

DOI: 10.19666/j.rlfed.202403054

# 基于多目标优化的多能互补冷热电联产系统运行优化研究

李鑫伟, 陈彬剑, 于明志, 刘吉萱, 杨开敏, 周世玉, 毛煜东  
(山东建筑大学热能工程学院, 山东 济南 250101)

**[摘要]** 针对多能互补冷热电联产系统构建了光-氢-气的多能源互补系统, 旨在满足用户对冷、热、电和气的需求; 为了优化系统性能, 构建了包含经济、环保和掺氢比例的多能互补冷热电联产系统多目标优化评价体系, 并以此为基础建立多目标优化调度的混合整数线性规划模型; 通过得到的帕累托前沿解集, 利用优劣解距离法找出解集中的最优解; 在改变掺入天然气管网的掺氢比例的过程中, 得到了热网和冷网各设备的最佳运行情况。研究结果显示: 在固定用户负荷的条件下, 掺氢比例为 14.47% 时, 每日系统运行成本最低为 26 794.31 元, 碳排放量最少为 162.03 kg, 与 2 个参考系统相比, 该方案不仅经济性较好, 而且具有节能减排的特点, 综合评价最优。将可再生能源转化为电力, 再转换成氢气掺入天然气管网, 按照一定的掺混比例应用到冷热电联产系统中, 可大幅减少天然气用量, 提高了能源利用效率, 最大限度地消纳可再生能源, 并降低了碳排放量。

**[关键词]** 多能互补; NSGA-II 算法; 混合整数线性规划; 天然气掺氢; 可再生能源

[引用本文格式] 李鑫伟, 陈彬剑, 于明志, 等. 基于多目标优化的多能互补冷热电联产系统运行优化研究[J]. 热力发电, 2024, 53(7): 73-81. LI Xinwei, CHEN Binjian, YU Mingzhi, et al. Research on operation optimization of multi-energy complementary cogeneration system based on multi-objective optimization[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(7): 73-81.

## Research on operation optimization of multi-energy complementary cogeneration system based on multi-objective optimization

LI Xinwei, CHEN Binjian, YU Mingzhi, LIU Jiying, YANG Kaimin, ZHOU Shiyu, MAO Yudong  
(School of Thermal Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

**Abstract:** A multi-energy complementary system integrating solar-hydrogen-gas has been developed for multi-energy complementary cogeneration systems, aimed at meeting users' demands for cooling, heating, power, and gas. In order to optimize the system performance, a multi-objective optimization evaluation system of the multi-energy complementary cooling, heating and power cogeneration system including economy, environmental protection and hydrogen doping ratio is constructed, and a mixed-integer linear programming model for multi-objective optimal scheduling is established based on this system. With the obtained Pareto frontier solution set, the optimal solution in the solution set is found by using the method of distance to the ideal solution to identify the optimal solution. By changing the blending ratio of hydrogen injected into the natural gas pipeline network, the optimal operating conditions for the devices in the electricity, heat, and cold networks are obtained. The results show that, under the condition of fixed user load, with the hydrogen doping ratio of 14.47%, the system operating cost per day is the lowest (26 794.31 yuan), and the carbon emission is the least (162.03 kg). The results indicate that the proposed scheme is not only economically better, but also has the characteristics of energy saving and emission reduction, and performs the best in comprehensive evaluation, compared with the 2 reference

收稿日期: 2024-03-15

基金项目: 济南市科研带头人工作室项目 (202333050); 山东省高等学校“青创人才引育计划”

Supported by: The Leading Researcher Studio Fund of Jinan (202333050); Plan of Introduction and Cultivation for Young Innovative Talents in Colleges and Universities of Shandong Province

第一作者简介: 李鑫伟 (1999), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为综合能源系统优化等, 2022035101@stu.sdjzu.edu.cn。

通信作者简介: 毛煜东 (1989), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为微尺度传热传质等, maoyudong@sdjzu.edu.cn。

systems. The conversion of renewable energy sources into electricity, followed by the transformation into hydrogen and its incorporation into the natural gas pipeline network according to a specified blending ratio for application in combined cooling, heating, and power generation systems, significantly reduces the use of natural gas. This approach enhances energy utilization efficiency, maximizes the integration of renewable energy sources, and reduces carbon emissions.

**Key words:** multi-energy complementary; NSGA-II algorithm; mixed-integer linear programming; hydrogen blending of natural gas; renewable energy

近年随着我国“双碳”目标的持续推进,在能源系统向低碳转型的大背景下,如何结合可再生能源来满足冷、热、电、气等多类型负荷的需求成为了一个重要的研究课题<sup>[1-2]</sup>。基于多能互补的冷热电系统可以最大限度地消纳可再生能源,并降低碳排放。这种系统可以通过集成不同的能源设备和技术来实现多类型负荷的服务<sup>[3]</sup>。例如,利用太阳能光伏发电和风力发电等可再生能源来提供电力,利用余热回收技术和燃气轮机等设备来提供热能,以及利用吸收式制冷机组等设备来提供冷能,从而实现能源高效利用,同时减少碳排放。张雨曼<sup>[4]</sup>和董金凤<sup>[5]</sup>等建立了基于多能互补系统的冷热电联产系统数学模型,旨在寻找设备最佳的运行状态,以提高能源效率等。

可再生能源的随机性、波动性和间歇性特征使得高比例可再生能源接入电力系统时,灵活性优化运行成为其核心问题之一。Hu 等人<sup>[6]</sup>研究了通过包含大量冷、热、电、气储存的冷热电联合系统来消纳可再生能源的优化模型,通过引入储能装置和需求响应等资源,实现了冷、热、电、气多个能源体系的协同优化,以提高系统时空范围内的优化配置能力。黄宇等<sup>[7]</sup>采用热力学分析法建立了综合能源系统模型,考虑了系统的效率和总运行成本,并引入了用户侧需求响应的实施和系统运行约束,该模型基于太阳能光伏发电或风力发电,利用 CPLEX 求解器进行高效求解,但未考虑环境友好度和天然气排放的影响。程杉等<sup>[8]</sup>则通过供需双侧电、热能的互动互补关系,采用储能装置实现联供设备的热电解耦,通过各能源转换设备提升系统多种能源的供应能力,并提出了供需双侧协同优化模型。然而,该方法并未减少对化石燃料的使用,无法充分消纳可再生能源。Wang 等人<sup>[9]</sup>以风能、太阳能和天然气为出发点,建立了电力网络和天然气网络之间的联系,分析了系统运行特性,该电-气综合能源系统的基本能流结构有效减少了弃风率和弃光率,但缺乏进一步的成本效益分析。

综上所述,目前对多能互补系统的研究需进一步考虑环境友好度、成本效益等因素,以提高可再

生能源的消纳和调峰能力。本文将可再生能源转化为电力,然后转换成氢气掺入天然气管网,形成掺氢天然气<sup>[10]</sup>。这种综合利用能源的方法不仅能够减少企业端或用户端对天然气的需求,还能有效降低二氧化碳排放量,解决光伏发电的弃光问题。天然气与氢能在产业链上具有相似链系特征、类似储运特点和部分相同应用领域,具备构建“天然气+氢能”全产业链耦合的良好发展条件<sup>[11]</sup>。

## 1 掺氢天然气性质

氢气作为清洁能源的优势在于燃烧后只产生水蒸气,不会产生二氧化碳等温室气体,而天然气在燃烧时会产生二氧化碳等温室气体。表 1 为氢气和天然气物理化学性质。

表 1 天然气氢气物理化学性质  
Tab.1 Physical and chemical properties of natural gas and hydrogen

项目	氢气	天然气
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	0.09	0.68
高位热值/(MJ·m <sup>-3</sup> )	12.74	39.14
低位热值/(MJ·m <sup>-3</sup> )	10.79	33.50
爆炸极限/%	3.10~74.80	5.06~15.29

掺氢技术可利用现有基础技术设施实现氢能利用,在一定范围内,掺氢天然气对天然气管道、设备等影响不大。各国对于掺氢天然气的允许比例有所不同,如欧洲国家允许的最大掺氢比为 1%至 6%,而德国和英国在特定情况下甚至达到 20%。

掺氢燃气管道内混合气体的爆炸极限可以采用 Le Chatelier 法则<sup>[12]</sup>计算:

$$\frac{1}{L} = \sum \frac{y_i}{L_i} \quad (1)$$

式中:  $L$ 、 $L_i$  分别为混合气体、第  $i$  种气体的爆炸极限;  $y_i$  为第  $i$  种气体的体积分数。

而掺氢天然气的热值混合公式是将这 2 种燃料的热值可按照一定比例进行加权平均获得<sup>[13]</sup>。不同掺氢比例下掺氢天然气爆炸极限和热值如图 1、图 2 所示。

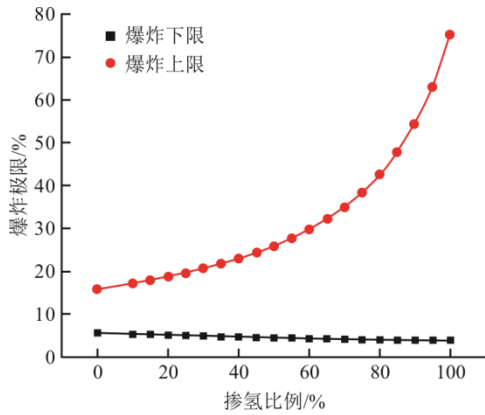


图1 不同掺氢比例下掺氢天然气爆炸极限  
Fig.1 Explosion limit of hydrogen-doped natural gas at different hydrogen-doped ratios

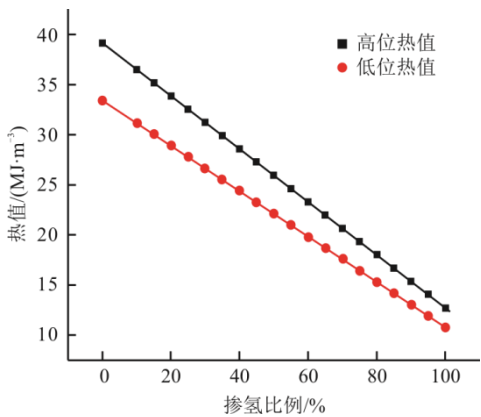


图2 不同掺氢比例下掺氢天然气热值变化  
Fig.2 The changes of calorific value of hydrogen-doped natural gas at different proportions of hydrogen

氢气在空气中的爆炸极限体积分数范围较宽，易于燃烧和爆炸，而天然气的爆炸极限体积分数范围较窄，相对安全。由图1可知，掺混后随着掺氢比例的升高，掺氢天然气更加易于爆炸和燃烧。由图2可知，掺混后的掺氢天然气随掺氢比例的升高，热值却逐渐下降。综上所述，掺氢比例越高越易于燃烧和爆炸，热值越低，因此本文掺氢比例设计为0~20%。栗遇春<sup>[14]</sup>和周建力<sup>[15]</sup>等都将氢气应用到综合能源系统，促进新能源消纳，减少化石燃料的使用，得到了最优风光配比条件下氢能系统的最佳容量配置，但是对天然气的使用没有限制。

## 2 光-氢-气多能源互补系统及其数学模型

多能互补的冷热电联产微网是微型能源网的一个典型示例。在微网中，主要的能源设备包括光伏发电系统、燃气轮机、吸收式制冷机和蒸汽热水换热装置，辅助能源包括电制冷机和集中供热。系统模型如图3所示。

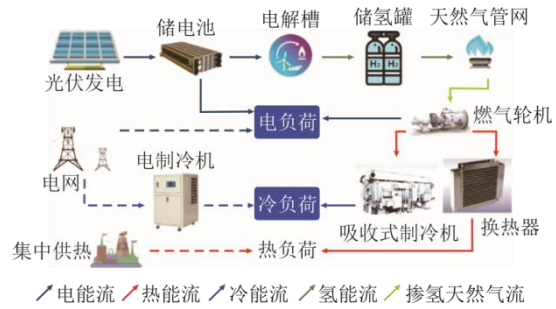


图3 多能互补系统模型结构  
Fig.3 Structural diagram of the multi-energy complementary system model

在冷热电联供型微网中，电能主要优先由光伏发电系统和燃气轮机发电提供，其次由蓄电池供电。同时，微网可以通过与配电网之间的电力购售关系来平衡微网内部对电能的需求，从而实现对电负荷的供电，从而形成了电能流动的方式。燃气轮机在运行过程中产生大量余热，可以通过吸收式制冷机和换热装置进行回收和转换，变成可供使用的冷能和热能。当吸收式制冷机和换热装置无法满足微网内部对冷能和热能的需求时，可以通过电制冷机和集中供热补充微网缺少的冷能和热能，从而形成冷能和热能的流动。氢气由电解槽制取，进入到天然气管网混合，天然气来自燃气公司，构成掺氢天然气的流动。系统还配备储电池和储氢罐。

多能互补系统充分利用多种能源网络的协同作用，通过多种能源的相互转换与储存，满足建筑空间或社区里终端用户的供电、供冷、供热等能源需求。能源系统整体规划运行，可提高系统运行灵活性，达到节能减排的目的<sup>[16]</sup>。

### 2.1 光伏发电输出特性模型

光伏组件输出功率<sup>[17]</sup>为：

$$P_{pv} = P_{pv,s} \times G \times [1 + k_{pv} (T_{pv} - T_{pv,s})] / G_s \quad (2)$$

式中： $P_{pv}$ 为光伏发电在 $t$ 时段内输出的功率； $P_{pv,s}$ 为标准测试条件下的最大光伏功率； $G$ 为 $t$ 时段内太阳实际的辐照强度； $k_{pv}$ 为光伏组件的功率温度系数； $T_{pv}$ 为光伏组件在 $t$ 时段内的实际温度； $T_{pv,s}$ 为在标准测试条件下的环境温度，取25℃； $G_s$ 为在标准测试条件下太阳的辐照强度，取1000W/m<sup>2</sup>。

### 2.2 制氢储氢系统数学模型

#### 2.2.1 电解制氢数学模型

常用的电解槽制氢气<sup>[18]</sup>是将水分解成氢气和氧气，并在阴极上收集氢气。制取的氢气流 $H_{el}$ 为：

$$\begin{aligned} H_{el} &= \eta_{el} P_{el} \\ 0 &\leq P_{el} \leq P_{el, \max} \\ |P_{el}(t) - P_{el}(t-1)| &\leq P_{el, \text{up}} \end{aligned} \quad (3)$$

式中： $H_{el}$ 为制取的氢气量； $P_{el}$ 为电解槽实时的耗电功率； $P_{el,up}$ 为电解槽的爬坡上限； $\eta_{el}$ 为电解槽的电解效率； $P_{el,max}$ 为电解槽的功率上限。

### 2.2.2 储氢罐数学模型

根据储氢压力的不同，储氢罐可分为高压储氢罐和低压储氢罐，低压储氢罐用来存储绿氢，其数学模型为：

$$\begin{aligned} E_h &= E_h(t-1) + \eta_{ch}^h H_{ch}^t - H_{dis}^t / \eta_{dis}^h \\ E_{c,min} &\leq E_h(t) \leq E_{c,max} \\ 0 &\leq H_{ch}^t \leq H_{ch,max}^t \\ 0 &\leq H_{dis}^t \leq H_{dis,max}^t \end{aligned} \quad (4)$$

式中： $E_h$ 为储氢罐 $t$ 时刻的储存量； $E_{c,min}$ 和 $E_{c,max}$ 为储氢罐的最小、最大容量； $H_{ch}^t$ 和 $H_{dis}^t$ 分别为当前时刻的充放氢量； $\eta_{ch}^h$ 和 $\eta_{dis}^h$ 分别为充放氢效率； $H_{ch,max}^t$ 和 $H_{dis,max}^t$ 分别为充放氢上限。

## 2.3 冷热电联产系统余热利用模型

### 2.3.1 燃气轮机烟气余量数学模型

燃气轮机通过燃烧掺氢天然气，产生大量烟气，这些烟气通过透平后推动转子做功产生电能，产生的额外废热则可以通过余热利用设备进行回收，其数学模型<sup>[19]</sup>为：

$$Q_{GT} = V_{GT} \eta_{GT} \times Q_{LIV} \times (1 - \eta_{GT} - \mu) / \eta_{GT} \quad (5)$$

式中： $Q_{GT}$ 为燃气轮机 $t$ 时段内产生的烟气余热； $V_{GT}$ 为 $t$ 时段内所消耗的燃气量； $\eta_{GT}$ 为燃气轮机效率； $Q_{LIV}$ 为燃烧热值，燃烧热值会随着掺氢比例的变化而变化； $\mu$ 为热损失系数。

### 2.3.2 吸收式制冷机数学模型

吸收式制冷机是利用溴化锂水溶液为工质，将余热输送给吸收式制冷机的热能转换成冷能，其数学模型为：

$$Q_{AC} = Q_{WHB} \times \mu_{cool} \times C_{COP,AC} \quad (6)$$

式中： $Q_{AC}$ 为吸收式制冷机在 $t$ 时段内的制冷功率； $\mu_{cool}$ 为余热输出功率中用于制冷的比例； $C_{COP,AC}$ 为吸收式制冷机组的性能系数。

### 2.3.3 换热器数学模型

换热器可以将余热烟气的热能充分置换出来，其数学模型表示为：

$$Q_{HE} = Q_{WHB} \times \mu_{heat} \times \eta_{HE} \quad (7)$$

式中： $Q_{HE}$ 为换热器在 $t$ 时段内的制冷功率； $\mu_{heat}$ 为余热输出功率中用于制热的比例； $\eta_{HE}$ 为换热器换热效率。

## 3 优化模型建立及算法

### 3.1 目标函数

#### 3.1.1 经济性

运行成本 $F_1$ 为：

$$F_1 = \min C_{op} = C_{grid} + C_{gas} + C_m + C_{EES} + C_h \quad (8)$$

式中： $C_{op}$ 为总成本，元； $C_{grid}$ 、 $C_{gas}$ 、 $C_m$ 分别为系统购电成本、购气成本、运行维护成本，元； $C_{EES}$ 、 $C_h$ 分别为储电、储氢成本，元。

电网购电成本为：

$$C_{grid} = \sum_{i=1}^n P_{grid} \alpha_{buy} \quad (9)$$

式中： $P_{grid}$ 为系统实时向电网购电功率，kW； $\alpha_{buy}$ 为系统实时向电网购电费用，元。

天然气成本为：

$$C_{gas} = \sum_{i=1}^n \beta_{buy} P_{GT} U_{GT} \beta_{GT} \quad (10)$$

式中： $P_{GT}$ 为系统实时燃气轮机运行功率，kW； $U_{GT}$ 为燃气轮机启、停状态标记位，0表示关闭，1表示开启； $\beta_{GT}$ 为燃气轮机功率系数； $\beta_{buy}$ 为天然气价格。

运行维护成本为：

$$C_m = \sum_{i=1}^n C_i P_i \quad (11)$$

式中： $C_i$ 为系统各设备运行维护成本，元； $P_i$ 为系统各设备实时运行功率，kW。

氢气成本为：

$$C_h = \sum_{i=1}^n P_{el} \gamma_{el} \eta_{el} \quad (12)$$

式中： $C_h$ 为制取氢气成本，元； $\gamma_{el}$ 为电解槽制氢的成本。

#### 3.1.2 碳排放量

碳排放量为：

$$F_2 = \min C_{DE} = G_{gas} + G_{grid} \quad (13)$$

式中： $C_{DE}$ 为系统的碳排放总量，kg； $G_{gas}$ 为系统天然气碳排放量，kg； $G_{grid}$ 为电网的购电碳排放量，kg。

## 3.2 约束条件

### 3.2.1 平衡约束

电功率平衡表示为：

$$P_{GT} + P_{pv} + P_{el} - P_{ch} + P_{dis} + P_{grid} = L_{ele} + E_{ele} \quad (14)$$

式中： $P_{ch}$ 和 $P_{dis}$ 分别为储能电池的充、放电功率，

kW;  $L_{ele}$  为系统电负荷, kW;  $E_{ele}$  为系统电负荷消减功率, kW;  $P_{SL}$  和  $P_{SR}$  分别为时移和削减负荷量。

冷功率平衡表示为:

$$Q_{AC} + Q_{EC} = L_{cool} + E_{cool} \quad (15)$$

式中:  $Q_{AC}$  和  $Q_{EC}$  分别为吸收式制冷机和电制冷机的制冷功率, kW;  $L_{cool}$  为系统冷负荷, kW;  $E_{cool}$  为系统冷负荷消减功率, kW。

热功率平衡表示为:

$$Q_{GB} + Q_{HE} = L_{hot} + E_{hot} \quad (16)$$

式中:  $Q_{GB}$  和  $Q_{HE}$  分别为集中供热和换热器的制热功率, kW;  $L_{hot}$  为系统热负荷, kW;  $E_{hot}$  为系统热负荷消减功率, kW。

### 3.2.2 设备运行约束

设备出力为:

$$\begin{cases} P_{i,t,min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,t,max} \\ P_{f,t,min} \leq P_{f,t} \leq P_{f,t,max} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $P_{i,t}$ 、 $P_{f,t}$  分别为不可调度设备 (光伏设备) 和可调度设备的当前出力, kW;  $P_{i,t,min}$  和  $P_{i,t,max}$  为不可调度设备的出力最大值和最小值, kW;  $P_{f,t,min}$  和  $P_{f,t,max}$  为可调度设备有效出力的调度区间。

设备爬坡约束表示为:

$$P_i^{up} \leq P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq P_i^{down} \quad (18)$$

式中:  $P_{i,t}$  和  $P_{i,t-1}$  为当前时刻和上一时刻的设备功率, kW;  $P_i^{up}$  和  $P_i^{down}$  为单位时间内设备允许上升或者下降的最大功率, kW。

储能电池约束表示为:

$$\begin{cases} E_{EES}(t) = E_{EES}(t-1) + [P_{EES.ch}(t)\eta_{e.ch} - \frac{P_{EES.dis}(t)}{\eta_{e.dis}}] \\ P_{EES.ch,min}U_{EES.ch}(t) \leq P_{EES.ch}(t) \leq P_{EES.ch,max}U_{EES.ch}(t) \\ P_{EES.dis,min}U_{EES.dis}(t) \leq P_{EES.dis}(t) \leq P_{EES.dis,max}U_{EES.dis}(t) \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $P_{EES.ch,min}$ 、 $P_{EES.ch,max}$  和  $P_{EES.dis,min}$ 、 $P_{EES.dis,max}$  分别为储能电池的充、放电的最小、最大功率, kW;  $E_{EES}(t)$  为储能电池的最大容量, kW;  $\eta_{e.ch}$ 、 $\eta_{e.dis}$  分别为储能电池的充、放电系数;  $U_{EES.ch}(t)$ 、 $U_{EES.dis}(t)$  为储能电池的充、放电状态标记位, 0 表示关闭、1 表示开启。

### 3.3 优化算法

NSGA-II 是一种多目标优化算法, 用于解决具有多个相互竞争目标函数的问题<sup>[20-22]</sup>, 结合混合整数线性规划模型能够更好地解决能源系统多目标

优化调度问题。NSGA-II 算法通过非支配排序和拥挤度计算来维持种群的多样性, 并利用交叉和变异操作引入新的个体<sup>[23]</sup>。其次, 通过设定多个目标函数和多能约束的方式建立混合整数线性规划模型来进行模型的求解<sup>[24-25]</sup>。经过多次迭代, NSGA-II 算法逐步优化种群, 最终得到 1 组近似最优解, 这些解在多个目标函数上都表现较好, 且彼此之间具有较高的多样性。多目标优化流程如图 4 所示。

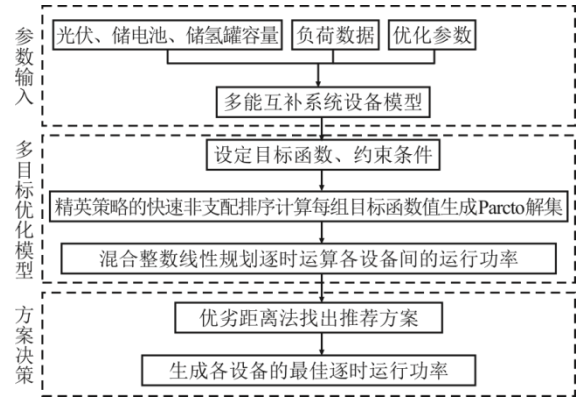


图 4 多目标优化流程

Fig.4 Flow chart of multi-objective optimization

## 4 计算结果分析

### 4.1 设备参数及优化参数说明

在多目标优化模型中, 常使用 NSGA-II 算法来计算并优化相关参数, 具体见表 2。这些参数的优化旨在平衡电网负荷, 以确保电力供应的稳定性。

表 2 NSGA-II 算法优化参数

Tab.2 Optimization parameters of the NSGA-II algorithm

参数	取值	参数	取值
种群规模	80	目标函数	2
子代规模	50	交叉概率	0.80
最大迭代次数	1 000	变异概率	0.01
掺氢比例范围	0~20%	步长	0.01

引入分时电价政策, 旨在引导用户在高峰时段减少用电, 在低谷时段增加用电。同时, 假设制定了分时气价政策, 以模拟不同价格下电价和气价的协调对系统的影响, 确保燃气管道的安全稳定运行。具体实时购电和购气价格见表 3。

表 3 购电购气价格

Tab.3 Prices for purchasing electricity and gas

时间	购电价格/(元·(kW·h) <sup>-1</sup> )	购气价格/(元·m <sup>-3</sup> )
00:00—07:00	0.385	2.050
07:00—13:00	0.725	1.570
13:00—19:00	0.555	2.050
19:00—00:00	0.725	1.570

在考虑建筑物结构以及用户对电、热和冷逐时需求量的基础上,选取光伏板、电池和储氢罐作为固定单元,并针对每个设备选择了相应的技术参数,详见表 4。通过优化这些设备的运行状态和配置,可以最大限度地提高能源利用效率,并满足多类型负荷的需求。

表 4 设备技术参数  
Tab.4 Technical parameters of the equipment

设备	项目	数值
光伏板	额定功率/kW	10
	额定输出功率/W	500
	光伏组件额定温度/°C	25
	温度系数	0.47
	额定光照辐照/(W·m <sup>-2</sup> )	1 000
储电电池	最大充电功率/kW	100
	最大放电功率/kW	100
	荷电状态范围	0.1~0.9
储氢罐	储氢效率	0.95
	放氢效率	0.95
	最大储氢容量/m <sup>3</sup>	1 000
	最大放氢容量/m <sup>3</sup>	50

为了能够适应不同的负荷需求,典型日负荷特点如图 5 所示。由图 5 可见:在 08:00—12:00 和 14:00—18:00 时间段内用户端的负荷需求量较多;而在 07:00—17:00 时间段内,光伏发电启动。通过不断迭代和演化,NSGA-II 算法能够在多个目标函数下相对较优的解,并进一步优化种群,得到 1 组近似最优解,Pareto 解集如图 6 所示。由图 6 可见,得到了在掺氢比例 0~20%之间的所有最优解,在 80 组最优种群中,通过 TOPSIS 法选择最优方案。根据计算结果多目标综合分析评价最优方案为,掺氢比例 14.47%,成本为 26 794.31 元,每日碳排放量为 162.03 kg。

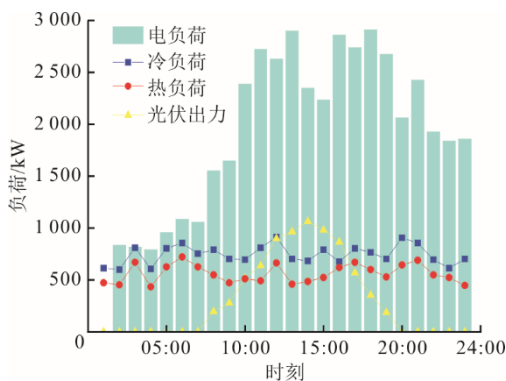


图 5 冷、热、电负荷及光伏出力

Fig.5 Output of the cold, heat, electric load and photovoltaic

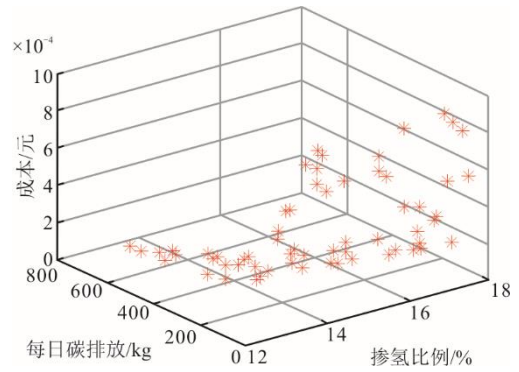


图 6 Pareto 解集

Fig.6 The Pareto solution set

### 4.2 优化结果

图 7 为燃气轮机及电网购电实时运行功率情况。由图 7 可见,在电价低谷时段,系统的电力需求完全通过外部电网满足,此时,燃气轮机处于停机状态。系统首先利用蓄电池放电来补充电能,其次通过从大电网购电来满足电力负荷。从 07:00 开始,随着太阳辐照强度的增强,光伏发电逐渐启动,当电价处于峰值时段时,电力需求可以通过光伏发电和燃气轮机共同满足,有效实现了太阳能的利用。在 00:00—06:00 时段,系统不从天然气管网购买气体,燃气轮机不运行;而在 06:00 以后,燃气轮机开始运行,系统内的吸收式制冷机组和换热器的耗热量基本都由燃气轮机产生的余热来满足。通过这样的能源调度策略,系统能够在电价低谷时段最大限度地利用外部电网供电,并在电价峰值时段启动光伏发电和燃气轮机来满足电力需求。同时,利用燃气轮机产生的余热来满足制冷和供热需求,有效提高了能源利用效率。这种灵活的能源调度方式使系统能够在经济性和可持续性之间取得平衡。

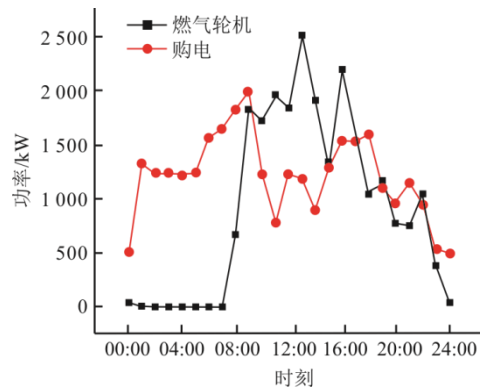


图 7 燃气轮机及电网购电实时运行功率情况

Fig.7 The real-time operating power of gas turbine and power grid purchasing

冷网各设备实时运行功率情况如图 8 所示。在电价处于峰值时，吸收式制冷机组成为主要的制冷设备，这些机组能够利用低品位的热能制冷，比消耗高品位和高价格的电能更具经济性。从 20:00 点到次日 06:00，当吸收式制冷机组无法满足用户端的冷负荷时，会启动电制冷机组以满足剩余的冷负荷需求。

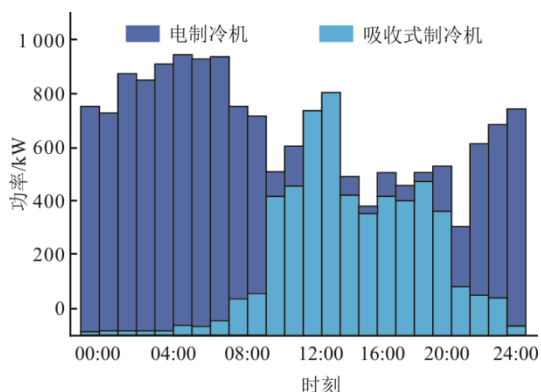


图 8 冷网设备实时运行功率情况  
Fig.8 The real-time running power of cold net equipment

同样的逻辑也适用于换热器，热网中各设备实时运行功率情况如图 9 所示。利用燃气轮机的余热为用户提供供热服务，当换热器无法满足用户端的热负荷时，将启动集中供热系统以满足剩余的热负荷需求。这种灵活的能源利用方式不仅能够有效降低能源成本，还能最大限度地提高能源利用效率，从而符合经济性和环保性的双重目标。

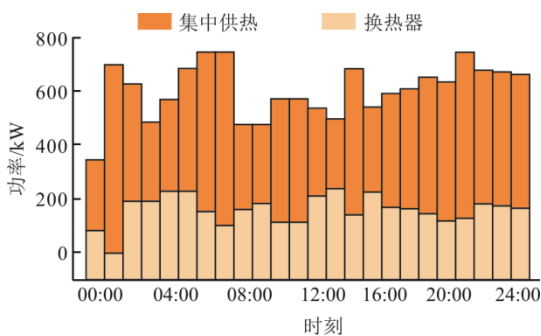


图 9 热网设备实时运行功率情况  
Fig.9 The real-time operation power of heat supply network equipment

蓄电池充放电运行情况如图 10 所示。太阳辐射强度从 07:00 开始逐渐增强，光伏发电装置产生更多的电能，但对这些额外的电能并没有直接使用的需求，因此起将其储存在蓄电池中，在傍晚 18:00 到次日 06:00 时段被释放出来，以供各种设备的运

行使用。通过有效地管理和利用多余的电能，可以最大限度地提高光伏发电系统的效率和稳定性。

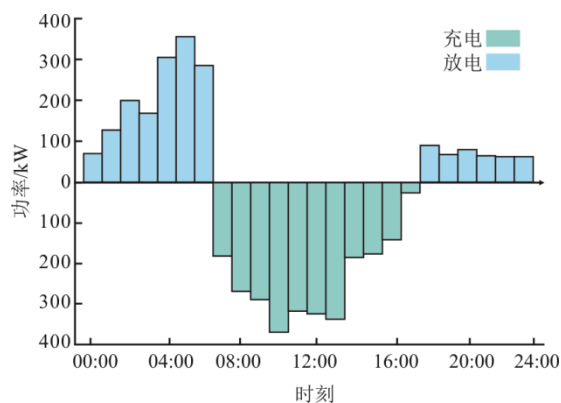


图 10 蓄电池充放电运行情况  
Fig.10 Charging and discharging operation of the battery

### 4.3 系统比较

为了验证多能互补冷热电联产系统的优越性，引入了 2 个现有系统进行比较<sup>[26]</sup>。在满足相同负荷需求时，对 2 个参考系统和本文设计系统的总运行成本、二氧化碳排放量进行比较，系统供能方式见表 5，对比结果如图 11 所示。

表 5 参考系统的供能方式  
Tab.5 Energy supply modes of the reference systems

供给源	设备	参考系统 1	参考系统 2	设计系统
电	电网	●	▲	■
	燃气轮机		▲	■
	光伏板		▲	■
热	燃气锅炉	●	▲	
	换热器			■
	集中供热		▲	■
冷	电制冷机	●	▲	■
	吸收式制冷机		▲	■

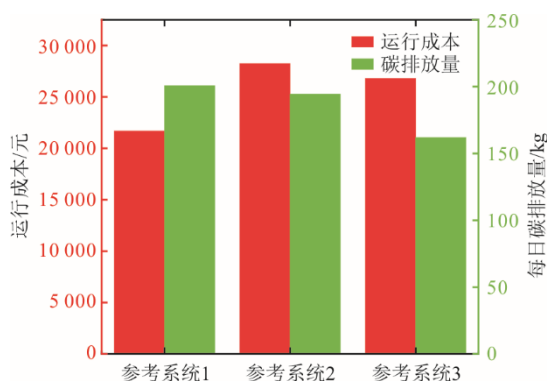


图 11 参考系统与设计系统对比  
Fig.11 Comparison diagram of the reference systems and design system

参考系统 1 用户的用电需求由当地火电厂发电满足并输送到电网；制冷需求由电制冷机满足，电制冷机的功率由电网提供；供暖需求由燃气锅炉提供。参考系统 2 由冷热电联产系统和天然气厂集中制氢组成；用户的电力需求由光伏、PGU 和电网提供；加热需求由燃气锅炉和换热器提供；制冷需求由吸收式制冷机和电制冷机提供。

由图 11 可知：参考系统 1 的电需求与热需求大都来自于集中电网和集中供热的购买，因而运行成本最低，但其碳排放量相较于设计系统较高；参考系统 2 与本文设计系统的区别在于利用新能源产生的电量产生氢气代替了部分天然气，减少了购电以及购气的费用，因而燃烧天然气产生的二氧化碳排放量也随之减少。显而易见，相较于 2 个参考系统，本文设计系统在经济性以及环保性明显优于参考系统。

## 5 结 论

多能互补冷热电联产系统是多种能源的协调运行，利用多种能源网络的协同作用，满足供电系统对能源及电力的需要，以及用户端冷热负荷的需求，提高系统运行灵活性，达到节能减排的目的。本文分析了多能互补冷热电联产系统，建立了光-电-冷-热-气的多能互补协调系统，利用多目标优化调度的混合整数线性规划模型，优化了各设备的运行出力情况，主要结论如下。

1) 在多能互补冷热电联产系统中引入氢能替代天然气的应用，有效减少了碳排放量。在固定用户端负荷条件下，通过多目标优化算法在 0~20% 的掺氢比例范围内进行优化，找到了最佳掺氢比例为 14.47% 时，每日系统的运行成本最小为 26 794.31 元，碳排放最少为 162.03 kg。从经济和环保的综合角度来看，该系统在效益和环境友好性方面都优于传统的集中供热、供电系统以及普通的冷热电联产系统。

2) 在上午和下午用电高峰期以及光伏能源的高产期，可将产生的电能储存起来，以备后续使用，有效消纳太阳能，减少了从电网购电的需求。在夜间用电低谷期，则可以利用白天蓄电池储存的电力，向用户供应电能，实现了能源互补，有效消纳可再生能源，以及多种能源的储存与转化。

### 【参 考 文 献】

[1] 崔民选, 王军生. 中国能源发展报告[M]. 北京: 北京大学出版社, 2014: 2.

- CUI Minxuan, WANG Junsheng. China energy development report[M]. Beijing: Peking University Press, 2014: 2.
- [2] 水电水利规划设计总院. 中国可再生能源发展报告 2021[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2022: 2. General Institute of Water Conservancy and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources. China renewable energy development report 2021[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Publishing House, 2022: 2.
- [3] 王世萱, 朱武. 冷热电联产型微网规划研究综述[J]. 电测与仪表, 2021, 58(12): 10-17. WANG Shixuan, ZHU Wu. Review on research of combined cooling, heating and power micro-grid planning[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(12): 10-17.
- [4] 张雨曼, 刘学智, 严正, 等. 光伏-储能-热电联产综合能源系统分解协调优化运行研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(11): 2372-2386. ZHANG Yuman, LIU Xuezhi, YAN Zheng, et al. Decomposition-coordination based optimization for PV-BESS-CHP integrated energy systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(11): 2372-2386.
- [5] 董金凤. 计及源荷不确定性的综合能源系统优化调度[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2021: 1. DONG Jinfeng. Optimal dispatch of integrated energy system considering source-load uncertainty[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2021: 1.
- [6] HU K, CHEN J, CHEN Q, et al. Phase-change heat storage saving strategy consultation in combined heat and power plants for integration of renewable energy sources into power system[J]. Energy, 2017, 124: 640-651.
- [7] 黄宇, 王宇涛, 李淑琴, 等. 计及(火用)分析的综合能源系统多目标优化调度[J]. 太阳能学报, 2022, 43(7): 30-38. HUANG Yu, WANG Yutao, LI Shuqin, et al. Multi-objective optimal scheduling of integrated energy system with thermodynamic exergy analysis method[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(7): 30-38.
- [8] 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. Multi-energy complementation based optimal operation of a microgrid with combined heat and power[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 160-168.
- [9] WANG Y, MA Y, SONG F, et al. Economic and efficient multi-objective operation optimization of integrated energy system considering electro-thermal demand response[J]. Energy, 2020, 205: 118022.
- [10] 高岳, 朱红钧, 唐堂, 等. 天然气管道掺氢输送研究现状与分析[J]. 低碳化学与化工, 2024, 49(3): 118-128. GAO Yue, ZHU Hongjun, TANG Tang, et al. Research status and analysis of hydrogen-blended natural gas transportation in natural gas pipelines[J]. Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering, 2024, 49(3): 118-128.
- [11] 梁严, 周淑慧, 吴璇, 等. “天然气+氢能”全产业链融合发展现状及趋势[J]. 油气与新能源, 2023, 35(6): 1-7. LIANG Yan, ZHOU Shuhui, WU Xuan, et al. Development of the entire industry chain for “natural gas

- + hydrogen energy”: status and trends[J]. *Petroleum and New Energy*, 2023, 35(6): 1-7.
- [12] 陈洪强, 李俊磊, 张成龙, 等. 掺氢可燃气体燃爆特性研究进展[J]. *力学与实践*, 2023, 45(2): 345-361.  
CHEN Hongqiang, LI Junlei, ZHANG Chenglong, et al. Research progress in the study of flammability and explosion characteristics of hydrogen-doped combustible gases[J]. *Mechanics in Engineering*, 2023, 45(2): 345-361.
- [13] 谢萍, 伍奕, 李长俊, 等. 混氢天然气管道输送技术研究进展[J]. *油气储运*, 2021, 40(4): 361-370.  
XIE Ping, WU Yi, LI Changjun, et al. Research progress on pipeline transportation technology of hydrogen-mixed natural gas[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2021, 40(4): 361-370.
- [14] 栗遇春, 王刚, 李瑞, 等. 基于氢能的分式家庭能源系统容量配置[J]. *热力发电*, 2023, 52(12): 49-58.  
LI Yuchun, WANG Gang, LI Rui, et al. Capacity configuration of distributed home energy system based on hydrogen energy[J]. *Thermal Power Generation*, 2023, 52(12): 49-58.
- [15] 周建力. 风-光-氢综合能源系统容量配置优化及决策模型研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2023: 2.  
ZHOU Jianli. Research on capacity configuration optimization and decision-making model of wind-photovoltaic-hydrogen integrated energy system[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2023: 2.
- [16] 董健, 王海鑫, 周夕然, 等. 考虑综合需求响应的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J]. *华北电力大学学报(自然科学版)*, 2021, 24(8): 1-10.  
DONG Jian, WANG Haixin, ZHOU Xiran, et al. Low-carbon economic dispatch of electric-gas-thermal integrated energy system considering integrated demand response[J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2021, 24(8): 1-10.
- [17] 刘建涛, 张建成, 王珂, 等. 独立光伏发电混合储能系统容量优化研究[J]. *电网与清洁能源*, 2012, 28(3): 85-90.  
LIU Jiantao, ZHANG Jiancheng, WANG Ke, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage system in independent PV system[J]. *Power System and Clean Energy*, 2012, 28(3): 85-90.
- [18] 高月芬, 员成博, 孔凡鹏, 等. 需求响应激励下耦合电转气、碳捕集设备的综合能源系统优化[J]. *中国电力*, 2024, 57(4): 32-41.  
GAO Yuefen, YUAN Chengbo, KONG Fanpeng, et al. Optimization of integrated energy system coupled with power-to-gas and carbon capture equipment under demand response incentive[J]. *Electric Power*, 2024, 57(4): 32-41.
- [19] 王传博. 冷热电联供型多微网调度研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023: 2.  
WANG Chuanbo. Research on multi-microgrid scheduling for cogeneration of cold, heat and electricity[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023: 2.
- [20] 王安阳, 单菲菲, 钟崴, 等. 基于非支配排序遗传算法-III的工业园区综合能源系统多目标优化调度[J]. *热力发电*, 2021, 50(6): 46-53.  
WANG Anyang, SHAN Feifei, ZHONG Wei, et al. Multi-objective optimal dispatching of industrial park integrated energy systems based on NSGA-III [J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(6): 46-53.
- [21] FENG B A, FU Y, HUANG Q X, et al. Multi-objective optimization of an integrated energy system with high proportion of renewable energy under multiple uncertainties[J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 695-701.
- [22] FOSLIE S S, KNUDSEN B R, KORPÅS M. Integrated design and operational optimization of energy systems in dairies[J]. *Energy*, 2023, 281: 128242.
- [23] 周灿煌. 区域综合能源系统的规划与运行优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018: 31.  
ZHOU Canhuang. Optimal planning and operation of district integrated energy system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018: 31.
- [24] WEI D, CHEN A, SUN B, et al. Multi-objective optimal operation and energy coupling analysis of combined cooling and heating system[J]. *Energy*, 2016, 98: 296-307.
- [25] 卫志农, 张思德, 孙国强, 等. 基于碳交易机制的电-气互联综合能源系统低碳经济运行[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(15): 9-16.  
WEI Zhinong, ZHANG Side, SUN Guoqiang, et al. Carbon trading based low-carbon economic operation for integrated electricity and natural gas energy system[J]. *Automation of electric power systems*, 2016, 40(15): 9-16.
- [26] SONG Y J, MU H L, LI N, et al. Techno-economic analysis of a hybrid energy system for CCHP and hydrogen production based on solar energy[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(58): 24533-24547.

(责任编辑 杨嘉蕾)