

文章编号: 2095-2163(2022)08-0085-08

中图分类号: TM734

文献标志码: A

# 计及分时电价的冷热电联供系统三级协同优化

张 杭, 袁旭峰, 禹洪波

(贵州大学 电气工程学院, 贵阳 550025)

**摘要:** 针对现有冷热电联供系统大多对优化因素考虑单一, 使用固定电价导致优化结果与实际存在偏差, 本文提出一种计及分时电价的冷热电联供三级协同优化方法。首先, 计及分时电价, 以热电比决定系统的运行模式, 对一级优化针对系统能效性, 以一次能源利用率最大作为优化目标; 其次, 二级优化针对系统环保性, 以二氧化碳排放量最小作为优化目标; 最后, 三级优化针对系统经济性, 以年总费用最小作为优化目标。以某学校的年运行负荷数据作为算例分析, 采用改进粒子群算法对所建立模型进行求解, 对固定电价和计及分时电价的结果进行对比分析, 得到计及分时电价, 对设备进行更好的选型和对容量进行更优的配置。

**关键词:** 冷热电联供; 三级优化; 改进粒子群算法; 固定电价; 分时电价; 热电比

## Three-level collaborative optimization of cogeneration of cold, heat and power including TOU price

ZHANG Hang, YUAN Xufeng, YU Hongbo

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**[Abstract]** In view of the fact that most existing cogeneration systems consider single optimization factors, the use of fixed electricity price which leads to the deviation between the optimization results and the actual situation, this paper proposes a three-level collaborative optimization method for cogeneration of CHD including TOU electricity price. The TOU price is taken into account first, and the operation mode of the system is determined by the thermoelectric ratio. For the first-order optimization, the system energy efficiency is targeted, and the maximum utilization rate of primary energy is taken as the optimization goal. Secondly, the secondary optimization aims at the environmental protection of the system, with the minimum carbon dioxide emissions as the optimization target. Finally, the three-level optimization aims at the system economy and takes the maximum annual total cost as the optimization goal. Taking the annual operating load data of a school as an example, the improved particle swarm optimization algorithm is used to solve the established model, and the results of fixed electricity price and TOU price are compared and analyzed. After the TOU price is calculated, the equipment can be better selected and the capacity can be better configured.

**[Key words]** combined cold, heat and electricity supply; three-stage optimization; improved particle swarm optimization; fixed electricity price; TOU price; the thermoelectric ratio

## 0 引言

2020年9月22日, 中国国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布了中国碳中和目标, 提出中国将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策和措施, 二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和<sup>[1]</sup>。“十四五”处于中国碳达峰、碳中和目标的第一个五年, 该阶段的能源电力科技创新部署将为中国能源实现高质量发展指明方向。当前, 化石能源作为中国的主要能源消耗, 结构不尽合理, 在现有的调度优化中, 多以经济性为目标。对传统能源系统进行调

度优化, 一方面由于能源危机和环境的双重压力, 研究者越来越关注节能减排的问题; 另一方面随着可再生能源在系统中渗透率的提高, 对可再生能源的充分利用, 降低化石能源污染物排放就显得尤为重要。因此, 多目标优化被引入到可再生能源冷热电联供微网运行优化<sup>[2]</sup>。

冷热电联供系统(Combined Cooling Heating and Power, CCHP)设计遵循“合理分布、各取所需、温度相适应、梯级利用”的原则, 既能使能源利用率得以提升, 减少系统运行成本, 对能源实现了梯级利用; 而且也减轻了环境的污染, 实现了节能减排, 为能源的可持续发展做出了巨大的贡献。由于CCHP具有

**基金项目:** 国家自然科学基金(52067004); 贵州省科学技术基金项目([2019]1128, [2019]1058)。

**作者简介:** 张 杭(1996-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 冷热电联供综合能源系统的协同优化; 袁旭峰(1976-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 电力电子在电力系统中的应用、电力系统运行与控制。

**通讯作者:** 袁旭峰 Email: 17015676@qq.com

收稿日期: 2022-02-14

显著的优势,近年来受到了国内外学者的广泛关注。

从经济性入手,考虑系统的运行成本和环境成本,以总成本最低为目标对系统进行优化。文献[3]建立以太阳能和储能电池的冷热电联供系统,以系统的燃料成本、购电量、排放污染气体产生的环境成本为优化模型,并采用空间粒子群算法来求解。文献[4]计及经济性与环保性,以运行成本和环境成本为最小建立了多目标优化模型,综合考虑了燃料费用和购售电费用的结构,采用改进粒子群算法进行求解,但只考虑了电储能和二氧化碳气体的排放。文献[5]考虑了储能装置对运行成本的影响,计及了环境成本,以系统总成本最小为目标,采用混合整数规划方法在 Cplex 中进行求解。文献[6]采用改进的蝙蝠算法,以系统的运行成本与环境成本之和最小为目标,在满足各种运行约束的情况下,合理分配各个模块的出力情况,并使总的经济效益达到最优。文献[7]提出一种得到逐时电制冷比的新方法,以 DeST 模拟得到建筑物的能量负荷分布为基础,综合考虑了能源节省率、年费用节省率、以及二氧化碳减排率三个标准来评价系统的性能,通过粒子群算法得出电制冷比与不同种类负荷的关系式,从而减少了运行参数,并对不同种类负荷对于电制冷比的影响进行了分析。文献[8]运用遗传算法,考虑了一次能源节约率、二氧化碳减排率、费用年值节约率,采用线性加权的方法对系统进行了系统配置和评价方法的优化分析。文献[9]建立了运行成本、能源利用率和污染物排放的多目标优化模型,采用线性加权法来综合考虑这几个因素,基于 Tent 映射的混沌搜索和非线性自适应粒子群算法相结合的优化算法,对冷热电联供系统中的各设备的出力进行更好的优化调度。文献[10]在给定系统结构的情况下,对设备的型号和台数进行优化。文献[11-12]则是在给定系统结构的情况下,对设备的定容问题进行优化。文献[13]提出可再生资源 CCHP 系统的两级嵌套优化配置方法,运用线性加权法综合考虑能源、经济和环境三个优化目标,建立求解模型。文献[14]针对 CCHP 系统的供能侧热电一定的情况下,对系统在“以电定冷”和“以冷定电”两种运行策略下的节能效益与需求侧冷电比的关系进行了分析,结果表明 CCHP 系统冷电比达到某一定值时,节能效益存在最优值。文献[15]通过不同的峰谷价和固定电价,建立总成本为目标的 CCHP 系统经济优化调度模型,对比分析冷热电联供系统在不同电价体系下的能量优化管理方案。文

献[16]将太阳能与传统的内燃机驱动的冷热电联供系统相整合,对系统设备容量与运行策略进行了优化设计。文献[17]提出了混沌多目标遗传算法,对包含风力发电、光伏发电、微燃气轮机、储能装置的独立运行微网容量进行优化配置。文献[18]提出了冷热电联供的三级协同优化方法,分别对系统的设备选型、容量配置和运行策略进行优化分析,考虑的是固定电价,采用粒子群算法对系统进行求解。

综上所述,目前对冷热电联供系统的研究大都集中在能源、经济和环保等方面,很多都是对其中一个因素的研究,即使考虑了多个因素,大多采用的是线性加权的方法。而冷热电联供系统的设备选型、容量配置及运行策略之间相互影响、相互耦合、密不可分,但是只考虑固定电价,却会使得出的结果与实际存在一定的偏差,且采用的传统粒子群算法具有一定的局限性,易于陷入局部最优。因此,本文计及分时电价,并采用改进的粒子群算法对其进行求解,并以某所学校的冷热电联供系统作为算例,对计及分时电价和固定电价时设备的选型、容量的配置以及运行策略上的结果进行对比分析,得到计及分时电价后的 CCHP 系统的最优优化方案,对在实际中确定节能减排的方案具有实际意义。

## 1 计及分时电价的冷热电联供系统模型

### 1.1 冷热电联供原理介绍

冷热电联供系统 CCHP 是分布式电源的一种,使用这种系统的目的是实现能源的梯级利用,能够更好地提高能源的利用率,对环境也是十分友好。CCHP 的组成方式比较多,结构形式也较为复杂<sup>[19]</sup>。本文选取典型的 CCHP 系统,系统简图如图 1 所示,由图 1 可看到,系统中包含天然气内燃发电机组、吸收式制冷机组、燃气锅炉、电制冷机组和余热回收装置。其中,附加的电制冷机组用来补充吸收式制冷机组不能提供用户所需的冷负荷时的缺额;余热回收装置回收的烟气余热经换热器产生的热负荷不足以供给用户所需的热负荷时,采用辅助的燃气锅炉补充用户所需的热负荷缺额;内燃发电机组通过燃烧天然气发电,为用户提供电负荷,当其所提供的电负荷不能满足需求时,才会由电网进行供电<sup>[20]</sup>;若其产生的电负荷超过用户所需的电负荷时,可以将多余的电量出售给电网,获得相应的收益;吸收式制冷机和换热器所需的能量是来源于余热回收装置所吸收的天然气供给电负荷的时候产生的高温余热。

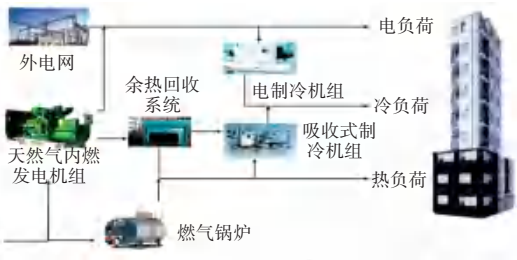


图 1 典型 CCHP 系统简图

Fig. 1 Typical CCHP system diagram

## 1.2 冷热电联供三级优化目标及优化变量

### 1.2.1 第一级优化目标—能源利用率

本文第一级实现的是设备的选型,即优化变量是  $C_n^m$ ,即现有  $n$  种设备,每一种设备有  $m$  种品牌,如果某种设备的某一个品牌被选中,则为 1,若没有被选中,则为 0。 $n = 1, 2, \dots, 5$  分别对应天然气内燃发电机、吸收式制冷机组、电制冷机组、燃气锅炉和余热回收装置; $m = 1, 2, \dots, H_n, H_n$  为设备  $n$  的品牌总数。对设备的选型,就是要实现节能,所以第一级的优化目标是能源利用率最大。对此可表示为:

$$\max \eta_{CCHP} = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I H_{CCHP}^i + \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I E_{CCHP}^i + \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I C_{CCHP}^i}{\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I F_{CCHP}^i} \quad (1)$$

其中,  $N$  为一年的总运行时间;  $I$  为一天的运行调度时间;  $\eta_{CCHP}$  为一次能源利用率;  $\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I H_{CCHP}^i$ 、

$\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I E_{CCHP}^i$ 、 $\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I C_{CCHP}^i$  分别为 CCHP 系统一年产

生的热负荷、电负荷和冷负荷;  $\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I F_{CCHP}^i$  是一年消耗的一次能源量,包括了天然气内燃发电机轮机、购电和燃气锅炉所消耗的能源量。

设备的选型得满足式(2)和式(3)的约束条件,即:

$$C_n^m \in \{0, 1\} \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^{H_n} C_n^m = 1 \quad (3)$$

### 1.2.2 第二级优化目标—二氧化碳排放量

第二级优化的变量是在设备已经选型后,对其容量进行优化,选择出最合适的容量配置,选择二氧化碳排放量最少作为其优化目标,对优化变量  $P_n^m$  进行优化,目标函数式如下:

$$\min CCHP_{CDE} = G_f \left( \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I F_{GT}^i + \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I F_{AB}^i \right) +$$

$$G_e \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I E_{grid}^i \quad (4)$$

其中,  $CCHP_{CDE}$  为 CCHP 系统排放的二氧化碳量;  $G_f$  为天然气的二氧化碳排放量转换系数,单位为  $\text{kg}/(\text{kWh})$ ;  $\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I F_{GT}^i$  为天然气内燃发电机组一年消耗的燃气总量;  $\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I F_{AB}^i$  为燃气锅炉一年消耗的燃气总量;  $G_e$  为向电网购电的二氧化碳排放量转换系数,单位为  $\text{kg}/(\text{kWh})$ ;  $\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I E_{grid}^i$  为一年向电网购电的总量。

优化目标是各个选中设备的选中品牌的容量,各个设备的容量受到式(5)~(9)的约束,即 5 种设备的额定容量  $P$  等于每类设备被选中的产品种类乘以该产品的优化容量。各约束公式的数学表述见如下:

$$P_{GT} = \sum_{m=1}^{H_1} C_1^m P_1^m \quad (5)$$

$$P_{BR} = \sum_{m=1}^{H_2} C_2^m P_2^m \quad (6)$$

$$P_{EC} = \sum_{j=1}^{H_3} C_3^m P_3^m \quad (7)$$

$$P_{AB} = \sum_{j=1}^{H_4} C_4^m P_4^m \quad (8)$$

$$P_{RC} = \sum_{j=1}^{H_5} C_5^m P_5^m \quad (9)$$

### 1.2.3 第三级优化目标—年总费用

第三级优化需要考虑的是经济性,采用综合考虑 CCHP 运行策略—“以热定电”和“以电定热”的模式,以一个变量  $G$  作为优化变量,表示运行模式的一个临界值,即根据时刻  $i$  的热负荷和冷负荷之和与电负荷之比,来确定时刻  $i$  为“以热定电”、还是“以电定热”的运行模式。如果在  $i$  时刻,热负荷和冷负荷之和与电负荷之比小于等于  $G$ ,应该采用“以热定电”,反之采用“以电定热”,用  $R_{CCHP}^i$  表示,推得的数学定义式如下:

$$R_{CCHP}^i = \begin{cases} 1 & \frac{H_i^i + C_i^i}{E_i^i} \leq G \\ \vdots & \\ 0 & \frac{H_i^i + C_i^i}{E_i^i} > G \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $E_i^i$  为  $i$  时刻的电负荷;  $H_i^i$  为  $i$  时刻的热负荷;  $C_i^i$  为  $i$  时刻的冷负荷。

考虑经济性,所以采用年总费用最低来对  $G$  进行优化,其中包括初投资费用  $C_{inv}$ , 设备的维修费用

$C_{om}$  和运行费用  $C_{run}$  (年消耗的燃气费用和年耗电量的费用), 即年总费用  $cost$  为式(11):

$$\min cost = \gamma C_{inv} + C_{om} + C_{run} \quad (11)$$

式(11)中,  $\gamma$  为等额支付系列资金恢复系数, 该值由式(12)计算求出:

$$\gamma = \frac{p \cdot (1+p)^j}{(1+p)^j - 1} \quad (12)$$

其中,  $p$  为年利率,  $j$  为使用寿命。接下来, 研究推得的  $C_{om}$  的计算公式可写为:

$$C_{om} = \sum_{n=1}^5 \sum_{m=1}^{H_n} C_n^m P_n^m I_n^m \quad (13)$$

其中,  $I_n^m$  为设备  $n$  的第  $m$  品牌的维修费用, 单位为元/kw。

在此基础上, 研究又推得了  $C_{inv}$ 、 $C_{run}$  的数学公式具体如下:

$$C_{inv} = C_{GT} + C_{BR} + C_{EC} + C_{AB} + C_{RC} \quad (14)$$

其中,  $C_{GT}$ 、 $C_{BR}$ 、 $C_{EC}$ 、 $C_{AB}$ 、 $C_{RC}$  分别为内燃发电机、吸收式制冷机组、电制冷机组、燃气锅炉和余热回收装置的费用。

$$C_{run} = P_f \left( \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I F_{GT}^i + \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I F_{AB}^i \right) + \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I Q_{BE}^i E_{grid}^i - \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I Q_{SE}^i E_{Sgrid}^i \quad (15)$$

其中,  $P_f$  为天然气的单价, 单位为元/(kWh);  $Q_{BE}^i$ 、 $Q_{SE}^i$  分别为时刻  $i$  向电网购电和售电的电价, 单位为元/(kWh);  $E_{Sgrid}^i$  为时刻  $i$  向电网出售的电量, 单位为元/(kWh);  $\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I Q_{BE}^i E_{grid}^i$  和  $\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I Q_{SE}^i E_{Sgrid}^i$  分别为向电网购电和售电的年总费用。

### 1.3 约束条件

除了上述的容量和设备的约束条件, CCHP 系统的冷热电平衡约束可进行研究分述如下。

(1) 电平衡。数学公式见式(16):

$$E_L^i = Q_{GT}^i + E_{grid}^i - E_{Sgrid}^i \quad (16)$$

其中,  $Q_{GT}^i$  为时刻  $i$  天然气内燃发电机的输出功率。

(2) 热平衡。数学公式见式(17):

$$H_L^i = \frac{Q_{GT}^i \eta_{GT}^h}{\eta_{GT}^e} + Q_{AB}^i \quad (17)$$

其中,  $\eta_{GT}^h$ 、 $\eta_{GT}^e$  为内燃机的热效率和电效率;  $Q_{AB}^i$  为  $i$  时刻燃气锅炉的输出功率。

(3) 系统最大的热负荷  $H_L^{\max}$  满足约束, 见式(18):

$$H_L^{\max} \leq \frac{P_{GT} \eta_{GT}^h}{\eta_{GT}^e} + P_{AB} \quad (18)$$

(4) 冷平衡。数学公式见式(19):

$$C_L^i = Q_{BR}^i + Q_{EC}^i \quad (19)$$

其中,  $Q_{BR}^i$  为时刻  $i$  吸收式制冷机组的输出功率,  $Q_{EC}^i$  为时刻  $i$  电制冷机组的输出功率。

(5) 最大的冷负荷  $C_L^{\max}$  的约束。数学公式见式(20):

$$C_L^{\max} \leq P_{BR} + P_{EC} \quad (20)$$

(6) 设备的功率约束。数学公式见式(21)~式(25):

$$P_{GT} \lambda_{GT}^{\min} \leq Q_{GT}^i \leq P_{GT} \lambda_{GT}^{\max} \quad (21)$$

$$P_{BR} \lambda_{BR}^{\min} \leq Q_{BR}^i \leq P_{BR} \lambda_{BR}^{\max} \quad (22)$$

$$P_{EC} \lambda_{EC}^{\min} \leq Q_{EC}^i \leq P_{EC} \lambda_{EC}^{\max} \quad (23)$$

$$P_{AB} \lambda_{AB}^{\min} \leq Q_{AB}^i \leq P_{AB} \lambda_{AB}^{\max} \quad (24)$$

$$P_{RC} \lambda_{RC}^{\min} \leq Q_{RC}^i \leq P_{RC} \lambda_{RC}^{\max} \quad (25)$$

其中,  $Q_{RC}^i$  为时刻  $i$  余热回收装置的输出功率;  $\lambda_n^{\min}$ 、 $\lambda_n^{\max}$  为选定设备  $n$  的最小负荷率和最大负荷率。

(7) 余热回收设备的额定容量要大于内燃机产生的最大的余热。数学计算公式见式(26):

$$\frac{P_{GT} \eta_{GT}^h}{\eta_{GT}^e} \leq P_{RC} \quad (26)$$

## 2 模型求解

### 2.1 改进粒子群算法

根据对鸟群的捕食行为的研究, 提出了粒子群算法 PSO, 设计一种无质量的粒子来模拟鸟群中的鸟, 该算法是通过群体的信息共享与个体自身经验的总结来对个体行动策略进行修正, 最终求取优化问题的解<sup>[21]</sup>。本文在粒子群算法的基础上, 对惯性权重和学习因子进行改进, 进而使用改进的粒子群算法进行求解, 改进策略如式(27)~(29)所示:

$$\omega = \omega_{\min} + \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min})(ger - T)}{ger} \quad (27)$$

$$c_1 = c_{1\min} + \frac{(c_{1\max} - c_{1\min}) \cdot T^2}{ger^2} \quad (28)$$

$$c_2 = c_{2\max} + \frac{(c_{2\min} - c_{2\max}) \cdot T^2}{ger^2} \quad (29)$$

其中,  $\omega_{\min}$ 、 $\omega_{\max}$  是惯性权重的最小值和最大值; 采用式(27)的惯性权重策略, 在迭代初期利于全局搜索, 而在迭代后期利于局部搜索, 提高了算法的收敛性;  $c_{1\max}$ 、 $c_{1\min}$  分别为自我学习因子  $c_1$  的最大值和最小值;  $c_{2\max}$ 、 $c_{2\min}$  分别为群体学习因子  $c_2$  的最大值和最小值;  $ger$  是总迭代次数;  $T$  是当前迭代次数。

### 2.2 模型求解流程

由于所设计的模型中涉及对设备的选型问题, 是一个离散型的变量, 所以采用离散粒子群算法对第一级目标进行优化求解。结合所建立的数学模型及改

进粒子群算法, 得到模型求解流程图, 如图 2 所示。

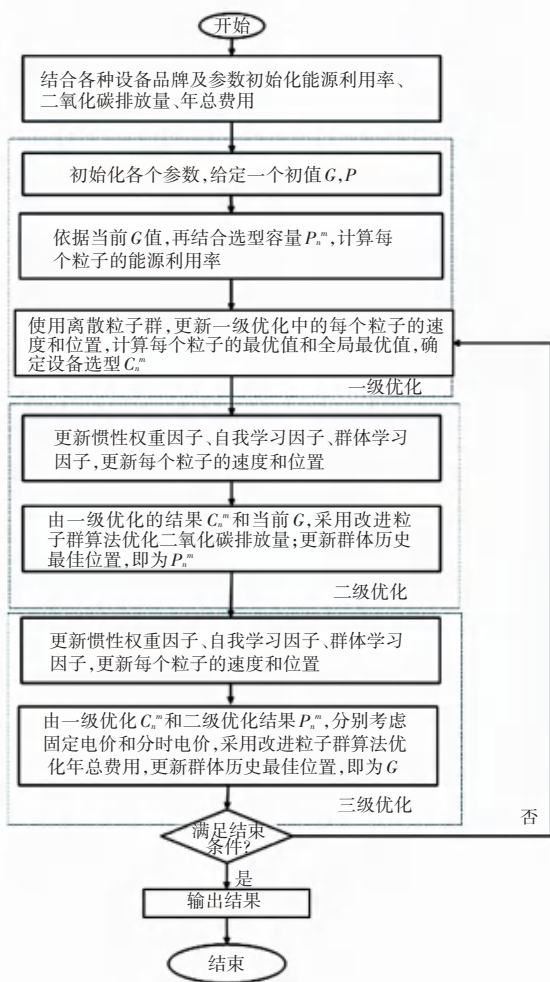


图 2 模型求解流程图

Fig. 2 Flow chart of the model solution

### 3 算例验证

#### 3.1 冷热电联供系统所需设备选取

本文根据需要, 选择的内燃机组品牌参数和额定容量关系曲线如图 3~图 5 所示, 选择的余热回收装置、吸收式制冷机组、电制冷机组、燃气锅炉装置的相关参数见表 1~表 4。

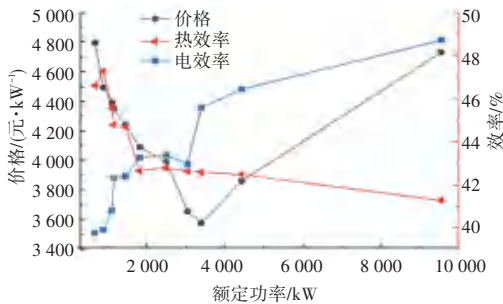


图 3 MGTA 品牌参数和额定容量关系曲线

Fig. 3 Relationship between MGTA brand parameters and rated capacity

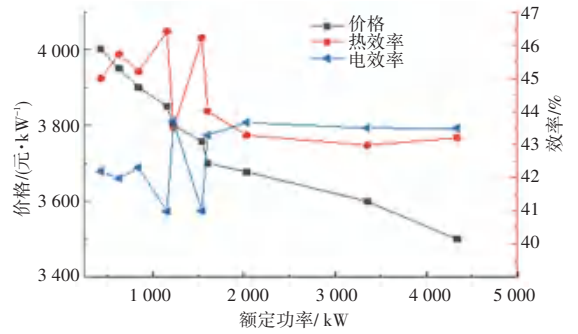


图 4 MGTB 品牌参数和额定容量关系曲线

Fig. 4 Relationship between MGTB brand parameters and rated capacity

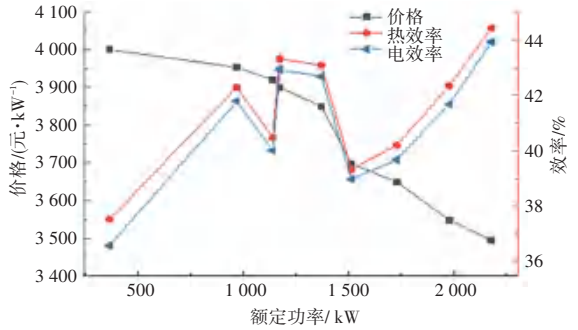


图 5 MGTC 品牌参数和额定容量关系曲线

Fig. 5 Relationship between MGTC brand parameters and rated capacity

表 1 备选余热回收装置参数

Tab. 1 Parameters of the alternative waste heat recovery devices

| 品牌        | 热效率  | 成本/(元·kW <sup>-1</sup> ) | 功率范围/kW    |
|-----------|------|--------------------------|------------|
| $M_{RCA}$ | 0.86 | 100                      | 300~20 000 |
| $M_{RCB}$ | 0.89 | 150                      | 200~17 000 |
| $M_{RCC}$ | 0.90 | 160                      | 200~19 000 |

表 2 备选吸收式制冷机组参数

Tab. 2 Parameters of alternative absorption refrigeration units

| 品牌        | COP  | 成本/(元·kW <sup>-1</sup> ) | 功率范围/kW    |
|-----------|------|--------------------------|------------|
| $M_{BRA}$ | 1.44 | 2 000                    | 230~9 300  |
| $M_{BRB}$ | 1.41 | 1 800                    | 233~11 630 |
| $M_{BRC}$ | 1.33 | 1 100                    | 105~5 814  |

表 3 备选电制冷机组参数

Tab. 3 Parameters of alternative electric refrigeration units

| 品牌        | COP | 成本/(元·kW <sup>-1</sup> ) | 功率范围/kW    |
|-----------|-----|--------------------------|------------|
| $M_{ECA}$ | 3.1 | 1 000                    | 200~3 860  |
| $M_{ECB}$ | 4.2 | 1 650                    | 200~9 800  |
| $M_{ECC}$ | 5.4 | 1 900                    | 300~10 000 |

表 4 备选燃气锅炉的参数

Tab. 4 Parameters of alternative gas boiler

| 品牌        | 热效率  | 成本/(元·kW <sup>-1</sup> ) | 功率范围/kW    |
|-----------|------|--------------------------|------------|
| $M_{ABA}$ | 0.88 | 260                      | 250~28 000 |
| $M_{ABB}$ | 0.90 | 320                      | 240~24 000 |
| $M_{ABC}$ | 0.91 | 340                      | 180~70 000 |

#### 3.2 算例信息

在进行算例分析时, 已经选定了设备, 还需要对

算例进行选取,学校一年四季中的冷热电负荷的需求都比较稳定,适合作为验证本次优化方法的算例,即采用在本文设计方法得到的 CCHP 为其供能。学校一年的典型日的负荷,其中供冷季是6月、7月和8月,共3个月,供冷季典型日24 h的负荷曲线如图6所示;采暖季是1月、2月、3月、11月和12月,共5个月,采暖季典型日24 h的负荷曲线如图7所示;过渡季是4月、5月、9月和10月,共4个月,过渡季典型日24 h的负荷曲线如图8~图9所示。图6~图9中,横坐标代表一天的24小时,纵坐标代表对应时刻的负荷值,曲线中黑色代表热负荷,红色代表电负荷,蓝色代表冷负荷。

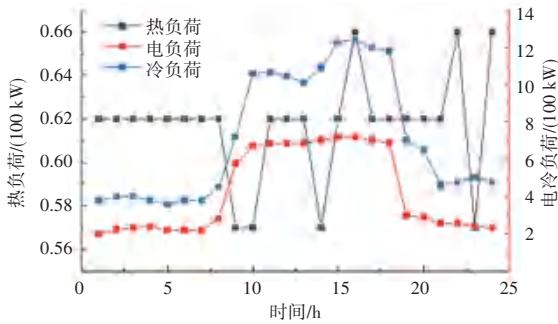


图6 供冷季6~8月典型日24 h的负荷曲线

Fig. 6 24 h load curves of a typical day from June to August in the cooling season

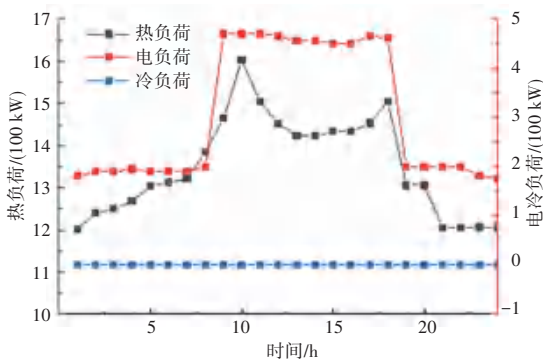


图7 采暖季典型日的24 h的负荷曲线

Fig. 7 24 h load curves of a typical day in the heating season

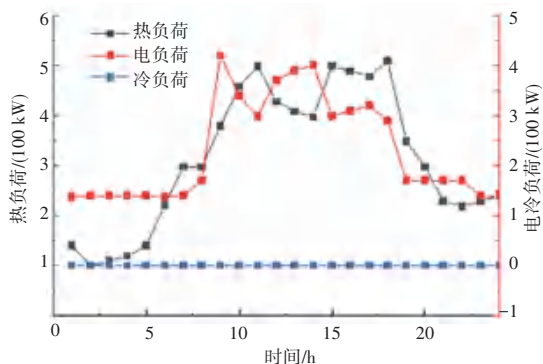


图8 过渡季4~5月典型日的负荷曲线

Fig. 8 24 h load curves of a typical day from April to May in the transition season

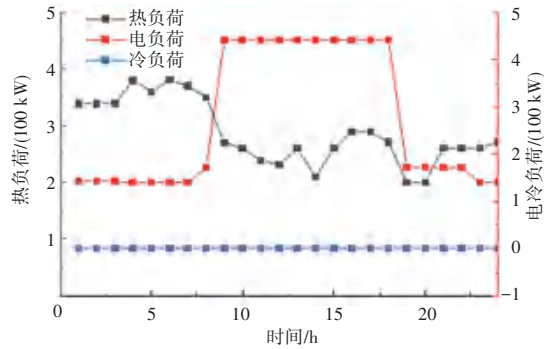


图9 过渡季9~10月典型日的负荷曲线

Fig. 9 24 h load curves of a typical day from September to October in the transition season

通过上述曲线,可以看出在采暖季和过渡季,冷负荷都为0,只含有电负荷和热负荷;在供冷季,含有电、热、冷三种负荷。因为学校的负荷是比较稳定的,所以可以采用典型日的数据来计算对应季节的负荷,进而计算全年的运行数据。

### 3.3 参数选取及购售电分时电价

本文选取的算法迭代次数为50次,除了上述的品牌参数,其余参数为:  $P = 0.1$ ,  $j = 10$ ;  $G_e = 0.997$ ,  $G_f = 1.96$ ,  $\omega_{\min} = 0.4$ ,  $\omega_{\max} = 0.9$ ,  $c_{1\max} = 2.5$ ,  $c_{1\min} = 0.5$ ,  $c_{2\max} = 0.5$ ,  $c_{2\min} = 2.5$ ;  $g_1 = g_2 = 0.5$ 。固定电价时,  $Q_{BE}^i$  为1.2元/(kW·h),  $Q_{SE}^i$  为0.8元/(kW·h)。

采用分时电价时,一天的时刻为24 h,峰谷平时段的划分为:峰时段为10:00-15:00,20:00-24:00;谷时段为00:00-07:00,15:00-18:00;平时段为07:00-10:00,18:00-20:00。各个时刻的购售电价格如图10所示。图10中,黑色代表购电价格,红色代表售电价格。

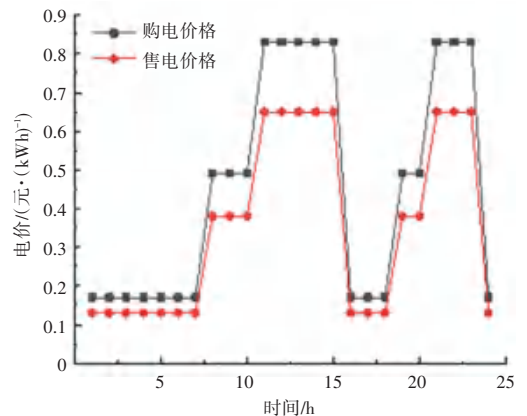


图10 购售电的分时电价曲线

Fig. 10 TOU price curves of electricity purchase and sale

### 3.4 固定电价及分时电价结果对比

对建立的模型及采用的算法,使用 Matlab 软件

编程求解。拟做研究论述如下。

### 3.4.1 固定电价

当购售电价格固定时,得到的一次能源利用率、二氧化碳排放量、以及年总费用的优化曲线分别如图 11~图 13 所示。

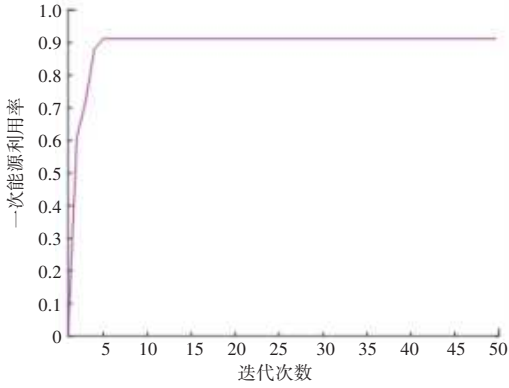


图 11 一次能源利用率优化曲线

### 3.4.2 分时电价

采用分时电价后,得到的一次能源利用率、二氧化碳排放量、以及年总费用的优化曲线分别如图 14~图 16 所示。

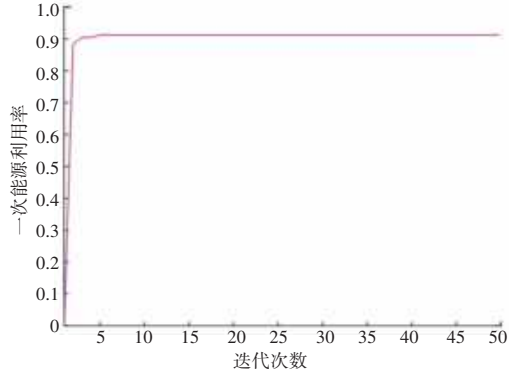


图 14 一次能源利用率优化曲线

Fig. 14 Optimization curve of primary energy utilization

Fig. 11 Optimization curve of primary energy utilization

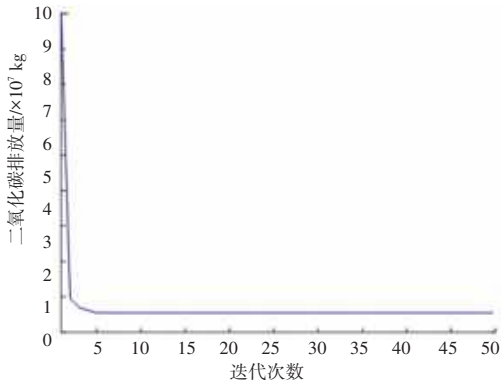


图 12 二氧化碳排放量优化曲线

Fig. 12 Optimization curve of carbon dioxide emissions

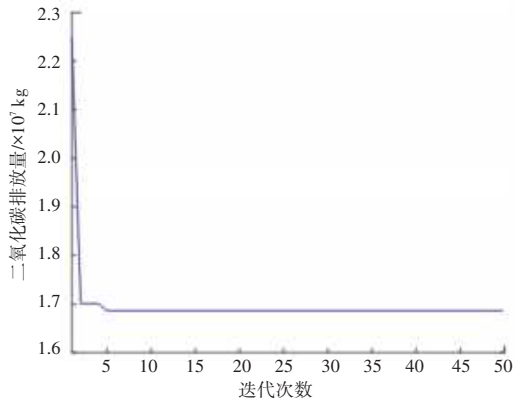


图 15 二氧化碳排放量优化曲线

Fig. 15 Optimization curve of carbon dioxide emissions

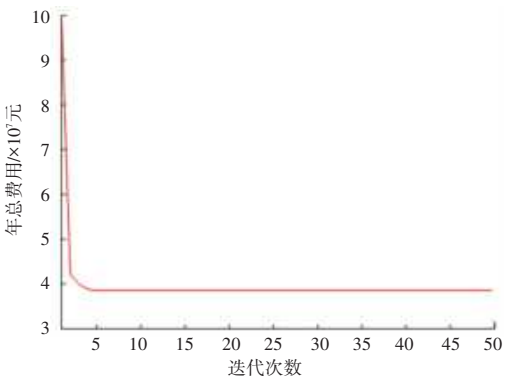


图 13 年总费用优化曲线

Fig. 13 Total cost optimization curve

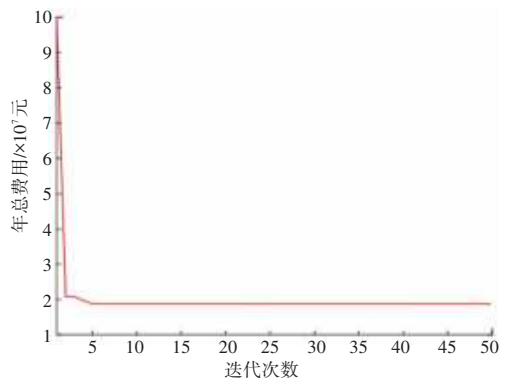


图 16 年总费用优化曲线

Fig. 16 Total cost optimization curve

采用固定电价的优化变量最佳运行参数  $G$  为 2.309 3,一次能源利用率为 91.20%,二氧化碳排放量为  $1.548 \times 10^7$  kg,年总费用为 3 852.56 万元。

采用分时电价之后的最佳运行参数  $G$  为 4.546 8。运行后得到的优化的结果是:一次能源利用率为 91.27%,二氧化碳排放量为  $1.686 \times 10^7$  kg,年

总费用为1 877.83万元。固定电价和分时电价实验结果对比见表5、表6。

表5 品牌选型和容量配置对比

Tab. 5 Comparison of brand selection and capacity configuration

| 设备      | 品牌   |      | 容量     |       |
|---------|------|------|--------|-------|
|         | 固定电价 | 分时电价 | 固定电价   | 分时电价  |
| 内燃发电机   | MGTB | MGTB | 4 300  | 4 300 |
| 吸收式制冷机组 | MBRB | MBRC | 10 258 | 5 293 |
| 电制冷机组   | MECB | MECA | 1 240  | 1 644 |
| 燃气锅炉    | MABC | MABC | 7 615  | 7 636 |
| 余热回收装置  | MRCC | MRCC | 7 699  | 8 994 |

表6 三级优化结果

Tab. 6 Three-level optimization results

|      | 优化结果        |                          |             |
|------|-------------|--------------------------|-------------|
|      | 能源利用率/<br>% | 二氧化碳<br>排放量/( $10^7$ kg) | 年总费用/<br>万元 |
| 固定电价 | 91.20       | 1.548                    | 3 852.56    |
| 分时电价 | 91.27       | 1.686                    | 1 877.83    |
| 变化量  | 0.07        | 0.138                    | 1 974.73    |

通过以上对比,可以发现,采用分时电价之后,选用的吸收制冷机和电制冷机组都和固定电价时不一样,这是由于电价影响了成本,本模型是三级协同优化,每一级优化变量都会影响其他两级,所以设备的选型和容量会有变化。由表6可以看出,考虑分时电价时,成本降低了1 974.73万,能源利用率提高了0.07%,二氧化碳的排放量也增加了 $0.138 \times 10^7$  kg,但是与二氧化碳排放相比,系统的经济性和能效性得到更大的提升,三级的协同优化作用的整体而言,在计及分时电价之后,能够对设备进行更好的选型与容量的配置,在能源利用率和环境友好性上变化不大的情况下,提高了系统的经济性。

## 4 结束语

本文针对CCHP系统的设备选型、容量的配置及运行模式的确定,设计了三级协同优化的方法,同时兼顾了系统的能效性、环保性和经济性。采用改进的粒子群算法,对惯性权重因子、自我学习因子和群体学习因子进行实时的更新,可以避免进入局部最优,能提升收敛速度。价格是影响成本的因素,由于是三级协同优化,每一级的结果都会影响其他两级,与固定电价相比,采用分时电价能够使经济性得到明显提升,能够为设备选型和容量配置提供更好

的支持。本文研究为在后续考虑运行负荷的影响时,计及分时电价之后,对系统设备的出力及运行优化研究奠定了基础。

## 参考文献

- [1] 新华社. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话[EB/OL]. (2020-09-22)[2021-04-01]. [http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content\\_5546168.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546168.htm).
- [2] MAO M Q, JI M H, DONG W, et al. Multi-objective economic dispatch model for a microgrid considering reliability [C]//IEEE Int Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. Hefei: IEEE, 2010: 993-998.
- [3] 张晗,王进,李亚峰,等. 多能模式下冷热电联供系统的经济优化调度[J]. 电力学报, 2018, 33(05): 463-470.
- [4] 邓剑波,马瑞,胡振文,等. 基于改进粒子群算法的冷热电联供微网优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(02): 35-42.
- [5] 晏伟,吴新林,方景刚. 含环境成本和多种储能的综合能源微网优化运行[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(01): 67-71, 96.
- [6] 吴宣儒,李萍,郝才成. 基于改进蝙蝠算法的冷热电联供型综合能源系统调度[J]. 工业控制计算机, 2020, 33(08): 51-54.
- [7] 郭楠,杨莱. 电制冷比可变的混合冷热电联供系统的多目标运行优化与分析[J]. 建筑节能, 2019, 47(10): 109-116.
- [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(06): 45-52.
- [9] 负保记,白森珂,张国. 基于混沌自适应粒子群算法的冷热电联供系统优化[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 123-130.
- [10] SHAHMOHAMMADI A. et al. Optimal design of multicarrier energy systems considering reliability constraints [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 878-886.
- [11] 刘维康,王丹,余晓丹,等. 考虑电气转换储能和可再生能源集成的微能源网多目标规划[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16): 11-20, 72.
- [12] 马溪原,郭晓斌,雷金勇. 面向多能互补的分布式光伏与气电混合容量规划方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(04): 55-63.
- [13] 张良. 可再生能源冷热电联供系统嵌套优化设计研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [14] 蒋润花,杨晓西,杨敏林,等. 冷热电联供系统运行方式性能优化分析[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(10): 1818-1822.
- [15] 李献梅,陈瑞先,周任军,等. 响应峰谷电价的冷热电联供系统优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(04): 25-30.
- [16] 吴红斌,王东旭,刘星月. 太阳能冷热电联供系统的策略评估和优化配置[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 46-51.
- [17] 王成山,洪博文,郭力,等. 冷热电联供微网优化调度通用建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 26-33, S3.
- [18] 赵峰,张承慧,孙波等. 冷热电联供系统的三级协同整体优化设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3785-3793.
- [19] 任晶鼎. 冷热电三联供(CCHP)系统运行分析与监控系统设计[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [20] 吴利辉,杨洪海,吴植华. 三联供系统配置及运行策略的多目标优化分析[J]. 建筑热能通风空调, 2012, 31(01): 16-18, 73.
- [21] SHI Y, EBERHART R C. Fuzzy adaptive particle swarm optimization [C]//Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation. Piscataway, New Jersey: IEEE, 2001: 101-106.