

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200922

# 计及生物质能的热电联供系统经济运行优化策略

郭威<sup>1</sup>, 杨鹏<sup>2</sup>, 孙胜博<sup>2</sup>, 李欢<sup>3</sup>, 王晓甜<sup>1</sup>, 张秀丽<sup>1</sup>

(1. 国网河北省电力有限公司营销服务中心, 河北 石家庄 050021; 2. 国网河北省电力有限公司, 河北 石家庄 050021; 3. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

**摘要:** 为提升我国农村地区生物质能利用效率, 借助热电联供(CHP)系统高用能效率优势, 给出一种计及生物质能的 CHP 系统经济运行优化策略。在考虑了运行功率及容量约束下, 对生物质能燃气发电、光伏发电以及储能电池等的运行成本进行建模分析, 将 CHP 系统运行经济性优化转化为求解最小系统运行成本问题。在优化问题求解过程中, 为提升传统粒子群算法求解效率, 采用灰狼-粒子群算法降低优化过程陷入局部最优概率, 提升优化算法运行速度。仿真结果表明, 灰狼-粒子群算法具有更快的算法收敛速度, 能够改善计及生物质能的 CHP 系统用能经济性, 有效降低农村地区用能费用, 促进生物质能推广应用。

**关键词:** 生物质能; 热电联供; 多能互补; 灰狼算法; 粒子群算法; 多目标优化

## Optimization strategy of a rural combined heat and power system considering biomass energy

GUO Wei<sup>1</sup>, YANG Peng<sup>2</sup>, SUN Shengbo<sup>2</sup>, LI Huan<sup>3</sup>, WANG Xiaotian<sup>1</sup>, ZHANG Xiuli<sup>1</sup>

(1. State Grid Hebei Marketing Service Center, Shijiazhuang 050021, China; 2. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China; 3. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** To improve the utilization efficiency of biomass energy in rural areas of China, by virtue of the advantages of the high energy efficiency of a Combined Heat and Power (CHP) system, an optimization strategy for economic operation of such a system considering biomass energy is proposed. Given the constraints of operating power and capacity, the operational costs of biomass gas power and photovoltaic power generation and an energy storage battery are modeled and analyzed. The operational economy optimization of a CHP system is transformed into solving the minimum system operation cost problem. To improve the efficiency of a traditional Particle Swarm Optimization (PSO), the Gray Wolf Particle Swarm Optimization (GW-PSO) algorithm is used to reduce the probability of falling into a local optimum and improve the running speed of the algorithm. The simulation results show that the proposed GW-PSO algorithm has faster convergence, and can improve the energy efficiency of a CHP system with biomass energy. It can effectively reduce energy consumption in rural areas. This could promote the popularization and application of biomass energy.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51806242) and the Science and Technology Project of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. (No. B104DY200299).

**Key words:** biomass energy; CHP; multi energy complementary; grey wolf optimization; particle swarm optimization; multi-objective optimization

## 0 引言

现阶段我国农村地区能源基础设施建设滞后, 存在传统石化能源用能成本较高, 清洁能源利用占比较低等问题。随着能源技术的进步, 生物质能逐

步得到开发利用, 将农业生产废弃有机物作为生物质燃料, 通过气化、燃烧等技术进行供暖和发电, 能有效缓解我国农村经济发展中能源短缺困境。

生物质能源具有分布广、可再生、供能成本低廉等优势, 然而, 生物质燃烧供能与小型火电发电类似, 用能效率较低。考虑到以热电联供(Combined Heat and Power, CHP)为代表的分布式供能系统可同时完成发电与供热, 通过能源梯级利用, 能够极

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51806242); 国家电网河北省电力有限公司科技项目资助(B104DY200299)

大提升能源使用效率。因此, 将生物质燃烧供能与 CHP 系统进行整合, 能够有效提升生物质能源的利用效率<sup>[1-3]</sup>。从工程规划角度出发, 文献[4]详细分析和比较了生物质供能方式在实际工程中的建设模式。文献[5]提出一种计及生物质能气化燃烧的 CCHP 系统, 并对不同环境条件和系统参数下的用能效率进行了对比分析。文献[6]则对 CHP 中生物质供能的能耗和经济性进行了分析。从上述研究可以看出, 与单独采用生物质能发电及供能相比, 利用 CHP 系统对生物质供能进行整合, 能够有效降低农村综合用能成本, 促进生物质的能进一步推广利用。

在上述研究基础上, 开展计及生物质能的 CHP 系统运行优化调度研究, 能够进一步提升用能经济性。然而, 现有研究多针对传统用能场景展开。文献[7]在对典型 CHP 系统进行分析的基础上, 提出了一种调度优化模型和优化调度通用建模方法。文献[8]提出了一种适用于 CHP 系统的两级规划调度算法, 在上级中主要对系统内部设备的类型和容量进行最优规划, 在下级中侧重于考虑内部设备间的能量流调度。文献[9]采用模型预测控制技术对 CHP 系统动态运行进行优化控制, 反馈信号选取为预期与实际的系统出力偏差, 从而减少系统外部不确定性扰动对系统运行经济性的负面影响。文献[10]研究了基于光伏和风力发电的多能联供系统的调度方法。文献[11]则主要考虑了用户侧电力负荷以及电力交易价格波动情况, 在此基础上提出一种基于时间协调的 CHP 系统优化运行算法。针对 CHP 系统中复杂多目标优化问题, 文献[12]采用遗传算法进行求解, 得到基于能量流模型的系统优化运行参数。文献[13]提出基于粒子群算法的微网用能调度策略, 对微网与配电网间的电能交互进行综合优化, 但未充分考虑峰谷电价对调度经济性的影响。文献[14]主要研究了分布式大规模光伏风电混合微网的接入对电网稳定、经济运行的影响, 并对多种微网处理预测方法进行了对比。

综上所述, 现有研究多基于传统用能场景中大型 CHP 系统, 尚未考虑农村中储量丰富的生物质能对 CHP 系统运行经济性的影响。同时, 考虑到单独使用生物质能发电效率较低, 本文建立了计及生物质能的 CHP 系统运行模型, 并以最小化 CHP 系统运行成本为目标, 对包括系统内多能源协调运行进行统筹调度, 优化系统运行经济性。在优化问题求解过程中, 为提升传统粒子群算法求解效率, 提出灰狼-粒子群(GW-PSO)算法降低优化过程陷入局部最优的概率, 提升优化算法运行速度。

最后, 仿真结果验证了本文所提方法的有效性, 通过在农村 CHP 系统中增添生物质能发电, 能够有效提升 CHP 系统综合用能效率, 降低农村用能成本, 同时还有利于降低电网储备容量, 提升电力系统经济性。

## 1 农村 CHP 系统数学模型

本研究中首先对农村小型 CHP 微网中包含的设备进行建模分析, 包括生物质能供电系统、光伏、储能电池以及热负荷等部分, 如图 1 所示。

针对农村地区用能需求, 该 CHP 系统中设计了生物质能供电系统, 包括生物质热解气气化装置、储气系统以及燃气发电机组, 通过燃烧生物质热解气进行发电<sup>[15]</sup>。为充分利用农村地区清洁农业, 系统中还包括光伏(PV)模块。PV 的间歇性出力特征会降低配电网稳定性, 同时考虑到有效利用配电网阶梯电价, 本文中农村小型 CHP 微网配备了储能电池组。为实现冬季储热和供热需求, 系统中还包含热回收系统储热水罐等设备。

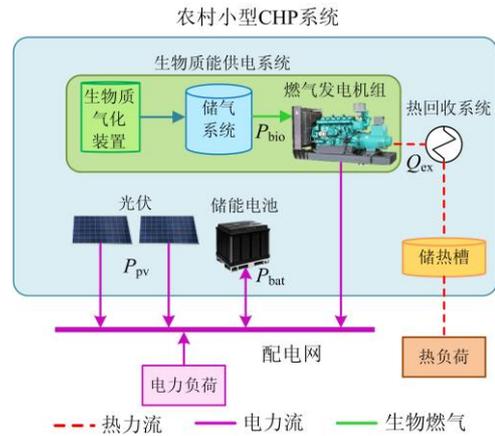


图 1 农村 CHP 系统模型

Fig. 1 Rural CHP system model

### 1.1 生物质能燃气发电模型

生物质能转化为电能需通过气化、存储以及燃气发电机中燃烧等环节。燃气发电机供电量  $E_{\text{bio}}(t)$  为

$$E_{\text{bio}}(t) = P_{\text{bio}}(t)\Delta t \quad (1)$$

式中,  $P_{\text{bio}}(t)$  为发电功率。生物质燃气由储气系统提供, 其消耗量  $V_{\text{bio}}(t)$  为

$$V_{\text{bio}}(t) = E_{\text{bio}}(t)/\eta_{\text{bio}}(t) \quad (2)$$

式中,  $\eta_{\text{bio}}(t)$  为生物质燃气发电效率, 并由式(3)给出。

$$\eta_{\text{bio}}(t) = a(P_{\text{bio}}^*(t))^3 + b(P_{\text{bio}}^*(t))^2 + cP_{\text{bio}}^*(t) + d \quad (3)$$

式中:  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  分别为效率系数;  $P_{\text{bio}}^*(t)$  为  $P_{\text{bio}}(t)$

的标么值。

生物质燃气储气量  $U_{\text{bio}}(t)$  由式(4)给出。

$$U_{\text{bio}}(t + \Delta t) = U_{\text{bio}}(t)(1 - \tau_{\text{bio}}) - P_{\text{bio}}(t)\Delta t / \eta_{\text{bio}} \quad (4)$$

式中:  $U_{\text{bio}}(t + \Delta t)$  为  $\Delta t$  时段后的储气量;  $\tau_{\text{bio}}$  为储气量衰减系数。

### 1.2 光伏电池模型

光伏电池输电功率为环境温度和光照强度的函数, 可表示为

$$P_{\text{pv}}(t) = P_{\text{pv}}^{\text{std}} L_{\text{ac}} [1 + k(T - T_r)] / L_{\text{std}} \quad (5)$$

式中:  $P_{\text{pv}}^{\text{std}}$  为额定光伏输出功率;  $P_{\text{pv}}(t)$  为  $t$  时刻光伏输出功率;  $L_{\text{ac}}$  为  $t$  时刻光照强度;  $k$  为功率温度系数;  $T$  为  $t$  时刻环境温度;  $T_r$  为基准环境温度, 单位为  $K$ ;  $L_{\text{std}}$  为基准测试时的光照强度。

### 1.3 储能电池模型

作为重要的功能缓冲机制, 储能电池能够平稳供能过程的随机出力波动。电池储能模型为

$$S_{\text{bat}}(t + \Delta t) = S_{\text{bat}}(t)(1 - \tau_{\text{bat}}) + (P_{\text{bat}}^{\text{c}}(t)\eta_{\text{c}}^{\text{b}} - P_{\text{bat}}^{\text{d}}(t)/\eta_{\text{d}}^{\text{b}})\Delta t \quad (6)$$

式中:  $S_{\text{bat}}(t)$  和  $S_{\text{bat}}(t + \Delta t)$  分别为  $t$  时刻和  $\Delta t$  时段后的电池容量;  $\tau_{\text{bat}}$  为电池组自放电率;  $P_{\text{bat}}^{\text{c}}(t)$  和  $P_{\text{bat}}^{\text{d}}(t)$  分别为电池的充放电功率;  $\eta_{\text{c}}^{\text{b}}$  和  $\eta_{\text{d}}^{\text{b}}$  分别为电池的充放电效率。

### 1.4 热回收系统模型

热回收系统负责对生物质能燃气发电机的余热进行回收, 并将该热能输送至系统热负荷。其中, 热回收系统输出热功率  $P_{\text{Q}}(t)$  为

$$P_{\text{Q}}(t) = P_{\text{bio}}(t)\gamma\eta_{\text{ex}}\eta_{\text{heat}} \quad (7)$$

式中:  $\gamma$  为燃气发电机热电比;  $\eta_{\text{ex}}$  为热回收系统效率;  $\eta_{\text{heat}}$  为燃气发电机余热用于制热的比例。

## 2 农村 CHP 系统经济运行优化

### 2.1 目标函数

在计及生物质能的 CHP 系统经济运行优化调度中, 运行经济性指标选取为系统单日用能费用, 并将该费用的最小化作为优化目标。

农村 CHP 运行成本主要包括四部分: 购电成本  $C_{\text{elec}}$ 、生物质热解气发电成本  $C_{\text{bio}}^{\text{gas}}$ 、燃气轮机运行成本  $C_{\text{bio}}^{\text{oper}}$  以及储能电池组运行成本  $C_{\text{bat}}^{\text{oper}}$ , 该目标函数可建模为

$$\min C_{\text{total}} = C_{\text{elec}} + C_{\text{bio}}^{\text{gas}} + C_{\text{bio}}^{\text{oper}} + C_{\text{bat}}^{\text{oper}} \quad (8)$$

式中, 各项成本可进一步分解为

#### 1) 购电成本 $C_{\text{elec}}$

$$C_{\text{elec}} = \sum_{i=1}^N E_i^{\text{grid}} P_i \quad (9)$$

式中:  $E_i^{\text{grid}}$  和  $P_i$  分别为采用阶梯电价方案时第  $i$  时段 CHP 系统购自电网的电量和电价;  $N$  为阶梯电价划分的时间段数量。

#### 2) 生物质燃气发电成本 $C_{\text{bio}}^{\text{gas}}$

$$C_{\text{bio}}^{\text{gas}} = a_{\text{bg}}(P_{\text{bio}}(t))^2 + b_{\text{bg}}P_{\text{bio}}(t) + c_{\text{bg}} \quad (10)$$

式中,  $a_{\text{bg}}$ 、 $b_{\text{bg}}$ 、 $c_{\text{bg}}$  分别为成本二次函数系数。

#### 3) 燃气轮机运行成本 $C_{\text{bio}}^{\text{oper}}$

$$C_{\text{bio}}^{\text{oper}}(t) = N_{\text{oper}}\beta(1 - e^{(-t_0/\tau_g)}) \quad (11)$$

式中:  $N_{\text{oper}}$  为启动次数;  $\beta$  为单次启动成本;  $t_0$  为启动时间;  $\tau_g$  为发电机到达稳态时间常数。

#### 4) 储能电池组运行成本 $C_{\text{bat}}^{\text{oper}}$

$$C_{\text{bat}}^{\text{oper}}(t) = \eta_{\text{bat}} \left| \delta P_{\text{bat}}^{\text{c}}(t) + (1 - \delta)P_{\text{bat}}^{\text{d}}(t) \right| \Delta t \quad (12)$$

式中:  $\eta_{\text{bat}}$  为单位时间运行成本;  $\delta$  为布尔变量, 当  $\delta = 1/0$  时分别表示电池组处于充电/放电状态。

### 2.2 约束条件

CHP 系统包含的各实际设备在运行过程中, 均存在一定的物理约束, 如最大输出功率以及储能容量等, CHP 系统运行优化调度实际为有约束优化问题, 因此加入如下约束条件。

1) 生物质能燃气发电机可运行在额定功率或低功率状态, 因此其运行约束为

$$\begin{cases} P_{\text{bio}}^{\text{min}} \leq P_{\text{bio}}(t) \leq P_{\text{bio}}^{\text{std}} \\ |P_{\text{bio}}(t + \Delta t) - P_{\text{bio}}(t)| \leq P_{\text{bio}}^{\text{ramp}} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $P_{\text{bio}}^{\text{min}}$  和  $P_{\text{bio}}^{\text{std}}$  分别为生物质供能最小与额定输出功率;  $P_{\text{bio}}^{\text{ramp}}$  为最大允许斜坡速率。

#### 2) 储能电池容量约束

$$B^{\text{min}} \leq B^{\text{d/c}}(t) \leq B^{\text{max}} \quad (14)$$

式中,  $B^{\text{min/max}}$  表示储能电池的最大/最小容量。

3) 为保护储能电池, 延长其使用年限, 需要对储能电池充放电功率进行限制。

$$\begin{cases} P_{\text{th}}^{\text{c,min}} \leq P_{\text{bat}}^{\text{c}}(t) \leq P_{\text{th}}^{\text{c,max}} \\ P_{\text{th}}^{\text{d,min}} \leq P_{\text{bat}}^{\text{d}}(t) \leq P_{\text{th}}^{\text{d,max}} \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $P_{\text{th}}^{\text{c/d,min}}$  和  $P_{\text{th}}^{\text{c/d,max}}$  分别为充/放电功率限制。

#### 4) 电负荷平衡约束

$$P_{\text{bio}}(t) + P_{\text{pv}}(t) + \delta P_{\text{bat}}^{\text{d}}(t) + P_{\text{grid}}(t) = P_{\text{user}}(t) + (1 - \delta)P_{\text{bat}}^{\text{c}}(t) \quad (16)$$

式中:  $\delta$  为布尔变量, 当  $\delta = 1/0$  时, 分别表示电池放电/充电;  $P_{\text{grid}}(t)$  为配电网输入功率;  $P_{\text{user}}(t)$  为用

户用电功率。

### 5) 热负荷约束

$$Q_{\text{store}}(t) + Q_{\text{ex}}(t) \geq Q_{\text{load}} \quad (17)$$

式中:  $Q_{\text{store}}(t)$  为储热系统现有储热;  $Q_{\text{ex}}(t)$  为燃气轮机余热;  $Q_{\text{load}}$  为用户热负荷需求。

## 3 农村 CHP 系统运行参数优化

由上述分析过程可知, 本文所建优化模型中包含目标函数及约束条件复杂, 对于这类问题, 多数文献均采用粒子群算法(PSO)进行求解<sup>[16]</sup>。PSO 算法具有易于实现的特点, 得到了广泛应用。然而, 对于有多个局部极值点的函数, PSO 算法的搜索过程容易停滞在局部极值点中, 因此并不能保证优化结果一定能够收敛到全局极值点上。因此, 本文将局部搜索能力强的灰狼算法(Grey Wolf optimizer, GW)<sup>[17-18]</sup>与 PSO 结合, 提出 GW-PSO 算法, 对计及生物质能的农村 CHP 系统经济运行进行优化。

### 3.1 粒子群算法

在粒子群算法中, 粒子的每一个位置与算法的解空间存在一一映射关系, 粒子的状态可表示为当前的位置量和速度量, 如式(18)、式(19)所示。

$$v_{id}^{k+1} = w \cdot v_{id}^k + c_1 \cdot r_1 (p_{id,\text{best}}^k - x_{id}^k) + \quad (18)$$

$$c_2 \cdot r_2 (p_{gd,\text{best}}^k - x_{id}^k)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^k \quad (19)$$

式中:  $v_{id}^k$  为粒子  $i$  在维度  $d$  的第  $k$  次迭代时的速度;  $x_{id}^k$  为粒子  $i$  第  $k$  次迭代的位置;  $p_{id,\text{best}}^k$  为粒子  $i$  在第  $k$  次迭代时得到的局部最优位置;  $p_{gd,\text{best}}^k$  为第  $k$  次迭代发现的群全局最优位置;  $w$  为惯性因子;  $c_1$  和  $c_2$  为分别为自学习因子和社会学习因子;  $r_1$  和  $r_2$  为位于闭区间[0,1]内且服从均匀分布的随机变量。

### 3.2 灰狼算法

灰狼算法(Grey Wolf Optimizer, GWO)受灰狼捕食猎物活动的启发而提出, 包括社会等级分层、跟踪、包围和攻击猎物等步骤。灰狼被分为  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$ 、 $\omega$  四个阶层, 其中  $\alpha$  代表最优解,  $\beta$ 、 $\delta$  代表排序第二和第三的解,  $\omega$  代表其余解。灰狼对猎物的围捕行为可表示为

$$D_{id}^k = |C \times X_{pd}^k - X_{id}^k| \quad (20)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{pd}^k - A \times D_{id}^k \quad (21)$$

式中:  $D_{id}^k$  为第  $i$  只灰狼在第  $k$  次迭代与猎物之间的距离;  $X_{pd}^k$  为猎物位置;  $X_{id}^k$  为第  $k$  次迭代中灰狼  $i$  的位置。  $A$  和  $C$  为系数向量, 计算公式为

$$A = a \times (2r_3 - 1) \quad (22)$$

$$C = 2 \times r_4 \quad (23)$$

式中,  $r_3$  和  $r_4$  为随机变量, 服从位于闭区间[0,1]内的均匀分布。编号为  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\delta$  的成员主导了搜索过程的进行, 狼群中其他成员根据狼  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\delta$  的状态进行移动。该过程可表示为

$$\begin{cases} D_{\alpha} = |C_1 \times X_{\alpha}^k - X_{id}^k| \\ D_{\beta} = |C_2 \times X_{\beta}^k - X_{id}^k| \\ D_{\delta} = |C_3 \times X_{\delta}^k - X_{id}^k| \end{cases} \quad (24)$$

式中,  $X_{\alpha}^k$ 、 $X_{\beta}^k$ 、 $X_{\delta}^k$  分别为第  $k$  次迭代时最好的三个灰狼的位置。

$$\begin{cases} X_1^k = |X_{\alpha}^k - a_1 D_{\alpha}^k| \\ X_2^k = |X_{\beta}^k - a_2 D_{\beta}^k| \\ X_3^k = |X_{\delta}^k - a_3 D_{\delta}^k| \end{cases} \quad (25)$$

$$X_{pd}^{k+1} = \frac{X_1^k + X_2^k + X_3^k}{3} \quad (26)$$

式中,  $X_{pd}^{k+1}$  为猎物的新位置, 是种群中最好三只狼的位置的平均值。

### 3.3 灰狼-粒子群算法 (GW-PSO)

为降低传统 PSO 算法中部分粒子陷入局部最小的概率, 本文利用 GW 算法将一些粒子定向到 GW 算法位置, 以取代定向到随机位置。GW-PSO 算法流程如图 2 所示, 其中  $P_{pbest}(i)$  和  $P_{pbest}(i-1)$  分

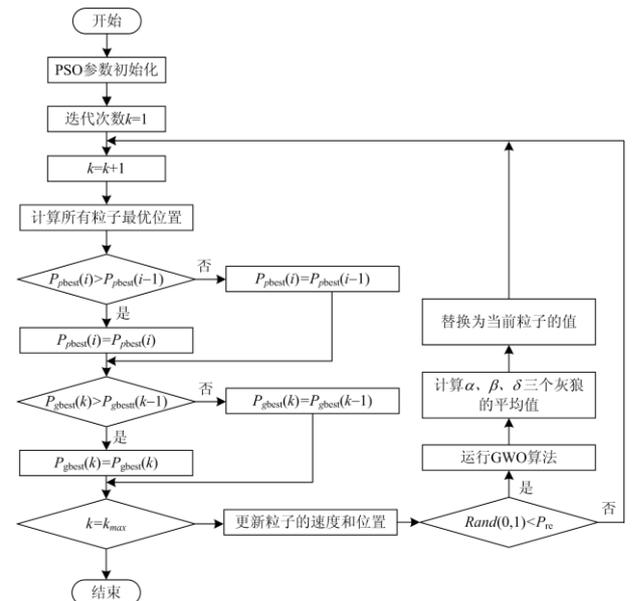


图 2 GW-PSO 算法流程图

Fig. 2 GW-PSO algorithm flow chart

别为粒子  $i$  和  $i-1$  的局部最优值;  $P_{gbest}(k)$  和  $P_{gbest}(k-1)$  分别为第  $k$  和第  $k-1$  次迭代中得到的全局最优解; 函数  $\text{Rand}(0,1)$  返回服从均匀分布的随机参量;  $P_{re}$  为更新变异率。

### 3.4 基于 GW-PSO 的参数优化流程

由于需对 24 h 系统运行调度进行优化, 调度周期为 1 h, 因此算法粒子按式(27)进行编码, 其中变量下标  $i(1 \leq i \leq 24)$  表示该变量属于第  $i$  个调度时间段。优化过程算法粒子编码为

$$X_{oper,i} = [P_{bio,i} \quad P_{bat,i}^c \quad P_{bat,i}^d \quad P_{pv,i} \quad P_{Q,i}]^T \quad (27)$$

在建立编码粒子向量基础上, 进行如下 GW-PSO 优化流程:

1) 首先对种群参数进行初始化设置, 包括粒子初始位置、粒子初始速度以及粒子的数量。

2) 应用 GW-PSO 算法计算成本函数, 利用本次迭代中得到的粒子速度和位置值, 计算目标函数值, 但满足收敛终值时, 算法停止迭代; 否则跳转到步骤 3) 继续执行。

3) 当  $P_{re} \leq \text{Rand}(0,1)$  时, 根据基本 PSO 粒子状态更新式(18)、式(19), 对全部粒子的速度和位置值进行更新。

4) 当  $P_{re} > \text{Rand}(0,1)$  时, 则按照灰狼算法对粒子位置进行重定向, 计算灰狼算法中  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\delta$  的平均值, 并将其替换为当前粒子状态值。

5) 生成新的种群转到步骤 2)。

6) 当算法迭代次数达到预设最大值  $k_{max}$  时, 则迭代停止, 根据最终的粒子状态值代入目标函数计算, 得到最优值。

## 4 算例分析

### 4.1 仿真参数设置

GAMS (General Algebraic Modeling System) 是一款专用于求解线性、非线性和混合整数最优化问题的数值分析软件, 具有建模便利和求解器种类丰富等优点, 因此我们采用 GAMS 对 GW-PSO 的运行优化进行了仿真分析。以中国北方某农村 CHP 微网冬季用能规划为例, 采用图 1 中示范系统的能源配置形式。参考文献[19-20]中系统参数配置, 给出了典型光伏出力预测值, 如图 3 所示, 其中光伏出力按照最大功率运行。

系统中共包括 1 台生物质热解气储气罐、1 台燃气发电机、2 组光伏电池、2 组储能电池组以及 1 具包括热回收装置在内的储热槽。仿真共包含 20 户农村家庭的用能情况, 并假设平均用电功率不超过 12 kW/每户。借鉴现有文献中 CHP 系统仿真参

数设置[21-22], 本文中设备参数设置如表 1 所示。

由于供电周期内存在明显的峰谷差异, 因此电力企业往往采用阶梯电价, 以指导电力用户进行错峰用电以调节用电负荷。仿真中以河北省 2019 年版城镇及农村居民生活用电电价(1 kV 以下)为依据, 进行了配电网阶梯电价设置。其中, 平段、高峰和低谷时段及其相应电价如表 2 所示。生物质能发电价格固定为 0.218 元/kWh[23]。

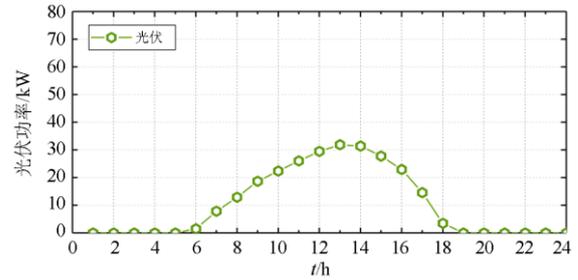


图 3 冬季典型光伏出力预测

Fig. 3 Prediction of typical photovoltaic output in winter

表 1 CHP 系统参数设置

Table 1 System parameter setting of CHP

设备	参数	数值
燃气轮机	效率系数 $a$	7.5
	效率系数 $b$	25.6
	效率系数 $c$	-14.7
	效率系数 $d$	10.2
	储气量衰减系数 $\tau_{bio}$	$10^{-4}$
	生物质热解气发电系数 $\eta_{bio}$	42%
光伏电池组	额定输出功率 $P_{pv}^{std}$	20 kWp
	额定容量 $E_{bat}(t)$	15 kWh
储能电池组	自放电率 $\tau_{bat}$	0.035
	充电效率 $\eta_c^b$	0.9
	放电效率 $\eta_d^b$	0.95
热负荷	热回收系统效率 $\eta_{ex}$	0.68

表 2 配电网阶梯电价

Table 2 System parameter setting of CHP

时段	起止时刻	电价/元
平段	08:00—09:00	0.52
高峰	09:00—12:00	0.55
平段	12:00—17:00	0.52
高峰	17:00—22:00	0.55
平段	22:00—24:00	0.52
低谷	24:00—08:00	0.3

### 4.2 算法性能对比

为了对本文提出的 GW-PSO 算法的收敛性能

进行测试, 以式(8)中单日用能成本函数为优化对象, 与差分进化算法(Differential Evolution, DE)以及单独采用 PSO、GW 时的收敛速度进行了对比, 结果如图 4 所示。

可以看出, 本文所提 GW-PSO 算法的收敛速度明显快于 PSO、GW 和 DE 算法。这是由于 GW-PSO 分别融合了 GW 与 PSO 算法的优点, 能够利用 GWO 算法的探测能力来降低陷入局部最优的风险, 不同于将粒子重定向到随机位置, GW-PSO 将解空间中的粒子重定向到 GWO 算法位置。因此, 当迭代开始后, 能够以最快的收敛速度收敛, 且 500 次迭代后用能费用收敛终值低于 PSO 算法。表明 GW-PSO 算法能够在更短时间内对农村 CHP 系统经济运行进行优化调度配置, 提升系统响应速度。

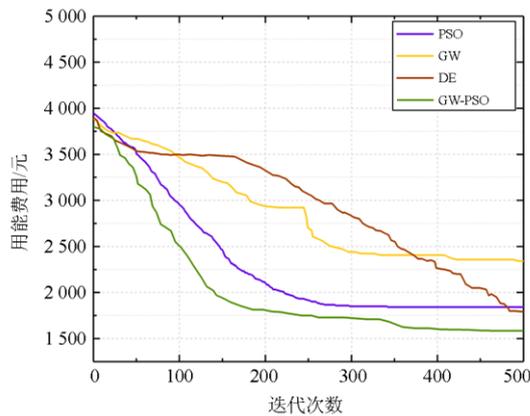


图 4 算法收敛速度对比

Fig. 4 Comparison of algorithm convergence rate

### 4.3 算例分析

选取某农村地区典型冬季电热负荷数据作为调度分析对象<sup>[24]</sup>, 调度周期为 1 h, 通过最小化系统运行成本, 可以获得生物质热解气发电、光伏电池组和储能电池在各个时段的最优出力。为检验农村 CHP 系统对生物质能用能效率和经济性提升效果, 仿真中对比了三种场景下的用能效率和经济性。

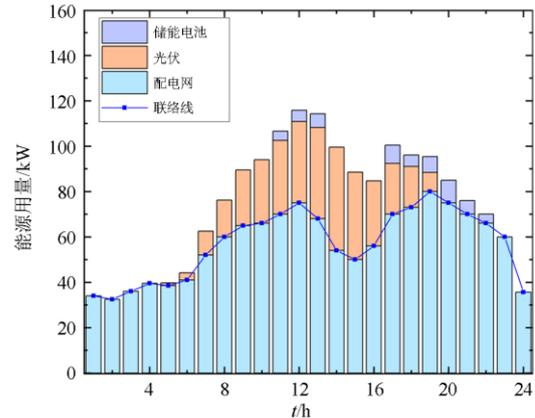
场景 1: 不适用生物质能作为电能来源, 仅使用配电网、光伏和储能电池进行能源调度和供应。

场景 2: 增加生物质能发电, 但未进行燃气轮机余热回收, 其余配置与场景 1 相同。

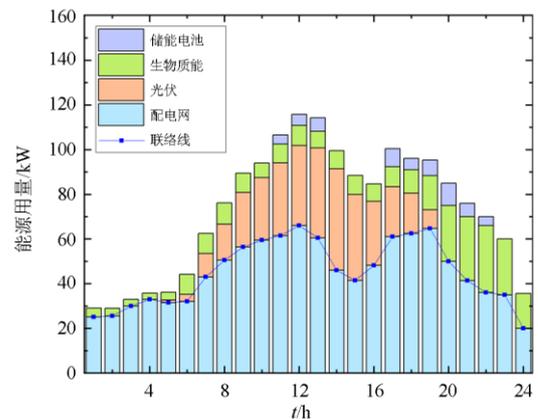
场景 3: 在场景 2 中利用热回收系统实现余热回收, 其余配置与场景 2 相同。

图 5 为运行 GW-PSO 算法后, 以单日综合用能成本最低为目标, 得到的农村小型 CHP 系统中各能源出力情况。场景 1 中在未使用生物质能时, 用户用电主要取自配电网和光伏, 在低谷电价阶段, 储

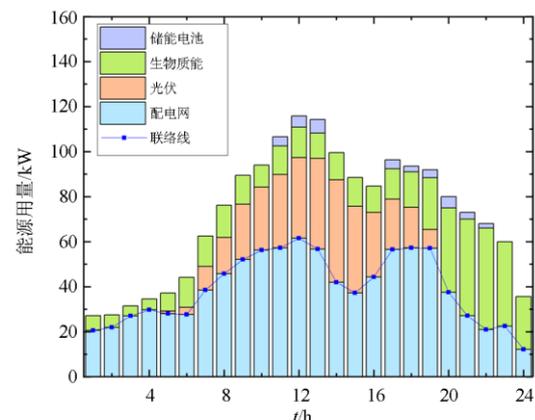
能电池利用系统外部主电网进行充电, 而在其他电价阶段, 储能电池可根据实际用能需求进行供电, 实现电能利用的削峰填谷。



(a) 场景 1 用能调度结果



(b) 场景 2 用能调度结果



(c) 场景 3 用能调度结果

图 5 不同场景能源出力

Fig. 5 Scheduling results of different scenarios

场景 2 中增加了生物质能供电方式, 因此在高峰电价时段, 能够利用更低成本的生物质能进行供

电。由于满负荷运行的燃气轮机具有更高的能源转化效率，因此运行经济性更好，用电成本更低。同时，在高峰电价时段，仍可继续调度储能电池供电以充分满足用能需求。然而在电价低谷阶段，由于采用电网购电成本更低，因此生物质能供电量占比最小。在场景 3 中，由于采用了燃气轮机余热回收，能够将多余热量存储在储热系统中，降低了系统中为满足用户热能需求造成的电力能耗，因此可进一步降低电网购电量。

图 6 为三种用能场景下，总计 20 户居民的单日用能费用对比，其中横轴为时间，纵轴为对应小时内的平均用能费用。可以看出，在用能低谷时段，三种场景下各时间段的用能费用接近。然而在高峰用能时段，生物质能发电成本低于配电网购电，因此采用生物质能发电补充用电需求，相比于场景 1，场景 2 中 24 h 总计用能费用降低约 18%。在场景 3 中，余热回收降低了夜间供热所需电能费用，因此进一步降低了用能费用，提升用能经济性，24 h 总计用能费用约为 1 468 元。

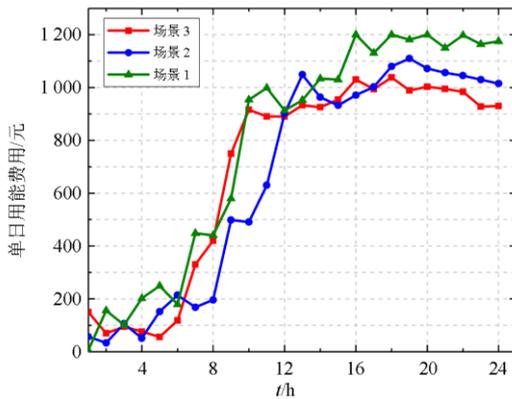


图 6 三种场景下用能费用对比

Fig. 6 Comparison of energy consumption costs under three scenarios

图 7 为在场景 1 和场景 2 下的电网联络线调度功率，反应了对电网储备容量需求的大小。可以看出，在场景 1 中，最大储备容量均为 0.86 MW，而在场景 2 中引入生物质能多能联供模式后，最大储备容量为 0.54 MW，与场景 1 相比降低了约 37%，因此通过增加生物质能发电，并进行经济运行优化调度，能够有效降低农村 CHP 系统对区域电网储备容量的需求。

图 8 为选取典型工作日中，购电系数(电网购电量与用户用电量之比)与 CHP 系统运行效率的关系。当购电系数为 0 时，系统脱网运行；当购电系数为 1 时，系统完全依赖配电网供电。可以看出，

在 13 点购电系数为 0.2 时，农村 CHP 系统热效率为 57.5。在该时段，光伏出力达到峰值，且电、热负荷较低，因此系统将富余电力存储到储能电池中，具有最优经济性。

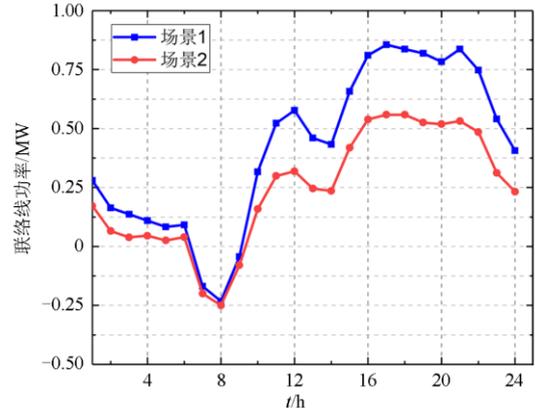


图 7 电网储备容量对比

Fig. 7 Comparison of grid reserve capacity

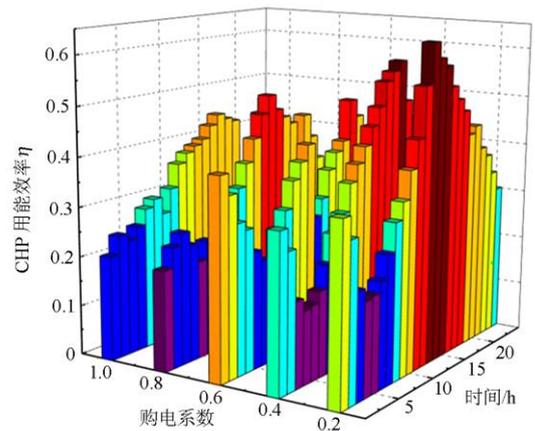


图 8 购电系数与 CHP 系统效率关系

Fig. 8 Relationship between power purchase coefficient and CHP system efficiency

### 5 结论

现有热电联供(CHP)系统较少考虑对生物质能加以利用，并进行相应的用能调度优化。针对该问题，借助热电联供(CHP)系统高用能效率的优势，本文给出一种计及生物质能的 CHP 系统经济运行优化策略。将最小化单日系统综合运行成本设置为优化目标，并根据实际运行要求，建立了 CHP 系统各模块(包括生物质能供电系统、光伏、储能电池以及热负荷系统)的运行约束。最后在传统粒子群算法基础上，设计并提出灰狼-粒子群优化算法，实现 CHP 系统运行最优参数的求解，为实现农村 CHP 经济运行调度提供依据。仿真结果表明，生物质能

与 CHP 系统联合供能可以显著降低农村综合用能成本,有效促进这一清洁能源在农村地区的推广利用。

### 参考文献

- [1] 刘辉, 刘强, 张立, 等. 考虑需求侧协同响应的热电联供微网多目标规划[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 43-51.  
LIU Hui, LIU Qiang, ZHANG Li, et al. Multi objective planning of cogeneration microgrid considering demand side collaborative response[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 43-51.
- [2] 程杉, 魏昭彬, 黄天力, 等. 基于多能互补的热电联供型微网优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 160-168.  
CHENG Shan, WEI Zhaobin, HUANG Tianli, et al. Optimal operation of cogeneration microgrid based on multi energy complementary[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 160-168.
- [3] HUANG W J, ZHANG N, KANG C Q, et al. From demand response to integrated demand response: review and prospect of research and application[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(2): 148-150. DOI: 10.1186/s41601-019-0126-4.
- [4] 曲磊, 李华. 12 MW 生物质直燃发电的热电联产系统节能经济性分析[J]. 能源研究与利用, 2010(2): 37-39.  
QU Lei, LI Hua. The energy-saving and economic analysis on CHP system of 12 MW biomass direct combustion power generation[J]. Energy Research & Utilization, 2010(2): 37-39.
- [5] WANG J J, YANG K, XU Z L, et al. Energy and exergy analyses of an integrated CCHP system with biomass air gasification[J]. Applied Energy, 2015, 142: 317-327.
- [6] 包哲, 王旭, 吴楠楠, 等. 生物质混煤冷热电联产系统能效分析[J]. 热力发电, 2020, 49(3): 31-37.  
BAO Zhe, WANG Xu, WU Nannan, et al. Analysis of energy efficiency of biomass-mixed coal cooling, heating and power cogeneration system[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(3): 31-37.
- [7] 蔺晨晖, 吴文传, 王彬, 等. 考虑调峰辅助服务的热电联合调度方法[J]. 中国电力, 2019, 52(6): 45-53.  
LIN Chenhui, WU Wenchuan, WANG Bin, et al. Combined heat and power dispatching method considering auxiliary services of peak shaving[J]. Electric Power, 2019, 52(6): 45-53.
- [8] GUO L, LIU W J, CAI J J, et al. A two-stage optimal planning and design method for combined cooling, heat and power microgrid system[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 74: 433-445.
- [9] GU W, WANG Z H, WU Z, et al. An online optimal dispatch schedule for CHP microgrids based on model predictive control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 8(5): 2332-2342.
- [10] 韩柳, 庄博, 吴耀武, 等. 风光水火联合运行电网的电源出力特性及相关性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 91-98.  
HAN Liu, ZHUANG Bo, WU Yaowu, et al. Study on power output characteristics and correlation of wind power, hydro thermal power grid[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 91-98.
- [11] LI Z M, XU Y. Temporally-coordinated optimal operation of a multi-energy microgrid under diverse uncertainties[J]. Applied Energy, 2019, 240: 719-729.
- [12] 胡荣, 张宓璐, 李振坤, 等. 计及可平移负荷的分布式冷热电联供系统优化运行[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 715-721.  
HU Rong, ZHANG Milu, LI Zhenkun, et al. Optimal operation for CCHP system considering shiftable loads[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 715-721.
- [13] 张少明, 盛四清. 基于改进粒子群算法的微网优化运行[J]. 中国电力, 2020, 53(5): 24-31.  
ZHANG Shaoming, SHENG Siqing. Optimal operation of microgrid based on improved particle swarm algorithm[J]. Electric Power, 2020, 53(5): 24-31.
- [14] 王洪坤, 葛磊蛟, 李宏伟, 等. 分布式光伏发电的特性分析与预测方法综述[J]. 电力建设, 2017, 38(7): 1-9.  
WANG Hongkun, GE Leijiao, LI Hongwei, et al. A review on characteristic analysis and prediction method of distributed PV[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(7): 1-9.
- [15] 张小桃, 段佛元, 黄勇, 等. 660 MW 机组燃煤锅炉耦合生物质气再燃数值模拟[J]. 热力发电, 2020, 49(3): 38-44.  
ZHANG Xiaotao, DUAN Foyuan, HUANG Yong, et al. Numerical simulation of coal-fired boiler coupled with biomass gas reburning for 660 MW unit[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(3): 38-44.
- [16] 王洪坤, 王守相, 潘志新, 等. 含高渗透分布式电源配电网灵活性提升优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 86-93.  
WANG Hongkun, WANG Shouxiang, PAN Zhixin, et al.

- Optimized dispatching method for flexibility improvement of distribution network with high-penetration distributed generation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(15): 86-93.
- [17] 吴亚雄, 高崇, 曹华珍, 等. 基于灰狼优化聚类算法的日负荷曲线聚类分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(6): 68-76.
- WU Yaxiong, GAO Chong, CAO Huazhen, et al. Clustering analysis of daily load curve based on Grey Wolf optimization clustering algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(6): 68-76.
- [18] 张惠娟, 冯一博, 张钦睿, 等. 基于改进灰狼优化算法的孤岛微网系统容量优化分析[J]. *可再生能源*, 2019, 37(3): 367-371.
- ZHANG Huijuan, FENG Yibo, ZHANG Qinrui, et al. Capacity optimization analysis of isolated island microgrid system based on improved gray wolf optimization algorithm[J]. *Renewable Energy*, 2019, 37(3): 367-371.
- [19] 门向阳, 曹军, 王泽森, 等. 能源互联微网型多能互补系统的构建与储能模式分析[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(19): 5727-5737.
- MEN Xiangyang, CAO Jun, WANG Zesen, et al. Construction and analysis of energy storage mode of energy interconnected microgrid multi-energy complementary system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(19): 5727-5737.
- [20] 朱翰超, 马蕊. 考虑需求侧管理的冷热电联供微电网优化配置方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(2): 139-146.
- ZHU Hanchao, MA Rui. Optimal configuration method of cogeneration microgrid considering demand side management[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(2): 139-146.
- [21] 王江江, 杨昆, 刘娟娟. 生物质燃气冷热电联供系统性能分析[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(3): 196-205.
- WANG Jiangjiang, YANG Kun, LIU Juanjuan. Performance analysis of biomass gas cogeneration system[J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2014, 45(3): 196-205.
- [22] 方绍凤, 周任军, 许福鹿, 等. 考虑电热多种负荷综合需求响应的园区微网综合能源系统优化运行[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2020, 32(1): 50-57.
- FANG Shaofeng, ZHOU Renjun, XU Fulu, et al. Optimal operation of Park microgrid integrated energy system considering the comprehensive demand response of electric heating multiple loads[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2020, 32(1): 50-57.
- [23] 魏大钧, 孙波, 赵峰, 等. 小型生物质沼气冷热电联供系统多目标优化设计与运行分析[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(12): 7-12.
- WEI Dajun, SUN Bo, ZHAO Feng, et al. Multi objective optimization design and operation analysis of small biomass biogas cogeneration system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(12): 7-12.
- [24] 张东, 李金平, 张涵. 基于沼气的热电气联供系统全工况模型与性能分析[J]. *化工学报*, 2017, 68(5): 1998-2008.
- ZHANG Dong, LI Jinping, ZHANG Han. All operation mathematical model and thermal performance analysis on combined heating power and biogas system[J]. *CIESC Journal*, 2017, 68(5): 1998-2008.

收稿日期: 2020-08-02; 修回日期: 2020-10-29

作者简介:

郭威(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力智能调度、电力营销; E-mail: yxzx\_guow@he.sgcc.com.cn

杨鹏(1975—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力营销管理; E-mail: yangp@he.sgcc.com.cn

孙胜博(1978—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力营销。E-mail: 18003110988@189.cn

(编辑 张爱琴)