

# 基于复合蓄能的天然气与太阳能耦合 CCHP 系统优化

向玉,张国强<sup>†</sup>

(湖南大学 土木工程学院,湖南长沙 410082)

**摘要:**基于含复合蓄能装置(蓄热/蓄电)的天然气与太阳能耦合冷热电三联供系统,从节能、经济、环保层面对其建立了优化模型.选取原动机额定容量、原动机启停比、太阳能光热/光伏面积、电制冷机供冷比为优化变量,利用量子粒子群算法对优化模型进行求解,获取了耦合系统的优化容量及优化运行模式,并对其在两种运行策略下的结果进行了对比分析,以广州的一栋宾馆建筑为例进行了案例分析.研究表明:两种优化运行模式下的耦合系统性能均优于分产系统,且以“电”定热模式的性能(年一次能源节约率为 37.9%,年总成本节约率为 39.9%,年二氧化碳减排率为 55.1%,综合性能为 44.3%)优于以“热”定电模式(年一次能源节约率为 30.7%,年总成本节约率为 36.1%,年二氧化碳减排率为 42.1%,综合性能为 36.3%).

**关键词:**太阳能;冷热电三联供系统;蓄能;量子粒子群算法

**中图分类号:**TK01

**文献标志码:**A

## Optimization of Natural Gas and Solar Energy Coupled CCHP System Based on Hybrid Energy Storage

XIANG Yu, ZHANG Guoqiang<sup>†</sup>

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Based on the natural gas and solar energy coupled CCHP system with hybrid energy storage (heat storage/power storage), an optimization model is established from the aspects of energy saving, economy and environmental protection. The rated capacity of the prime mover, the start stop ratio of the prime mover, the solar thermal / photovoltaic area and the cooling ratio of the electric refrigerator are set as the optimization variables, and the quantum particle swarm optimization algorithm is used to solve the optimization model. After optimization, the optimal capacity and operation mode of the coupled system are obtained, and a hotel building in Guangzhou is taken as an example to verify the optimal model. The results show that the performance of the coupled system under the two optimal operation modes is better than that of the separate production system, and the performance under follow “electricity” demand mode (annual primary energy saving ratio: 37.9%; annual total cost saving ratio: 39.9%; annual CO<sub>2</sub> reduction ratio: 55.1%; overall performance: 44.3%) is better than that under follow “thermal” demand mode (annual primary energy saving ratio: 30.7%; annual total cost saving ratio: 36.1%; annual CO<sub>2</sub> reduction ratio: 42.1%; overall performance: 36.3%).

\* 收稿日期:2021-07-30

基金项目:湖南省科技重大专项(2011FJ1007), The Science and Technology Innovation Program of Hunan Province (2011FJ1007)

作者简介:向玉(1989—),女,湖南长沙人,湖南大学博士研究生

<sup>†</sup>通信联系人,E-mail: gqzhang@188.com



建筑电负荷, kWh;  $E_{Sp,a}^x$  为分产系统运行所需的附加电量, kWh;  $E_{Sp,ec}^x$  为分产系统驱动电制冷机组的电负荷, kWh, 其计算式如下:

$$E_{Sp,ec}^x = Q_c^x / COP_{Sp,ec}^x \quad (2)$$

式中:  $Q_c^x$  为建筑的冷负荷, kWh;  $COP_{Sp,ec}^x$  为电制冷机组的性能系数, 其计算式如下<sup>[12]</sup>:

$$COP_{Sp,ec}^x = COP_{Sp,ec}^{max} (a_2 \eta_{Sp,ec}^x + a_1 \eta_{Sp,ec}^x) \quad (3)$$

式中:  $COP_{Sp,ec}^{max}$  为电制冷机组额定工况下的性能系数;  $a_1$ 、 $a_2$  为电制冷机效率系数;  $\eta_{Sp,ec}^x$  为分产系统中电制冷机的部分负载系数, 可表示为:

$$\eta_{Sp,ec}^x = Q_c^x / Q_{Sp,ec}^{max} \quad (4)$$

式中:  $Q_{Sp,ec}^{max}$  为分产系统中电制冷机组的额定容量。

考虑到能量转换和传输, 分产系统的逐时能

耗为:

$$F_{Sp,total}^x = E_{Sp,g}^x / \eta_e \eta_t + N_{Sp,b}^x \quad (5)$$

式中:  $\eta_e$  和  $\eta_t$  分别为大电网的发电效率和传输效率, 分别取 0.35 和 0.92;  $N_{Sp,b}^x$  为分产系统中锅炉消耗的天然气量, kWh。

### 1.2 含蓄能系统的天然气与太阳能耦合 CCHP 系统

该耦合系统包括原动机、吸收式制冷机、热交换器、光伏、光热、蓄电装置、蓄热装置以及燃气锅炉, 如图 2 所示, 可分别在制冷模式和制热模式下运行。供能主体为原动机、吸收式制冷机、热交换器、光伏、光热, 蓄电装置和蓄热装置分别用于储存多余电量和热量, 由大电网和燃气锅炉补充耦合系统不足电量和热量。

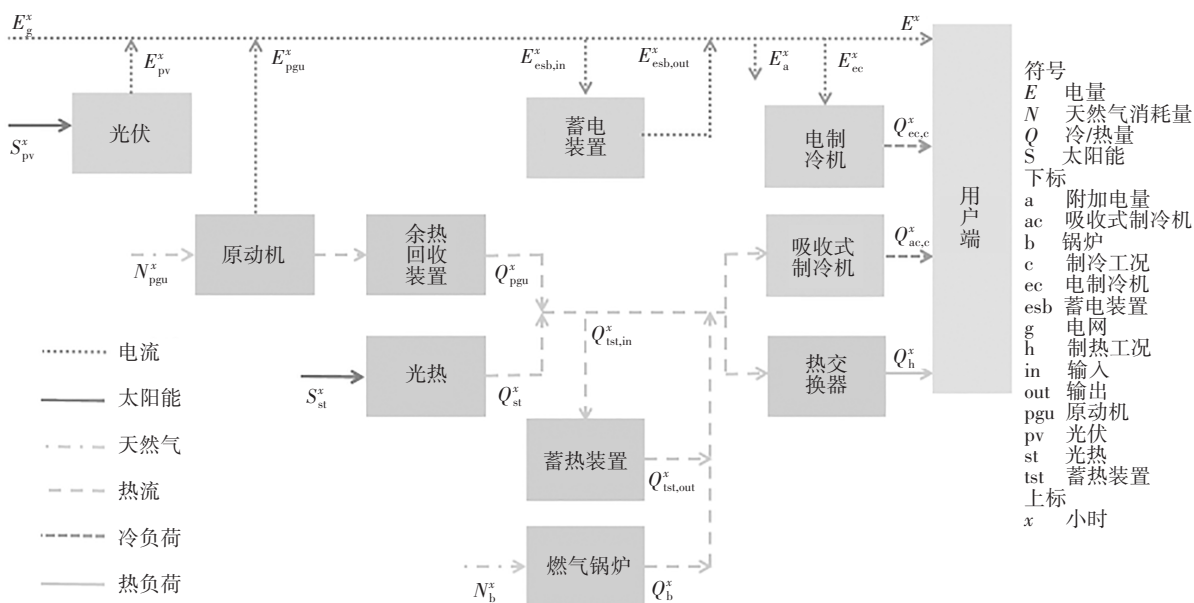


图2 含蓄能系统的天然气与太阳能耦合 CCHP 系统

Fig.2 The natural gas and solar energy coupled CCHP system with hybrid energy storage

系统电平衡公式如下:

$$E_g^x + E_{pv}^x + E_{pgu}^x + E_{esb,out}^x - E_{esb,in}^x = E^x + E_a^x + E_{ec}^x \quad (6)$$

式中:  $E_g^x$  为来自大电网的电量, kWh;  $E_{pv}^x$  为光伏板产电量, kWh;  $E_{pgu}^x$  为原动机所产电量, kWh;  $E_{esb,out}^x$  为电池释放的电量, kWh;  $E_{esb,in}^x$  为储存至电池的电量, kWh;  $E_a^x$  为系统运行所需电量, kWh;  $E_{ec}^x$  为电制冷机组所需电量, kWh, 可表示为:

$$E_{ec}^x = Q_{ec,c}^x / COP_{ec}^x \quad (7)$$

式中:  $Q_{ec,c}^x$  为电制冷机组提供的冷负荷, kWh, 可表示为:

$$Q_{ec,c}^x = m Q_c^x \quad (8)$$

式中:  $m$  表示电制冷机组提供冷量占冷负荷比例, 为

决策变量。

$COP_{ec}^x$  表示电制冷机组的性能系数, 其计算式如下<sup>[12]</sup>:

$$COP_{ec}^x = COP_{ec}^{max} (a_2 \eta_{ec}^x + a_1 \eta_{ec}^x) \quad (9)$$

式中:  $COP_{ec}^{max}$  为电制冷机组额定工况下的性能系数;  $a_1$ 、 $a_2$  为电制冷机效率系数;  $\eta_{ec}^x$  为电制冷机的部分负载系数, 可表示为:

$$\eta_{ec}^x = Q_{ec,c}^x / Q_{ec}^{max} \quad (10)$$

式中:  $Q_{ec}^{max}$  为电制冷机组的额定容量, kWh。

原动机消耗的天然气为:

$$N_{pgu}^x = E_{pgu}^x / \eta_{pgu}^x \quad (11)$$

式中:  $E_{pgu}^x$  为原动机实际发电量, kWh, 可表示为:

$$E_{\text{pgu}}^x = \begin{cases} 0, & 0 < f_{\text{pgu}}^x \leq t; \\ E_{\text{pgu}}^x, & t < f_{\text{pgu}}^x < 1; \\ E_{\text{pgu}}^{\text{max}}, & f_{\text{pgu}}^x \geq 1 \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $t$  表示原动机的启动因子, 决定着原动机是否启动, 为决策变量;  $f_{\text{pgu}}^x$  为原动机的部分负载系数, 可表示为:

$$f_{\text{pgu}}^x = E_{\text{pgu}}^x / E_{\text{pgu}}^{\text{max}} \quad (13)$$

式中:  $E_{\text{pgu}}^{\text{max}}$  为原动机的额定发电量, kWh.

$\eta_{\text{pgu}}^x$  为原动机发电效率, 可表示为<sup>[13]</sup>:

$$\eta_{\text{pgu}}^x = b_0 + b_1 f_{\text{pgu}}^x + b_2 f_{\text{pgu}}^{x^2} \quad (14)$$

式中:  $b_0$ 、 $b_1$ 、 $b_2$  为原动机效率系数.

$Q_{\text{pgu}}^x$  是原动机的回收余热 (kWh), 可表示为:

$$Q_{\text{pgu}}^x = N_{\text{pgu}}^x (1 - \eta_{\text{pgu}}^x) \eta_{\text{rec}} \quad (15)$$

式中:  $N_{\text{pgu}}^x$  为原动机消耗的天然气量, kWh;  $\eta_{\text{rec}}$  为热回收系统的效率.

耦合系统的热平衡为:

$$Q_{\text{pgu}}^x + Q_{\text{b}}^x + Q_{\text{st}}^x + Q_{\text{st}, \text{out}}^x - Q_{\text{st}, \text{in}}^x = \frac{Q_{\text{ac}, \text{c}}^x}{\text{COP}_{\text{ac}}^x} + \frac{Q_{\text{h}}^x}{\eta_{\text{he}}} \quad (16)$$

式中:  $Q_{\text{b}}^x$  为锅炉提供的热量, kWh;  $Q_{\text{st}}^x$  为太阳能集热板提供的热量, kWh;  $Q_{\text{st}, \text{out}}^x$  为从储热罐输出的热量, kWh;  $Q_{\text{st}, \text{in}}^x$  为储存到储热罐的热量, kWh;  $Q_{\text{ac}, \text{c}}^x$  为吸收式制冷机提供的冷负荷, kWh;  $Q_{\text{h}}^x$  为热交换器提供的热负荷, kWh;  $\eta_{\text{he}}$  为换热器的效率;  $\text{COP}_{\text{ac}}^x$  为吸收式制冷机的性能系数, 可表示为<sup>[14]</sup>:

$$\text{COP}_{\text{ac}}^x = \text{COP}_{\text{ac}}^{\text{max}} (c_2 \eta_{\text{ac}}^{x^2} + c_1 \eta_{\text{ac}}^x + c_0) \quad (17)$$

式中:  $c_0$ 、 $c_1$ 、 $c_2$  为吸收式制冷机效率系数;  $\eta_{\text{ac}}^x$  为吸收式制冷机的部分负荷率, 可表示为:

$$\eta_{\text{ac}}^x = Q_{\text{ac}, \text{c}}^x / Q_{\text{ac}}^{\text{max}} \quad (18)$$

式中:  $Q_{\text{ac}}^{\text{max}}$  为吸收式制冷机的额定容量.

锅炉消耗的天然气为:

$$N_{\text{b}}^x = Q_{\text{b}}^x / \eta_{\text{b}} \quad (19)$$

式中:  $\eta_{\text{b}}$  为锅炉的效率.

因此, 系统的一次能源总消耗包括三个部分: 原动机和锅炉消耗的天然气, 以及大电网消耗的化石燃料, 其可表示为:

$$F_{\text{total}}^x = N_{\text{pgu}}^x + N_{\text{b}}^x + E_{\text{g}}^x / \eta_{\text{e}} \eta_{\text{t}} \quad (20)$$

光伏产电通过公式(21)进行计算<sup>[5]</sup>:

$$E_{\text{PV}} = A_{\text{PV}} G \eta_{\text{PV}} = A_{\text{PV}} G \eta_{\text{REF}} [1 - \mu (T_{\text{PV}} - T_{\text{REF}})] / 1000 \quad (21)$$

式中:  $A_{\text{PV}}$  为光伏模块的总面积,  $\text{m}^2$ ;  $\eta_{\text{PV}}$  为在基准温度下的基准模块效率;  $T_{\text{REF}}$  为  $25\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_{\text{PV}}$  为环境温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $\mu$  为光伏组件的太阳辐照度系数, 取值 0.005;

$\eta_{\text{REF}}$  为 0.125;  $G$  为单位面积光伏板接受辐射量,  $\text{W}/\text{m}^2$ , 计算式如下<sup>[15-17]</sup>:

$$G = R_{\text{b}} S_{\text{b}} + \frac{1 + \cos \beta}{2} S_{\text{d}} + \frac{1 - \cos \beta}{2} \rho (S_{\text{b}} + S_{\text{d}}) \quad (22)$$

式中:  $S_{\text{b}}$  和  $S_{\text{d}}$  分别为在水平表面上的直射辐射和漫射辐射,  $\text{W}/\text{m}^2$ , 取值来源于气象参数;  $\rho$  为地面反射系数;  $\beta$  为太阳能板倾斜角度 (在本文中取为当地纬度);  $R_{\text{b}}$  为太阳能辐射倾斜系数, 可以按下式计算:

$$R_{\text{b}} = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta} \quad (23)$$

式中:  $\varphi$  为当地纬度;  $\omega$  为太阳时角;  $\delta$  为太阳倾斜角. 太阳光热系统的产热量 (kWh) 按下式计算<sup>[3]</sup>:

$$G_{\text{solar}} = A_{\text{solar}} G \eta_{\text{solar}} / 1000 \quad (24)$$

式中:  $\eta_{\text{solar}}$  取 0.615.

蓄电装置计算式如下<sup>[18]</sup>:

$$E_{\text{esb}}^{x+1} = E_{\text{esb}}^x (1 - \eta_{\text{esb}, \text{loss}}) + (E_{\text{esb}, \text{in}} \eta_{\text{esb}, \text{in}} - E_{\text{esb}, \text{out}} / \eta_{\text{esb}, \text{out}}) \Delta t, \quad x = 0, \dots, 8759 \quad (25)$$

式中:  $E_{\text{esb}}^{x+1}$  为下一个时刻的电量, kWh;  $E_{\text{esb}}^x$  为当前时刻的电量, kWh;  $\eta_{\text{esb}, \text{loss}}$  为损失率;  $E_{\text{esb}, \text{in}}$  为进入蓄电装置的电量, kWh,  $0 \leq E_{\text{esb}, \text{in}} \leq 0.2 E_{\text{esb}}^{\text{max}}$ ;  $\eta_{\text{esb}, \text{in}}$  为充电效率;  $E_{\text{esb}, \text{out}}$  为蓄电装置释放的电量, kWh,  $0 \leq E_{\text{esb}, \text{out}} \leq 0.4 E_{\text{esb}}^{\text{max}}$ ;  $\eta_{\text{esb}, \text{out}}$  为放电效率;  $\Delta t = 1\text{h}$ .

蓄热装置计算式如下:

$$Q_{\text{st}}^{x+1} = \eta_{\text{st}} Q_{\text{st}}^x + Q_{\text{st}, \text{in}} - Q_{\text{st}, \text{out}}, \quad x = 0, \dots, 8759 \quad (26)$$

式中:  $Q_{\text{st}}^{x+1}$  为下一个时刻的热量, kWh;  $Q_{\text{st}}^x$  为当前时刻的热量, kWh;  $\eta_{\text{st}}$  为蓄热装置效率;  $Q_{\text{st}, \text{in}}$  为进入蓄热装置的热量, kWh;  $Q_{\text{st}, \text{out}}$  为蓄热装置输出的热量, kWh.

## 2 优化

### 2.1 优化算法

粒子群优化算法 (PSO) 是一种进化智能算法, 在对动物集群活动行为观察的基础上, 利用群体中的个体对信息的共享使整个群体的运动在问题求解空间中产生从无序到有序的演化过程, 从而获得最优解. 量子粒子群算法取消了粒子移动方向的属性, 增加了粒子移动的随机性, 从而更好地避免了粒子陷入局部最优值.

因此, 本文基于量子粒子群算法, 以原动机额定容量、原动机启停比、太阳能光热/光伏面积、电制冷机供冷比为决策变量来对系统进行整体优化, 利用

MATLAB 软件实现整个计算过程,如图 3 所示。

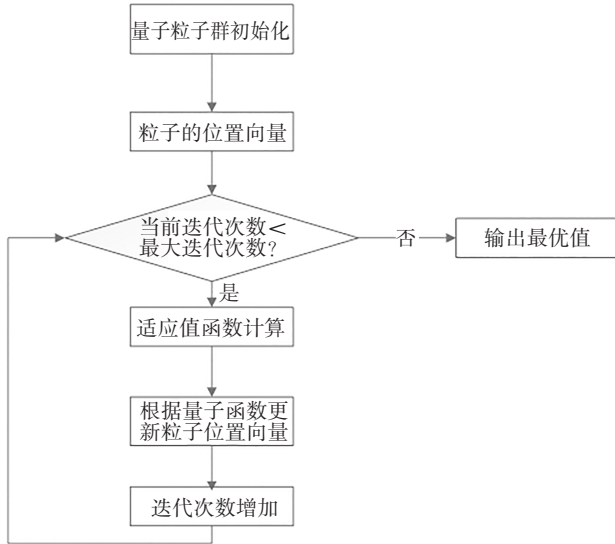


图 3 算法流程图

Fig.3 The algorithm flow chart

## 2.2 决策变量和运行策略

为获取系统的优化容量和运行方式,选取了原动机额定容量、原动机启停比、太阳能光热/光伏面积、电制冷机供冷比为本文的优化变量,其中原动机额定容量、太阳能光热/光伏面积比为与设备容量相关的变量,原动机启停比为与系统运行相关的变量,电制冷机供冷比为与设备容量和系统运行均相关的变量。

结合决策变量,系统可在以“电”定热和以“热”定电两种运行策略下运行,以“电”定热优先考虑满足建筑电负荷、驱动电制冷机制冷的电量以及系统的附加电量,可由光伏、蓄电装置、原动机提供,不足电量由大电网补给。以“热”定电优先考虑满足驱动吸收式制冷机的热量(制冷模式)或驱动热交换器的热量(制热模式),可由光热、蓄热装置、原动机余热回收装置提供,不足热量由燃气锅炉补给。

## 2.3 优化目标

### 2.3.1 年一次能源节约率

选择年一次能源节约率作为能源指标。耦合系统能源消耗包括原动机和锅炉消耗的天然气,电网消耗的化石燃料。耦合系统年一次能源消耗量可以表示为:

$$F_{\text{total}} = \sum_{x=1}^{8760} F_{\text{total}}^x \quad (27)$$

分产系统的年一次能源消耗量可表示为:

$$F_{\text{Sp}} = \sum_{x=1}^{8760} F_{\text{Sp, total}}^x \quad (28)$$

年一次能源节约率为:

$$P_{\text{en}} = \frac{F_{\text{Sp}} - F_{\text{total}}}{F_{\text{Sp}}} \times 100\% \quad (29)$$

### 2.3.2 年总成本节约率

选择年总成本节约率作为经济指标。耦合系统的年总成本包含天然气成本、碳税和系统初投资,耦合系统年度总成本可以表示为:

$$C_{\text{R, total}} = \sum_{x=1}^{8760} [N_{\text{gas}} (N_{\text{pgu}}^x + N_{\text{b}}^x) + E_{\text{g}}^x N_{\text{grid}}^x] + \quad (30)$$

$$E_{\text{R, total}} T + p \sum_{k=1}^y C_{\text{a, k}} C_{\text{o, k}}$$

式中:  $N_{\text{gas}}$  为天然气的单位价格,元/kWh;  $N_{\text{b}}^x$  为锅炉消耗的天然气量, kWh;  $N_{\text{grid}}^x$  为电价的逐时价格,元/kWh;  $E_{\text{R, total}}$  为耦合系统二氧化碳排放量, kg;  $T$  为碳税价格,元/kg;  $p$  为投资回报率;  $C_{\text{a, k}}$  为耦合系统中各设备的额定容量, kW;  $C_{\text{o, k}}$  为各设备的单位价格,元/kW。

分产系统的年总成本可以表示为:

$$C_{\text{R, Sp}} = \sum_{x=1}^{8760} (N_{\text{gas}} N_{\text{Sp, b}}^x + E_{\text{Sp, g}}^x N_{\text{grid}}^x) + \quad (31)$$

$$E_{\text{R, Sp}} T + p \sum_{k=1}^z C_{\text{a, Sp, k}} C_{\text{o, Sp, k}}$$

式中:  $E_{\text{R, Sp}}$  为分产系统二氧化碳排放量, kg;  $C_{\text{a, Sp, k}}$  为分产系统中各设备的额定容量, kW;  $C_{\text{o, Sp, k}}$  为各设备的单位价格,元/kW。

投资回报率  $p$  可以定义为:

$$p = \frac{I(I+1)^d}{(I+1)^d - 1} \quad (32)$$

式中:  $I$  为利率;  $d$  为设备的使用寿命。

年总成本降低率为:

$$P_{\text{co}} = \frac{C_{\text{R, Sp}} - C_{\text{R, total}}}{C_{\text{R, Sp}}} \times 100\% \quad (33)$$

### 2.3.3 年二氧化碳减排率

选择年二氧化碳减排率作为环境指标。耦合系统二氧化碳排放量包含原动机和锅炉消耗的天然气以及公共电网消耗的化石燃料,耦合系统二氧化碳排放量可以表示为:

$$E_{\text{R, total}} = \sum_{x=1}^{8760} M_{\text{gas}} (N_{\text{pgu}}^x + N_{\text{b}}^x) + M_{\text{grid}} E_{\text{g}}^x \quad (34)$$

式中:  $M_{\text{gas}}$  为单位天然气排放的二氧化碳量, g/kWh;  $M_{\text{grid}}$  为单位电量排放的二氧化碳量, g/kWh。

分产系统的二氧化碳排放量可以表示为:

$$E_{\text{R, Sp}} = \sum_{x=1}^{8760} M_{\text{gas}} N_{\text{Sp, b}}^x + M_{\text{grid}} E_{\text{Sp, g}}^x \quad (35)$$

年二氧化碳减排率为:

$$P_{envi} = \frac{E_{R, Sp} - E_{R, total}}{E_{R, Sp}} \times 100\% \quad (36)$$

2.3.4 综合性能

为了反映耦合系统的综合性能,将能源、经济和环境指标组合为以下表达式:

$$O_B = \max \{ \delta_1 P_{en} + \delta_2 P_{co} + \delta_3 P_{envi} \} \quad (37)$$

式中:  $\delta_1, \delta_2$  和  $\delta_3$  是加权因子 ( $0 \leq \delta_1, \delta_2, \delta_3 \leq 1, \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 1$ ), 它们的值分别代表能源、经济和环境指标的重要性,  $\delta_1, \delta_2$  和  $\delta_3$  均设置为  $1/3$ <sup>[19]</sup>. 本文将最大化问题转化为最小化问题. 因此, 该模型的优化目标可表示为:

$$P = \min \left[ 1 - (\delta_1 P_{en} + \delta_2 P_{co} + \delta_3 P_{envi}) \right] = \min \left( \delta_1 \frac{F_{C, total}}{F_{C, Sp}} + \delta_2 \frac{C_{R, total}}{C_{R, Sp}} + \delta_3 \frac{E_{R, total}}{E_{R, Sp}} \right) \quad (38)$$

3 案例分析

3.1 建筑信息

以广州地区的一栋宾馆建筑为例进行案例分析, 建筑面积为  $9\ 600\ m^2$ , 层数为 6 层, 建筑围护结构和功能参数设置均依据《民用建筑热工设计规范》, 并在 DesignBuilder 软件中实现建筑负荷的模拟. 建筑的逐时冷热电负荷如图 4 所示.

3.2 参数输入

系统设备成本以及能源价格见表 1; 系统设备参数见表 2; 能源碳排放量见表 3.

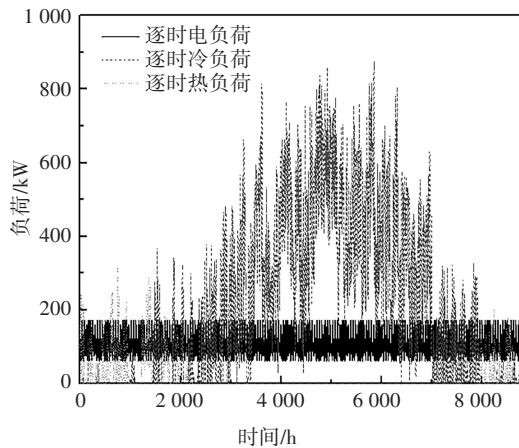


图 4 建筑逐时负荷图

Fig.4 The hourly building load

3.3 结果与讨论

利用量子粒子群优化算法对优化模型进行求解后, 可获得系统的各设备容量以及逐时运行策略. 表

表 1 系统成本<sup>[5,20]</sup>

Tab.1 System cost

能源及设备	符号	价格
分时电价(6:00—22:00)	$N_{grid}^x$	1.2 元/kWh
分时电价(23:00—5:00)	$N_{grid}^x$	0.711 元/kWh
天然气	$N_{gas}$	0.325 元/kWh
电制冷机	$C_{o,ec}$	970 元/kW
原动机+热回收设备	$C_{o,pgu+rec}$	6 800 元/kW
吸收式机组	$C_{o,ac}$	1 200 元/kW
光伏	$C_{o,pv}$	11 840 元/kW
光热	$C_{o,st}$	1 294 元/m <sup>2</sup>
燃气锅炉	$C_{o,b}$	300 元/kW
蓄电池	$C_{o,esb}$	5 700 元/kW
蓄热器	$C_{o,ist}$	230 元/kW
换热器	$C_{o,he}$	200 元/kW
碳税	$T$	0.3 元/kg

表 2 系统设备参数<sup>[5,12-14,18]</sup>

Tab.2 System equipment parameters

设备参数	符号	值
原动机发电效率	$\eta_{pgu}^{max}$	0.39
	$b_0$	-0.401 5
	$b_1$	0.741 1
热回收器效率	$b_2$	0.049
	$\eta_{rec}$	0.8
	吸收式制冷机组效率	$COP_{ac}^{max}$
$c_0$		-0.724 9
$c_1$		1.525
制冷机组效率	$c_2$	0.195 1
	$COP_{ec}^{max}$	4
	$a_1$	1.819
锅炉效率	$a_2$	-0.819
	$\eta_b$	0.8
热交换器效率	$\eta_{he}$	0.8
蓄电池效率	$\eta_{in}$	0.95
	$\eta_{out}$	0.95
蓄热器效率	$\eta_{esb, loss}$	0.04
	$\eta_{ist}$	0.8
电网效率	$\eta_e$	0.35
太阳能	$\eta_i$	0.92
	$T_{REF}$	25 °C
设备利率	$\eta_{REF}$	12.5%
	$I$	0.06
设备寿命	$d$	20 年(蓄电池为 9 年)

表 3 能源碳排放参数

Tab.3 Carbon emission parameters

燃料	符号	值/(g·kWh <sup>-1</sup> )
电	$M_{grid}$	968
天然气	$M_{gas}$	220

4展示了两种运行策略下的电制冷机占比和原动机启动因子,电制冷占比均较小,意味着建筑冷负荷主要由吸收式制冷机满足.以“电”定热模式下的原动机启停因子为0.36,意味着只有当电量需求大于等于 $0.36 E_{\text{pgu}}^{\text{max}}$  ( $E_{\text{pgu}}^{\text{max}}$ 为原动机额定容量)时,原动机才开启,否则原动机处于关闭状态;以“热”定电模式下的原动机启停因子为0,意味着只要当热量需求大于0时,原动机就开启.

表4 优化变量

Tab. 4 Optimization variables

运行策略	决策变量	值
以“电”定热	电制冷机占比	0.07
以“电”定热	原动机启动因子	0.36
以“热”定电	电制冷机占比	0.02
以“热”定电	原动机启动因子	0

### 3.3.1 系统设备容量

图5展示了优化后的系统各设备容量,以“电”定热下的原动机容量大于以“热”定电下的容量;电制冷机占比较小(见表4),因此,建筑的冷负荷主要由吸收式制冷机提供,且以“热”定电运行模式下的吸收式制冷机组容量大于以“电”定热运行模式下的吸收式制冷机组容量;建筑热负荷由热交换器提供,因此两种运行策略下的热交换容量相同;以“热”定电模式下的锅炉容量大于以“电”定热模式下的锅炉容量;以“电”定热模式优先满足系统的电需求,在这种情况下,可能有多余的热量储存进蓄热装置,且以“电”定热模式下的光热板面积大于以“热”定电模式下的光热板面积,综合作用下,以“电”定热模式下的蓄热装置容量大于以“电”定热模式下的蓄热装置容量;以“电”定热模式下的蓄电装置容量为零,说明在该模式下运行时,系统并无多余电量储存至蓄电装置,在以“热”定电模式下,优先满足系统的热需求(驱动吸收式制冷机供冷或驱动热交换器供热),由图4可知,广州的建筑冷负荷较大且持续时间长,电负荷相对平稳,此时可能有多余的电量储存至蓄电装置中.

如图6所示,在以“电”定热模式和以“热”定电模式下,光热面积均大于光伏面积,这是因为广州的建筑冷负荷较大,且持续时间较长,在制冷模式下,太阳能资源往往相对比较丰富,且从表4可看出,两种模式下的电制冷机占比较小,意味着更多的冷负荷是由吸收式制冷机满足,综合作用下,使得两种模式下的太阳能光热面积均大于光伏面积.

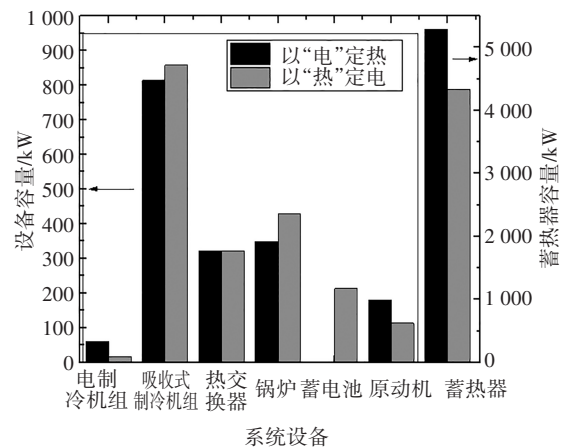


图5 系统设备容量

Fig.5 System equipment capacity

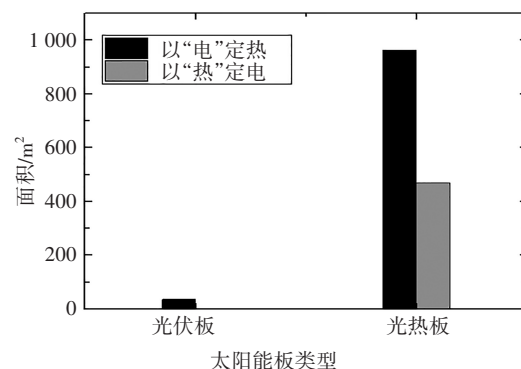


图6 光伏/光热面积

Fig.6 The area of PV and ST

### 3.3.2 系统运行策略

为了更清晰地展示优化后的逐时电/热运行策略,分别选取冬季、夏季以及过渡季典型日进行分析.图7展示了冬季典型日的逐时电/热运行策略,在以“电”定热运行模式下,原动机全天开启,电需求主要由原动机提供,由于光伏占比较小,因此光伏仅在白天的某几个时刻提供电量,无需从大电网购电;由于在该模式下优先满足系统的电需求,除原动机余热外,由于光热占比较大,白天光热较充足,多余的热量储存至蓄热装置中,不需要锅炉补充热量.在以“热”定电运行模式下,由于光伏占比为零,除因满足热需求开启原动机时,由原动机提供电量外,电需求多数时刻由大电网满足,且在热需求负荷较大时,原动机产电量较大,有多余的电量储存至蓄电装置中;由于在该模式下优先满足系统的热需求,少数时刻热需求由蓄热装置满足,原动机仅需在有热需求时开启,白天光热较充足,多余的热量储存至蓄热装置中,在个别时刻(此时原动机已在满负荷工况运行,无太阳能光热,且蓄热装置中没有可输出热量)需要开启锅炉.

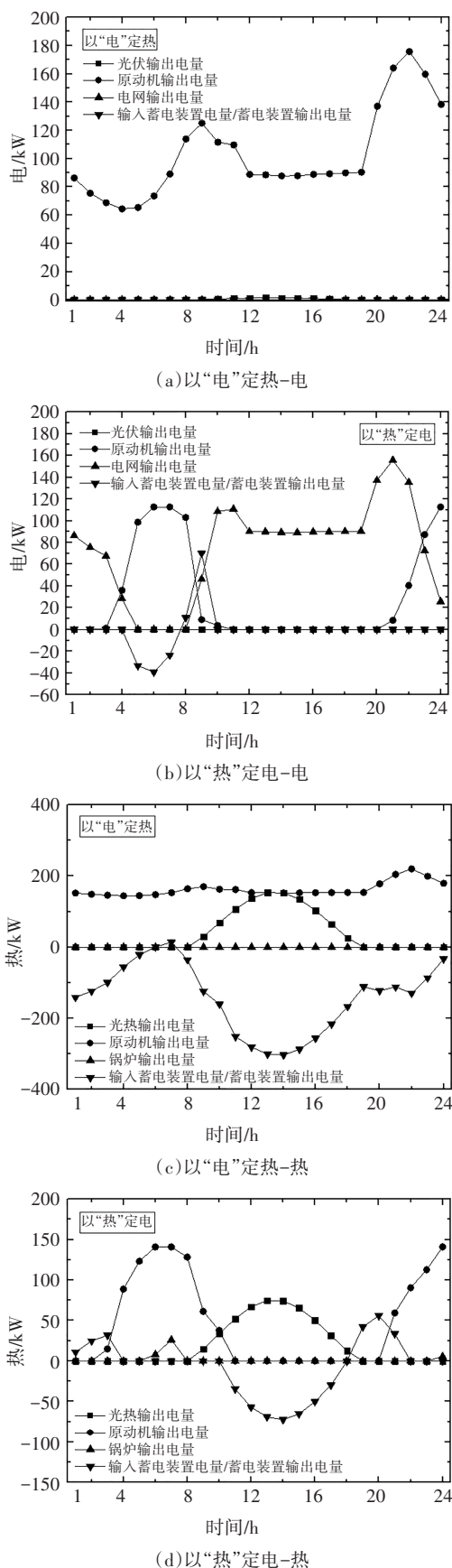


图 7 冬季典型日电/热逐时运行图

Fig.7 Hourly electricity/heat operation in winter typical day

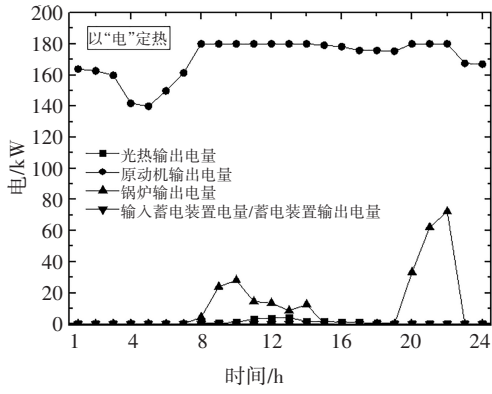
图 8 展示了夏季典型日的逐时电/热运行策略, 该典型日电需求较稳定, 用于驱动吸收式制冷机制冷的热需求较大, 在以“电”定热运行模式下, 电需求主要由原动机提供, 大电网补充不足电量, 由于光伏占比较小, 因此光伏仅在白天的某几个时刻提供电量; 由于在该模式下优先满足系统的电需求, 除原动机余热外, 白天光热较充足, 在白天光热最充足的 3 个时刻储存多余的热量至蓄热装置中, 而晚上不足热量由锅炉补充. 在以“热”定电运行模式下, 由于光伏占比为零, 且该典型日的热需求较大, 原动机全天在额定工况运行, 不足电需求由大电网满足; 由于在该模式下优先满足系统的热需求, 且该典型日热需求较大, 原动机全天在额定工况运行, 白天光热较充足, 不足热量由锅炉补充, 因夏季典型日驱动吸收式制冷机制冷的热需求较大, 此时没有多余热量储存.

图 9 展示了过渡季典型日的逐时电/热运行策略. 该典型日电需求较稳定, 热需求很小, 在以“电”定热运行模式下, 电需求主要由原动机提供, 由于光伏占比较小, 因此光伏仅在白天的某几个时刻提供电量; 由于在该模式下优先满足系统的电需求, 除原动机余热外, 由于光热占比较大, 白天光热较充足, 且因该典型日热需求较小, 多余的热量存储至蓄热装置中, 不需要锅炉补充热量. 在以“热”定电运行模式下, 由于光伏占比为零, 且该典型日的热需求较小, 此时电需求主要由大电网满足, 原动机仅在个别时刻运行; 由于在该模式下优先满足系统的热需求, 且该典型日热需求很小, 原动机仅需在少数时刻开启, 白天光热较充足, 且因该典型日热需求较小, 此时蓄热仅在白天有光热时发生, 晚上可利用蓄热装置中的热量供热, 不需要锅炉补充热量.

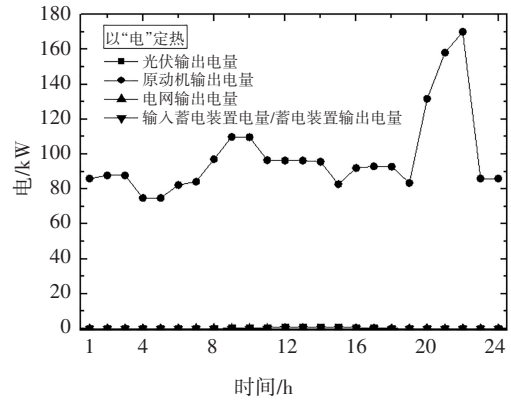
### 3.3.3 系统性能

图 10 所示为两种运行策略下的年一次能源节约率、年总成本节约率、年二氧化碳减排率以及综合性能, 结果表明: 两种运行策略下的系统性能均优于分产系统, 但以“电”定热模式下的各指标均优于以“热”定电模式下的各指标.

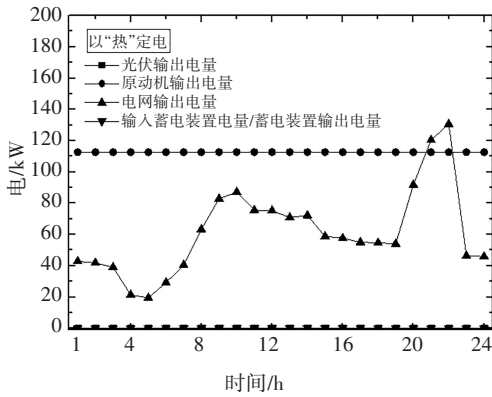




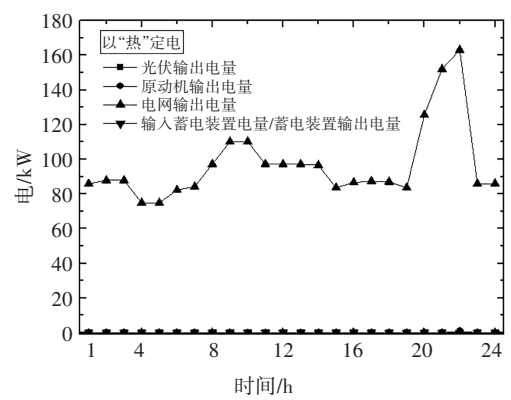
(a)以“电”定热-电



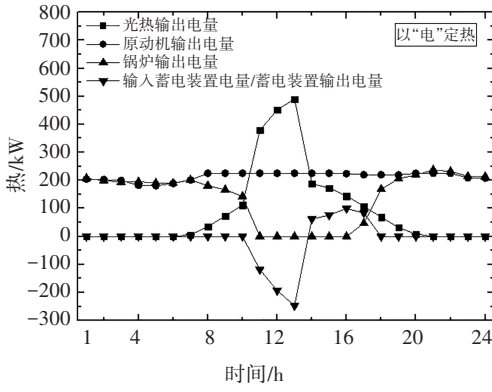
(a)以“电”定热-电



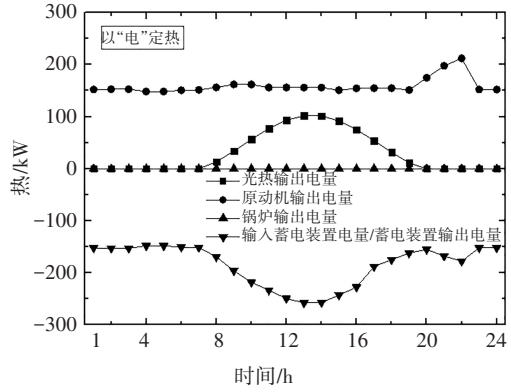
(b)以“热”定电-电



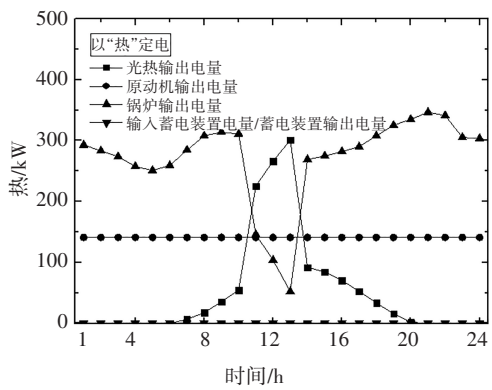
(b)以“热”定电-电



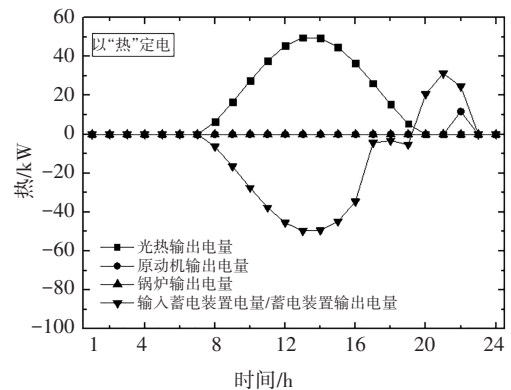
(c)以“电”定热-热



(c)以“电”定热-热



(d)以“热”定电-热



(d)以“热”定电-热

图8 夏季典型日电/热逐时运行图

图9 过渡季典型日电/热逐时运行图

Fig. 8 Hourly electricity/heat operation in summer typical day

Fig.9 Hourly electricity/heat operation in transitional typical day

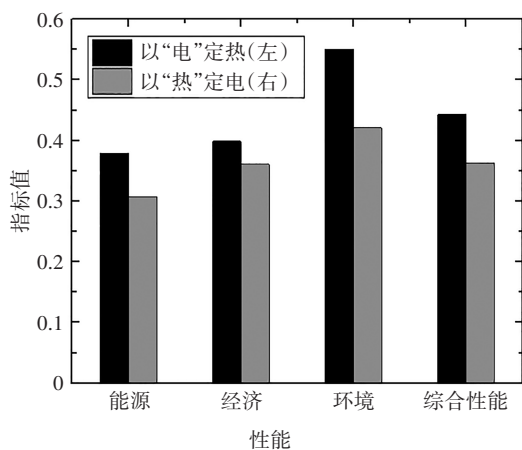


图 10 性能指标

Fig.10 Performance index

## 4 结论

本文对基于蓄能装置的太阳能冷热电三联供系统建立了优化模型,优化目标综合考虑了年一次能源节约率、年总成本减少率以及年二氧化碳排放减少率,优化变量为原动机额定容量、原动机启停比、太阳能光热/光伏面积、电制冷机供冷比,量子粒子群算法用于求解该优化模型,并对系统在两种运行策略下(以“电”定热和以“热”定电)的优化结果和性能进行了比较分析。

为验证该优化模型,用位于广州的一栋宾馆建筑进行了案例分析,获取了系统优化设备容量以及典型日逐时运行策略。结果表明:1)原动机、电制冷机组、蓄热装置、光伏/光热面积在以“电”定热下较以“热”定电下大,而吸收式制冷机组、热交换器、锅炉、蓄电装置在以“热”定电下较以“电”定热下大;2)冬季、夏季、过渡季典型日在两种运行策略下呈现出不同的特征;3)两种运行策略下的系统性能均优于分产系统性能,且以“电”定热下的性能(年一次能源节约率:37.9%;年总成本节约率:39.9%,年二氧化碳减排率:55.1%,综合性能:44.3%)优于以“热”定电下的性能(年一次能源节约率:30.7%,年总成本节约率:36.1%,年二氧化碳减排率:42.1%,综合性能:36.3%)。

## 参考文献

[1] 陆海,杨洋,李耀华,等.一种可再生能源接入的多端口变换

器及其能量协同管理[J].湖南大学学报(自然科学版),2021,48(2):103-111.

LU H, YANG Y, LI Y H, *et al.* A multi-port converter for renewable energy access and its energy cooperative control[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2021, 48(2): 103-111. (In Chinese)

[2] 牛东晓,赵东来,杨尚东,等.考虑综合成本的海上风电与远方清洁能源协同优化模型[J].湖南大学学报(自然科学版),2019,46(12):16-24.

NIU D X, ZHAO D L, YANG S D, *et al.* Collaborative optimization model of offshore wind power and remote clean energy considering comprehensive cost in power system[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2019, 46(12): 16-24. (In Chinese)

[3] 杨晓辉,刘康.不同类型太阳能辅助三联供系统的评价与案例分析[J].实验技术与管理,2021,38(3):51-56.

YANG X H, LIU K. Evaluation and case analysis of different types of solar-assisted triple generation systems[J]. Experimental Technology and Management, 2021, 38(3): 51-56. (In Chinese)

[4] 李薇,包哲,杨涵晟,等.基于区间数理论的园区分布式综合能源系统效益及影响因素分析[J].太阳能学报,2020,41(2):339-346.

LI W, BAO Z, YANG H S, *et al.* Cost-benefit and influencing factors analysis of distributed comprehensive energy system based on interval number theory[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(2):339-346. (In Chinese)

[5] SONG Z H, LIU T, LIN Q Z. Multi-objective optimization of a solar hybrid CCHP system based on different operation modes[J]. Energy, 2020, 206: 118125.

[6] YANG G, ZHAI X Q. Optimal design and performance analysis of solar hybrid CCHP system considering influence of building type and climate condition[J]. Energy, 2019, 174: 647-663.

[7] 武家辉,张强,王维庆,等.太阳能冷热电联供系统的综合评价与研究[J].电力系统保护与控制,2019,47(21):179-186.

WU J H, ZHANG Q, WANG W Q, *et al.* Evaluation and research on the comprehensive performance of a PV/T-CCHP system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 179-186. (In Chinese)

[8] 张本启,王佳豪.基于遗传算法的太阳能和天然气互补冷热电联供系统优化[J].电力科学与工程,2021,37(6):45-52.

ZHANG B Q, WANG J H. Optimization of solar and natural gas complementarity combined cooling, heating and power system based on genetic algorithm[J]. Electric Power Science and Engineering, 2021, 37(6): 45-52. (In Chinese)

[9] 和树森,刘天羽.基于改进蝴蝶算法的冷热电联供微网日前优

- 化调度研究[J]. 电气技术, 2021, 22(3): 14-19.
- HE S S, LIU T Y. Research on optimized scheduling of combined cooling heating and power microgrid based on improved butterfly algorithm [J]. Electrical Engineering, 2021, 22(3): 14-19. (In Chinese)
- [10] 陈锦涛, 杨苹, 陈滢, 等. 基于综合需求侧响应策略的园区多能源系统优化运行[J]. 可再生能源, 2021, 39(2): 222-228.
- CHEN J T, YANG P, CHEN Y, *et al.* Optimized operation of multi-energy system in the industrial park based on integrated demand response strategy [J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(2): 222-228. (In Chinese)
- [11] 耿健, 杨冬梅, 高正平, 等. 含储能的冷热电联供分布式综合能源微网优化运行[J]. 电力工程技术, 2021, 40(1): 25-32.
- GENG J, YANG D M, GAO Z P, *et al.* Optimal operation of distributed integrated energy microgrid with CCHP considering energy storage [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 25-32. (In Chinese)
- [12] CUI Q, MA P P, HUANG L, *et al.* Effect of device models on the multiobjective optimal operation of CCHP microgrids considering shiftable loads [J]. Applied Energy, 2020, 275: 115369.
- [13] 周王斌. 多能协同冷热电三联供系统优化配置及不确定性运行研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
- ZHOU W B. Research on optimal design and uncertain operating of combined cooling heating and power system with synergy of multiple energy sources [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018. (In Chinese)
- [14] WEN Q M, LIU G, WU W, *et al.* Genetic algorithm-based operation strategy optimization and multi-criteria evaluation of distributed energy system for commercial buildings [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 226: 113529.
- [15] 季杰, 何伟. 光伏墙体年发电性能及年得热动态预测[J]. 太阳能学报, 2001, 22(3): 311-316.
- JI J, HE W. Dynamic prediction of the annual heat gain and power output of a PV-wall [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2001, 22(3): 311-316. (In Chinese)
- [16] 朱丹丹, 燕达. 太阳能板放置最佳倾角研究[J]. 建筑科学, 2012, 28(S2): 277-281.
- ZHU D D, YAN D. Calculation of solar radiation and generated energy on inclined plane and optimal inclined angle [J]. Building Science, 2012, 28(S2): 277-281. (In Chinese)
- [17] KALOGIROU S A. Solar energy engineering: processes and systems [M]. Salt Lake City, USA: Academic Press, 2013.
- [18] REN F K, WEI Z Q, ZHAI X Q. Multi-objective optimization and evaluation of hybrid CCHP systems for different building types [J]. Energy, 2021, 215: 119096.
- [19] ZHENG C Y, WU J Y, ZHAI X Q. A novel operation strategy for CCHP systems based on minimum distance [J]. Applied Energy, 2014, 128: 325-335.
- [20] ZENG R, ZHANG X F, DENG Y, *et al.* An off-design model to optimize CCHP-GSHP system considering carbon tax [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 189: 105-117.