

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.015

卷盘式喷灌机牵引装置油光互补供电系统配置优化

李丹^{1,2} 朱德兰^{1,2} 林明月^{1,2} 武亚梅^{1,2} 赵航^{1,2} 王蓉^{1,2}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;
 2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 针对卷盘式喷灌机灌溉准备工作中拖拉机牵引喷头车及供水管时存在的压实土壤、破坏作物、能耗浪费及灵活性差等问题, 基于光伏板、蓄电池、汽油发电机互补供电技术, 提出了一种电动牵引装置。根据牵引装置动力需求, 以供电系统年费用为目标函数, 以负载亏电率、蓄电池荷电状态为约束条件, 以光伏板、蓄电池数目和汽油发电机额定功率为决策变量建立优化模型, 利用基于罚函数的粒子群算法(Particle swarm optimization algorithm, PSO)求解, 并在陕西省杨凌地区气候条件下进行了优化模型应用, 得到年费用最低的供电系统配置: 光伏板数目为2块、蓄电池数目为4块、汽油发电机额定功率为3 kW, 此配置下年费用为2 740.69元。通过不同配置方案的对比, 对模型优化结果进行了验证。最后, 以最优方案配置供电系统进行了为期3 d的田间运行试验, 结果表明: 不同时段、不同天气类型下系统发电量始终大于耗电量, 系统累计发电量为5.01 kW·h, 负载累计耗电量为4.71 kW·h, 所选试验条件下优化配置满足牵引装置运行要求。

关键词: 卷盘式喷灌机; 牵引装置; 油光互补; 优化配置; 田间试验

中图分类号: S277.9⁺⁴ 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)08-0131-09

Optimal Configuration for Gasoline – Solar Complementary Driven Traction Device of Hard-hose Traveler

LI Dan^{1,2} ZHU Delan^{1,2} LIN Mingyue^{1,2} WU Yamei^{1,2} ZHAO Hang^{1,2} WANG Rong^{1,2}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Nowadays, the hose-drawn travelers have been gaining more popularity worldwide, especially in China. The sprinkler cart and polyethylene (PE) pipe need to be dragged to the start position of spray before the hose-drawn traveler working. For this problem, tractor is mostly used, but it often causes damage to soil and crops. In order to solve the problem, a supporting traction device for the hose-drawn traveler was proposed, which was driven by gasoline – solar complementary power supply system. To explore the power matching design method of the gasoline – solar complementary drive traction device, an optimal model for traction device configuration was established. According to the power demand of the device, the annual cost of power supply system was taken as the objective function, and the load loss of power supply probability and battery state of charge were the constraints. The number of PV panels, batteries as well as the rated power of the gasoline generator was used as the decision variables. In addition, the particle swarm optimization (PSO) algorithm based on penalty function was employed to solve the optimal model, and the optimal configuration of the power supply system was obtained. Then, application of the optimization model was carried out based on the weather condition and experimental periods in Yangling, Shaanxi Province. The power supply system configuration with the lowest annual cost was achieved. The optimal configuration was composed of two photovoltaic panels, four batteries and a gasoline generator with rated power of 3 kW, respectively. Correspondingly, the annual cost was

收稿日期: 2019-04-04 修回日期: 2019-06-10

基金项目: 杨凌示范区产学研用协同创新重大项目(2017CXY-09)、“十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD22B01-02)和国家外国专家局“111”计划项目(B12007)

作者简介: 李丹(1989—), 女, 博士生, 主要从事节水灌溉新技术研究, E-mail: xlidan@163.com

通信作者: 朱德兰(1969—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉新技术研究, E-mail: dlzhu@126.com

2 740.69 yuan. Finally, the power supply system was configured with the optimal solution and a three-day field operation test was conducted. The results showed that the generated power of the system was always greater than the consumed power at different periods and different weather. During the whole test, the accumulated generated power and consumed power of the system were 5.01 kW·h and 4.71 kW·h, respectively, and the optimal configuration results were able to meet the operational requirements of the device. It was showed that the proposed method was appropriate and the power supply system was with high reliability.

Key words: hard-hose traveler; traction device; gasoline – solar complementary; optimal configuration; field test

0 引言

卷盘式喷灌机是我国大田节水灌溉的重要装备之一^[1-3],由停于地头的卷盘车和往返移动于田间的喷头车及供水管组成。卷盘式喷灌机灌溉准备工作中需将喷头车及供水管牵引至喷洒起始位置,目前主要采用四轮拖拉机牵引,此方法需拖拉机进入田间,易压实土壤、破坏作物^[4-5],且拖拉机输出功率远大于喷头车及软管移动所需功率,能耗浪费严重,若将拖拉机停于地头牵引,则又需配置复杂悬挂装置。

多能源互补动力系统可充分发挥各自优势,近年来在农业装备领域应用较广泛,不少学者对其进行深入研究^[6-8]。然而,此方面研究更多关注节能环保问题,注重于现有成熟装备的混合动力系统研究,鲜有应用于大田灌溉的新型多能源互补动力装备。太阳能为节能环保的可再生能源,也是多能源互补系统最重要组成部分,具有广泛的应用前景^[9-19]。现有研究多关注于单一太阳能发电系统供电可靠性及自动控制方面,且有研究表明,晴天时单一太阳能供电保证率较高,但阴雨天时保证率显著下降^[20-21],特殊工况下单独光伏发电不能满足负载要求,可用汽油发电机补充供电。故牵引装置可由光伏板、蓄电池及汽油发电机互补供电。然而,如何优化配置油光互补系统中各组件尚缺乏科学依据,因此,探究其优化配置方法对该牵引装置的应用有重要意义。

鉴于此,本文以课题组自主设计的油光互补驱动牵引装置为研究对象,基于牵引装置动力需求,建立油光互补供电系统优化配置模型,采用粒子群优化算法求解,应用该模型对牵引装置供电系统实行优化配置并进行田间运行试验,以期为此类供电系统提供一种优化配置方法,以及为油光互补驱动牵引装置应用推广提供理论依据。

1 牵引装置供电系统

图1为油光互补驱动牵引装置结构示意图。其

中,牵引装置供电系统由光伏板、太阳能控制器、蓄电池和汽油发电机组成,供电系统将太阳能和汽油转化为电能传送至直流电机,电机经传动系统拉动钢丝绳,牵引供水管和喷头车至喷洒起始位置,为卷盘式喷灌机灌溉作业做好准备工作。在牵引速度较高、地形坡度较大或连续阴天情况下,出现单独光伏板发电甚至光伏板发电联合蓄电池放电均无法满足负载要求的情况下,此时汽油发电机便对牵引系统进行补充供电;若负载功率需求小于光伏板发电联合蓄电池放电功率,则汽油发电机不工作,此时光伏板发电若还有剩余,多余电量将充入蓄电池备用;光伏板、蓄电池、汽油发电机三者共同作用,形成一种油光互补供电系统。合理配置光伏板、蓄电池和汽油发电机是确保该系统稳定运行并降低成本的关键,故本文将从供电可靠性和经济性出发,进行供电系统的配置优化。

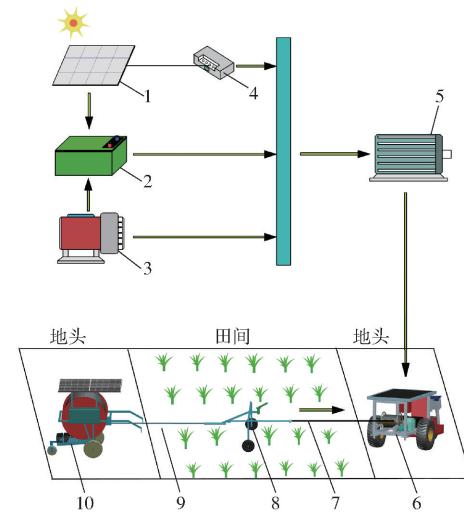


图1 油光互补驱动牵引装置结构示意图

Fig. 1 Schematic of gasoline – solar complementary driven traction device

1. 光伏板
2. 蓄电池
3. 汽油发电机
4. 太阳能控制器
5. 直流电机
6. 牵引装置
7. 钢丝绳
8. 喷头车
9. 供水管
10. 卷盘车

2 油光互补供电系统优化配置模型

2.1 牵引装置动力需求

牵引装置驱动系统功率需求取决于其工作过程

中克服喷头车及供水管与地面摩擦阻力所需功率、克服卷盘式喷灌机转盘转动阻力所需功率以及驱动系统工作效率3部分。由于牵引速度较慢,忽略喷头车行走时的空气阻力,因此牵引装置动力需求计算公式为

$$P_l = \frac{P_f + P_r}{\eta_m \eta_b \eta_r} \quad (1)$$

式中 P_l ——驱动系统功率,W

P_f ——地面与喷头车及供水管的摩擦阻力做功功率,W

P_r ——牵引装置克服盘卷阻力做功功率,W

η_m ——驱动电机传动效率,%

η_b ——皮带传动效率,%

η_r ——减速机传动效率,%

2.1.1 供水管和喷头车摩擦阻力功率

牵引装置牵引喷头车和供水管时,会受到地面的摩擦阻力并造成能量损失,此作用力包括滚动摩擦阻力和滑动摩擦阻力,二者消耗的功率之和为

$$P_f = (\mu_p \rho_0 l_p + \mu_c M_c) g v \quad (2)$$

式中 μ_p ——供水管与地面之间的摩擦因数

ρ_0 ——供水管未充水时单位长度质量,kg/m

l_p ——供水管被拉开的长度,m

μ_c ——喷头车与地面之间的摩擦因数

M_c ——喷头车质量,kg

g ——重力加速度,m/s²

v ——牵引速度,m/s

2.1.2 克服盘卷阻力做功功率

牵引装置牵引过程中,喷灌机上未被牵引的供水管质量较大,故需克服喷灌机卷盘的盘卷阻力,此功率消耗在数值上等于卷盘转动时转动动能与时间的比值,其表达式为

$$P_r = \frac{[(L - l_p) \rho_0] v^2}{4t} \quad (3)$$

式中 L ——供水管全长,m

t ——牵引装置运行时间,s

2.2 供电系统参数

2.2.1 光伏板发电功率

光伏板发电功率主要与光伏板数目、光电转化效率、光伏板面积及太阳辐照度有关,其计算公式为^[22]

$$P_{pv} = N_{pv} \eta_{pv} A_{pv} G_{ir} \quad (4)$$

式中 P_{pv} ——光伏板发电功率,W

N_{pv} ——光伏板数目,块

η_{pv} ——光电转化效率,%

A_{pv} ——光伏板面积,m²

G_{ir} ——太阳辐照度,W/m²

2.2.2 蓄电池容量

为了监测蓄电池充放电过程,利用蓄电池荷电状态 S_{oc} 实时反映蓄电池剩余电量情况。其定义为某一时刻蓄电池剩余电量与额定容量的比值。因此某一时刻 t 蓄电池的荷电状态为:^[23]

$$\text{充电时 } S_{oc}(t) = S_{oc}(t - \Delta t) + \frac{\Delta E_{store} \eta_{in}}{N_b E_{rate}} \quad (5)$$

$$\text{放电时 } S_{oc}(t) = S_{oc}(t - \Delta t) - \frac{\Delta E_{store}}{\eta_{out} N_b E_{rate}} \quad (6)$$

式中 $S_{oc}(t - \Delta t)$ —— $t - \Delta t$ 时刻蓄电池的荷电状态,%

ΔE_{store} —— Δt 时段内蓄电池吸收或放出的电量,W·h

η_{in}, η_{out} ——蓄电池系统充、放电效率,%

N_b ——蓄电池数目,块

E_{rate} ——蓄电池额定容量,W·h

油光互补供电系统中蓄电池应保持系统内部能量平衡,当光伏板发电功率大于负载功率时,蓄电池进行充电, $t \sim t + \Delta t$ 时间内蓄电池理论充入电量为

$$\Delta E_{store} = (P_{pv}(t) - P_l(t)) \Delta t \eta_{in} \quad (7)$$

当光伏板发电功率小于负载功率,且光伏板发电功率和蓄电池放电功率之和大于负载耗电功率时,蓄电池需要释放电量以满足负载需求。 $t \sim t + \Delta t$ 时间内蓄电池理论放出电量为

$$\Delta E_{store} = (P_l(t) - P_{pv}(t)) \Delta t \eta_{out} \quad (8)$$

当光伏板发电功率和蓄电池放电功率之和小于负载功率时,汽油发电机开始工作,若光伏板发电功率、蓄电池放电功率及汽油发电机发电功率三者之和大于负载功率时,多余电量将充入蓄电池中, $t \sim t + \Delta t$ 时间内蓄电池理论充入电量为

$$\Delta E_{store} = (P_{pv}(t) + P_g(t) - P_l(t)) \Delta t \eta_{in} \quad (9)$$

式中 P_g ——汽油发电机发电功率,W

当光伏板发电功率、蓄电池放电功率及汽油发电机额定功率三者之和小于负载功率时,系统出现亏电,亏缺电量计算公式为

$$Q_{LPS}(t) = [P_l(t) - (P_{pv}(t) + P_{gr} + P_{discharge}(t) \eta_{out})] \Delta t \quad (10)$$

式中 Q_{LPS} —— Δt 时段内系统亏缺电量,W·h

P_{gr} ——汽油发电机额定功率,W

$P_{discharge}$ ——蓄电池放电功率,W

蓄电池运行过程中荷电状态应不超过上限值 S_{OCmax} ,且不低于下限值 S_{OCmin} ,因此,当 $t + \Delta t$ 时刻 $S_{oc}(t + \Delta t) < S_{OCmin}$ 时,则 $t \sim t + \Delta t$ 时间段蓄电池实际放电电量为

$$\Delta E_{discharge} = N_b E_{rate} (S_{oc}(t) - S_{OCmin}) \eta_{out} \quad (11)$$

当 $t + \Delta t$ 时刻 $S_{OC}(t + \Delta t) > S_{OCmax}$ 时, 则 $t \sim t + \Delta t$ 时间段蓄电池实际充电电量为

$$\Delta E_{charge} = N_b E_{rate} (S_{OCmax} - S_{OC}(t)) / \eta_{in} \quad (12)$$

2.3 供电系统优化模型

2.3.1 目标函数

本文优化模型目标函数为供电系统年费用 C_T 最低, 其主要包括: 初始投资 C_{acap} 、运行维护费 C_{amain} 、安装费 C_{ains} 、替换费 C_{are} 以及燃料费 C_{af} ^[24]。因此, 目标函数表达式为

$$\min C_T = C_{acap} + C_{are} + C_{ains} + C_{amain} + C_{af} = f(N_{pv}, N_b, P_{gr}) \quad (13)$$

系统每年的初始投资可表示为^[25-26]

$$C_{acap} = C_{RF} (C_{pv} N_{pv} + C_b N_b + C_g P_{gr} + C_{con}) \quad (14)$$

其中 $C_{RF} = \frac{d(1+d)^n}{(1+d)^n - 1} \quad (15)$

式中 C_{RF} ——资金回收因子

C_{pv} ——单块光伏板费用, 元

C_b ——单块蓄电池费用, 元

C_g ——汽油发电机费用, 元/W

C_{con} ——控制器费用, 元

d ——利率, %

n ——系统运行年限, a

在油光互补供电系统中, 蓄电池的使用寿命为 5 a, 汽油发电机和控制器的使用寿命为 10 a, 则系统的替换费计算公式为^[27]

$$C_{are} = S_{FF} C_b N_b \left[\left(\frac{1+f}{1+d} \right)^5 + \left(\frac{1+f}{1+d} \right)^{10} + \left(\frac{1+f}{1+d} \right)^{15} \right] + S_{FF} (C_{con} + C_g P_{gr}) \left(\frac{1+f}{1+d} \right)^{10} \quad (16)$$

其中 $S_{FF} = \frac{d}{(1+d)^{l_r} - 1} \quad (17)$

式中 S_{FF} ——资金偿债系数

f ——通货膨胀率, %

l_r ——替换设备(蓄电池、汽油发电机或控制器)的使用寿命, a

燃料费计算公式为

$$C_{af} = C_f V_f T_g \quad (18)$$

其中 $V_f = A_g P_{gr} + B_g P_g \quad (19)$

式中 C_f ——汽油单价, 元/L

V_f ——单位时间消耗汽油的体积, L/h

T_g ——汽油发电机工作时长, h

A_g, B_g ——汽油的燃烧系数, L/(W·h)

油光互补供电系统安装费主要包括人工费和运输费等, 按系统初始投资的 10% 计算^[28]; 运行维护费主要包括维修费等, 按系统初始投资的 2% 计算^[28]。

2.3.2 约束条件

(1) 系统供电保证率约束

以负载亏电率 δ_{LPSP} 为系统供电可靠性指标, 使系统既满足供电保证率又提高可再生能源利用率。

负载亏电率表示一段时间内油光互补供电系统不能满足负载用电需求的概率, 在评价周期 T 内, 负载亏电率可表示为该时间段内负载亏缺电量与负载总需求电量的比值。本文油光互补系统中负载亏电率计算公式为^[29]

$$\delta_{LPSP} = \frac{\sum_{t=t_0}^{t_0+n\Delta t} [P_l(t) - (P_{pv}(t) + P_{discharge}(t)\eta_{out} + P_{gr})] \Delta t}{\sum_{t=t_0}^{t_0+n\Delta t} P_l(t) \Delta t} \quad (20)$$

式中 n ——时间序数 t_0 ——初始时刻

δ_{LPSP} 取值范围 $[0, 1]$, $\delta_{LPSP} = 0$ 表示系统供电保证率为 100%; $\delta_{LPSP} = 1$ 表示系统供电保证率为零。

(2) 蓄电池电量约束

为了防止蓄电池因过充或过放而影响使用寿命, 蓄电池荷电状态应满足约束条件^[30-31]

$$S_{OCmin} \leq S_{OC}(t) \leq S_{OCmax} \quad (21)$$

2.4 优化模型求解方法

2.4.1 优化模型辅助函数

采用基于罚函数的粒子群算法 (Particle swarm optimization algorithm, PSO) 求解优化模型, 罚函数可将有约束优化问题转换为无约束优化问题, 目标函数加上惩罚函数即辅助函数, 本文辅助函数为

$$F(N_{pv}, N_b, P_{gr}, M_p) = C_T + M_p \max(0, \delta_{LPSP} - \delta_{LPSP,max}) \quad (22)$$

式中 M_p ——罚因子

$\delta_{LPSP,max}$ ——系统允许的最大负载亏电率

当 $\delta_{LPSP} > \delta_{LPSP,max}$ 时, 式(22)中惩罚项趋近于无穷大, 辅助函数不存在最小值; 当 $\delta_{LPSP} \leq \delta_{LPSP,max}$ 时, 惩罚项等于零, 则对辅助函数最小值进行计算。

2.4.2 粒子群优化算法

粒子群算法为基于群体迭代的人工智能优化算法, 其在解的空间里追随最优粒子而进行搜索, 具有优化步骤少、运行时间短等优点。粒子速度和位置更新是求解优化模型的关键, 其更新公式为^[32]

$$v_{id}^{(k+1)} = \omega v_{id}^{(k)} + c_1 r_1 (p_{id}^{(k)} - x_{id}^{(k)}) + c_2 r_2 (p_{gd}^{(k)} - x_{gd}^{(k)}) \quad (23)$$

$$x_{id}^{(k+1)} = x_{id}^{(k)} + v_{id}^{(k+1)} \quad (24)$$

式中 ω ——惯性权重 c_1, c_2 ——学习因子

r_1, r_2 —— $[0, 1]$ 区间内均匀分布的随机数

- $v_{id}^{(k)}$ ——第 k 次迭代粒子 i 速度矢量的第 d 维分量
 $x_{id}^{(k)}$ ——第 k 次迭代粒子 i 位置矢量的第 d 维分量
 $p_{id}^{(k)}$ ——第 k 次迭代粒子 i 在第 d 维空间中的历史最优位置
 $p_{gd}^{(k)}$ ——第 k 次迭代所有粒子在第 d 维空间中的历史最优位置

惯性权重决定了粒子继承前次飞行速度的程度,通过调整惯性权重值可实现全局搜索和局部搜索之间的平衡。本文采用线性递减权重计算策略^[32],即

$$\omega = \omega_{\max} - k \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{K} \quad (25)$$

式中 ω_{\max} ——最大惯性权重

ω_{\min} ——最小惯性权重

K ——最大迭代次数

2.4.3 优化模型求解步骤

优化模型的求解步骤如图 2 所示,时间间隔 $\Delta t = 1$ h,具体计算步骤为:

(1)根据喷头车、供水管、牵引装置的工作参数等,应用式(1)~(3)计算牵引装置功率需求。

(2)根据太阳辐照度、光伏板面积、光电转化效率等参数,应用式(4)计算光伏板发电功率。

(3)判断 P_{pv} 是否大于等于 P_l ,若 P_{pv} 大于等于 P_l ,多余电量将充入蓄电池并按式(7)计算充电量;否则蓄电池将为负载提供部分电量,并按式(8)计算蓄电池放电量。

(4)判断 P_{pv} 与 $P_{discharge}$ 之和是否大于等于 P_l ,若 P_{pv} 与 $P_{discharge}$ 之和小于 P_l ,汽油发电机开始工作;若 P_{pv} 、 $P_{discharge}$ 、 P_{gr} 三者之和大于等于 P_l ,多余电量则充入蓄电池,充电量按式(9)计算;若 P_{pv} 、 $P_{discharge}$ 、 P_{gr} 三者之和小于 P_l ,则系统出现亏电,亏电量按式(10)计算。

(5)应用式(5)、(6)计算蓄电池荷电状态 $S_{oc}(t)$,若 $S_{oc}(t)$ 小于 S_{ocmin} ,按式(11)计算蓄电池放电量;若 $S_{oc}(t)$ 大于或等于 S_{ocmax} ,按式(12)计算蓄电池充电量。

(6)根据式(13)~(19)得到优化模型目标函数,结合式(20)、(21)优化模型约束条件,按式(22)计算优化模型的辅助函数,最后输出使辅助函数最小的决策变量值。

3 油光互补系统优化模型应用

3.1 基础数据

基于陕西省杨凌地区牵引装置动力需求,进行

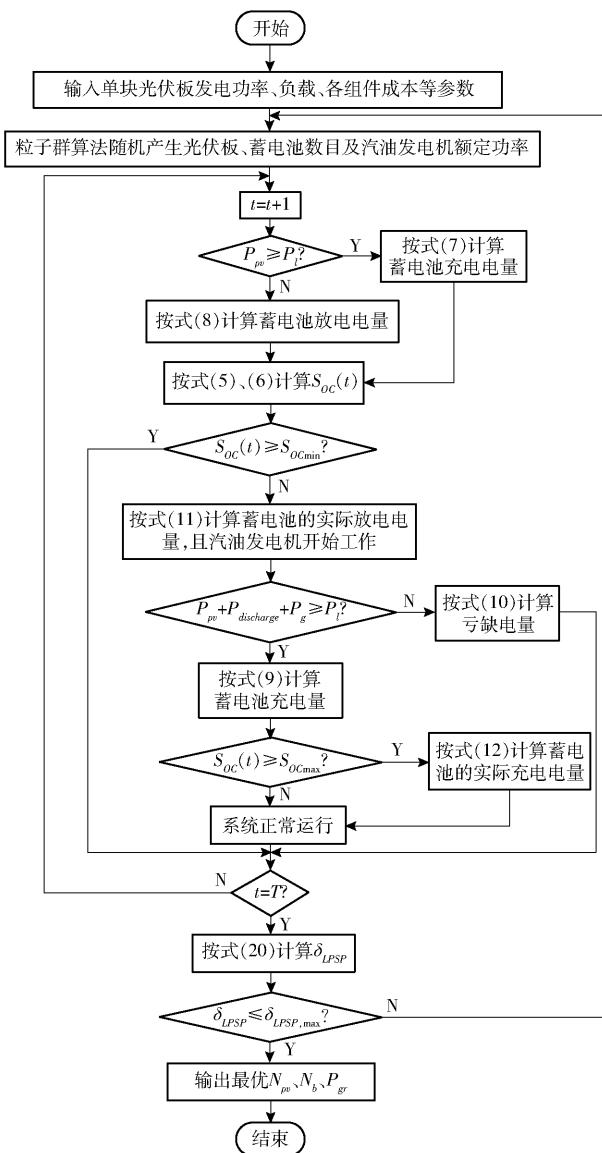


图 2 优化模型计算流程图

Fig. 2 Calculation flow chart of optimal model

油光互补供电系统优化模型应用,以得出优化配置。应用时选用型号为 CS5M32-260 的单晶光伏板(峰值功率 260 W、峰值电压 49.71 V、峰值电流 5.25 A),河北风帆有限公司生产的 190H52 型阀控式全密封铅酸蓄电池(容量 120 A·h、额定电压 12 V),以及福安市双龙电机有限公司生产的单缸汽油发电机(额定电压 48 V);采用 JP75-300 型卷盘式喷灌机进行喷灌作业,牵引装置设定工作时长为 1 个月,每天工作 2 h。

太阳辐照度为优化模型的重要输入参数,用于光伏发电功率的求解。前期采用 AV6592 型便携式太阳能电池测试仪(电压精度 0.01 V,电流精度 0.001 A,功率范围 0.1~500 W),对试验区进行了为期 1 个月的逐时太阳辐照度监测,结果如图 3 所示。同时,本文优化模型涉及卷盘式喷灌机和牵引装置多种参数,具体如表 1 所示。

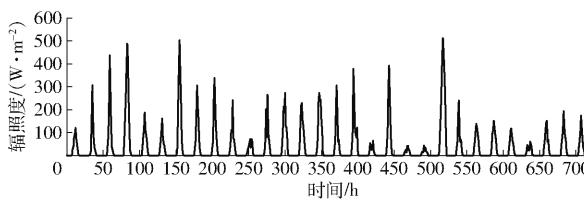


图3 太阳辐照度变化曲线

Fig. 3 Changing curve of solar irradiance

表1 优化模型输入参数

Tab. 1 Input parameters of optimal model

参数	数值	参数	数值
喷头车质量/kg	119.24	放电效率/%	85
重力加速度/(m·s⁻²)	9.8	初始荷电状态/%	60
牵引速度/(m·s⁻¹)	0.083	控制器成本/元	1 600
供水管全长/m	300	利率/%	3.1
电机工作效率/%	80	通货膨胀率/%	3.5
胶带传动效率/%	95	运行年限/a	20
减速机工作效率/%	75	最大负载亏电率/%	0
光伏板成本/元	1 000	燃烧系数 A_g /	246
蓄电池成本/元	600	(L·(W·h) ⁻¹)	
允许荷电状态上限/%	80	燃烧系数 B_g /	81.5
允许荷电状态下限/%	20	(L·(W·h) ⁻¹)	
喷头车与地面摩擦因数	0.5	供水管单位长度质	1.172
供水管与地面摩擦因数	0.8	量/(kg·m⁻¹)	
汽油成本/(元·L⁻¹)	6	汽油发电机成本/	0.3
充电效率/%	90	(元·W⁻¹)	

3.2 算法参数设置

种群数量: 初始种群数量越大, 收敛性越好, 但过大时影响收敛速度, 故本文取种群数量范围为1~70。

粒子速度: 粒子速度过快可能跳过最优解, 过慢则影响收敛速度^[32], 本文取其范围为-3~3。

最大迭代次数: 因本文供电系统配置仅包括光伏板、蓄电池及汽油发电机, 有效配置种类数不会超过100种, 为确保迭代有效, 且避免浪费过多时间, 本文取最大迭代次数为200。

学习因子: 学习因子范围一般为0~4^[32], 依据经验, 取值为2.05。

惯性权重: 在迭代过程中由式(25)确定, 为了防止模型过早陷入局部最优, 惯性权重的取值分别为 $\omega_{\max}=0.9$, $\omega_{\min}=0.4$ 。

3.3 优化配置结果

采用Matlab R2014a平台进行油光互补供电系统优化模型求解, 求解过程重复运行30次; 经过200次迭代后, 得到粒子群算法的优化收敛曲线, 如图4所示。由图4可知, 经过25次迭代后, 目标函数值便保持不变, 表明此时寻找到最优解。最终得到以下优化配置: 光伏板数目为2块、蓄电池数目为4块、汽油发电机额定功率为3kW, 此配置下系统年

费用为2 740.69元。

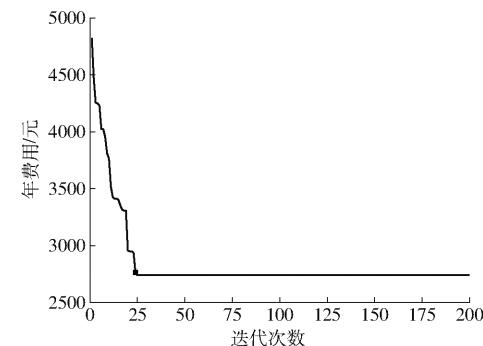


图4 粒子群算法优化收敛曲线

Fig. 4 Optimization model convergence curve of particle swarm optimization algorithm

3.4 验证模型优化结果

为了验证模型优化结果, 进行了牵引装置供电系统不同配置下的负载亏电率和年费用对比。依据牵引装置机型特点, 共选取4种具有代表性的配置方案作为对照, 每种方案均包含一种或两种配置项目的增减变化。牵引装置运行条件的设定与3.1节相同, 依据表1及式(13)、(20)计算年费用和负载亏电率, 得到不同配置方案的对比结果, 如表2所示, 方案1、2虽年费用比优化方案少, 但负载亏电率却增大, 无法保证系统正常供电; 方案3、4负载亏电率为零, 而费用却较高。相比而言, 本文优化模型求解所得方案为最优配置方案。

表2 不同配置方案对比结果

Tab. 2 Comparison and verification result of different configurations

方案	供电配置			负载亏电率/%	年费用/元
	N_{pv} /块	N_b /块	P_{gr} /kW		
1	2	3	2	16.26	2 157.12
2	1	4	3	11.92	2 664.71
3	3	4	3	0	2 816.67
4	3	4	4	0	2 877.80
优化方案	2	4	3	0	2 740.69

4 田间运行试验

4.1 试验条件与方法

为了观测所得供电系统最优配置的田间运行效果, 基于上述优化结果, 对卷盘式喷灌机牵引装置供电系统进行配置, 并在西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院试验田内(东经108.07°, 北纬34.28°, 海拔521 m)进行田间运行试验, 试验现场如图5所示, 地块长度为300 m, 宽度为100 m。试验分为3个时间段: 第1天, 09:00—11:30(2018年12月6日, 天气晴朗, 最高温度4℃, 最低温度-4℃, 西北风2级); 第2天, 13:00—15:30(2019年1月6日, 天气晴朗, 最高温度5℃, 最低温度-2℃, 西北风2级)。

年4月18日,天气晴朗,最高温度30℃,最低温度15℃,东北风2级);第3天,09:00—11:30(2019年4月21日,天气阴,最高温度24℃,最低温度13℃,东南风2级)。



图5 田间运行试验现场

Fig. 5 Scene picture of field test

1. 喷头车 2. 光伏板 3. 汽油发电机

试验前卷盘式喷灌机和牵引装置分别置于田间地头两侧,将牵引装置钢丝绳与喷头车用挂钩连接,试验时启动牵引装置使其开始工作。牵引装置控制箱内装有控制器,用于监测光伏板发电功率、牵引装置功率消耗和蓄电池剩余电量,汽油发电机输出端装有功率传感器,用于监测汽油发电机输出功率,监测间隔均为1 min,牵引装置牵引速度为0.083 m/s。

4.2 试验结果与分析

图6为3 d试验中牵引装置负载功率与油光互补系统发电功率对比图,随时间的延长,牵引距离逐渐增大,负载功率呈增大趋势,直至喷头车完全被牵引至灌溉起始位置后达到最大,原因是随着牵引距离增大,供水管摩擦阻力功率增大而使负载功率增大;此外因地面情况复杂多变,负载功率存在局部微小波动。

对比图6a、6b发现,图6a 09:00 光伏板发电功率较小,负载需求功率大于光伏板发电功率,此时蓄电池需为负载提供部分电量,导致蓄电池荷电状态逐渐减小;图6b则相反,13:00 光伏板发电功率大于负载功率,多余电量充入蓄电池,导致蓄电池荷电状态先逐渐增大;随着负载功率逐渐增大,光伏板发电功率小于负载功率,蓄电池荷电状态逐渐减小,直到即将小于下限值时,汽油发电机开始工作,多余发电量仍充入蓄电池,故蓄电池荷电状态迅速增大,后一直波动变化,表明此过程蓄电池处于充放电交替状态。首次牵引完成后,在光伏板充电下蓄电池荷电状态迅速达到最大,等待下一次牵引。图6a中09:00—10:00 汽油发电机工作时长大于图6b 13:00—14:00 汽油发电机工作时长,这是因为13:00—14:00 光照强度大于09:00—10:00,导致光伏板发电量较大,则汽油发电机发电量减小。

对比图6a、6c发现,图6a所示晴天下光伏板发电功率稳定上升,而图6c 阴天下发电功率则波

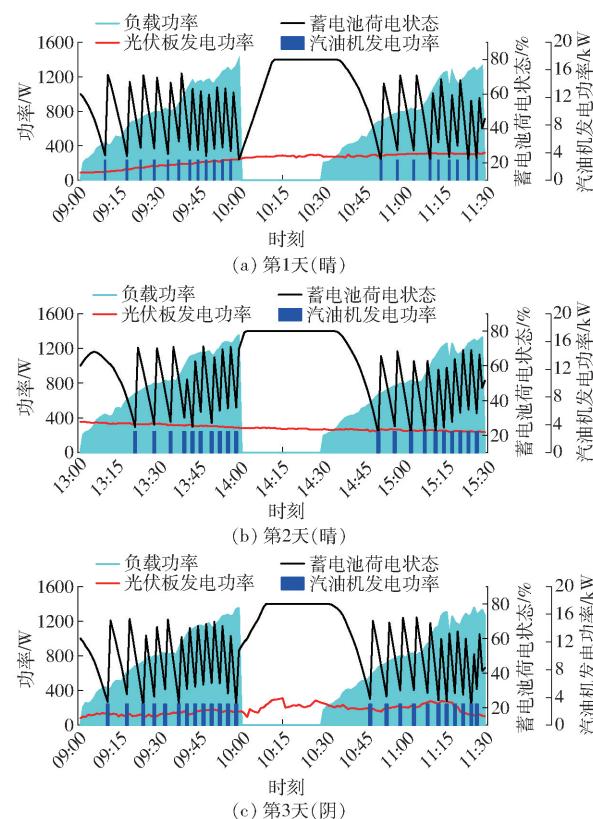


图6 牵引装置负载功率与发电功率对比

Fig. 6 Comparisons of load and generation power of traction device

动性较大,且总体晴天光伏板发电功率明显高于阴天,阴天汽油发电机工作时长大于晴天,也是光照强度所致。

由图6可得,3 d运行过程中,光伏板累计发电量1.76 kW·h,汽油发电机累计发电量3.25 kW·h,即牵引装置累计发电量为5.01 kW·h,而负载累计耗电量为4.71 kW·h,故系统发电量大于耗电量。运行试验中,光伏板、蓄电池、汽油发电机均发挥了作用,实现了三者互补供电,虽试验运行时段及天气类型均存在不同,但牵引装置一直稳定有效运行。综上,在本文试验条件下,优化模型计算所得最优配置可使牵引装置在不同天气类型、不同时段下正常稳定运行,具有良好的运行特性。

5 结论

(1)基于牵引装置动力需求及供电系统参数,建立了以系统年费用为目标函数,以负载亏电率和蓄电池荷电状态为约束条件,以光伏板、蓄电池数目和汽油发电机额定功率为决策变量的供电系统优化配置模型,构建了一种卷盘式喷灌机牵引装置油光互补供电系统优化配置方法。

(2)油光互补供电系统优化配置模型应用结果表明,通过粒子群算法对优化模型求解可快速得到

最优配置,即光伏板数目为2块、蓄电池数目为4块、汽油发电机额定功率为3kW;在满足供电保证率条件下,进行了不同配置方案的对比,仅模型求解所得优化配置的年费用最低,为2740.69元。

(3)优化配置田间运行试验中,在试验时段、天

气类型均不同的情况下,牵引装置运行情况良好,供电系统累计发电量为5.01kW·h,负载累计耗电量为4.71kW·h,优化模型求解得到的光伏板、蓄电池数目和汽油发电机额定功率满足试验条件下牵引装置的用电需求。

参 考 文 献

- [1] 郑耀泉,刘婴谷,严海军,等.喷灌与微灌技术应用[M].北京:中国水利水电出版社,2015.
- [2] 袁寿其,李红,王新坤.中国节水灌溉装备与发展现状、问题、趋势与建议[J].排灌机械工程学报,2015,33(1):78-92.
YUAN Shouqi, LI Hong, WANG Xinkun. Status, problems, trends and suggestions for water-saving irrigation equipment in China [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015, 33(1): 78 - 92. (in Chinese)
- [3] 黎耀军,陈为升,严海军,等.卷盘式喷灌机冲击式水涡轮结构参数优化[J/OL].农业机械学报,2018,49(8):145-151.
LI Yaojun, CHEN Weisheng, YAN Haijun, et al. Optimization of structure parameters for impulse water turbine of hose reel irrigator[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49 (8): 145 - 151. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180816&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.016. (in Chinese)
- [4] 汤玲迪,袁寿其,汤跃.卷盘式喷灌机研究进展与发展趋势分析[J/OL].农业机械学报,2018,49(10):1-15.
TANG Lingdi, YUAN Shouqi, TANG Yue. Analysis on research progress and development trend of hose reel irrigator[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49 (10): 1 - 15. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181001&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.001. (in Chinese)
- [5] 顾哲,汤跃,汤玲迪,等.卷盘式喷灌机卷盘驱动负载计算与分析[J].农机化研究,2015,37(8):70-73.
GU Zhe, TANG Yue, TANG Lingdi, et al. Calculation and analysis on load of hose reel irrigators[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015,37(8): 70 - 73. (in Chinese)
- [6] 吴红斌,陈斌,郭彩云.风光互补发电系统中混合储能单元的容量优化[J].农业工程学报,2011,27(4):241-245.
WU Hongbin, CHEN Bin, GUO Caiyun. Capacity optimization of hybrid energy storage units in wind/solar generation system [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 241 - 245. (in Chinese)
- [7] 邓晓亭,朱思洪,高辉松,等.混合动力拖拉机传动系统设计理论与方法[J/OL].农业机械学报,2012,43(8):24-31.
DENG Xiaoting, ZHU Sihong, GAO Huisong, et al. Design theory and method for drive train of hybrid electric tractor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43 (8): 24 - 31. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120805&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.005. (in Chinese)
- [8] 邓晓亭,朱思洪,钱忠祥,等.混合动力拖拉机动力耦合装置的研制[J].农业工程学报,2012,28(16):29-34.
DENG Xiaoting, ZHU Sihong, QIAN Zhongxiang, et al. Research and development on power coupling device of hybrid electric tractor[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(16): 29 - 34. (in Chinese)
- [9] ISMAIL M S, MOGHAVVEMI M, MAHLIA T M I. Design of an optimized photovoltaic and microturbine hybrid power system for a remote small community: case study of palestine[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 75: 271 - 281.
- [10] CAMPANA P E, LI H, ZHANG J, et al. Economic optimization of photovoltaic water pumping systems for irrigation[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 95: 32 - 41.
- [11] 钱旺,杨世昆,刘贵林,等.太阳能牧草干燥成套设备干燥工艺参数优化[J/OL].农业机械学报,2018,49(8):110-118.
QIAN Wang, YANG Shikun, LIU Guilin, et al. Optimization of drying process parameters of solar herbage dry equipment[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49 (8): 110 - 118. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180813&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.013. (in Chinese)
- [12] 张净,沈捷,刘晓梅.基于太阳能供电的行走式智能增氧机器人研究[J/OL].农业机械学报,2017,48(12):340-345.
ZHANG Jing, SHEN Jie, LIU Xiaomei. Realization of walking intelligence oxygenated robot based on solar power[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 340 - 345. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171242&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.042. (in Chinese)
- [13] 杜建强,张俊国,郭志平,等.太阳能饲草干燥空气集热器自动跟踪系统应用研究[J/OL].农业机械学报,2014,45(增刊):309-313.
DU Jianqiang, ZHANG Junguo, GUO Zhiping, et al. Application research of solar forage drying air collector automatic tracking system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(Supp.):309 - 313. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2014s150&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/

- j. issn. 1000-1298. 2014, S0. 050. (in Chinese)
- [14] 刘厚林,崔建保,谈明高,等. 光伏离心泵负载匹配研究[J/OL]. 农业机械学报,2014, 45(7):98-102.
LIU Houlin, CUI Jianbao, TAN Minggao, et al. Investigation on load matching characteristics of photovoltaic centrifugal pumps [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 98 - 102. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140716&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn. 1000-1298. 2014.07.016. (in Chinese)
- [15] NORDIN N D, RAHMAN H A. A novel optimization method for designing stand alone photovoltaic system[J]. Renewable Energy, 2016, 89: 706-715.
- [16] 张超,朱思洪,王军洋,等. 太阳能园艺拖拉机驱动系统匹配设计与性能分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11):24-30.
ZHANG Chao, ZHU Sihong, WANG Junyang, et al. Matching design and performance analysis for driving system of solar garden tractor[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11): 24 - 30. (in Chinese)
- [17] 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 Ke'nan, WU Pute, ZHU Delan, et al. Design and test of driving power and photovoltaic power matching for solar-driven sprinkler irrigation unit[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(16): 96 - 103. (in Chinese)
- [18] 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, 29(12):86-93.
LI Jianian, HONG Tiansheng, NI Huina. Constant pressure water supply automatic device designed for micro-irrigation system based on solar energy[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(12): 86 - 93. (in Chinese)
- [19] 李光林,李晓东,曾庆欣. 基于太阳能的柑桔园自动灌溉与土壤含水率监测系统研制[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12):146-152.
LI Guanglin, LI Xiaodong, ZENG Qingxin. Development of automatic irrigation and soil moisture monitoring system based on solar energy in citrus orchard[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(12): 146 - 152. (in Chinese)
- [20] SINHA S, CHANDEL S S. Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic-wind based hybrid energy systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 50: 755-769.
- [21] KHAN M J, YADAV A K, MATHEW L. Techno-economic feasibility analysis of different combinations of PV-wind-diesel-battery hybrid system for telecommunication applications in different cities of Punjab, India[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 76: 577-607.
- [22] MAHERI A. Multi-objective design optimization of standalone hybrid wind-PV-diesel systems under uncertainties[J]. Renewable Energy, 2014, 66(6): 650-661.
- [23] 吴小刚,刘宗歧,田立亭,等. 独立光伏系统光储容量优化配置方法[J]. 电网技术, 2014, 38(5):1271-1276.
WU Xiaogang, LIU Zongqi, TIAN Liting, et al. Optimized capacity configuration of photovoltaic generation and energy storage device for stand-alone photovoltaic generation system[J]. Power System Technology, 2014, 38 (5): 1271 - 1276. (in Chinese)
- [24] ZHAO J, YUAN X. 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.
- [25] AMROLLAHI M H, BATHAEI S M T. Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind generation together with energy storage system in a stand-alone micro-grid subjected to demand response[J]. Applied Energy, 2017, 202: 66-77.
- [26] OLCAN C. Multi-objective analytical model for optimal sizing of stand-alone photovoltaic water pumping systems[J]. Energy Conversion & Management, 2015, 100: 358-369.
- [27] WANG R, LI G, MING M, et al. An efficient multi-objective model and algorithm for sizing a stand-alone hybrid renewable energy system[J]. Energy, 2017, 141: 2288-2299.
- [28] BATAINEH K, DALALAH D. Optimal configuration for design of stand-alone PV system[J]. Smart Grid and Renewable Energy, 2012(3): 139-147.
- [29] 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 Shibiao, ZHU Delan, GE Maosheng, 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. (in Chinese)
- [30] CHAUHAN A, SAINI R P. Size optimization and demand response of a stand-alone integrated renewable energy system[J]. Energy, 2017, 124: 59-73.
- [31] TEZER T, YAMAN R, YAMAN G, et al. Evaluation of approaches used for optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 73: 840-853.
- [32] 李整. 基于粒子群优化算法的机组组合问题的研究[D]. 北京:华北电力大学, 2016.