟踪充放电控制器对蓄电池组进行管理,蓄电池为系统负载供电。

1.1.2 感知层

DHT22型温湿度传感器实时采集棚内空气温度和相对湿度,BH1750型光照传感器采集棚内光照强度,所有传感信号经A/D转换后输入单片机。

1.1.3 控制层

以STM32单片机为核心,运行PID控制算法和决策逻辑,输出控制指令。

1.1.4 执行层

轴流风机用于强制通风降温排湿;电动卷膜器控制薄膜开合,实现自然通风;LED植物生长灯在光照不足时开启补光。

1.2 主要器件参数

依据系统功率需求,使用的主要器件见表1。

表1 系统主要器件参考表

Tab.1 Main system component reference

器件	型号	器件	型号
菲涅尔透镜阵列	PMMA 材质, 方形	温湿度传感器	DHT22
光伏组件	多晶硅	光照传感器	BH1750FVI
充放电控制器	MPPT 型	轴流风机	三相轴流
蓄电池组	铅酸免维护	电动卷膜器	直流减速电机
单片机	STM32	LED 植物灯	红蓝全光谱

2 数学模型建立

为开展系统仿真,分别建立了菲涅尔聚光模型^[7-9]、太阳辐照度模型、光伏发电模型及蓄电池荷电状态(SOC)模型等。其中:太阳辐照度模型采用余弦函数叠加随机扰动项,描述山西地区典型晴天条件下辐照度

的日变化规律^[10];光伏发电模型依据组件额定效率、总面积与实时辐照度,计算输出功率,并引入温度系数修正^[11];蓄电池荷电状态模型通过安时积分法,实时估算充放电累积电量,设定安全工作区间,低于下限时停止放电以保护电池^[12]。大棚温湿度动态模型将温室视为一阶热容系统,综合考虑室外传热、风机强制通风和卷膜器自然通风对温度的影响。其中:外界气温采用分段余弦函数描述日变化规律^[13];湿度模型基于水分平衡原理,量化通风换湿及作物蒸腾等作用^[14]。采用平衡截断模型降阶法对模型降阶^[15],保留系统精度的同时,提高系统计算迭代速度。

3 控制策略设计

本文采用三层控制结构:目标层根据季节和作物类型提供分时控制目标值;算法层采用PID控制器计算控制输出量;决策层根据PID输出、传感器状态和电池荷电(SOC)状态执行决策及约束规定。

3.1 分时目标值切换

考虑到日光温室白天(7:00—19:00)和夜间(其余时段)温度管理目标不同,采用分时切换策略。以番茄为例:

$$T_{\text{set}}(t) \begin{cases} \frac{T_{\text{day, min}} + T_{\text{day, max}}}{2}, 7 \leq t \leq 19 \\ T_{\text{niget, min}} + 2 = 15\text{ }^{\circ}\text{C}, \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

湿度目标值设置为全天恒定。

3.2 离散PID控制器

温度通道离散PID控制律为:

$$u_T(k) = K_{\text{pT}}e_T(k) + K_{\text{iT}}\sum_{j=0}^ke_T(j)\Delta t + K_{\text{dT}}\frac{e_T(k) - e_T(k-1)}{\Delta t} \quad (2)$$

式中: $e_T(k)$ 为当前时刻温度误差。

为防止积分饱和,对积分项实施限幅处理。PID参数经Ziegler-Nichols法^[16]初步整定后,通过MATLAB仿真迭代调优。

3.3 执行器控制决策规则

系统的执行器控制决策采用优先级从高到低的层次化规则。蓄电池保护具有最高优先级,当SOC降至20%以下时,强制关闭全部执行器,以防止过放损坏电池。在供电正常的前提下,温度控制优先于湿度控制。

4 仿真结果与分析

4.1 光伏系统运行结果

太阳辐照度与光伏发电功率日变化曲线见图2。由图2可知,太阳辐照度在6:00—18:00内呈正弦分布,叠加云层随机扰动后峰值约在950~1 050 W/m²波动,午间12:00附近光伏组件输出功率峰值约为512 W,

与理论计算值相近,差异主要来自随机扰动在可接受范围内。

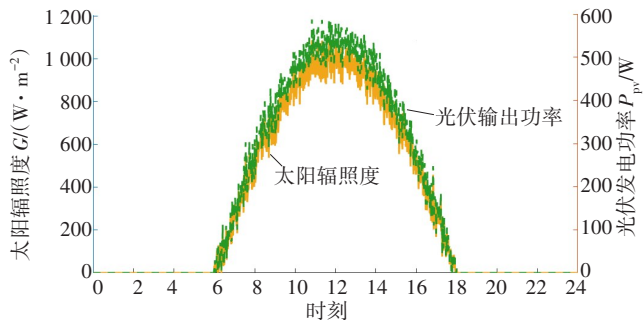


图2 太阳辐照度与光伏发电功率日变化曲线图

Fig.2 Daily variation curves of solar irradiance and PV power output

SOC日变化情况见图3。由图3可知,白天6:00—17:00发电量大于负载消耗,蓄电池处于充电状态;17:00以后进入放电阶段,SOC逐步下降,至次日6:00最低,降至约29%,全程高于20%的保护下限。这表明供电系统能够满足全天负载需求,且蓄电池未发生过放,可靠性满足设计要求。

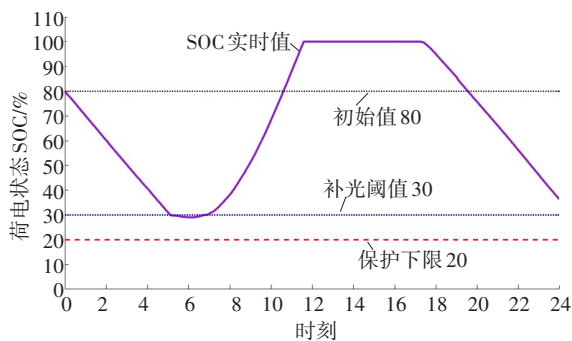


图3 SOC日变化图

Fig.3 Daily SOC variation chart

4.2 温度控制效果

日光温度控制效果曲线见图4。

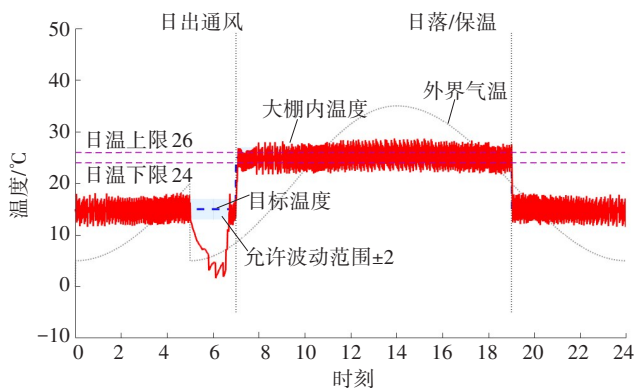


图4 日光温度控制效果曲线图

Fig.4 Solar greenhouse temperature control performance curve

由图4可知,常规工况下温室温度控制表现良好,白天稳定在25℃左右且波动在可接受范围内,夜间前段后段(0:00—5:00、19:00—24:00)保温效果优异。5:00—6:30时蓄电池处于放电末期,为保护蓄电池,限

制了大功率执行器的运行,温度曲线有所波动。

4.3 湿度控制效果

日光温室湿度控制效果见图5。由图5可知,目标湿度70%、允许波动±10%,外界湿度呈单谷型日变化。大棚内湿度整体围绕目标值小幅震荡,控制RMSE为4.78%,全天越限率8.3%,基本满足预设湿度控制要求。

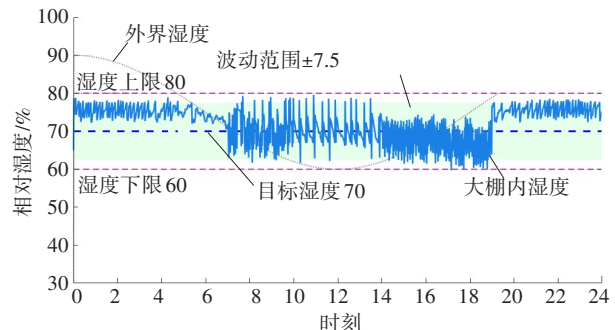


图5 日光温室湿度控制效果曲线图

Fig.5 Solar greenhouse humidity control performance curve

5 结语

本研究针对山西日光温室温差显著、市电依赖度高及人工调控精度差的问题,设计了温湿度智能控制系统,采用PID结合阈值决策的控制策略。仿真验证了系统控制的有效性,供电可满足全天负载需求。未来可优化多因子耦合控制,适配作物全生长周期,同时引入蓄电池衰减模型,提升储能系统可靠性。

参考文献

- [1] 骆飞,徐海斌,左志宇,等.我国设施农业发展现状、存在不足及对策[J].江苏农业科学,2020,48(10):57-62.
- [2] 李海涛,王志伟.不同天气条件下山西日光温室室内温度特征分析[J].科技与创新,2016(18):17-19.
- [3] 郭鹏,申彦波,陈峰,等.光伏发电潜力分析:以山西省为例[J].气象科技进展,2019,9(2):78-83.
- [4] AKANO T, ASAOLU O. Modelling of a greenhouse climatic conditions control system with PID controller for plant growth optimization[J]. FUOYE journal of engineering and technology, 2023, 8(4): 478-482.
- [5] 邢希君,宋建成,吝伶俐,等.设施农业温室大棚智能控制技术的现状与展望[J].江苏农业科学,2017,45(21):10-15.
- [6] 中华人民共和国农业农村部.日光温室全产业链管理技术规范 番茄:NY/T 3744—2020[S]. 2020-08-26.
- [7] 陈海飞.高倍聚光光伏光热综合利用系统的理论和实验研究[D].合肥:中国科学技术大学,2014.
- [8] 黄启禄.高倍聚光光伏光学系统的设计与实验研究[D].合肥:中国科学技术大学,2018.
- [9] 曹可,袁达忠,胡和敏,等.高倍聚光光伏光热一体化系统的热电性能研究[J].太阳能学报,2021,42(12):64-70.
- [10] GRAHAM V A, HOLLANDS K G T. A method to generate synthetic hourly solar radiation globally[J]. Solar energy, 1990, 44(6): 333-341.

(下转第11页)

升较大幅度,有效拓宽水泵的安全运行范围^[4]。

3.4 材料声学特性对噪声辐射的影响

叶轮材料的声学特性包括声速和声阻抗两个基本参数。声速由材料密度和弹性模量共同决定,声速差异影响声波在材料内部的传播特性和边界反射行为。高声速材料中声波传播路径更短,到达边界的时间更快,使得叶轮各部位振动的相位关系发生变化,改变整体的声辐射指向性。材料的声阻抗等于材料密度与声速的乘积。金属材料的声阻抗与水介质的声阻抗差异较大,在固—液界面容易形成较强声反射,使部分声能被反射回固体内部,另一部分声能透射进入液体并向外传播。材料的声辐射效率与其弯曲波波速及周围介质声速之间的关系密切相关,弯曲波波速低于介质声速的频段称为临界频率以下区域,此时结构振动难以有效激发声波向远场传播,声辐射效率相对较低。提高材料刚度会使弯曲波波速增大,导致更宽频段落入高效辐射区,材料表面的声辐射效率受到几何形状和边界条件的影响,薄壁曲面结构比厚壁平板结构的辐射效率高出数倍。因此,材料选择需要结合叶轮的结构形式综合考虑^[5]。

4 典型案例分析

景电工程作为跨省区、高扬程、多梯级、大流量电力提灌工程,其泵站系统装机容量达 30.6×10^4 kW,总扬程713 m,在长期运行中面临黄河高含沙水质导致的叶轮磨损与气蚀问题,为研究叶轮材料对水泵振动噪声的影响提供了典型应用场景。工程二期泵站群采用卧式离心泵,叶轮在液—固—气三相流体作用下承受复杂工况,材料性能直接影响泵组振动特性与噪声辐射水平。本研究选取景电二期某典型泵站开展不同材质叶轮的振动噪声对比测试,测试结果见表1。

测试数据显示,材料阻尼特性对叶轮振动噪声控制具有重要影响,高阻尼铸铁叶轮的振动加速度均方根值为 2.6 m/s^2 ,相比普通不锈钢叶轮的 4.8 m/s^2 降低45.8%,对应噪声声压级从92 dB降至83 dB。高阻尼材料将振动能量快速转化为热能耗散,有效抑制共振峰值与宽频振动响应。灰铸铁叶轮因其内部片状石墨相的存在,损耗因子达到0.020,虽然弹性模量较不锈钢低19%,但振动加速度反而降低33.3%,证明阻尼性能

表1 不同材质叶轮振动噪声测试结果对比表

Tab.1 Comparison of vibration and noise test results of different material impellers

叶轮 材质	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模 量/GPa	损耗 因子	振动加速 度均方根/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	噪声 声压 级/dB	使用 寿命/ h
普通不锈钢	7 900	210	0.003	4.8	92	8 500
灰铸铁	7 200	170	0.020	3.2	86	12 000
高阻尼铸铁	7 300	175	0.028	2.6	83	15 000
铝青铜合金	7 600	120	0.012	3.9	89	10 500

在振动控制中的权重超过刚度因素。铝青铜合金叶轮的弹性模量仅为120 GPa,在高扬程工况下叶片变形量较大,导致流动分离与压力脉动增强,虽然其损耗因子达到0.012,但振动加速度仍维持在 3.9 m/s^2 的较高水平,说明刚度不足引发的自激振动会抵消部分阻尼效果。

5 结语

叶轮材料的密度、刚度、阻尼及声学特性对水泵振动噪声具有重要影响。材料密度会影响转子系统的质量分布和固有频率特性,高密度叶轮使固有频率下移,增加与激励频率共振的风险;材料刚度影响叶片在压力脉动作用下的变形量,刚度不足导致流动分离增强,放大压力脉动幅值,但刚度过高会提升振动加速度响应;材料阻尼特性在振动控制中发挥主导作用,高阻尼材料能够快速耗散振动能量,削减共振峰值,降低宽频振动响应。因此,水泵降噪设计时应根据需求,正确选择叶轮材料,保障水泵稳定运行。

参考文献

[1] 李彦迪,王昱.簸箕型流道泵站水泵振动信号消噪方法研究[J].机械制造与自动化,2024,53(5):92-96.
[2] 黄凯乐.内燃机冷却水泵内部流动及其诱导振动噪声特性[D].镇江:江苏大学,2019.
[3] 曹崇宏,仇伟伟,孔江峰.水泵振动和噪声的解决方法[J].中国新技术新产品,2018(1):121-122.
[4] 夏勇.ACP1000核设备冷却水泵振动噪声研究[D].镇江:江苏大学,2016.
[5] 沈松土,汪智锋.水厂送水泵机组的优化改造与成果[J].通用机械,2015(10):76-78.

(上接第8页)
[11] SKOPLAKI E, PALYVOS J A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: a review of efficiency/power correlations[J]. Solar energy, 2009, 83(5): 614-624.
[12] PILLER S, PERRIN M, JOSSEN A. Methods for state-of-charge determination and their applications[J]. Journal of power sources, 2001, 96(1): 113-120.
[13] 李树海,马承伟,张俊芳,等.多层覆盖连栋温室热环境模型构

建[J].农业工程学报,2004(3):217-221.
[14] 何芬,马承伟,张俊雄.温室湿度动态预测模型建立与试验[J].农业机械学报,2009,40(10):173-177.
[15] 杜鑫,丁大伟.基于平衡截断法的离散时间线性时滞系统的低频域模型降阶[J].自动化学报,2015,41(10):1825-1830.
[16] ZIEGLER J G, NICHOLS N B. Optimum settings for automatic controllers[J]. Transactions of the American society of mechanical engineers, 1942, 64(8): 759-765.