

基于区间线性规划和可逼近理想解排序法的 园区型综合能源系统投资决策

张沛¹, 王旭¹, 杨璐², 孙秋洁³, 叶玲节³, 王岑峰³,
冯也³, 杨云露³, 周竹君^{4,5}

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京市海淀区 100044; 2. 山西大学电力与建筑学院, 山西省太原市 030006;
3. 国网浙江省电力有限公司经济技术研究院, 浙江省杭州市 310016; 4. 湖北泽电新能源科技有限公司,
湖北省天门市 431700; 5. 武汉泽电新材料有限公司, 湖北省武汉市 430074)

Application of Interval Linear Programming and TOPSIS to Investment Decision on Integrated Energy System of Industrial Parks

ZHANG Pei¹, WANG Xu¹, YANG Lu², SUN Qiujie³, YE Lingjie³, WANG Cenfeng³,
Feng Ye³, YANG Yunlu³, ZHOU Zhujun^{4,5}

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Haidian District, Beijing 100044, China;
2. School of Electric Power, Civil Engineering and Architecture, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi Province, China;
3. Economic and Technological Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310016,
Zhejiang Province, China; 4. Hubei Zedian New Energy Technology Co., Ltd., Tianmen 431700, Hubei Province, China;
5. Wuhan Zedian New Material Co., Ltd., Wuhan 430074, Hubei Province, China)

摘要: 综合能源服务作为电网企业增值服务重点开发的领域, 研究其在计及不确定性因素情况下的投资决策方法, 能够有效提升电网的投资效益。从综合能源投资者角度出发, 提出一种基于区间线性规划和可逼近理想解排序法 (technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS) 的园区型综合能源系统投资决策方法。首先, 采用区间数的方式对负荷和能源价格的不确定性进行描述, 构建基于区间数的综合能源系统不确定性规划模型, 求解得到年综合成本和年碳排放成本; 然后, 综合考虑园区的经济性指标和环保性指标, 选取 TOPSIS 法对多个投资规划方案进行排序, 统筹筛选出综合经济性和环保性的最优方案。案例分析结果表明所提方法可有效辅助综合能源公司做出合理投资决策。

关键词: 综合能源系统 (IES); 不确定性; 可逼近理想解排序法 (TOPSIS); 投资决策

Abstract: Integrated energy service (IES) is a key development area of value-added services for power grid enterprises. The study on the investment decision-making method with consideration of uncertain factors can effectively improve the

investment benefits of power grids. From the perspective of integrated energy investors, based on interval linear programming and technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) an investment decision-making method for industrial park type of integrated energy system was proposed. Firstly, the uncertainty of load and energy price was described by interval numbers to construct an interval number based uncertainty programming model for integrated energy system. Secondly, solving this model, the annual comprehensive cost and annual carbon emission cost were obtained. Thirdly, overall considering the economic index and environmental index of the industrial park, TOPSIS was chosen to rank multiple investment planning options, then planning as a whole, the optimal plan that synthesized economy and environmental protection was screened out. Case study results show that the proposed method can effectively assist the Integrated energy company to make rational investment decision.

Keywords: integrated energy system (IES); uncertain factors; technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS); investment decision

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0347

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目 (5211JY18000W)
Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd.(5211JY18000W)

0 引言

随着社会经济快速发展, 能源需求的快速增

长与能源日渐紧缺的矛盾日益凸显^[1]。随着近些年经济的快速增长,我国的电力行业也在发展迅速,政府积极推进科技创新,鼓励能源转型,合理地构建综合能源系统可以协调运用多种能源,对能源进行梯级利用,进而提高能源利用率^[2-3]。综合能源服务是以电力系统为核心,在投资、规划和运行的过程中,综合利用不同能源,有机协调多种不同能源之间的传输、转化、存储、利用等环节,达成能源高效利用的能源供应系统^[4]。在电力市场化背景下,电网企业在综合能源服务项目的投资不断增加,同时社会资本的参与缩小了电网企业的盈利空间^[5]。面对激烈的市场竞争,电网企业如何提升自身投资决策能力,在投资建设环节考虑多种不确定性因素,采用简单有效的决策方法从众多上报的综合能源项目中选取优质项目是十分值得研究的课题。

针对园区型综合能源系统投资决策方面的研究,其难点主要在于园区型综合能源系统的规划运行中存在大量的不确定性因素,譬如负荷预测误差、园区能源价格的波动及其他。若单纯地采用现有决策方法对园区型综合能源系统进行投资方案决策是不合理的,需要将园区的相关不确定因素与决策方法有机结合,形成计及不确定性的投资决策方法。目前,多数研究人员在对综合能源系统的不确定性因素方面已有一定成果。文献^[6]提出了一种多微网互联系统的动态调度模型,并分析了风光、负荷等不确定性因素对动态调度模型的影响。文献^[7]提出了一种基于模型预测控制的冷热电联供型(combined cooling heating and power, CCHP)微网动态优化调度策略,以应对大规模的新能源接入及负荷的不确定性。文献^[8]基于能源集线器模型,采用鲁棒规划方法对负荷波动进行分析,进而确定其对冷热电多能负荷园区效益的影响。文献^[9]提出了一种区域综合能源系统双层优化模型,考虑新能源出力及负荷不确定性的前提下采用粒子群算法对模型进行优化求解,最后根据优化结果量化分析了各类资源的不确定性对系统配置结果和系统盈利能力的影响。文献^[10]对光伏出力及负荷的不确定性使用区间数进行描述,基于区间规划提出了一种综合能源系统日前经济优化模型,用区间形式体现最优解,并通过此最优解进而确定不确定因素对系统总收益的影响。以上文献虽采用不同方法对综合能源

系统存在的不确定性因素进行了研究,进而推导出各不确定性因素对综合能源系统规划运行的影响。但并未将园区的相关不确定因素与现有决策方法有机结合,为园区提出一种具体的投资决策方法辅助投资者进行决策。

综上所述,为提升电网企业在综合能源系统项目的投资效益,本文从综合能源投资者角度出发,将园区规划和运行优化相结合,构建园区型综合能源系统技术优选模型,求解出一些经济性较好的投资规划方案;然后考虑能源购入价格和负荷的不确定性,对多个投资规划方案用可逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS),进行排序,遴选出兼顾经济性和环保性的最佳方案。

1 基于区间数的综合能源系统不确定性规划模型

园区型综合能源系统可以有效整合不同能源,通过不同耦合设备间的协调工作,实现对能源的梯级利用,从而提高能源利用效率。园区的运营商从能源商处购置天然气、煤炭和电能,通过园区内部各种能源耦合设备的转换,满足园区能源负荷需求。

在实际的投资规划中,园区能源价格和冷热电负荷的预测均存在较大的不确定性,很大程度影响着投资者对园区型综合能源系统的投资决策。在能源交易背景下,能源价格与实时能源交易量有关联,具有一定波动性,一般来说也较难获取到精确的概率密度函数。在实际决策过程时,当不确定变量的取值范围获取易于精确的概率密度函数时,可采用区间规划法获得最优值区间。区间规划法在处理计及不确定性的能源规划问题时有其优点,尤其是不确定因素的精确分布情况获取困难时,可以采用区间数进行描述。

1.1 目标函数

1.1.1 全生命周期成本

园区型综合能源系统的全生命周期成本统筹考虑了各能源设备或系统的规划、选型、运行、维护和退役等在给定周期(即整个生命周期)内发生的直接费用和间接费用的总和,因此本文提出的年综合成本 C_{overall} 目标函数为

$$\min C_{\text{overall}} = C_{\text{inv}} + C_{\text{mt}} + C_{\text{oper}} + C_{\text{dep}} \quad (1)$$

式中： C_{inv} 为投资成本； C_{mt} 为系统维护成本； C_{oper} 为系统运行成本； C_{dep} 为折旧成本。

1) 投资成本 C_{inv} 。

投资成本主要是指主要指园区型综合能源系统建设初期购置各类能源设备的成本和供能网络的建设费用，具体的计算公式分别为：

$$C_{inv,dev}^y = \sum_{i \in T} \beta_i r_i^{dev} d_i \quad (2)$$

$$C_{inv,net}^y = \sum_{u \in B} \sum_{ij} (l_{ij}^u r^u d^u) \quad (3)$$

$$d = \frac{h(1+h)^y}{(1+h)^y - 1} \quad (4)$$

式中： $C_{inv,dev}^y$ 和 $C_{inv,net}^y$ 分别为第 y 年的设备投资成本和供能网络投资成本；将所有可能备选的设备集合记为 T ； β_i 为选型系数， $\beta_i \in \{0, 1\}$ ，表示设备 i 是否被选择，0表示该设备类型未被选择，1表示该设备类型被选择； r_i^{dev} 为设备 i 的成本价格；集合 B 表示系统所有种类能源的集合， $B = \{c, e, h\}$ ，其中 c 代表冷能， e 代表电能， h 代表热能； l_{ij}^u 为节点 i 与 j 之间传输能源 u 的管道长度； r^u 为传输能源 u 的管道单位长度成本； h 为折现率； y 为设备使用寿命。

2) 系统维护成本 C_{mt} 。

系统维护成本主要包括园区设备的维护成本和供能网络的维护成本，具体的计算公式分别为：

$$C_{mt,dev}^y = \sum_{t=1}^y \sum_{i \in T} \beta_i c_i^{dev} w_i(t) \quad (5)$$

$$C_{mt,net}^y = \sum_{t=1}^y \left\{ \sum_{u \in B} \sum_{ij} c^u f_{ij}^u(t) \right\} \quad (6)$$

式中： $C_{mt,dev}^y$ 和 $C_{mt,net}^y$ 分别为第 y 年设备的维护成本和供能网络的维护成本； c_i^{dev} 为设备 i 的单位维护费用； $w_i(t)$ 为 t 时刻设备 i 的实际出力； $f_{ij}^u(t)$ 为传输能源 u 的供能网络中通过管道线路 ij 的功率； c^u 为传输能源 u 的供能网络中管道线路的单位维护费用。

3) 系统运行成本 C_{oper} 。

系统运行成本包括能源购置费用和碳排放成本两部分。能源购置费用指系统从外部网络购买电能、天然气和煤炭的能源所花费的成本。

$$C_{oper,pe}^y = \sum_t [P_e(t)r_e(t) + P_{coal}(t)r_{coal}(t) + P_g(t)r_g(t)] \quad (7)$$

$$C_{oper,pc}^y = \sum_t [\varepsilon_{coal} P_{coal}(t) + \varepsilon_g P_g(t)] \cdot k \quad (8)$$

式中： $C_{oper,pe}^y$ 和 $C_{oper,pc}^y$ 分别为第 y 年的能源购置成本和碳排放成本； $P_e(t)$ 、 $P_{coal}(t)$ 、 $P_g(t)$ 分别表示为 t 时刻园区从外部购入电能、煤炭、天然气的量； $r_e(t)$ 、 $r_{coal}(t)$ 、 $r_g(t)$ 分别为 t 时刻电能、煤炭、天然气的单位价格； ε_{coal} 为煤炭机组的碳排放系数； ε_g 为天然气机组的碳排放系数； k 为碳排放成本系数，即碳税。

利用区间数来描述能源价格的波动，即 $[r_e] = [r_e^-, r_e^+]$ ， $[r_{coal}] = [r_{coal}^-, r_{coal}^+]$ ， $[r_g] = [r_g^-, r_g^+]$ ，可将式(7)改为

$$[C_{oper,pe}^y, C_{oper,pe}^{y+}] = \sum_t \{P_e(t)[r_e^-(t), r_e^+(t)] + P_{coal}(t)[r_{coal}^-(t), r_{coal}^+(t)] + P_g(t)[r_g^-(t), r_g^+(t)]\} \quad (9)$$

4) 折旧成本 C_{dep} 。

折旧成本主要体现能源设备磨损损失价值的体现，本文采取固定的折旧费率进行计算，第 y 年的折旧成本为

$$C_{dep}^y = \sum_{i \in T} \beta_i r_i \lambda_i \quad (10)$$

式中： β_i 为选型系数； r_i 为设备 i 的成本价格； λ_i 为设备 i 的折旧费率。

1.1.2 碳排放成本

由1.1.1节可知，全生命周期成本已经包含了碳排放成本，可由式(8)求得，碳排放成本和全生命周期成本呈现的是一种非线性关系，本文统筹兼顾园区的经济性和环保性，将碳排放成本提升到与全生命周期成本同等的地位。

1.1.3 约束条件

本文构建的园区型综合能源系统规划运行联合优化模型的约束条件包含规划类约束和运行类约束两大类约束条件。其中运行类约束条件又由功率运行约束、设备运行约束和供能网络运行约束组成。

1) 规划约束。

园区内各种能源的生产应该保证满足园区各类负荷最大负荷时的需要，这也是规划期从能源设备库内初步筛选能源设备的主要约束条件。具体约束条件如下所示：

$$\begin{cases} \sum_{T_e \subseteq T} \sum_{i \in T_e} \beta_i W_{\text{rate},i} \geq L_e^{\max} \\ \sum_{T_h \subseteq T} \sum_{i \in T_h} \beta_i W_{\text{rate},i} \geq L_h^{\max} \\ \sum_{T_c \subseteq T} \sum_{i \in T_c} \beta_i W_{\text{rate},i} \geq L_c^{\max} \end{cases} \quad (11)$$

式中： T_e 为可以产电为园区电负荷供给的所有设备的集合； T_h 为可以产热为园区热负荷供给的所有设备的集合； T_c 为可以制冷为园区冷负荷供给的所有设备的集合；且 T_e 、 T_h 、 T_c 均为集合 T 的子集； $W_{\text{rate},i}$ 为设备 i 在额定工作方式下产出相应能源的能量； $L_e^{\max}$ 、 $L_h^{\max}$ 、 $L_c^{\max}$ 分别为电、热、冷最大需求负荷。

利用区间数来描述冷热电负荷的波动，即 $[L_e] = [L_e^+, L_e^-]$ ， $[L_h] = [L_h^+, L_h^-]$ ， $[L_c] = [L_c^+, L_c^-]$ 可将式(11)改为

$$\begin{cases} \sum_{T_e \subseteq T} \sum_{i \in T_e} \beta_i W_{\text{rate},i} \geq L_e^+ \\ \sum_{T_h \subseteq T} \sum_{i \in T_h} \beta_i W_{\text{rate},i} \geq L_h^+ \\ \sum_{T_c \subseteq T} \sum_{i \in T_c} \beta_i W_{\text{rate},i} \geq L_c^+ \end{cases} \quad (12)$$

2) 运行约束。

①功率平衡约束。

在任一时刻，系统内的电、热、冷的功率平衡约束如下：

$$\begin{cases} \sum P_i(t) = L_e(t) \\ \sum H_i(t) = L_h(t) \\ \sum C_i(t) = L_c(t) \end{cases} \quad (13)$$

式中： $P_i(t)$ 为 t 时刻设备 i 的电出力； $H_i(t)$ 为 t 时刻设备 i 的热出力； $C_i(t)$ 为 t 时刻设备 i 的冷出力； $L_e(t)$ 为园区 t 时刻的电负荷； $L_h(t)$ 为园区 t 时刻的热负荷； $L_c(t)$ 为园区 t 时刻的冷负荷。

同样地，用区间数来描述冷热电负荷的不确定性，可将式(13)改为

$$\begin{cases} \sum P_i(t) = [L_e^+, L_e^-] \\ \sum H_i(t) = [L_h^+, L_h^-] \\ \sum C_i(t) = [L_c^+, L_c^-] \end{cases} \quad (14)$$

②设备运行约束。

园区内每个设备都有其运行特性，出力存在上下限，设备运行约束如下：

$$W_i^{\min} \leq W_i(t) \leq W_i^{\max} \quad (15)$$

式中： $W_i(t)$ 为 t 时刻设备 i 的出力； $W_i^{\min}$ 为设备 i 的出力下限； $W_i^{\max}$ 为设备 i 的出力上限。

③供能网络运行约束。

对于电能传输网络在运行过程中，计算各个电负荷节点消耗的电功率时，需要将循环水泵工作时消耗的电功率考虑进去，因此各节点的有功和无功约束方程为

$$\begin{cases} P_{si}^t - P_{Li}^t - P_{pci}^t - P_{phi}^t = \\ U_i^t \sum_{j=1}^{N_e} U_j^t [G_{ij} \cos(\delta_i^t - \delta_j^t) + B_{ij} \sin(\delta_i^t - \delta_j^t)] \\ Q_{si}^t - Q_{Li}^t - Q_{pci}^t - Q_{phi}^t = \\ U_i^t \sum_{j=1}^{N_e} U_j^t [B_{ij} \cos(\delta_i^t - \delta_j^t) - G_{ij} \sin(\delta_i^t - \delta_j^t)] \end{cases} \quad (16)$$

式中： P_{si}^t 和 Q_{si}^t 分别为 t 时刻注入节点 i 的有功功率和无功功率； P_{Li}^t 和 Q_{Li}^t 分别为负荷节点 i 在 t 时刻的有功功率和无功功率（不考虑循环水泵）； P_{pci}^t 和 Q_{pci}^t 分别表示冷网循环水泵消耗的有功功率和无功功率； P_{phi}^t 和 Q_{phi}^t 分别表示热网的循环水泵消耗的有功功率和无功功率； U_i^t 和 U_j^t 分别为 t 时刻节点 i 和节点 j 的电压； N_e 为节点数目； G_{ij} 和 B_{ij} 为节点 i 和 j 间的线路电导和电纳。

供热/冷网络的运行约束包括供热/冷负荷节点的换热器/风机的负荷功率模型，供水管道的温度约束和流量约束以及循环水泵的工作特性约束。

$$\begin{cases} P_{hi}^h = c_w m_{qhj}^h (T_{wj} - T_{rj}) \\ T_{op} = (T_{ip} - T_a) e^{-\frac{\lambda L}{c_w m_j}} + T_a \\ \sum m_{in} = \sum m_{out} \\ \sum (m_{in} T_{in}) = \sum (m_{out} T_{out}) \\ P_{phj} = \frac{m_j g H_p}{\rho_w \eta_p} \end{cases} \quad (17)$$

式中： P_{hi}^h 为换热器/风机的负荷功率； c_w 为水的比热容； m_{qhj}^h 为流过的热/冷水流量； T_{wj} 和 T_{rj} 分别为进水温度和回水温度； T_{op} 为所处管道的出水温度； T_{ip} 为所处管道的进水温度； T_a 为所处环境的温度； L 为管道长度； m_{in} 和 m_{out} 分别为流入和流出节点的流体流量； m_j 为管道流量； λ 为管道单位长度的传热系数； T_{in} 和 T_{out} 为流体混合前流入节点和各流体温度和混合后流出节点的流体温度； P_{phj} 为循环水泵消耗的电功率； g 为重力加速度；

H_p 为水泵扬程； ρ_w 为水的密度； η_p 为循环水泵的工作效率。

1.1.4 模型求解

求解算法采取两阶段分解算法，将包含不确定问题的模型转化成为确定性问题的子模型进行求解。区间线性规划模型一般形式为关键所在，首先构建标准化区间规划模型，其标准化过程见文献[11-12]；然后将构建的模型分解为最优子模型和最劣子模型。

1) 求解最优子模型 f^+ ：

$$\begin{cases} \max f^+ = \sum_{j=1}^{k_1} c_j^+ x_j^+ + \sum_{j=k_1+1}^n c_j^+ x_j^- \\ \text{s.t.} \sum_{j=1}^{k_1} |a_{ij}^+| \text{sgn}(a_{ij}^+) x_j^+ + \sum_{j=k_1+1}^n |a_{ij}^+| \text{sgn}(a_{ij}^+) x_j^- \leq b_{ij}^+ \\ x_j^+ \geq 0, \forall j \end{cases} \quad (18)$$

式中： $x_j^+(j=1,2,\dots,k_1)$ 是系数为正的区间变量； $x_j^-(j=k_1+1,k_1+2,\dots,n)$ 是系数为负的区间变量； C_j^+ 为目标函数中变量 x_j 系数区间的上限值； a_{ij}^+ 为不等式约束中 x_j 的系数区间值； a_{ij}^+ 和 a_{ij}^- 分别为 a_{ij}^+ 的上限值和下限值； b_{ij}^+ 为不等式约束中约束值 b_{ij} 的上限值。

求解式(18)可得到对应解 $x_{j,\text{opt}}^+(j=1,2,\dots,k_1)$ ，表示 $x_j^+(j=1,2,\dots,k_1)$ 的上限值； $x_{j,\text{opt}}^-(j=k_1+1,k_1+2,\dots,n)$ ，表示 $x_j^-(j=k_1+1,k_1+2,\dots,n)$ 的下限值；最优子模型解为 f^+ 。

2) 求解最劣子模型 f^- ：

$$\begin{cases} \max f^- = \sum_{j=1}^{k_1} c_j^- x_j^- + \sum_{j=k_1+1}^n c_j^- x_j^+ \\ \text{s.t.} \sum_{j=1}^{k_1} |a_{ij}^-| \text{sgn}(a_{ij}^-) x_j^- + \sum_{j=k_1+1}^n |a_{ij}^-| \text{sgn}(a_{ij}^-) x_j^+ \leq b_{ij}^- \\ x_j^- \geq 0, \forall j \end{cases} \quad (19)$$

式中 b_{ij}^- 为不等式约束中约束值 b_{ij} 的下限值。

同理，求解式(19)可得到对应解 $x_{j,\text{opt}}^-(j=1,2,\dots,k_1)$ ，表示 $x_j^-(j=1,2,\dots,k_1)$ 的下限值； $x_{j,\text{opt}}^+(j=k_1+1,k_1+2,\dots,n)$ ，表示 $x_j^+(j=k_1+1,k_1+2,\dots,n)$ 的上限值；最劣子模型解为 f^- 。

最终对 2 个子模型的求解结果进行综合，求

得模型的目标函数值 $[f_{\text{opt}}] = [f_{\text{opt}}^-, f_{\text{opt}}^+]$ ，以及决策变量 $[x_{j,\text{opt}}] = [x_{j,\text{opt}}^-, x_{j,\text{opt}}^+]$ 。

模型求解后，得到区间值年综合成本 $[C_{\text{overall}}] = [C_{\text{overall}}^-, C_{\text{overall}}^+]$ 和年碳排放成本 $[C_{\text{oper,pc}}] = [C_{\text{oper,pc}}^-, C_{\text{oper,pc}}^+]$ 。以这 2 个区间值的均值表征园区的年均成本费用，并分别作为评价园区经济性和环保性的指标。

综上所述，基于区间数的综合能源系统不确定性规划模型的具体流程如图 1 所示。

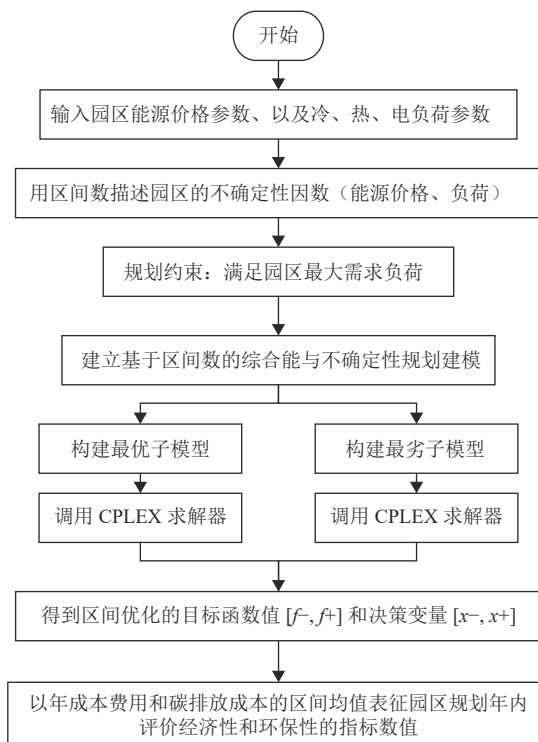


图 1 基于区间数的综合能源系统不确定性规划模型

Fig. 1 Uncertainty programming model of integrated energy system based on interval numbers

2 基于 TOPSIS 的园区型综合能源系统投资决策

TOPSIS 法是目前被应用最广泛的多目标决策方法之一。TOPSIS 法根据有限个评价对象与理想目标的接近程度对方案进行排序，进而优选方案。TOPSIS 法是一种逼近理想解的排序法，其中“正理想解”和“负理想解”是该方法的 2 个基本概念。所谓正理想解就是理想中的最优方案，该方案的各个指标均达到备选方案中的最优值；而负理想解即是最劣方案，该方案各属性均

为最差。该方法的基本原理就是计算出备选方案中的正负理想解,然后通过评价各个方案距最优解和最劣解的距离进行评价^[13-14]。

TOPSIS法的基本计算过程为先将原始数据矩阵统一指标类型(一般正向化处理)得到正向化的矩阵,再对正向化的矩阵进行标准化处理以消除各指标量纲的影响。得到标准化矩阵后,从中得到“正理想解”和“负理想解”。再对各方案与正理想解和负理想解间的距离进行计算,得到各评价对象与正理想解之间的相对接近程度,从而确定各方案的好坏程度。TOPSIS法不限制数据分布及样本含量,方便数据计算。

采用TOPSIS法对多目标综合评选具体流程如下:

1) 假设有 n 个投资方案,其中每个方案包含2个评价指标,进而可以形成多目标决策矩阵 $F = (f_{ij})_{n \times 2}$ 。

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \\ \vdots & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} \end{bmatrix} \quad (20)$$

正向化处理决策矩阵,也就是让所有的指标都转化为极大型指标。反之对于极小型指标,指标越小越好,将其正向化处理的公式为

$$\bar{f}_{ij} = \max_{1 \leq j \leq n} \{f_{ij}\} - f_{ij} \quad (21)$$

2) 为了方便解决不同指标量纲之间的影响,标准化处理已经正向化的矩阵,形成标准化矩阵 $Z = (z_{ij})_{n \times 2}$ 。

$$z_{ij} = f_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^n f_{ij}^2} \quad (22)$$

3) 求得正理想解 Z^+ 和负理想解 Z^- 。

$$\begin{aligned} Z^+ &= (Z_1^+, Z_2^+) = (\max\{z_{11}, \dots, z_{n1}\}, \max\{z_{12}, \dots, z_{n2}\}) \\ Z^- &= (Z_1^-, Z_2^-) = (\min\{z_{11}, \dots, z_{n1}\}, \min\{z_{12}, \dots, z_{n2}\}) \end{aligned} \quad (23)$$

4) 计算各个方案到正、负理想解的欧式距离 L^+ 及 L^- 。方案 i 的欧式距离公式为

$$\begin{cases} L_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_j^+ - z_{ij})^2} \\ L_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_j^- - z_{ij})^2} \end{cases}, i = 1, 2, \dots, n \quad (24)$$

5) 计算各个方案与理想点的贴近度 S :

$$S_i = L_i^+ / (L_i^+ + L_i^-), i = 1, 2, \dots, n \quad (25)$$

6) 根据 S_i 的值进行排序, $S_i \in [0, 1]$, S_i 值越小,代表该备选方案相对越差。

综上所述,基于TOPSIS法的园区型综合能源系统投资决策的具体流程如图2所示。

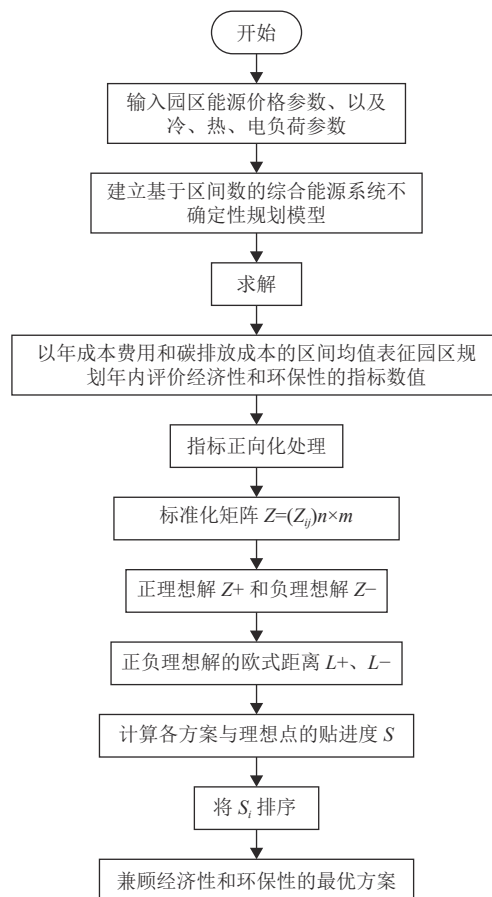


图2 基于TOPSIS的园区型综合能源系统投资决策
Fig. 2 Investment decision flowchart of integrated energy system based on TOPSIS

3 算例分析

3.1 算例场景

本文算例选取某个园区型综合能源系统,具体结构见图3。该园区的供热网、供冷网均包括12各管道和13个节点;供电网络采用IEEE14节点算例,基准功率为100 MV·A,基准电压为23 kV,包括13条支路。为了保证供冷/热网络正常运行,在所有的冷/热源节点处和冷/热负荷节点处安装循环水泵。园区供冷网的冷源供水温度为6℃,冷负荷回水温度12℃。园区供热网的热源供水温度85℃,热负荷回水温度30℃。水泵扬程为最高30.6 m,水泵的效率为0.8。该系

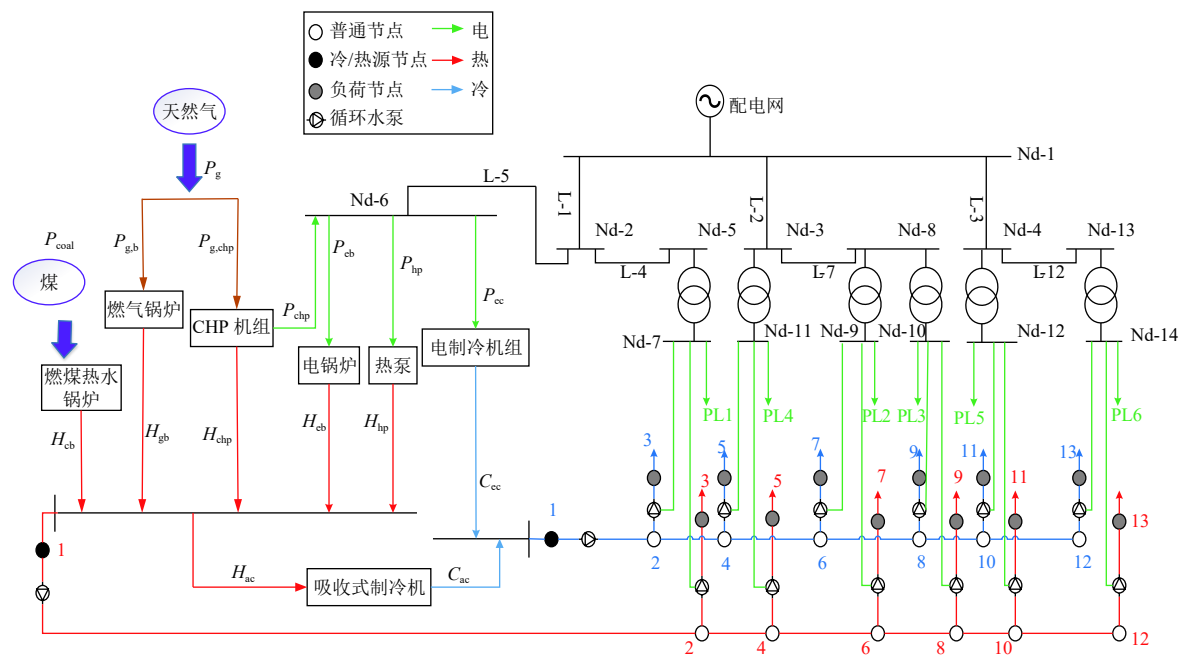


图 3 园区型综合能源系统结构图

Fig. 3 Structure of Integrated Energy System for industrial park

统供能网络的具体参数见附表 A1—A3。

本算例构建的候选设备库具体参数详见附表 A4—A10。为满足园区冷热电负荷需求，园区的运营商将从上述设备库中选择合适设备，通过园区内部各种能源耦合设备的转换及协调运行，实现对能源的梯级利用。

为简化分析，对一年 8760 h 的冷热电需求场景进行聚类回归并，将一年分为夏季/冬季/过渡季节 3 个典型的季节，以典型日的运行情况来代表整个季节的运行情况以减少运行模拟的计算量。各典型日的具体划分情况如表 1 所示。该园区聚类归并后各典型日的负荷曲线详见附图 A1。

表 1 典型日分类情况

Table 1 The classification of typical days

典型日类型	累计天数	环境温度/℃
夏季	93	32
冬季	151	0
过渡季	121	10

该园区电价采取分时计价，峰时（08:00—10:00 和 18:00—22:00）、平时（07:00 和 11:00—17:00）、谷时（01:00—06:00 和 23:00—24:00）电价分别为 0.9640、0.6785、0.4090 元/(kW·h)。园区购置天然气的价格折合成单位热值单价为

0.34 元/kWh，购置煤炭价格折合成单位热值单价为 0.11 元/kWh。为了提高园区的环保性，考虑碳排放成本，碳税为 0.3 元/kg，天然气和煤炭的碳排放系数分别为 0.4 和 0.9。考虑到规划年内不确定性的因素，将负荷的波动设置为-5% 和+10%，能源价格的波动设置为±10%。

3.2 技术优选结果分析

首先，以算例中的设备库参数为基础，根据排列组合可知，不同设备不同类型互相组合形成不同的规划方案，总共有 $2^{20}=1048576$ 种方案。根据公式 (9)，以满足园区最大负荷需求为硬性条件筛选出满足负荷需求的备选规划方案集 Q ，共包含 8640 种方案。因此该园区规划阶段设备选型的初步筛选率为 $\varepsilon = (8640/1048576) \times 100\% = 0.82\%$ 。

然后，结合上述计算结果，根据不计及区间数的模型对备选规划方案集 Q 中每个方案 $Q_i(i=1,2,\dots,8640)$ 进行运行优化计算。以年综合成本最小为优化目标，得到备选规划方案集 Q 中第 3664 种方案 Q_{3664} 为联合优化的最优规划方案 Q_{best} 。最优规划方案 Q_{best} 设备选型的结果为 $Q_{best}=[1,1,1,1,0,1,0,1,1,1,1,0,0,0,1,0,1,1,1]$ ，即该园区具体的规划方案为：燃煤锅炉 3 台 (240 kW/350 kW/560 kW)、燃气锅炉 2 台 (350 kW/

480 kW)、热电联产机组 2 台(250 kW/750 kW)、热泵机组 3 台(6 kW/20 kW/53 kW)、吸收式制冷机组 1 台(2910 kW)和电制冷机组 3 台(18.5 kW/114.6 kW/40.8 kW)。

为了进一步对比分析园区型综合能源系统年成本费用的构成,本文除了选取联合优化得到的最优规划方案 Q_{best} 之外,还从备选规划方案集 Q 中选取年投资成本最小的方案 Q_{inv} 和年运行成本最小的方案 Q_{oper} 进行联合对比分析,具体对比结果见表 2。

表 2 不同方案费用对比

Table 2 Costs comparison among different cases

万元

方案	设备年投资成本	供能网络年投资成本	设备维护成本	供能网络维护成本	能源购置费	碳排放成本	折旧成本	年综合成本
Q_{best}	155.01	36.36	13.58	61	189.97	244.88	9.57	710.37
Q_{inv}	138.38	36.36	12.63	61	221.67	259.92	8.74	738.7
Q_{oper}	192.46	36.36	16.77	61	208.37	197.82	11.44	724.22

3.3 计及不确定性的投资决策结果分析

为进一步考虑到园区负荷和能源价格的波动对园区投资决策的影响,并兼顾综合能源系统投资的经济性和环保性,从技术优选求解得到的备选规划方案集 Q 中选取 8 个备选方案作为本节算例,其中包括 3.2 小节中提及的 3 个典型方案: Q_{best} 、 Q_{inv} 和 Q_{opr} 。园区内负荷的波动为-5%和+10%,能源价格的波动为 $\pm 10\%$,根据公式(1)—(19),得到计及不确定性的园区型综合能源系统技术优选模型的区间优化形式。采用两阶段分解算法求解,得到各方案年成本费用和碳排放成本的最优值区间,具体结果见表 3。

表 3 区间优化模型求解结果

Table 3 Results of the solving of interval optimization model

万元

方案	年综合成本		碳排放成本	
	最优值区间	区间均值	最优值区间	区间均值
1(Q_{best})	[664.63,791.05]	727.84	[230.23,266.19]	248.21
2(Q_{inv})	[688.62,822.79]	755.71	[239.08,287.05]	263.07
3(Q_{opr})	[679.94,798.81]	739.38	[185.54,229.27]	207.41
4	[693.04,826.08]	752.56	[227.65,269.64]	248.65
5	[774.77, 904.63]	839.70	[205.61,244.6]	225.11
6	[706.06,829.65]	767.86	[257.69,305.67]	281.68
7	[758.65,886.07]	822.36	[220.54,261.04]	240.79
8	[742.36,868.88]	805.62	[254.04,299.61]	276.83

通过表 2 中园区型综合能源系统 3 种不同规划方案的成本费用的对比分析,可以得到以下结论:1) 园区型综合能源系统的年成本费用主要受到园区负荷和能源价格的影响;2) 碳排放成本作为运行成本的主要组成,其数额的大小体现了该综合能源系统环境的友好程度;3) 通过 3 个不同方案对比分析可知,成本费用最低的方案碳排放成本未必最低,碳排放成本最低的方案,其经济性不是最优。由此可见,能源价格和园区负荷是影响园区投资决策的两个因素。

以年综合成本和碳排放成本的区间均值表征园区的年均成本费用,并分别作为评价园区经济性和环保性的指标。由于经济性和环保性指标均属于极小型指标,需要对这 2 类指标按照式(21)进行指标正向化处理。指标正向化后的投资方案评价表见表 4。

表 4 指标正向化后的投资方案评价表

Table 4 Appraisal form of investment plan after indicators normalized

方案	经济性	环保性
1(Q_{best})	111.86	33.47
2(Q_{inv})	84.00	18.62
3(Q_{opr})	100.33	74.28
4	87.14	33.04
5	0.00	56.58
6	71.85	0.00
7	17.34	40.89
8	34.08	4.86

依照式(22)进行标准化处理后得到的标准化矩阵如表 5。

根据式(23)得到正、负理想解分别为: $Z^+ = (0.5342, 0.4968)$ 、 $Z^- = (0.0000, 0.0000)$ 。

依据式(24)计算各个方案到正负理想解的距离 L_i^+ 及 L_i^- , 然后根据式(25)计算贴近度 S_i 并对方案进行排序,具体结果见表 6。

表 5 投资方案的标准化矩阵
Table 5 Standardized matrix of investment plan

方案	经济性	环保性
1(Q_{best})	0.5342	0.2939
2(Q_{inv})	0.4011	0.1635
3(Q_{opr})	0.4791	0.6522
4	0.4161	0.2901
5	0.0000	0.4968
6	0.3431	0.0000
7	0.0828	0.3590
8	0.1627	0.0427

表 6 投资方案的相对贴近度及排名
Table 6 Relative closeness and ranking of investment plan

方案	L_i^+	L_i^-	S_i	排名
1(Q_{best})	0.3583	0.6097	0.6298	2
2(Q_{inv})	0.5065	0.4332	0.4610	5
3(Q_{opr})	0.0551	0.8092	0.9396	1
4	0.3808	0.5073	0.5712	3
5	0.5563	0.4968	0.4717	4
6	0.6796	0.3431	0.3355	7
7	0.5382	0.3684	0.4064	6
8	0.7137	0.1682	0.1908	8

由此可见，贴合度最高为方案 3，此方案同时统筹了经济性和环保性，所以是最佳的投资方案。通过采用上述投资决策方法，不仅考虑了园区型综合能源系统的不确定性因素，还从众多备选方案中评选中最佳投资方案，给投资方提供更明确投资辅助。

4 结论

1) 在进行园区型综合能源系统的投资决策过程中，追求经济性最佳的同时，对环保性的考量是十分必要的。经济性较优的方案，其环保性较差；环保性不错的方案，其成本费用可能略高。若单纯只考虑园区经济性或环保性去遴选方案均不太合理。统筹兼顾经济性和环保性才能更好地对园区型综合能源系统进行投资规划。

2) 本文所提的基于 TOPSIS 的园区型综合能源系统的投资决策方法将优选模型和方案评选结合起来，求解满足园区的投资规划方案的同时，进行方案间比选，操作简单，既兼顾了园区的经

济性和环保性，又直观地展示了各个方案之间的相对差距，给投资方提供更明确投资辅助。

(本刊附录请见网络版，印刷版略)

参考文献

- [1] 周钰童, 华亮亮, 黄伟, 等. 计及电热交易的区域综合能源多目标优化配置[J]. 现代电力, 2019, 36(4): 24–30.
ZHOU Xutong, HUA Liangliang, HUANG Wei, *et al.* Multi-objective optimal allocation of regional integrated energy considering electric-heat transaction[J]. *Modern Electric Power*, 2019, 36(4): 24–30(in Chinese).
- [2] 郇嘉嘉, 赵瑾, 曾诚玉, 等. 园区综合能源系统规划影响因素分析及优化配置方案设计[J]. 现代电力, 2020, 7(3): 303–309.
HUAN Jiajia, ZHAO Jin, ZENG Chengyu, *et al.* Influencing factors analysis and optimal allocation schemes design of integrated energy system planning in parks[J]. *Modern Electric Power*, 2020, 7(3): 303–309.
- [3] 程林, 刘琛, 朱守真, 等. 基于多能协同策略的能源互联微网研究[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 132–138.
CHEN Lin, LIU Chen, ZHU Shouzheng, *et al.* Study of micro energy internet based on multi-energy interconnected strategy[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(1): 132–138(in Chinese).
- [4] 张利军, 徐晨博, 范娟娟, 等. 区域能源互联网多能系统规划决策关键技术及应用[J]. 现代电力, 2018, 35(4): 27–34.
ZHANG Lijun, XU Chenbo, FAN Juanjuan, *et al.* Critical technology and its application of multi-energy system planning and decision making for regional energy internet[J]. *Modern Electric Power*, 2018, 35(4): 27–34(in Chinese).
- [5] 刘明华, 刘文霞, 刘晨苗, 等. 基于全息风险评估和组合赋权的电网建设项目投资决策方法[J]. 现代电力, 2019, 36(5): 87–94.
LIU Minghua, LIU Wenxia, LIU Chenmiao, *et al.* Investment decision method for power grid construction projects based on holographic risk assessment and combination weighting[J]. *Modern Electric Power*, 2019, 36(5): 87–94(in Chinese).
- [6] 吴红斌, 孙瑞松, 蔡高原. 多微网互联系统的动态经济调度研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(05): 1426–1433.
Wu Hongbin, Sun Ruisong, Cai Gaoyuan. Dynamic economic dispatch for multi-microgrid interconnection system[J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2018, 39(05): 1426–1433(in Chinese).

- [7] 吴鸣, 骆钊, 季宇, 等. 基于模型预测控制的冷热电联供型微网动态优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7174-7184, 7431.
WU Ming, LUO Zhao, JI Yu, *et al.* Optimal dynamic dispatch for combined heating and power microgrid based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7174-7184, 7431(in Chinese).
- [8] 沈欣炜, 郭庆来, 许银亮, 等. 考虑多能负荷不确定性的区域综合能源系统鲁棒规划[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 34-45.
SHEN Xinwei, GUO Qinglai, XU Yinliang, *et al.* Robust-planning method for regional integrated energy system considering multi-energy load uncertainties[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 34-45(in Chinese).
- [9] 仇知, 王蓓蓓, 贲树俊, 等. 计及不确定性的区域综合能源系统双层优化配置规划模型[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 176-185.
QIU Zhi, WANG Beibei, BEN Shujun, *et al.* Bi-level optimal configuration planning model of regional integrated energy system considering uncertainties[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 176-185(in Chinese).
- [10] 白牧可, 王越, 唐巍, 等. 基于区间线性规划的区域综合能源系统日前优化调度[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 3963-3970.
BAI Muke, WANG Yue, TANG Wei, *et al.* Day-ahead optimal dispatching of regional integrated energy system based on interval linear programming[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 3963-3970(in Chinese).
- [11] 郭均鹏, 李文华. 区间线性规划的标准型及其最优值区间[J]. 管理科学学报, 2004(3): 59-63.
GUO Junpeng, LI Wenhua. Standard form of interval linear programming and its optimal objective interval value[J]. Journal of Management Sciences in China, 2004(3): 59-63(in Chinese).
- [12] ZHOU F, HUANG G H, CHEN G X, *et al.* Enhanced-interval linear programming[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 199(2): 323-333.
- [13] 李琳. 基于距离计算改进的TOPSIS多属性决策研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
LI Lin. Research on TOPSIS multi-attribute decision making based on distance computation improvement[D]. Nanning: Guangxi University, 2019.
- [14] 李慧玲, 芦新波, 刘大川, 等. 基于AHP-TOPSIS的电力能效项目综合评价[J]. 现代电力, 2014, 31(4): 88-94.
LI Huiling, LU Xinbo, LIU Dachuan, *et al.* A comprehensive evaluation method for power energy efficiency project based on AHP-TOPSIS[J]. Modern Electric Power, 2014, 31(4): 88-94(in Chinese).

收稿日期: 2020-10-01

作者简介:

张沛(1972), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统调度分析、电力系统规划、电力信息化和新能源, E-mail: 2512692577@qq.com;

王旭(1994), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统的优化规划, E-mail: 18126154@bjtu.edu.cn;

杨璐(1992), 男, 硕士, 助教, 研究方向为电力系统规划、电力系统运行与控制, E-mail: 1036909083@qq.com;

孙秋洁(1990), 女, 硕士, 中级工程师、经济师, 研究方向为综合能源服务、企业发展战略与规划, E-mail: sunqiujiel004@163.com;

叶玲节(1990), 女, 硕士, 中级经济师, 研究方向为企业发展战略与规划, E-mail: 278846276@qq.com;

王岑峰(1993), 男, 硕士, 初级工程师, 研究方向为综合能源服务、能源经济, E-mail: 814202934@qq.com;

冯也(1995), 女, 理学硕士, 研究方向为能源经济, 财务管理, E-mail: fengye0579@163.com;

杨云露(1991), 女, 工商管理硕士, 中级工程师, 研究方向为企业发展战略与规划, E-mail: 375977040@qq.com;

周竹君(1988), 男, 工学硕士, 研究方向为事企业管理与战略研究, 电力系统新材料开发与能源互联网等方面研究, E-mail: zhouzhujun@zdoil.cn.

附录 A

附表 A1 供热网络参数

Table A1 Parameters of heating network

管道编号	首节点	末节点	长度/m	管径/m	管道传热系数
1	h_1	h_2	1200	0.12	0.4
2	h_2	h_3	500	0.12	0.4
3	h_2	h_4	400	0.12	0.4
4	h_4	h_5	500	0.12	0.4
5	h_4	h_6	800	0.12	0.4
6	h_6	h_7	500	0.12	0.4
7	h_6	h_8	400	0.12	0.4
8	h_8	h_9	500	0.12	0.4
9	h_8	h_{10}	400	0.12	0.4
10	h_{10}	h_{11}	500	0.12	0.4
11	h_{10}	h_{12}	800	0.12	0.4
12	h_{12}	h_{13}	500	0.12	0.4

附表 A2 供冷网络参数

Table A2 Parameters of cooling network

管道编号	首节点	末节点	长度/m	管径/m	管道传热系数
1	c_1	c_2	600	0.1	0.4
2	c_2	c_3	300	0.1	0.4
3	c_2	c_4	400	0.1	0.4
4	c_4	c_5	300	0.1	0.4
5	c_4	c_6	800	0.1	0.4
6	c_6	c_7	300	0.1	0.4
7	c_6	c_8	400	0.1	0.4
8	c_8	c_9	300	0.1	0.4
9	c_8	c_{10}	400	0.1	0.4
10	c_{10}	c_{11}	300	0.1	0.4
11	c_{10}	c_{12}	800	0.1	0.4
12	c_{12}	c_{13}	300	0.1	0.4

附表 A3 供电网络参数

Table A3 Parameters of power supply network

支路编号	起始节点	末节点	阻抗/pu	感抗/pu
1	e_1	e_2	0.075	0.1
2	e_1	e_3	0.11	0.11
3	e_1	e_4	0.11	0.11
4	e_2	e_5	0.09	0.18
5	e_2	e_6	0.08	0.04
6	e_5	e_7	0.04	0.11
7	e_3	e_8	0.08	0.11
8	e_8	e_9	0.08	0.11
9	e_8	e_{10}	0.11	0.11
10	e_3	e_{11}	0.11	0.12
11	e_4	e_{12}	0.09	0.12
12	e_4	e_{13}	0.08	0.11
13	e_{13}	e_{14}	0.04	0.01

附表 A4 燃煤锅炉技术参数

Table A4 Technical parameters of coal-fired boiler

额定热功率/kW	热效率	价格/万元	维护成本/%	年限/a
240	0.86	5.6	0.5	15
350	0.925	6.9	0.5	15
560	0.735	7.2	0.5	15

附表 A5 燃气锅炉技术参数

Table A5 Technical parameters of gas-fired boiler

额定热功率/kW	热效率	价格/万元	维护成本/%	年限/a
350	0.95	33.5	1	20
480	0.96	46	1	20
230	0.986	22	1	20

附表 A6 热电联产机组技术参数

Table A6 Technical parameters of heat and power cogeneration units

额定热功率/kW	热效率	电效率	价格/万元	维护成本/%	年限/a
250	0.491	0.382	116.2	0.7	25
75	0.515	0.355	34.8	0.7	25
750	0.482	0.375	348.7	0.7	25

附录 A

附表 A7 热泵机组技术参数

Table A7 Technical parameters of heat pump unit

额定功率/kW	制热能效比	价格/万元	维护成本/%	年限/a
6	5.4	1.63	1.5	20
20	3.4	5	1.5	20
53	4.5	12	1.5	20

附表 A8 电锅炉技术参数

Table A8 Technical parameters of electric boiler

额定电功率/kW	制热能效比	价格/万元	维护成本/%	年限/a
100	0.833	15.9	1	15
240	0.98	38.2	1	15
700	0.986	111.3	1	15

附表 A9 吸收式制冷技术参数

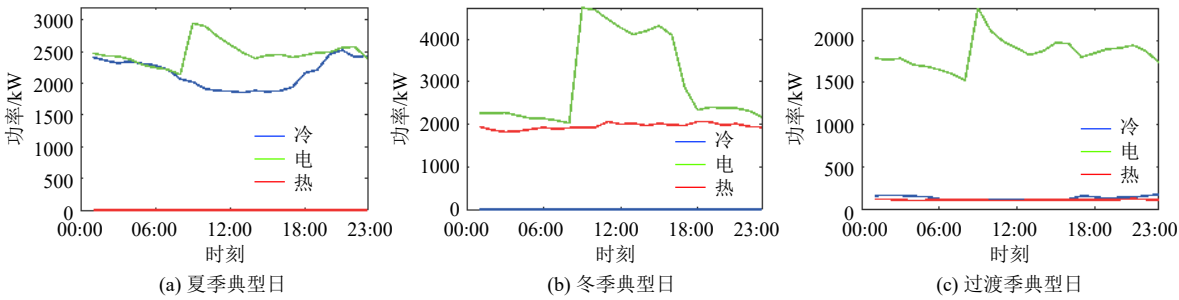
Table A9 Technical Parameters of absorption refrigeration

额定冷功率/kW	制冷能效比	价格/万元	维护成本/%	年限/a
3910	1.2	440	2	20
3400	1.3	518.5	2	20

附表 A10 电制冷机组技术参数

Table A10 Technical parameters of electrical refrigeration units

额定功率/kW	制冷能效比	价格/万元	维护成本/%	年限/a
18.5	4.7	1.8	2	20
114.6	3.44	11.6	2	20
40.8	3.19	4	2	20



附图 A1 典型日负荷曲线

Fig. A1 Heating, cooling and electrical loads of typical days