

计及碳效益的光储油联合驱动 喷灌机供电系统配置优化

李铂涵¹, 刘柯楠¹, 蔡耀辉², 周慧霞¹, 赵静涛¹

(1. 甘肃农业大学机电工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:针对太阳能喷灌机供电系统各配置不匹配所造成的能源供给不稳定和系统成本高等问题,建立了计及碳效益的光储油联合驱动喷灌机供电系统优化配置模型,利用实测气象数据和历史光伏发电功率,结合 SARIMA 时序预测方法对光伏发电功率建立估算模型,可估算太阳能喷灌机及其他太阳能装备的光伏发电功率。以卷盘式喷灌机 JP75-300 为例,基于喷灌机系统需求,将年最小成本作为目标函数,碳排放量和供电可靠性指标作为约束条件,光伏板面积、蓄电池数目、汽油发电机额定功率作为决策变量,建立了光储油供电配置优化模型,利用完全搜索法求解得出系统最优配置组合,并进一步进行供电性能试验与碳效益分析。结果表明:在碳效益约束下该光储油喷灌机供电系统最优配置由 5 块蓄电池组、7 m² 光伏板、额定功率为 1 kW 的汽油发电机组合,年最小成本 1 312.69 元,8 d 试验期内碳排放量为 8.27 kg,较传统喷灌机大幅减少,降低量为 38.39 kg。本研究在保证供电系统性能的基础上对光储油多能源协同喷灌机进行配置优化,验证了其环保性、供电可靠性和经济可行性,对新能源系统与喷灌技术的结合应用及西北旱农区光伏喷灌机的应用推广具有指导意义。

关键词:光储油;卷盘式喷灌机;配置优化;光伏预测;碳效益

中图分类号:S277.9⁺4 **文献标志码:**A

Optimization of the power supply system configuration for a combined solar-storage-oil irrigation machine with consideration of carbon efficiency

LI Bohan¹, LIU Kenan¹, CAI Yaohui², ZHOU Huixia¹, ZHAO Jingtao¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: This paper addresses the issues of unstable energy supply and high system costs caused by the misalignment in the configuration of solar-powered irrigation machine power supply systems. To solve these problems, an optimization model for the configuration of solar-storage-oil-powered irrigation machine power supply systems was established, with consideration given to carbon efficiency. Additionally, using measured meteorological data and historical photovoltaic power generation data, and incorporating the SARIMA time series forecasting methods, a model for estimating photovoltaic power generation capacity was developed. This model can estimate the photovoltaic power generation capacity of solar-powered irrigation machines and other solar energy systems. In this study, the reel sprinkler JP75-300 was used as an example. Based on the irrigation system's requirements, the objective was to minimize the annual cost, with carbon emissions and power supply reliability index as constraints. The decision variables include the area of photovoltaic panels, the number of storage batteries, and the rated power of the gasoline generator. An optimization model for the solar-storage-oil power supply configuration was established. The optimal configuration was determined using a complete search method, followed by performance tests and a carbon efficiency analysis. The results showed that under the constraint of carbon benefit, the optimal configuration of the pow-

er supply system of the photovoltaic oil storage sprinkler was composed of 5 battery packs, 7 m² photovoltaic panels, and gasoline generator with a rated power of 1 kW, with a minimum annual cost of 1 312.69 CNY, and the carbon emission during the 8-day test period was 8.27 kg, which was 38.39 kg less CO₂ than that of the traditional sprinkler irrigation machine. This study optimizes the configuration of the photovoltaic energy storage and multi-energy collaborative irrigation system while ensuring the performance of the power system. It verifies the system's environmental friendliness, power reliability, and economic feasibility. The integration of renewable energy systems with irrigation technology holds significant potential for the application and promotion of photovoltaic irrigation systems in arid farming regions of the northwest.

Keywords: solar-storage-oil; hard-hose traveler; configuration optimization; PV forecasting; carbon efficiency

在全球水资源危机背景下,以喷微灌为代表的高效节水灌溉技术得以蓬勃发展,有效提升了灌溉效率^[1],其伴生的灌溉能耗激增问题也随之凸显,严重制约了农业生产的绿色可持续发展。以节约资源和保护生态环境为前提^[2],推动农业可持续发展,基于清洁能源的喷微灌技术与装备将是节水灌溉未来发展的重要趋势。研究表明,太阳能喷灌集成绿色清洁能源和高效节水的双重优势,可有效解决偏远地区灌溉电力供应不足的问题^[3]。由于光伏组件供电具有间歇性和不可控性,太阳能喷灌机存在初始投资较高以及供电不稳定等问题^[4],难以保证灌溉质量;匹配储能蓄电池进行稳定性调节则价格昂贵且会污染环境,这一矛盾严重限制了太阳能喷灌技术的应用。光储油互补供电可在一定程度上消除光伏供电的不稳定性,并能减少成本,同时提升环保性^[4]。前人对光储油互补驱动机组在特定地区的机组工作能力、运行成本及稳定性研究鲜有报道;而国内不少机组弃之不用更重要的原因是移动式喷灌机配套装置的动力匹配性较差^[2]。因此,深入研究光储油互补作用下喷灌机组能量优化配置与碳排放环境效益分析,对推动太阳能清洁能源和喷灌技术的高效联合应用、助力双碳目标实现具有重要的理论价值和科学意义。

对太阳能农业装备进行研究,首先需要满足光伏发电功率的可靠性需求。由于各个地区气象条件不同,对装备的需求也不同,构建光伏发电功率估算模型对于电力供给匮乏区域的太阳能装备应用具有重要意义。在“碳达峰”、“碳中和”的大背景下,能耗控制将逐步转向碳排放控制^[5],然而目前农业领域大量机械装置仍由汽油柴油驱动,故其碳排放量也不容忽视。近年来,已有不少学者在喷灌机驱动装置领域进行了研究^[6-9],主要集中于各种移动式太阳能喷灌机的驱动配置优化,但优化过程中关于喷灌机的碳效益研究很少,且存在系统为获得更低成本而选择较少的光伏板和较高功率的汽

油发电机,从而产生过多碳排放量的问题。

基于上述问题,本研究将通过气象数据和历史光伏数据,考虑季节性影响^[10]结合 SARIMA 模型的时间序列预测方法对光伏发电功率进行估算,在计及碳效益条件下进行光储油喷灌机的配置优化与试验分析。基于喷灌机驱动系统的供电需求,将年最小成本作为目标函数,将碳排放量和供电可靠性指标等作为约束条件,选择决策变量后建立优化模型,利用辅助函数结合完全搜索法求解,得出光储油喷灌机供电系统的最优配置;在此基础上进行为期 8 d 的试验验证供电可靠性,并进行碳效益计算分析,以期光储油喷灌机以及其他农业装备的应用推广提供支撑。

1 研究对象

1.1 喷灌机供电系统

卷盘式喷灌机轻巧灵活,在农田灌溉中应用广泛^[1],以卷盘式喷灌机 JP75-300 为例,其 PE 软管外径为 75 mm,长度为 300 m,额定功率为 1.26 kW。供电系统由光伏板、太阳能控制器、汽油发电机、蓄电池组和直流电机组成(图 1)。若光照充足,供电系统首先由光伏板利用光伏效应产生电能,再传送至直流电机进行供电,光伏板剩余电量将自动充入蓄电池作为备用;若阴天或光照不足时,将优先自动使用蓄电池内储存电量,蓄电池内部电量耗尽时将由汽油发动机驱动直流电机。光伏板、汽油发电机和蓄电池组三者协同作用为直流电机供电,形成了光储油一体化供电系统。本文从供电系统的经济性和环保性出发,将更好地进行供电系统的配置优化设计以及年最小成本的计算。

1.2 数据来源

1.2.1 气象数据 本文利用机器学习结合实测气象数据对光伏发电功率建立估算模型。采用某地光伏电站 2019 年 1 月 1 日—2019 年 12 月 31 日共 365 d 的气象数据和光伏数据,对太阳能板进行监

测,采集间隔为 15 min,采集信息包括太阳辐射、气温、组件温度和光伏发电功率等数据。

1.2.2 组件数据 蓄电池选用额定电压 12 V、容量 120 Ah 的 190H52 阀控式全密封铅酸蓄电池(河北风帆蓄电池股份有限公司)。光伏组件选用金源电子电器公司的 CS5M32-260 单晶光伏组件,其光电转化效率为 16.9%。汽油发电机选用福安市双龙电机有限公司的单缸汽油发电机。

2 喷灌机光伏发电功率计算

2.1 建立估算模型

2.2.1 估算模型算法选择 由于光伏发电系统发电功率的时间序列具有高度自相关性,尤其具有季节相关性^[11]。在实际的太阳能光伏发电系统应用中,太阳能的逐时发电功率反映了太阳能的逐时发电情况。故本研究选 SARIMA 时间序列统计模型对光伏发电功率预测建立估算模型。

2.2.2 SARIMA 算法 ARIMA(d, p, q) 为自回归移动平均模型。Seasonal ARIMA(d, p, q, D, P, Q, s) 简称 SARIMA,即季节性自回归移动平均。SARIMA 在 ARIMA 算法的基础上增加 4 个季节性参数,可以弥补 ARIMA 模型无法很好地处理周期性序列这一不足之处。SARIMA 模型主要用于时间序列分析和预测统计,尤其是处理具有季节相关性特点的数据,通过捕捉数据中的长期趋势、季节性变化和随机波动,从而提供对未来值的预测和洞察。

2.2 光伏发电功率预测

2.2.1 参数选择 对于某个阵列,光伏板的光电转化效率和面积是固定的,但是太阳辐照度和环境温度会随时间周期性变化^[12]。因此,本研究以光伏发

电功率为因变量(即输出参数),以太阳辐照度和环境温度为协变量,以时间序列为索引。使用 autoarima 方法自动寻找最佳参数,寻优结果为 SARIMA(1,1,1,2,0,1,2)。

2.2.2 数据预处理 首先对缺失数据进行处理,按照 8:2 的比例分割训练集和测试集,对原始数据进行归一化处理和一阶差分,再对测试集部分的光伏发电功率进行估算。最后用决定系数 R^2 、均方根误差 RMSE 和平均绝对误差 MAE 作为评价指标对 SARIMA 估算模型的准确性进行评价(表 1)。

光伏发电功率 SARIMA 模型估算值与实际测量值散点图如图 2 所示,散点大多分布在 1:1 线附近,表明模型可满足精度要求。

2.2.3 模型流程图 基于 Anaconda 平台利用 Python 语言进行机器学习,建立光伏发电功率估算模型,模型流程如图 3 所示。

利用该光伏发电功率估算模型可结合气象数据对各地区光伏发电功率和单位面积光伏发电功率进行估算,从而对喷灌机太阳能板或更多农业装备的光伏发电功率进行计算。光伏板的发电功率计算公式如下:

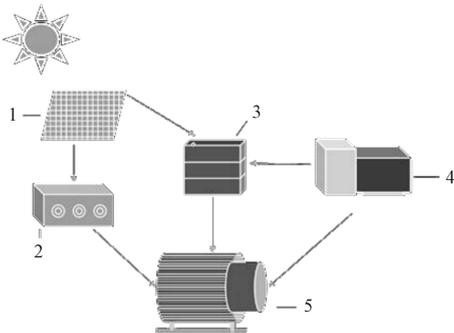
$$P_{pv} = A_{pv} p_{pv} \quad (1)$$

式中, P_{pv} 为光伏板发电功率(W); A_{pv} 为光伏组件的面积(m^2); p_{pv} 为单位面积光伏发电功率($W \cdot m^{-2}$)。

表 1 光伏发电功率估算模型评价结果指标

Table 1 Evaluation index of photovoltaic power generation power estimation model

评价指标 Evaluation indicator	训练集 Train set	测试集 Test set
R^2	0.946	0.944
RMSE	0.068	0.070
MAE	0.042	0.044



1. 光伏板; 2. 太阳能控制器; 3. 蓄电池组;
4. 汽油发电机; 5. 直流电机

1. Photovoltaic panel; 2. Solar controller; 3. Storage battery pack;
4. Gasoline generator; 5. DC motor

图 1 光储油喷灌机驱动装置结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the drive unit of solar-storage-oil irrigation machine

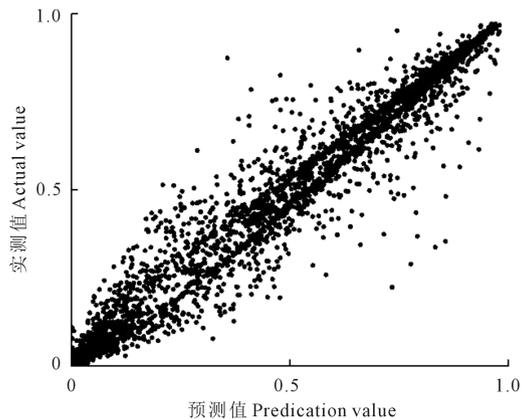


图 2 SARIMA 模型预测值与实测值散点图

Fig.2 Scatter of the predication and actual values of the SARIMA model

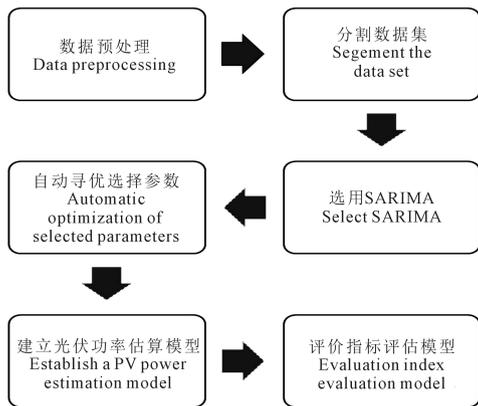


图3 光伏发电功率估算模型流程图

Fig.3 Flowchart of photovoltaic power generation estimation model

3 供电系统配置优化

3.1 数学模型建立

混合动力系统的能源成本越低,通常意味着碳排放越高^[13]。本研究进一步建立了在碳约束条件下光储油供电系统的优化配置模型。将供电系统的年最小费用设定为目标函数,约束条件为碳排放量和供电系统可靠性指标,其中包括能量溢出比和负载亏电率,决策变量为光伏板面积、蓄电池数目和汽油发电机额定功率。在此基础上设立惩罚项,建立惩罚函数作为辅助函数,将有约束问题转换为无约束问题,建立配置优化模型。利用完全搜索法对此进行求解,得到年费用最低的供电系统配置。

3.1.1 驱动功率 喷灌机光伏驱动系统总功率按机组最大工况计算^[6],主要包括克服喷头车及软管阻力、克服盘卷阻力和牵引装置的扭矩及转速计算,总功率取值 1.26 kW。

3.1.2 蓄电池功率计算 蓄电池单元某一时刻 t 的荷电状态 ($S_{oc,t}$, %) 如式(2)和(3)所示^[6]:

充电时:

$$S_{oc,t} = S_{oc}(t - \Delta t) + \frac{\Delta E_{store} \eta_{in}}{N_b E_{rate}} \quad (2)$$

放电时:

$$S_{oc,t} = S_{oc}(t - \Delta t) - \frac{\Delta E_{store}}{N_b E_{rate} \eta_{out}} \quad (3)$$

式中, $S_{oc}(t - \Delta t)$ 为蓄电池 $t - \Delta t$ 时刻的荷电状态(%); E_{rate} 为蓄电池额定容量(Ah),取值 120 Ah; N_b 为蓄电池组的数目; ΔE_{store} 为 $t \sim t + \Delta t$ 时间内的蓄电池电量(Ah); η_{in} 和 η_{out} 分别为蓄电池系统的充、放电效率(%).

当太阳能和蓄电池所提供功率无法满足负载功率需求时,汽油发电机将开始工作。直到三者共同作用满足负载功率需求后,汽油发电机停止工作。

当三者共同作用依然无法满足负载功率需求时,

系统产生亏电,亏电量计算公式如下^[6]:

$$Q_{LPS}(t) = \{P_1(t) - [P_{pv}(t) + P_{gr} + P_{discharge}(t) \eta_{out}]\} \Delta t \quad (4)$$

式中, P_1 为喷灌机光伏驱动系统总功率(W); Q_{LPS} 为 Δt 时段内的系统亏电量(Wh); P_{gr} 为汽油发电机额定功率(W); $P_{discharge}$ 为蓄电池放电功率(W)。

在运行过程中蓄电池的荷电状态应保持在限定范围^[14-15]。当 $S_{oc}(t + \Delta t) < S_{ocmin}$ 时, $t \sim t + \Delta t$ 时间段蓄电池实际放电量为:

$$\Delta E_{discharge} = N_b E_{rate} [S_{oc}(t) - S_{ocmin}] \eta_{out} \quad (5)$$

当 $S_{oc}(t + \Delta t) > S_{ocmin}$ 时, $t \sim t + \Delta t$ 时间段蓄电池实际充电量为:

$$\Delta E_{charge} = N_b E_{rate} [S_{ocmax} - S_{oc}(t)] / \eta_{in} \quad (6)$$

式中, $\Delta E_{discharge}$ 为 $t \sim t + \Delta t$ 时间段蓄电实际放电量(Wh); ΔE_{charge} 为 $t \sim \Delta t$ 时间段蓄电池实际充电量(Wh); S_{ocmax} 和 S_{ocmin} 分别为蓄电池系统允许蓄电状态的上、下限值(%).

3.1.3 燃料费计算 燃料费主要与燃料单价、消耗燃料的体积及汽油发电机的工作时长有关,其计算公式如下^[6]:

$$C_{af} = C_f V_f T_g \quad (7)$$

$$V_f = A_g P_g + B_g P_{gr} \quad (8)$$

式中, C_{af} 为燃料费(CNY); C_f 为汽油单价(CNY · L⁻¹); T_g 为汽油发电机工作时长(h); V_f 为消耗汽油的体积(L · h⁻¹); A_g 、 B_g 为汽油的燃烧系数(L · kWh⁻¹); P_g 为汽油发电机的输出功率(kW)。

3.1.4 目标函数 供电系统年费用包括初始投资和运行维护费用^[16]。目标函数表达式如式(9)所示:

$$\text{Min } C_t = C_{acap} + C_{are} + C_{ains} + C_{aom} + C_{af} \quad (9)$$

$$C_{acap} = C_{RF}(C_{pv} N_{pv} + C_b N_b + C_g P_{gr} + C_{con}) \quad (10)$$

$$C_{are} = S_{FF} C_b N_b \left[\left(\frac{1+f}{1+d} \right)^5 + \left(\frac{1+f}{1+d} \right)^{10} + \left(\frac{1+f}{1+d} \right)^{15} \right] + S_{FF}(C_{con} + C_g P_{gr}) \left(\frac{1+f}{1+d} \right)^{10} \quad (11)$$

式中, C_t 为整个供电系统的年费用(CNY); C_{acap} 为系统每年的初始投资^[17](CNY); C_{are} 为系统每年的替换费用^[12](CNY); C_{ains} 为系统每年的安装费用(CNY); C_{aom} 为系统每年的运行维护费用(CNY); C_{RF} 为资金回收因子; S_{FF} 为资金偿债系数; C_{pv} 为光伏组件的费用(CNY · m⁻²); C_b 为蓄电池的费用(CNY · Ah⁻¹); C_g 为汽油发电机费用(CNY · W⁻¹); C_{con} 为太阳能控制器费用(CNY); N_{pv} 为光伏板面积(m²); f 为通货膨胀率(%); d 为利率(%).

光储油供电系统安装费按系统初始投资的 10% 计

算^[18],运行维护费按系统初始投资的2%计算^[18]。

3.1.5 碳排放量计算 将碳排放量和负载亏电率、能量溢出比设置为约束条件,使系统既能保证负荷的供电保证率,又可最大程度提高光伏利用率。

汽油发电机的 CO₂排放量估算公式如下^[19-20]:

$$E_t = P_f \times \beta_t \times V_e \quad (12)$$

式中, E_t 为 CO₂ 排放量(kg); P_f 为汽油发电机发电功率(kW); β_t 为汽油碳排放系数(kg·L⁻¹),取 3.186 kg·L⁻¹; V_e 为油耗量(L·kW⁻¹),取 0.374 L·kW⁻¹。

负载亏电率(δ_{LPSP} ,%)的计算公式为^[7]:

$$\delta_{LPSP} = \frac{\sum_{t=1}^T \{P_l(t) - [P_{pv}(t) + P_{discharge}(t) \eta_{out}]\} \Delta t}{\sum_{t=1}^T [P_l(t)] \Delta t} \quad (13)$$

能量溢出比(δ_{EXC} ,%)的计算公式为^[7]:

$$\delta_{EXC} = \frac{\sum_{t=1}^T \left\{ P_{pv}(t) - \left[\frac{P_{charge}(t)}{\eta_{in}} + P_l(t) \right] \right\} \Delta t}{\sum_{t=1}^T [P_{pv}(t)] \Delta t} \quad (14)$$

式中, P_{charge} 为蓄电池充电功率(W); δ_{LPSP} 和 δ_{EXC} 取值区间均为[0,1], δ_{LPSP} 和 δ_{EXC} 的值越接近于0,供电保证率越高,能量浪费越少。

3.2 模型求解

3.2.1 求解方法 本研究采用基于惩罚函数的完全搜索优化算法。它遍历所有在限定范围内的解,并评估每个解的目标函数值,最终找到使目标函数达到最小的解。设置惩罚函数作为一个判断条件,主要作用是使违反约束的解受到一定程度的惩罚,从而作为限制条件筛选出合适的目标函数。优化模型计算流程如图4所示,输入参数列于表2。

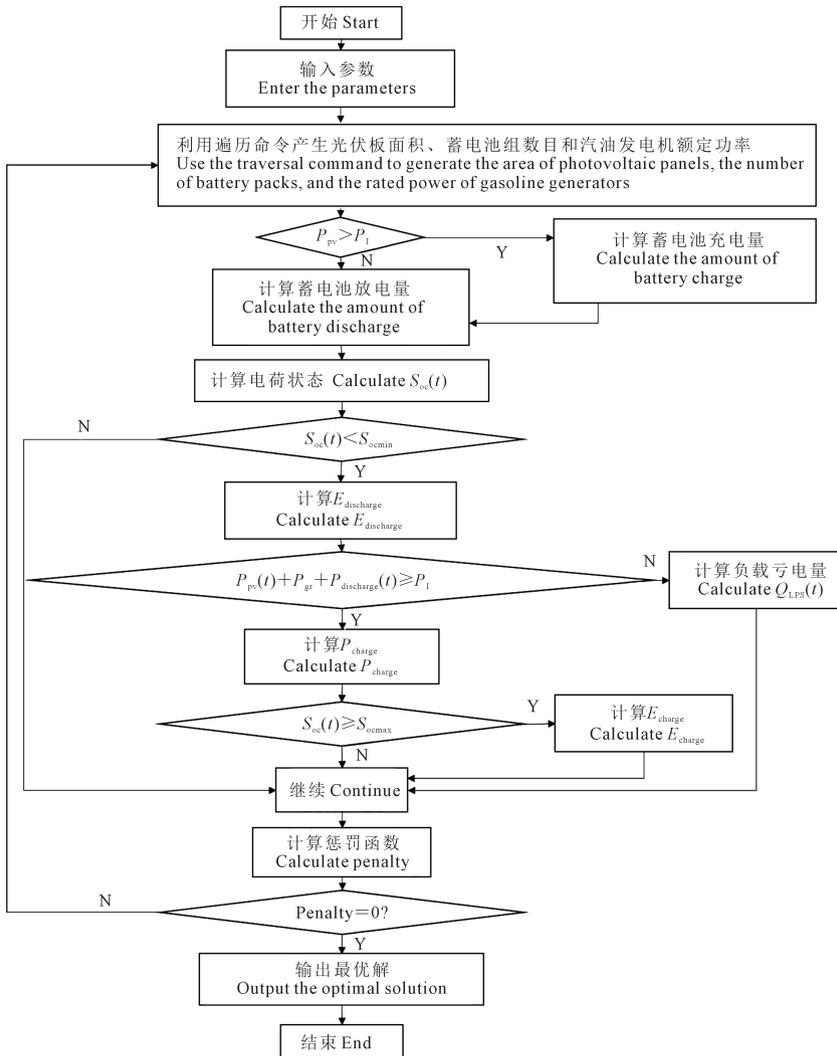


图 4 优化模型计算流程图

Fig.4 Calculation flow chart of optimization model

其中惩罚函数公式如下:

$$penalty1 = penalty_f \times \max(0, \delta_{LPSP} - \delta_{LPS} P_{max}) \quad (15)$$

$$penalty2 = penalty_f \times \max(0, \delta_{EXC} - \delta_{EXCmax}) \quad (16)$$

$$penalty3 = penalty_f \times \max(0, E_i - E_{i,max}) \quad (17)$$

$$penalty = penalty1 + penalty2 + penalty3 \quad (18)$$

式中, $penalty_f$ 为惩罚系数, 取 1 000; $penalty1$ 为负载亏电率的惩罚项; $penalty2$ 为能量溢出比的惩罚项; $penalty3$ 为碳排放量的惩罚项; $penalty$ 为总惩罚函数。优化模型输入参数如表 2 所示。

3.2.2 最优配置 根据上述模型求解, 得到光储油喷灌机最优配置为: 7 m² 光伏板, 5 块 120 Ah 蓄电池, 汽油发电机额定功率为 1 kW, 基于目标函数计算得出年最小成本为 1 312.69 元。

4 供电系统分析与试验

4.1 试验背景

本研究在甘肃兰州地区进行供电系统分析与试验。灌溉作物以马铃薯为例, 设计马铃薯耗水强度为 4 mm · d⁻¹, 灌溉周期 1 d, 喷灌机日工作时间 8 h

表 2 优化模型输入参数

Table 2 Input parameters of the optimization model for simulation

参数 Parameter	数值 Value
光伏板成本 Photovoltaic panel cost/CNY	1000
蓄电池成本 The cost of the battery/CNY	600
利率 Interest rate/%	3.1
通货膨胀率 Inflation rate/%	3.5
运行年限 Years of operation/a	20
最大负载亏电率 Maximum load power deficit rate/%	0
电机工作效率 Motor work efficiency/%	80
初始荷电状态 Initial state of charge/%	60
控制器成本 Controller cost/CNY	1600
允许荷电状态上限 The upper limit of the allowable state of charge/%	80
允许荷电状态下限 The lower limit of the allowable state of charge/%	20
汽油成本 Gasoline cost/(CNY · L ⁻¹)	7.25
充电效率 Charging efficiency/%	90
最大能量溢出比 Maximum energy spillover ratio/%	0
燃烧系数 A _g Combustion coefficient/(L · kWh ⁻¹)	0.246
资金回收因子 Fund recovery factor	0.067
燃烧系数 B _g Combustion coefficient/(L · kWh ⁻¹)	0.0815
放电效率 Discharge efficiency/%	85
资金债偿系数 Debt repayment coefficient of funds	0.037
汽油发电机成本 Gasoline generator cost/(CNY · W ⁻¹)	0.3

(8:00—16:00), 行走速度 200 m · h⁻¹, 灌溉水量 12 m³ · h⁻¹, 灌溉面积为 2.44 hm²。由于马铃薯块茎膨大期(4—8 月)需水量最高^[21-22], 故选择测试时间为 4 月 13 日—4 月 20 日。图 5 为试验期内 8 d 气象变化曲线。

4.2 基于 PVSYS 的供电性能仿真

PVSYS 是一款功能强大的光伏系统设计与仿真软件, 广泛应用于独立和并网光伏系统的性能评估和优化设计。该软件基于气象数据, 结合光伏组件等设备参数, 通过逐时计算和能量平衡分析, 能够准确预测光伏系统在实际运行条件下的发电量、损耗和经济性等关键指标。使用参数如表 3 所示。

气象资料来源于 Meteonorm 8.1 数据库, 基于 PVSYS 平台获取兰州地区(36.3°N, 102.9°E, 海拔 1 742 m)1900 年 4 月 13 日—4 月 20 日的气象数据(年份 1900 表示通用的数据, 并非特定年份)。在试验中, 利用 PVSYS 系统仿真得到系统发电量如图 6 所示。

4.3 基于 PVSYS 的供电可靠性结果分析

试验期间 4 月 16 日—4 月 19 日为阴天, 光照不足, 需要光储油三者协同作用; 其余为晴天, 光照充足并可为蓄电池充电。太阳能喷灌机光伏发电不

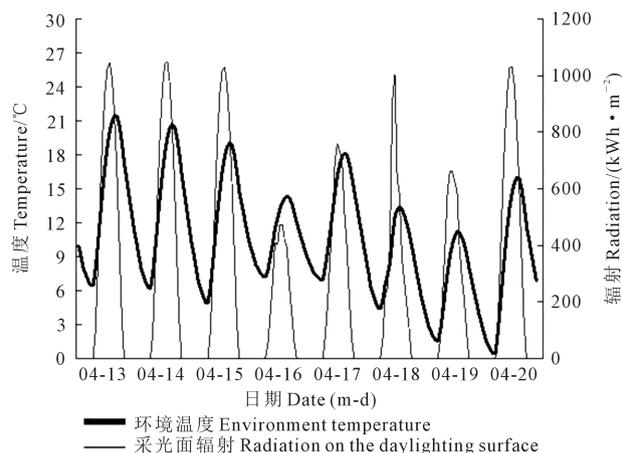


图 5 兰州地区 8 天气象变化曲线

Fig.5 8-day meteorological curve in Lanzhou

表 3 供电系统主要参数

Table 3 Main parameters of PV system

部件 Part	参数 Parameter	数值 Value
光伏组件 Photovoltaic module	峰值功率 Peak power/W	260.00
	峰值电压 Peak voltage/V	49.71
	峰值电流 Peak current/A	5.25
	组件面积 Area of components/m ²	7.00
蓄电池 Battery	额定电压 Rated voltage/V	12.00
	额定容量 Rated capacity/Ah	120.00
	蓄电池数 Number of batteries	5.00

足时由蓄电池补充供电,依然不能满足时启动汽油发电机供电。在试验工况下,负载计算功率为847.54 W^[6],每日总功率需求为 6.78 kW。试验光伏发电功率与负载功率需求关系如图 7 所示。

根据数据库得到的光伏发电功率数据,记录兰州地区光伏电池全天发电量情况可知,系统光伏电池组件夏季典型晴天天下全天累计发电量约为 9 kWh,结合蓄电池组最大负荷状态 80%计算,最大发电量约为 2.45 kWh。当机组以最大流量 12 m³ · h⁻¹、最大行走速度 300 m · h⁻¹运行时,根据计算负载功率最多可持续工作约 9 h。在 4 月 16 日阴天条件下,以上述最大工况运行机组,可持续工作约 5.3 h。

表 4 为供电系统仿真的主要结果,可知测试期间光伏发电总电量为 58.16 kWh,负载需电量约为 54.24 kWh,能量溢出比 6.74%,满足光伏发电系统 5%~30%的能量溢出比要求。在光伏系统供电不足时,可启动汽油发电机保证负载正常工作,故负载亏电率为 0,满足马铃薯灌溉要求。

4.4 碳效益分析与计算

利用生命周期评估法结合试验时长对试验期间内该光储油系统的碳排放进行分析,周期涵盖生

产、运输、使用、废弃等过程^[23]。

4.4.1 生产阶段 生产阶段的碳排放主要由光伏板和蓄电池生产时产生的能源消耗引起,计算公式如下^[24-25]:

$$C_s = \frac{E_b}{1000} \times 95.8 + A_v \times 160.86 \times \alpha \quad (19)$$

式中, C_s 为生产阶段碳排放量(以 CO₂排放量计,kg); A_v 为光伏板面积(m²); E_b 为蓄电池容量(kWh); α 为时长因子,取 0.001。

4.4.2 运输阶段 运输阶段主要考虑光伏板生产商和农户农田之间的距离,运输车的行驶速度、发动机效率、燃油热值以及光伏板自身质量等因素,运输时使用小型货车,使用燃油为柴油,运输阶段碳排放计算公式如(20)所示^[24-25]:

$$C_t = \frac{s \varepsilon H \beta_c m}{m_g} \alpha \quad (20)$$

式中, C_t 为运输阶段碳排放量(以 CO₂排放量计,kg); m_g 为货物质量(kg),取 2 400 kg; m 为光伏板重量(kg); s 为运输距离(km),取 100 km; ε 为公里燃油消耗(L · km⁻¹),取 0.092 L · km⁻¹; H 为燃油热值(kWh · L⁻¹),取 9.2 kWh · L⁻¹; β_c 为柴油碳排放因子(kg · kWh⁻¹),取 0.267 kg · kWh⁻¹。

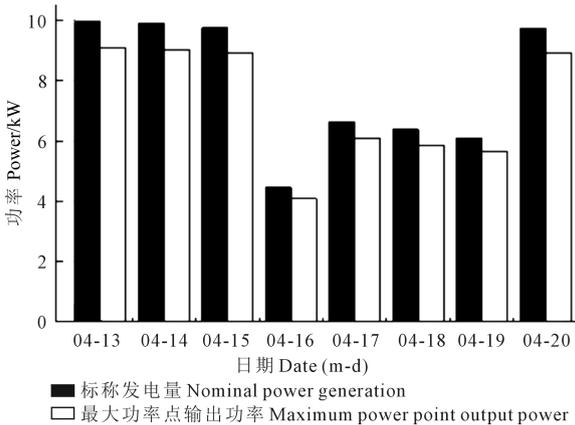


图 6 系统发电量情况

Fig.6 The power generation of the system

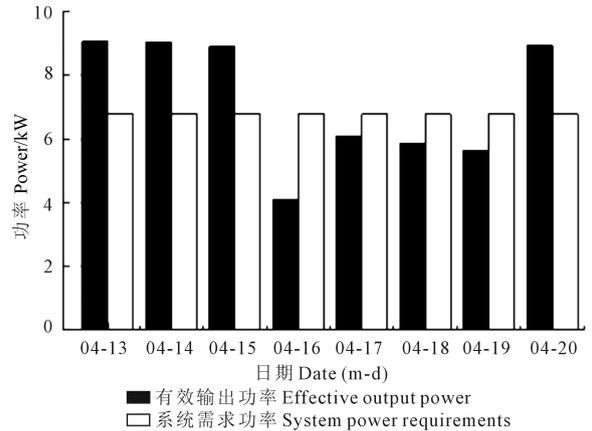


图 7 喷灌机需求功率与光伏发电功率对比

Fig.7 Comparison between the power demand and the power generation of irrigation machine

表 4 仿真主要结果

Table 4 Main results of simulation

日期 Date (m-d)	太阳总辐射 Total solar radiation / (kWh · m ⁻²)	系统发电量 System power generation /kWh	负载需电量 Load power demand /kWh	缺电时间 Power shortage time/h	溢出能量 Overflowing energy /kWh
04-13	7.81	9.03	6.78	0.00	2.25
04-14	7.75	8.99	6.78	0.00	2.21
04-15	7.65	8.90	6.78	0.00	2.12
04-16	3.70	4.27	6.78	2.97	0.00
04-17	5.31	6.19	6.78	0.70	0.00
04-18	5.11	5.96	6.78	0.98	0.00
04-19	4.95	5.79	6.78	1.17	0.00
04-20	7.74	9.03	6.78	0.00	2.25
总计 Total	50.02	58.16	54.24	5.82	8.83

4.4.3 使用阶段 在使用阶段,碳排放来源于蓄电池维持系统运行时所消耗的电能和汽油发电机维持系统运行时所燃烧的汽油,总碳排放计算公式如下^[24-25]:

$$C = E_1 + C_1 \quad (21)$$

式中, C 为光储油系统的总碳排放(以 CO_2 排放量计,kg); E_1 为使用阶段汽油发电机的碳排放(以 CO_2 排放量计,kg); C_1 为蓄电池运行时消耗电能产生的碳排放(以 CO_2 排放量计,kg)。

$$C_1 = WTY\alpha\beta \quad (22)$$

式中, W 为系统功率(kW); T 为系统使用蓄电池运行的时间(h); β 为国家电网碳排放因子($\text{kg} \cdot \text{kWh}^{-1}$),取 $1.28 \text{ kg} \cdot \text{kWh}^{-1}$; Y 为使用寿命(a),取 20 a。

4.4.4 废弃阶段 废弃阶段对其进行回收再利用,会产生碳排放,计算公式如下^[24-25]:

$$C_r = C_g + C_x \quad (23)$$

$$C_g = A_v \times 55.6 \times \alpha \quad (24)$$

$$C_x = \frac{E_b \times T}{1000} \times 23.3 \quad (25)$$

式中, C_r 为废弃阶段的碳排放量(以 CO_2 排放量计,kg); C_g 为光伏板报废组在拆解和热解后产生的碳排放(以 CO_2 排放量计,kg); C_x 为蓄电池循环利用产生的碳排放(以 CO_2 排放量计,kg)。

4.4.5 总结分析 根据上述计算可知,试验期间在使用阶段和废弃阶段光储油喷灌机共产生 8.27 kg 二氧化碳。若仅采用汽油为喷灌机供电,试验期间一共需产生 46.66 kg 二氧化碳,是光储油喷灌机总碳排放量的 5.6 倍。

4 结 论

1)结合太阳能喷灌机具体情况估算光伏发电功率,基于实测光伏发电功率及气象数据,在光伏发电技术、多能源匹配和节水灌溉技术相结合的基础上,利用 SARIMA 机器学习方法对建立了光伏供电系统的估算模型,可为各地区光伏发电功率估算提供参考。

2)从光储油喷灌机初始投资较高、供电系统匹配性不强等问题出发,在考虑碳效益并满足供电可靠性指标的约束条件下建立优化配置模型,利用完全搜索法求解得到了光储油喷灌机供电系统的最优配置为 7 m^2 光伏板,5 块 120 Ah 蓄电池,汽油发电机额定功率为 1 kW,年最小成本为 1 312.69 元,结果可为其他太阳能装备配置优化提供参考。

3)在兰州地区进行为期 8 d 的供电性能试验,

验证了基于 PVSYST 供电系统的可靠性,系统发电量为 58.16 kWh,可满足 54.24 kWh 的负载需电量;同时对碳效益进行计算分析并验证其环保性,该系统较传统汽油发电方式减少了 4.6 倍碳排放量,可为偏远电力短缺地区的光储油喷灌机组的推广应用提供参考。

参 考 文 献:

- [1] 汤玲迪,袁寿其,刘俊萍,等.中国喷灌机现状与发展思考[J].排灌机械工程学报,2022,40(10):1072-1080.
TANG L D, YUAN S Q, LIU J P, et al. Challenges and opportunities for development of sprinkler irrigation machine in China[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(10): 1072-1080.
- [2] 罗锡文,廖娟,胡炼,等.提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J].农业工程学报,2016,32(1):1-11.
LUO X W, LIAO J, HU L, et al. Improving agricultural mechanization level to promote agricultural sustainable development[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(1): 1-11.
- [3] 李加念,洪添胜,倪慧娜.基于太阳能的微灌系统恒压供水自动控制装置研制[J].农业工程学报,2013,(12):86-93.
LI J N, HONG T S, NI H N. Constant pressure water supply automatic device designed for micro-irrigation system based on solar energy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, (12): 86-93.
- [4] 路小娟,白建聪,范多进,等.风光热储互补发电系统容量配置技术研究[J].热力发电,2024,53(3):51-58.
LU X J, BAI J C, FAN D J, et al. Research on capacity configuration technology of wind-solar-thermal-storage complementary power generation system[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(3): 51-58.
- [5] 中央深化改革委员会.关于推动能耗双控逐步转向碳排放双控的意见[R].北京:中央深化改革委员会,2023.
Central Commission for Deepening Reform. Opinions on promoting the gradual shift from dual control of energy consumption to dual control of carbon emissions[R]. Beijing: Central Commission for Deepening Reform, 2023.
- [6] 李丹,朱德兰,林明月,等.卷盘式喷灌机牵引装置油光互补供电系统配置优化[J].农业机械学报,2019,50(8):131-139.
LI D, ZHU D L, LIN M Y, et al. Optimal configuration for gasoline-solar complementary driven traction device of hard-hose traveler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 131-139.
- [7] 蔡仕彪,朱德兰,葛茂生,等.太阳能平移式喷灌机光伏优化配置[J].排灌机械工程学报,2017,35(5):417-423.
CAI S B, ZHU D L, GE M S, et al. Photovoltaic optimization of solar-powered linear move sprinkler irrigation system [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(5): 417-423.
- [8] 陈昕,朱德兰,葛茂生,等.太阳能平移式喷灌机行走驱动系统配置与性能研究[J].节水灌溉,2016,(4):98-102.

- CHEN X, ZHU D L, GE M S, et al. A study on configuration and performance of driving system of a solar translational sprinkler [J]. *Water Saving Irrigation*, 2016, (4): 98-102.
- [9] 刘柯楠, 吴普特, 朱德兰, 等. 太阳能驱动喷灌机组行走动力和光伏功率匹配设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(16): 96-103.
- LIU K N, WU P T, ZHU D L, et al. Design and test of driving power and photovoltaic power matching for solar-driven sprinkler irrigation unit[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(16): 96-103.
- [10] 时珉, 周海, 韩雨彤, 等. 一种考虑季节特性的光伏电站多模型功率预测方法[J]. *电网与清洁能源*, 2019, 35(7): 75-82.
- SHI M, ZHOU H, HAN Y T, et al. A Multi-model power forecasting approach of photovoltaic plant based on seasonal characteristics [J]. *Advances of Power System & Hydroelectric Engineering*, 2019, 35(7): 75-82.
- [11] 周鑫, 李燕, 曾永辉, 等. 基于 SARIMAX-SVR 的光伏发电功率预测[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2024, 36(5): 1-8.
- ZHOU X, LI Y, ZENG Y H, et al. Forecasting of photovoltaic power generation based on SARIMAX-SVR[J]. *Proceedings of the CSU-EP-SA*, 2024, 36(5): 1-8.
- [12] WANG R, LI G Z, MING M J, et al. An efficient multi-objective model and algorithm for sizing a stand-alone hybrid renewable energy system[J]. *Energy*, 2017, 141: 2288-2299.
- [13] DUFO-LÓPEZ R, BERNAL-AGUSTÍN J L, YUSTA-LOYO J M, et al. Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV-wind-diesel systems with batteries storage[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(11): 4033-4041.
- [14] 李建林, 王思佳, 周毅, 等. 计及多典型天气特征的光储容量配置技术研究[J]. *电网与清洁能源*, 2022, 38(3): 80-89.
- LI J L, WANG S J, ZHOU Y, et al. A study on optical storage capacity allocation technology considering multi-typical weather scenarios [J]. *Advances of Power System & Hydroelectric Engineering*, 2022, 38(3): 80-89.
- [15] 李建林, 郭斌琪, 牛萌, 等. 风光储系统储能容量优化配置策略[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(6): 1189-1196.
- LI J L, GUO B Q, NIU M, et al. Optimal configuration strategy of energy storage capacity in wind/PV/storage hybrid system [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(6): 1189-1196.
- [16] ZHAO J Y, YUAN X F. Multi-objective optimization of stand-alone hybrid PV-wind-diesel-battery system using improved fruit fly optimization algorithm[J]. *Soft Computing*, 2016, 20(7): 2841-2853.
- [17] OLCAN C. Multi-objective analytical model for optimal sizing of stand-alone photovoltaic water pumping systems[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 100: 358-369.
- [18] BATAINEH K, DALALAH D. Optimal configuration for design of stand-alone PV system[J]. *Smart Grid and Renewable Energy*, 2012, 3: 139-147.
- [19] EGGLESTON S, BUENDIA L, MIWA K, et al. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [C]. Hayama, Kanagawa: IGES, 2006.
- [20] 田佩宁, 陈硕, 毛保华, 等. 新能源汽车对中国私家车碳排放的影响[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2023, 43(5): 88-98.
- TIAN P N, CHEN S, MAO B H, et al. Impact of new energy vehicles on carbon emissions of private cars in China[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2023, 43(5): 88-98.
- [21] 江俊燕, 汪有科. 不同灌水量和灌水周期对滴灌马铃薯生长及产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(2): 121-125.
- JIANG J Y, WANG Y K. Effect of different treatment of drip irrigation on growth of potato[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(2): 121-125.
- [22] 田英, 黄志刚, 于秀芹. 马铃薯需水规律试验研究[J]. *现代农业科技*, 2011, (8): 91-92, 94.
- TIAN Y, HUANG Z G, YU X Q. Study on the water requirement test for potato[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2011, (8): 91-92, 94.
- [23] ROY P, NEI D S E, OKADOME H, et al. Life cycle inventory analysis of fresh tomato distribution systems in Japan considering the quality aspect [J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 86(2): 225-233.
- [24] 何津津. 基于生命周期评价的光伏发电碳排放研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- HE J J. Study on carbon emissions of photovoltaic power generation based on life cycle assessment [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [25] 赵守政, 朱宗升, 赵松松, 等. 不同供冷模式下生鲜配送碳排放计算及对比分析[J]. *制冷学报*, 2024, 45(3): 150-159.
- ZHAO S Z, ZHU Z S, ZHAO S S, et al. Carbon emission calculation and comparative analysis during last-mile fresh food distribution using different cooling modes[J]. *Journal of Refrigeration*, 2024, 45(3): 150-159.