

基于改进粒子群的冷-热-电综合能源系统双层优化模型

卜令晨¹, 李安桂¹, 李 扬¹, 王 鑫¹, 彭怀午², 牛东圣², 许晨琛², 韩 欧¹

(1. 西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院, 陕西 西安, 710055;

2. 太阳能利用工程技术研究所, 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安, 710065)

摘要: 基于能源集线器模型提出一种冷-热-电综合能源系统双层优化建模方法, 在对园区各典型能源转化设备建模的基础上, 综合考虑系统的运行成本及系统投资, 并以某机场项目为例建立以系统年费为优化目标的双层优化模型。结果表明该模型可协调各类能源从而实现经济运行, 具有较好的通用性与实用性。

关键词: 能源集线器; 综合能源系统; 优化调度; 能源耦合

中图分类号: TU111.19⁺5.2; TK01

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)05-0753-09

Bi-level optimization model of cold-heat-electricity integrated energy system based on improved particle swarm optimization algorithm

BU Lingchen¹, LI Angui¹, LI Yang¹, WANG Xin¹, PENG Huaiwu²,
NIU Dongsheng², XU Chenchen², HAN Ou¹

(1. School of Building Services Science and Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China

2. Institute of Solar Engineering Technology, Northwest Engineering Corporation Limited,
Power China, Xi'an 710065, China)

Abstract: Based on the concept of energy hub model, this paper proposes an bi-level optimization modeling method of the cold-heat-electricity integrated energy system. On the basis of modeling the typical energy conversion equipment in the park, the operation cost and investment of the system are comprehensively considered. Taking an airport project as an example, a bilevel optimization model with the annual cost of the system as the optimization objective is established. The results show that the model can coordinate all kinds of energy to achieve economic operation, and has good universality and practicability.

Key words: energy hub; integrated energy system; optimal scheduling; energy coupling

如何高效环保地利用传统能源并提高清洁能源使用占比, 是当前能源发展面临的一大挑战。能源互联网是解决当前能源问题、推动能源系统变革的关键, 而综合能源系统是能源互联网的重要物理载体^[1-2]。该系统有利于实现多能互补、提高能源利用率、促进化石能源清洁高效利用、提升能源综合效率^[1], 是实现多能互济、能源梯级利用等理念的关键^[3], 是未来能源的主要承载形式之一。综合能源系统是一种用于多能源协调的新型规划系统, 可实现在规划设计和运营阶段对各类能源的生产、转化分配和储存利用的协调优化, 解决了传统能源系统的单独规划设计和独立运营

模式, 从而实现多能互补和能源梯级利用^[4]。

实现综合能源系统的优化运行, 首先要建立适用的数学模型及优化模型, 熊焰等^[5]构建了一种多能互补优化模型, 该模型针对不同能源和季节差异, 采取了改变相应费率结构的协调措施, 并用算例分析, 证实了该策略的可行性和消纳电能的能力; 康书硕等^[6]分析了天然气基分布式能源系统与地源热泵系统的特点, 提出了集成两种系统的新方法, 并基于算例验证了综合能源系统可通过能源梯级利用来提高能源利用效率、进一步降低成本。综合能源系统的构建可以提高清洁能源与可再生能源的利用、降低一次能源消耗、从而

收稿日期: 2021-07-30

修改稿日期: 2022-10-08

基金项目: 十二五国家科技支撑课题合作单位基金资助项目(2011BAJ03B03-5)

第一作者: 卜令晨(1996—), 女, 硕士生, 主要研究能源综合利用。E-mail: 940496967@qq.com

通信作者: 李安桂(1963—), 男, 博士生导师, 主要研究建筑通风空调气流组织、地下空气环境、太阳能建筑一体化等。E-mail: liangui@xauat.edu.cn

提高系统总效率,而合理的综合能源规划是必要的,邵成成等^[7]以电力系统为主导,各能源子系统为基础,对多能源耦合利用系统进行了规划分析研究,实现了多种能源的耦合利用与协调互补。胡源等^[8]以投资费用和运行费用为优化目标,建立了气、电耦合的多阶段联合规划模型,基于增量线性化方法将模型转化为简单的混合整数线性规划模型,通过电、气联合网络验证了模型的有效性与正确性。WANG等^[9]建立了由能量路由器、供能网络和需求端等基本单元组成的综合能源系统的层次模型,实现分布式优化协调供能。陈磊等^[10~13]基于热网与电网的耦合,针对能源输送损耗和延时而导致综合能源系统运行结果发生偏差的问题,研究并改进了综合能源系统的储热调节能力、储热系统的优化设计、协调运行策略等。Havelsky^[14]针对集成热能存储系统的混合区域供热系统,结合仿真与优化,提出一种简化的动态优化法,有效地将区域发电、热电联产系统(combined cooling heating and power, CCHP)与储能系统耦合起来,提高系统总效率;LIU等^[15]采用基于上层结构的混合整数非线性规划(MINLP)数学模型从经济性和能效两个方面对系统进行了优化,分析出生物质能与风能更有利于工业型用户;FANG等^[16]针对可再生发电型综合能源系统,以运行成本和环境成本为优化目标,采用改进遗传算法,验证了多目标优化相较于单目标优化,更能减少成本代价;AHMADI等^[17]以系统总成本和效率为优化目标,研究了含生物质能的综合能源系统的多目标优化;QIN等^[18]针对气、电、热及可再生资源耦合的综合能源系统,构建了包含燃料成本、弃风率及峰谷负荷方差的多目标优化模型,通过粒子群优化算法求解全局最优解,为能源策略提供良好参考。

本文依据相关文献的主要理论,针对如何利用园区能源系统来合理配置能源以满足用户侧能源(冷热电负荷)需求这一问题,建立了一种基于改进粒子群的冷-热-电综合能源系统双层优化模型,针对园区综合能源系统的能源转化设备的优化运行和容量配置问题进行分析,确立该问题下的目标函数与约束条件;最后根据某工程实例进行系统建模和优化求解,为工程实践提供一定参考依据。

1 冷-热-电综合能源系统通用化建模

本文基于能源集线器模型对系统进行建模,

该模型基于能量守恒的基本原理,即系统的总能量改变等于传入或者传出该系统能量的多少;该模型用于描述系统中总体能源的数量关系,结合实际应用场景可将能源系统简化为如图1所示的等效结构^[19]。综合能源系统包括三个主体:上层能源网、园区能源系统、用户端。其中园区能源系统包含能源转换设备、能源储存设备与可再生能源设备。能源的传入方式包括从能源网的购入和可再生能源发电,能源的传出途径则主要为向用户供能和向上层网网售出;当系统中存在储能设备,可认为能量在储存时传入系统,而在释放时传出,其总量同样守恒。此外,能量在转化和传输过程中存在损失,该部分以转化效率的形式计入。

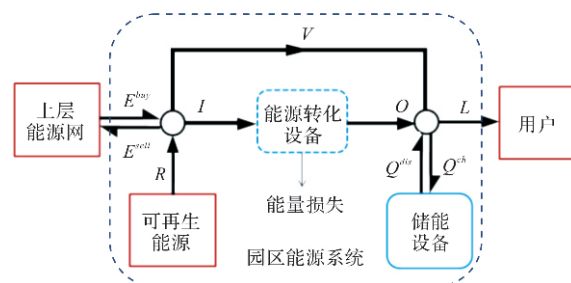


图1 综合能源系统等效结构^[19]

Fig. 1 Equivalent structure of integrated energy system

图中以功率向量表示系统中同一过程的不同种类能量,以用户负荷 L 为例,设该综合能源系统包括 k 类能源,则该功率向量表示为 $L = [L_1, L_2, \dots, L_k]^T$ 。同样地,图中任一功率向量均表示为这样的列向量,其中, E^{buy} 为从上层能源网购买能源的功率; E^{sell} 为向上层能源网售出的能源; R 为可再生能源出力; I 为能源转换设备的输入功率; O 为能源转换设备的输出; Q^{ch} 为能源储存设备充电; Q^{dis} 为能源储存设备放电; L 为能源用户的功率向量。

图中以节点1和节点2作为枢纽,由于节点处未发生能量的损耗或存储,流入和流出总量应相等。根据上图节点1和节点2的能量平衡,可推出:

$$R + E^{\text{buy}} + Q^{\text{dis}} + O = I + Q^{\text{ch}} + E^{\text{sell}} + L \quad (1)$$

等式左端为系统输入,右端为系统输出,该式描述了系统内能量整体的平衡关系,未体现能量转化和分配关系,向量 I 、 O 仅代表输入或输出所有能源转化设备的总能量,在实际应用中,由于需要计算每台设备的出力以方便对其调整,因此还需对能源转化设备部分进行详细建模。

2 能源转化设备建模

能源转化设备模型用于描述不同类型能源之间的转化关系(I到O)。如图2所示, 首先定义输入各台能源转化设备的功率为 P_j^{in} ($j=1, 2, \dots, n$), 能量输入转化设备后, 经过一台或多台转化设备输出的过程为一个转化环节, P_j^{in} 为每个转化环节中第一台能源转化设备的输入功率, 设系统中共有 n 个转化环节, 经过每一转化环节最终输出的功率为 P_j^{out} , 则对应地, 共有 n 个输入功率与 n 个输出功率, 表示为功率向量:

$$P^{\text{in}} = [P_1^{\text{in}}, P_2^{\text{in}}, \dots, P_n^{\text{in}}]^T \quad (3)$$

$$P^{\text{out}} = [P_1^{\text{out}}, P_2^{\text{out}}, \dots, P_n^{\text{out}}]^T \quad (4)$$

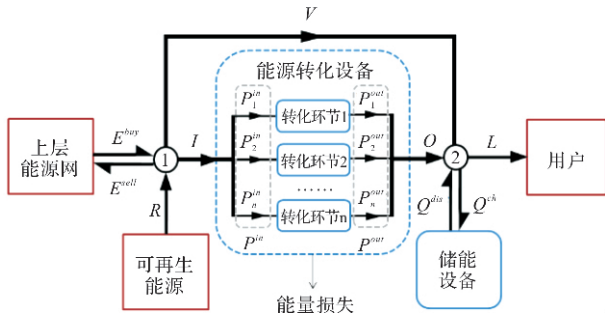


图2 包含能源转化模型的系统等效结构图

Fig. 2 System equivalent structure diagram containing energy conversion model

建立 P^{in} 、 P^{out} 与 I 、 O 向量之间的转化关系, 由于 I 、 O 向量中各元素按能源种类区分, 而 P^{in} 、 P^{out} 向量中各元素按能源种类与输入设备区分, 因此将 P^{in} 、 P^{out} 中同种类而不同设备的功率相加即为对应 I 、 O 向量中的元素。设 A 、 B 分别为输入关系矩阵和输出关系矩阵, 有转化关系^[19]为

$$\begin{cases} I = AP^{\text{in}} \\ O = BP^{\text{out}} \end{cases} \quad (5)$$

设 I 、 O 向量中的第 i 类能源功率 ($1 \leq i \leq k$), 则 A 、 B 满足关系^[19]为

$$a_{ij(k \times n)} = \begin{cases} 1, & P_j^{\text{in}} \text{ 属于 } i \text{ 类能源} \\ 0, & P_j^{\text{in}} \text{ 不属于 } i \text{ 类能源} \end{cases} \quad (6)$$

$$b_{ij(k \times n)} = \begin{cases} 1, & P_j^{\text{out}} \text{ 属于 } i \text{ 类能源} \\ 0, & P_j^{\text{out}} \text{ 不属于 } i \text{ 类能源} \end{cases} \quad (7)$$

设备的输出功率可由输入功率与转化效率确定, 不作为单独求解的变量, 定义转化关系矩阵 D , 输出功率如下式表示^[19]。

$$P^{\text{out}} = DP^{\text{in}} \quad (8)$$

D 满足关系^[19]为

$$d_{jj'} = \begin{cases} \eta_{jj'}, & P_j^{\text{in}} \text{ 和 } P_{j'}^{\text{out}} \text{ 对应相同转化环节} \\ 0, & P_j^{\text{in}} \text{ 和 } P_{j'}^{\text{out}} \text{ 对应不同转化环节} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\eta_{jj'}$ 为对应转化环节的总稳态转化效率, 若该环节涉及多台能源转化设备, 总效率为每台设备转化效率之乘积。

将式子(2)、(5)、(8)联立, 得^[19]:

$$E^{\text{buy}} - E^{\text{sell}} + R = FP^{\text{in}} + L + Q^{\text{ch}} - Q^{\text{dis}} \quad (10)$$

式中, $F = (A - BD) = (f_{kn})_{K \times N}$ 。

3 配置及调度优化模型

以上模型描述了能源传输与转化的数量关系, 为了实现特定目标下的系统配置优化, 需要建立优化模型。由于系统经济性是目前多数工程较为关注的指标, 本文以系统年费用这一优化目标为例, 对优化模型的建立进行说明。

本文所采用的系统年费用 f_1 指标包括设备初始投资的折合年费与系统运行所产生的燃料费用, 假设这两部分为主要的费用成本为

$$\min f_1 = C_{\text{inv}} + C_{\text{opr}} \quad (11)$$

式中: C_{inv} 为设备投资折合费用; C_{opr} 为燃料成本。

设备投资折合费计算如下式^[13]。

$$C_{\text{inv}} = \sum_{n=1}^N C_n P_n^e \frac{I}{1 - (1 + I)^{-I_n}} \quad (12)$$

式中: C_n 为第 n 类设备的单位功率费用; P_n^e 为第 n 类设备的额定功率; I 为折现率; I_n 为第 n 类设备的使用寿命。

燃料成本计算如下式。

$$C_{\text{opr}} = \sum_{t=1}^T (c_{\text{ele},t}^{\text{buy}} E_{\text{ele},t}^{\text{buy}} + c_{\text{gas},t}^{\text{buy}} E_{\text{gas},t}^{\text{buy}} + c_{\text{h},t}^{\text{buy}} E_{\text{h},t}^{\text{buy}}) \quad (13)$$

式中: $c_{\text{ele},t}^{\text{buy}}$ 、 $c_{\text{gas},t}^{\text{buy}}$ 、 $c_{\text{h},t}^{\text{buy}}$ 分别为 t 时刻单位功率的电价、燃气价格和热价; $E_{\text{ele},t}^{\text{buy}}$ 、 $E_{\text{gas},t}^{\text{buy}}$ 、 $E_{\text{h},t}^{\text{buy}}$ 分别为 t 时刻购电、气、热的逐时功率。

在计算优化目标(系统年费用 f_1)时, 由于设备的投资费用与容量相关, 该容量又同时作为计算系统运行时燃料成本的上限限制, 即这一参数既在优化中作为待求变量, 又需在约束条件中作为已知参数, 考虑建立双层优化模型(图3)。

双层优化包括上层优化和下层优化。

由于粒子群算法(PSO)搜索速度快, 具有记忆性, 且需要调整的参数较少, 采用实数编码, 易于实现, 则本文采用粒子群算法进行求解。在上层优化中, 首先通过粒子初始化在预设的设备容量范围内随机生成多组已知的容量配置方案, 然后在下层优化中对这些方案进行优化求解, 即求解每个随机方案下的燃料成本和逐时运行参数, 最后通过比较各方案的系统年费用 f_1 筛选最优方案。上层优化的目的是给下层提供设备容量

方案和选出最优的设备容量方案,而下层优化的主要任务是依据上层给的设备容量方案算出每小时的设备运行方案和总燃料成本,再将燃料成本返回给上层。上层优化和下层优化具体步骤如下:

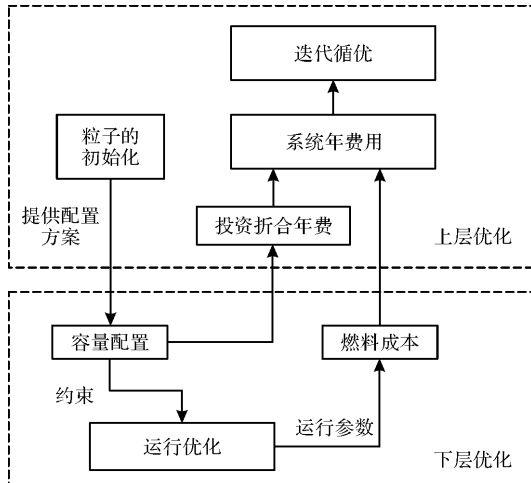


图3 配置及调度优化算法框架

Fig. 3 Configuration and scheduling optimization algorithm framework

3.1 上层优化

上层优化基于系统年费用的优化目标,采用粒子群算法进行迭代寻优。其中,粒子即代表不同的设备容量方案,设备的种类数即为求解空间的维度。算法流程如图4所示。首先,在粒子初始化过程中,应当在预设的 $P_{n,\min}^e$ 和 $P_{n,\max}^e$ 之间随机生成:

$$P_{n,\min}^e \leq P_n^e \leq P_{n,\max}^e \quad (14)$$

式中: $P_{n,\min}^e$ 为第 n 类设备的最小容量; $P_{n,\max}^e$ 为第 n 类设备的最大容量。

粒子初始化过程即设备容量方案的生成过程。粒子为下层优化(一年内设备运行的逐时功率)提供设备容量值 P_n^e , 作为运行优化的启动值。下层优化得出的燃料成本 C_{opr} 再返回到上层优化的优化目标函数中, 然后比较多个粒子的成本 f_1 。

计算适应度 f_1 时根据上层优化目标为

$$\min f_1 = C_{inv} + C_{opr} \quad (15)$$

式中: C_{inv} 根据上一步生成的 P_n^e 得出; C_{opr} 根据下层优化得出。

得到一组费用成本 f_1 后, 比较各费用成本 f_1 , 更新粒子, 进行下一组设备容量配置方案的计算。而更新粒子过程依据粒子群算法为: 比较各费用成本 f_1 后, 得出初始种群的最优位置和每个粒子的个体最优位置, 并更新速度和位置。如图4。

其中粒子更新速度时采用二阶运动模型为

$$v_{i,t}^{k+1} = \omega \cdot v_{i,t}^k + c_1 r_1 (pbest_{i,t}^k - X_{i,t}^k) + c_2 r_2 (gbest_{i,t}^k - X_{i,t}^k) \quad (16)$$

式中: $v_{i,t}^{k+1}$ 、 $v_{i,t}^k$ 分别为第 k 和 $k+1$ 次迭代的速度, $X_{i,t}^k$ 为粒子当前位置, $pbest_{i,t}^k$ 为个体最优位置, $gbest_{i,t}^k$ 为当前群体最优位置, ω 为惯性权重, c_1 、 c_2 分别为个体学习因子和群体学习因子, r_1 、 r_2 为 $(0, 1)$ 区间内服从均匀分布的随机数。

速度即为粒子每次迭代的移动步长, 则更新位置表示为

$$X_{i,t}^{k+1} = X_{i,t}^k + v_{i,t}^{k+1} \quad (17)$$

式中: $X_{i,t}^{k+1}$ 为更新后的粒子位置。

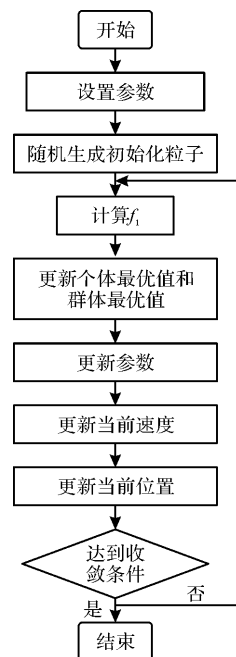


图4 算法流程

Fig. 4 Algorithm flow

由于计算后期粒子容易出现在最优值附近震荡的现象, 为了加速后期收敛, 并且保证前期的搜索能力, 采用惯性递减策略调整 ω 值, ω 值根据下式在每次更新速度后更新一次:

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{iter_{\max}} iter \quad (18)$$

式中: ω 为惯性权重; ω_{\max} 、 ω_{\min} 分别为惯性权重的上限和下限; $iter$ 为当前迭代次数, $iter_{\max}$ 为最大迭代次数。

3.2 下层优化

上层优化向下层优化提供一组设备容量配置方案后, 下层优化需要在满足用户侧能源需求(例如冷热电负荷)的情况对一组内每个设备容量配置方案进行设备运行情况优化。

其中下层优化目标为

$$\min f_2 = \sum_{t=1}^T (c_{\text{ele},t}^{\text{buy}} E_{\text{ele},t}^{\text{buy}} + c_{\text{gas},t}^{\text{buy}} E_{\text{gas},t}^{\text{buy}} + c_{\text{h},t}^{\text{buy}} E_{\text{h},t}^{\text{buy}}) \quad (19)$$

下层优化目标是一年内每小时的设备运行的燃料成本最低。下层优化目标也就是需要向上层优化提供的燃料成本 C_{opr} 。

为了满足用户侧能源需求(例如冷热电负荷),对于下层优化中所涉及的逐时功率存在以下约束条件。

3.2.1 能量平衡约束

根据式子(10),系统各类能量满足平衡关系为

$$E_{k,t}^{\text{buy}} - E_{k,t}^{\text{sell}} + R_{k,t} = \sum_n f_{kn} P_{n,t}^{\text{in}} + L_{k,t} + Q_{k,t}^{\text{ch}} - Q_{k,t}^{\text{dis}} \quad (20)$$

式中: $E_{k,t}^{\text{buy}}$ 为 t 时刻购买第 k 类能源的逐时功率; $E_{k,t}^{\text{sell}}$ 为在 t 时刻出售第 k 类能源的逐时功率; $R_{k,t}$ 为第 k 类可再生能源在 t 时段的逐时输出功率; $L_{k,t}$ 为第 k 类能源在 t 时段的用户逐时负荷; $Q_{k,t}^{\text{ch}}$ 和 $Q_{k,t}^{\text{dis}}$ 分别为 k 类能源储存设备在 t 时段的充放能功率。

3.2.2 能源转化设备约束

对于能源转化设备,其不等式约束包括设备出力约束与爬坡速率的约束,通式为

$$\begin{cases} P_{m,\min}^{\text{in}} \leq P_{m,t}^{\text{in}} \leq P_{m,\max}^{\text{in}} \\ -r_{d,m} \Delta t \leq P_{m,t}^{\text{in}} - P_{m,t-1}^{\text{in}} \leq r_{u,m} \Delta t \end{cases} \quad (21)$$

式中: $P_{m,\min}^{\text{in}}$ 为第 m 台设备的最小输入功率; $P_{m,\max}^{\text{in}}$ 为第 m 台设备的最大输入功率; $P_{m,t}^{\text{in}}$ 、 $P_{m,t-1}^{\text{in}}$ 分别为第 m 台设备的 t 时段和 $t-1$ 时段的逐时输入功率; $r_{d,m}$ 和 $r_{u,m}$ 分别为第 m 台能源转换设备输入功率的向下和向上爬坡速率限值。

3.2.3 储能设备约束

储能占比描述如下式。

$$E_{k,t} = E_{k,t-1} + \frac{Q_t^{\text{ch}} \eta_k^{\text{ch}}}{\beta} \Delta t - \frac{Q_t^{\text{dis}}}{\beta \eta_k^{\text{dis}}} \Delta t \quad (22)$$

式中, $E_{k,t}$ 为 k 类储能设备在 t 时段的储能占比; η_k^{ch} 为 k 类储能设备的充能效率; η_k^{dis} 为 k 类储能设备的放能效率; β_k 为 k 类能源储存设备的配置容量。

充放功率约束为

$$0 \leq Q_t^{\text{ch}} \leq u_t^{\text{ch}} Q_{\max}^{\text{ch}} \quad (23)$$

$$0 \leq Q_t^{\text{dis}} \leq u_t^{\text{dis}} Q_{\max}^{\text{dis}} \quad (24)$$

$$u_t^{\text{ch}} + u_t^{\text{dis}} \leq 1 \quad (25)$$

式中: Q_t^{ch} 、 Q_t^{dis} 分别为 t 时刻的充能功率和放能功率; Q_{\max}^{ch} 、 Q_{\max}^{dis} 分别为充能功率上限和放能功率上限; u_t^{ch} 、 u_t^{dis} 为充放逻辑变量, u_t^{ch} 、 $u_t^{\text{dis}} \in \{0, 1\}$ 。

储能占比约束为

$$E_{\min} \leq E_t \leq E_{\max} \quad (26)$$

$$E_0 = E_T \quad (27)$$

式中: E_{\min} 为储能设备的最小储能占比; E_{\max} 为储能设备的最大储能占比。

能源在购入时存在交互功率约束,主要涉及燃气管网和热力管网的出力约束为

$$0 \leq E_{g,t}^{\text{buy}} \leq E_{g,\max}^{\text{buy}} \quad (28)$$

$$0 \leq E_{h,t}^{\text{buy}} \leq E_{h,\max}^{\text{buy}} \quad (29)$$

式中: $E_{g,t}^{\text{buy}}$ 为从气网购入燃气的功率; $E_{g,\max}^{\text{buy}}$ 为从气网购入燃气的最大功率; $E_{h,t}^{\text{buy}}$ 为从热网购热的功率; $E_{h,\max}^{\text{buy}}$ 为从热网购热的最大功率值。

3.2.4 交互功率约束

能源在买卖过程中存在能源的交互功率约束,约束条件如下式。

$$0 \leq E_{k,t}^{\text{buy}} \leq u_{k,t}^{\text{sell}} E_{k,\max}^{\text{buy}} \quad (30)$$

$$0 \leq E_{k,t}^{\text{sell}} \leq u_{k,t}^{\text{buy}} E_{k,\max}^{\text{sell}} \quad (31)$$

$$u_{k,t}^{\text{sell}} + u_{k,t}^{\text{buy}} \leq 1 \quad (32)$$

式中: $E_{k,\max}^{\text{buy}}$ 、 $E_{k,\max}^{\text{sell}}$ 分别为购买第 k 种能源的最大和最小功率限值; $u_{k,t}^{\text{sell}}$ 、 $u_{k,t}^{\text{buy}}$ 为逻辑变量, $u_{k,t}^{\text{sell}}$ 、 $u_{k,t}^{\text{buy}} \in \{0, 1\}$ 。

4 案例分析

4.1 案例介绍

本文以某机场扩建项目为例对综合能源系统的建模方法进行阐述。该项目通过电网、气网及热网的能源输入用以满足机场的冷、热、电负荷;拟采用的技术形式包括 CCHP、冰蓄冷、地源热泵以及燃气锅炉。其中,电力负荷由三联供机组和电网直供承担,热负荷由三联供机组、燃气锅炉、地源热泵和热网共同承担,冷负荷由地源热泵和冰蓄冷机组承担。系统结构如图 5 所示。

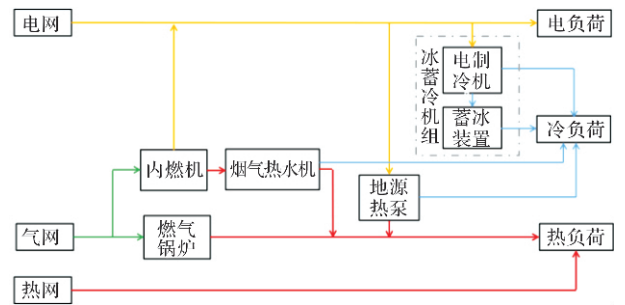


图 5 机场扩建工程能源系统图

Fig. 5 Energy system diagram of airport expansion project

该项目冬季、夏季及过渡季典型日负荷如图 6~8 所示。其中,典型冬季日(1月15日)热负荷如下图所示,该负荷分段较明显,早上 7:00 左右用热上升至 8:00 到达峰值,中午 12:00 至 17:00 用热呈现较为平缓的中值状态,晚上 18:00 至

23:00 用热负荷逐渐上升,而凌晨 0:00 至 6:00 用热负荷最低;电负荷在整个时间段中的差异不大,呈平缓趋势,且整体远低于热负荷。

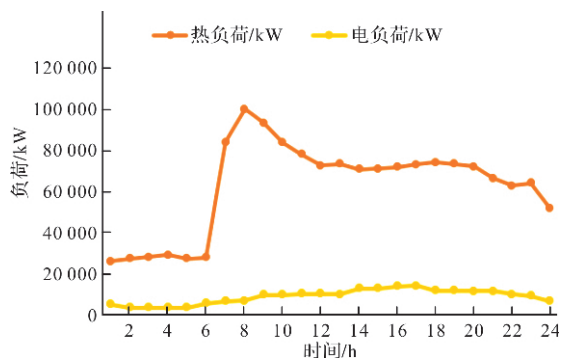


图6 冬季典型日负荷

Fig. 6 Typical daily load in winter

典型夏季日(7月15日)的冷负荷如图7所示,夏季负荷同样存在明显的分段,其中 0:00 至 7:00 的冷负荷较小,而 12:00 至 19:00 的冷负荷为最大段,主要与当地室外气象以及客流量有关;电负荷的变化趋势与冷负荷的变化趋势相同。

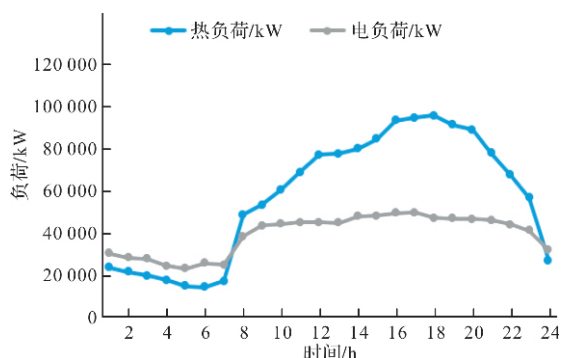


图7 夏季典型日负荷

Fig. 7 Typical daily load in summer

过渡季典型日(4月15日)的电负荷如图8所示:

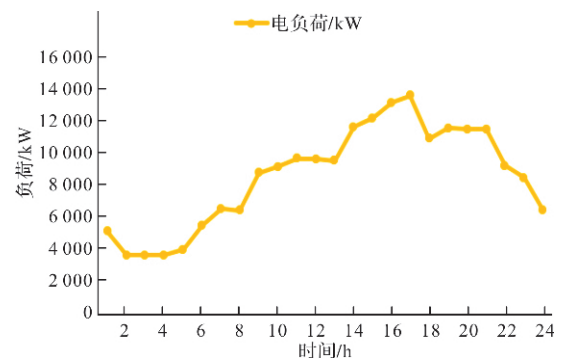


图8 过渡季典型日电负荷

Fig. 8 Typical daily electrical load in transition season

首先根据式(1)建立园区综合能源系统与上层能源网、及其与用户侧的能源关系。该系统共涉及四类能源,即电、气、热、冷,列出功率向量如下:

$$\begin{cases} E^{\text{buy}} = [E_e^{\text{buy}}, E_g^{\text{buy}}, 0, 0]^T \\ L = [L_e, 0, L_h, L_c]^T \\ Q^{\text{dis}} = [0, 0, 0, Q_c^{\text{dis}}]^T \\ Q^{\text{ch}} = [0, 0, 0, Q_c^{\text{ch}}]^T \\ I = [I_e, I_g, 0, 0]^T \\ O = [O_e, 0, O_h, O_c]^T \end{cases} \quad (33)$$

根据能量转化途径确定输入输出功率向量。以 G 表示燃气, E 表示电能, H 表示热量, C 表示冷量,系统中的能源转化途径涉及以下 7 种:

- ① E—地源热泵—H;
- ② E—地源热泵—C;
- ③ E—电制冷机—C;
- ④ G—内燃机—E;
- ⑤ G—内燃机—烟气热水机—H;
- ⑥ G—内燃机—烟气热水机—C;
- ⑦ G—燃气锅炉—H;

分别列出输入与输出功率向量,上标表示路径,下标表示能源种类,则各设备的输入功率 P^{in} 和 P^{out} 为:

$$P^{\text{in}} = [P_e^1, P_e^2, P_e^3, P_e^4, P_g^5, P_g^6, P_g^7]^T \quad (34)$$

$$P^{\text{out}} = [P_h^1, P_c^2, P_c^3, P_e^4, P_h^5, P_h^6, P_h^7]^T \quad (35)$$

其次根据式(5)~(9)建立设备的输入与输出转化关系,本案例中涉及的能量转化设备包括三联供机组、冰蓄冷、地源热泵以及燃气锅炉,转化关系矩阵 A、B 及效率矩阵 D 分别见式(36)~(38),中间关系矩阵 F 见式(39)。其中, β_{ph} 为地源热泵热效率; γ_{ph} 为地源热泵热制冷效率; α_{en} 为内燃机发电效率; β_{en} 为热效率; β_{re} 为烟气热水机热效率; β_{hb} 为燃气锅炉热效率; γ_{re} 为烟气热水机制冷效率; γ_{ec} 为电制冷机效率。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$D = \begin{bmatrix} \beta_{\text{ph}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{\text{ph}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{\text{ec}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_{\text{en}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_{\text{en}}\beta_{\text{re}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_{\text{en}}\gamma_{\text{re}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_{\text{hb}} \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$F=(A \quad -B \quad D)=\left[\begin{array}{ccccccc} 1 & 1 & 1 & -\alpha_{\text{en}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -\beta_{\text{ph}} & 0 & 0 & 0 & -\beta_{\text{re}} \beta_{\text{re}} & 0 & -\beta_{\text{hb}} \\ 0 & -\gamma_{\text{ph}} & -\gamma_{\text{ec}} & 0 & 0 & -\beta_{\text{en}} \gamma_{\text{re}} & 0 \end{array}\right] \quad (39)$$

根据式(20), 有:

$$\left[\begin{array}{c} E_{\text{e}}^{\text{buy}} \\ E_{\text{g}}^{\text{buy}} \\ 0 \\ 0 \end{array}\right]=\left[\begin{array}{ccccccc} 1 & 1 & 1 & -\alpha_{\text{en}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -\beta_{\text{ph}} & 0 & 0 & 0 & -\beta_{\text{en}} \beta_{\text{re}} & 0 & -\beta_{\text{hb}} \\ 0 & -\gamma_{\text{ph}} & -\gamma_{\text{ec}} & 0 & 0 & -\beta_{\text{en}} \gamma_{\text{re}} & 0 \end{array}\right]\left[\begin{array}{c} P_{\text{e}}^1 \\ P_{\text{e}}^2 \\ P_{\text{e}}^3 \\ P_{\text{g}}^4 \\ P_{\text{g}}^5 \\ P_{\text{g}}^6 \\ P_{\text{g}}^7 \end{array}\right]+\left[\begin{array}{c} L_{\text{e}} \\ 0 \\ L_{\text{h}} \\ L_{\text{c}} \end{array}\right]+\left[\begin{array}{c} Q_{\text{e}}^{\text{ch}} \\ 0 \\ 0 \\ -Q_{\text{c}}^{\text{dis}} \end{array}\right] \quad (40)$$

4.2 参数信息

4.2.1 能源价格

该综合能源系统向上层能源网购买能源主要包含电能与天然气, 以西安市为例, 电价 $c_{\text{ele}}^{\text{buy}}$ 如表 1 所示; 天然气对非居民用气不采用阶梯价格, $c_{\text{gas}}^{\text{buy}}$ 按 2.25 元/ m^3 计, 折合约 0.24 元/ kWh ; 购热单价 $c_{\text{h}}^{\text{buy}}$ 按 0.2 元/ kWh 计。

表 1 电网峰谷分时销售电价表

Tab. 1 Electricity price of power grid peak-trough time-division					
时刻	0—7	7—12	12—17	17—22	22—24
电价	0.233 5	0.866 9	0.550 2	0.866 9	0.550 2
/(元· kWh^{-1})					

4.2.2 设备参数

内燃机、地源热泵、冷水机组、锅炉及蓄冰槽等设备的参数见表 2~6 所示, 每类设备均包含多种型号。其中, 各设备的主要参数包含最大输入功率 $P_{m,\text{max}}^{\text{in}}$ 、设备效率 η 、单位功率费用 C_n 及储能占比上下限 E_{min} 、 E_{max} 等。

表 2 内燃机参数

Tab. 2 Parameters of internal combustion engine			
	最大输入 功率/ kW	电/热效 率/%	单位功率费用 /(元· kW^{-1})
型号 I	5970	44.8/21.2	3250
型号 II	9695	45.4/21.1	3250

表 3 地源热泵参数

Tab. 3 Parameters of ground-source heat pump			
	最大输入 功率/ kW	制热效 率/%	单位功率费用 /(元· kW^{-1})
型号 I	194	4.85	400
型号 II	329	5.02	400
型号 III	416	5.11	400

表 4 冷水机组参数

Tab. 4 Parameters of chiller			
	最大输入 功率/ kW	制冷效 率/%	单位功率费用 /(元· kW^{-1})
型号 I	731	4.2	180
型号 II	1603	4.1	180

表 5 锅炉参数

Tab. 5 Parameters of boiler			
	最大输入 功率/ kW	效率/%	单位功率费用 /(元· kW^{-1})
型号 I	354.2	92	250
型号 II	2699.3	95	250
型号 III	13456.6	96	250

表 6 蓄冰槽参数

Tab. 6 Parameters of ice storage tank					
	配置容 量/ kWh	充放 效率	储能占比 上下限/(元· kWh^{-1})	折合费用	充放功率限 值/ kW
型号 I	960	0.9	0.9/0.1	104	107
型号 II	2089	0.9	0.9/0.1	100	232
型号 III	2676	0.9	0.9/0.1	91	297

4.3 案例结果分析

调度结果如下图 9~12 所示, 选择典型日进行分析, 其中, 由冬季典型日的结果表明: 在日间供热设备的优先级依次为地源热泵、燃气三联供、热网和燃气锅炉, 由于夜间负荷小, 电价较低, 仅使用地源热泵和热网供热, 不再采用三联供, 相应地, 夜间供电只由电网承担, 而日间由于燃气价格低于电价, 且电负荷低于三联供的装机容量, 电负荷全部由三联供承担。

过渡季电负荷同样在夜间由电网承担, 而日

间由三联供承担,同时由于不存在热负荷,三联供只需供电。

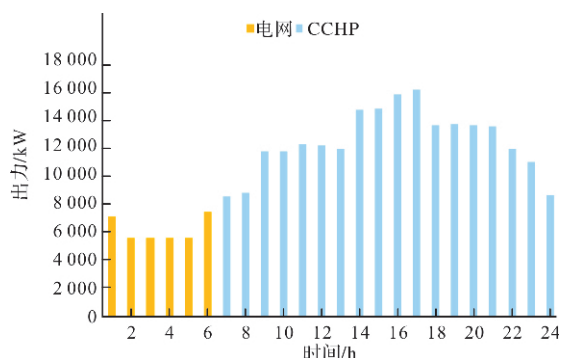


图9 冬季典型日供电出力

Fig. 9 Typical daily power output in winter

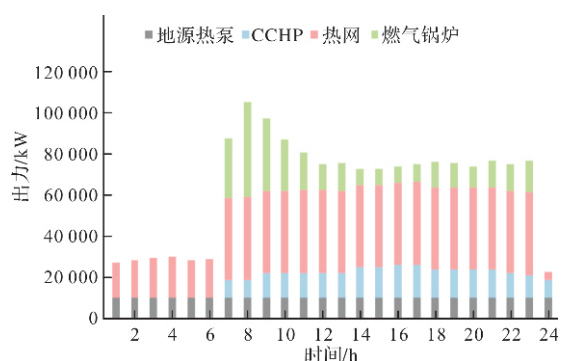


图10 冬季典型日供热出力

Fig. 10 Typical daily heating output in winter

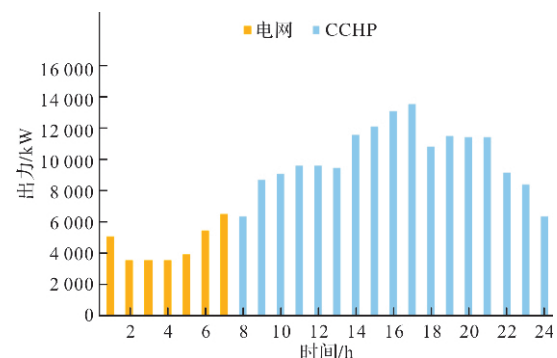


图11 过渡季典型日供电出力

Fig. 11 Typical daily power supply output in transition season

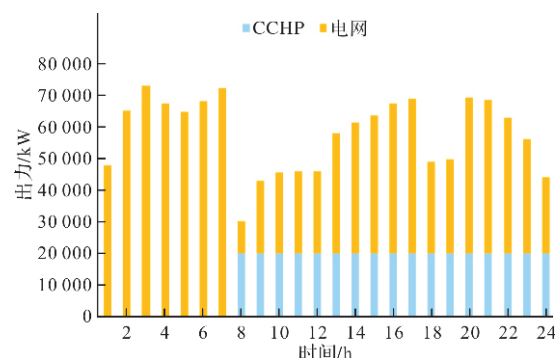


图12 夏季典型日供电出力

Fig. 12 Typical daily power output in summer

对于夏季,由于夏季电负荷较大,日间由三联供承担基载负荷,其余电量由电网补充,夜间仅由电网供电;日间供冷优先由地源热泵和三联供承担,并在电价高峰期时由融冰供冷补充,平价时由冷水机供冷,而夜间优先由地源热泵进行供冷,并且蓄冷系统在夜间利用谷电进行蓄冰。整体运行趋势与实际经验较为符合。

对于系统配置,热泵由于效率高而能耗低,且初投资较低,相对其他形式具有最优的经济性;而三联供的折合投资远高于其他技术形式,仅在承担基础负荷时表现出较好的经济性,闲置容量将导致其经济性的下降;锅炉尽管投资较低,但其运行时将燃气转化为相对低价的热,仅作为其他技术形式的补充。

5 结语

本文以园区综合能源系统为研究对象,分析了系统内能量转换特性,建立了基于能源集线器与粒子群算法的双层优化模型。通过算例分析,得到的主要结论为该模型可协调各类能源从而实现经济运行,可满足复杂场景的仿真需要,具有较好的通用性与实用性,为工程设计验证方案提供快捷的数值参考。

参考文献 References

- [1] 王雪,陈昕. 城市能源变革下的城市智慧能源系统顶层设计研究[J]. 中国电力, 2018, 51(8): 85-91.
WANG Xue, CHEN Xin. Top-level design of urban smart energy system under urban energy revolution [J]. China Electric Power, 2018, 51(8): 85-91.
- [2] 余晓丹,徐宪东,陈硕翼,等. 综合能源系统与能源互联网综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 1-13.
YU Xiaodan, XU Xiandong, CHEN Shuoyi, et al. A brief review to integrated energy system and energy Internet [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31 (1): 1-13.
- [3] 王伟亮,王丹,贾宏杰,等. 能源互联网背景下的典型区域综合能源系统稳态分析研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3292-3306.
WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Review of steady-state analysis of typical regional integrated energy system under the background of energy Internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3292-3306.
- [4] 黎静华,黄玉金,张鹏. 综合能源系统多能流潮流计算模型与方法综述[J]. 电力建设, 2018, 39(3): 1-11.
LI Jinghua, HUANG Yujin, ZHANG Peng. Review

- of multi-energy flow calculation model and method in integrated energy system [J]. *Electric Power Construction*, 2018, 39(3):1-11.
- [5] 熊焰,吴杰康,王强,等.风光气储互补发电的冷热电联供优化协调模型及求解方法[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(14):3616-3625.
- XIONG Yan, WU Jiekang, WANG Qiang, et al. An optimization coordination model and solution for combined cooling, heating and electric power systems with complimentary generation of wind, PV, gas and energy storage[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(14):3616-3625.
- [6] 康书硕,李洪强,蔡博,等.分布式能源系统与地源热泵耦合的系统研究[J]. *工程热物理学报*, 2013, 34(5):817-821.
- KANG Shushuo, LI Hongqiang, CAI Bo, et al. Research on the coupling system of distributed energy system and ground source heat pump[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, 34(5):817-821.
- [7] 邵成成,王锡凡,王秀丽,等.多能源系统分析规划初探[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(14):3817-3829.
- SHAO Chengcheng, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. Probe into analysis and planning of multi-energy systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(14):3817-3829.
- [8] 胡源,别朝红,李更丰,等.天然气网络和电源、电网联合规划的方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(1):45-54.
- HU Yuan, BIE chaohong, LI Gengfeng, et al. Study on the method of joint planning of natural gas network, power supply and power grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(1):45-54.
- [9] WANG Lixiao, JING Z. X, ZHENG J. H, et al. Decentralized optimization of coordinated electrical and thermal generations in hierarchical integrated energy systems considering competitive individuals[J]. *Energy*, 2018, 158:607-622.
- [10] 陈磊,徐飞,王晓,等.储热提升风电消纳能力的实施方式及效果分析[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(17):4283-4290.
- CHEN Lei, XU Fei, WANG Xiao, et al. Implementation and effect of thermal storage in improving wind power accommodation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(17):4283-4290.
- [11] 顾泽鹏,康重庆,陈新宇,等.考虑热网约束的电热能源集成系统运行优化及其风电消纳效益分析[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 14:3596-3604.
- GU Zepeng, KANG Chongqing, CHEN Xinyu, et al. Operation Optimization of Integrated Electric Thermal Energy System Considering Heat Network Constraints and Analysis of Wind Power Consumption Benefit[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 14:3596-3604.
- [12] 徐飞,闵勇,陈磊,等.包含大容量储热的电-热联合系统. *中国电机工程学报*[J], 2014, 34(29):5063-5072.
- XU Fei, MIN Yong, CHEN Lei, et al. Combined electric-heat operation system containing large capacity thermal energy storage[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(29):5063-5072.
- [13] 张涛,朱彤,陈上,等.多能源耦合系统的运行优化与改进分析[J]. *科学通报*, 2017, 62(32):3693-3702.
- ZHANG Tao, ZHU Tong, CHEN Shang, et al. Operation optimization and improvement analysis of multi-energy system [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(32):3693-3702.
- [14] HAVELSKY V. Energetic efficiency of cogeneration systems for combined heat, cold and power production [J]. *International Journal of Refrigeration*, 1999, 22(6):479-485.
- [15] LIU Wenhui, HO Waishin, LEE Mingyang, et al. Development and optimization of an integrated energy network with centralized and decentralized energy systems using mathematical modelling approach[J]. *Energy*, 2019, 183:617-629.
- [16] FANG Ruiming. Multi-objective optimized operation of integrated energy system with hydrogen storage[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(56):29409-29417.
- [17] AHMADI Pouria, DINCER Ibrahim, ROSEN Marc A. Thermoeconomic multi-objective optimization of a novel biomass-based integrated energy system[J]. *Energy*, 2014, 68:958-970.
- [18] QIN Chao, YAN Qingyou, HE Gang. Integrated energy systems planning with electricity, heat and gas using particle swarm optimization[J]. *Energy*, 2019, 188:116044.
- [19] 陈丽萍,林晓明,许苑,等.基于能源集线器的微能源网建模与多目标优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(6):9-16.
- CHEN Liping, LIN Xiaoming, XU Yuan, et al. Energy hub based micro-energy network modeling and multi-objective optimal scheduling[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(6):9-16.

(编辑 桂智刚)