

# 基于改进Petri网的区域综合能源系统能耗建模及优化运行分析

胡列翔<sup>1</sup>,王 蕾<sup>2</sup>,董明枫<sup>3</sup>,李宏仲<sup>4</sup>,孙 可<sup>1</sup>,胡哲晟<sup>2</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司,浙江 杭州 310007;2. 国网浙江省电力有限公司经济技术研究院,浙江 杭州 310008;  
3. 南方电网江门市供电公司,广东 江门 529000;4. 上海电力大学 电气工程学院,上海 200090)

**摘要:**区域综合能源系统包含的设备和负荷类型众多,设备之间的耦合方式多样,在实际运行中往往难以确定最优的供能方式。从能耗分析的基本原理出发,结合带时间约束的模糊有色Petri网特定的建模原则,提出一种区域综合能源系统能耗优化推理模型。该模型在满足负荷需求和基本运行条件下,从综合能源系统运行成本、污染物排放量和一次能源消耗量3个方面对系统供能路径进行优化,通过对系统进行能耗仿真分析,从而得到不同需求场景下的最优供能方式。最后以某实际区域综合能源系统为例,验证了所建模型的有效性和实用性。

**关键词:**区域综合能源系统;带时间约束的模糊有色Petri网;能耗模型;能耗率;熵权法

**中图分类号:**TM 73

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202010024

## 0 引言

能源是人类赖以生存和社会发展的基础。目前,我国能源系统面临需求放缓、传统产能过剩、整体效率较低等突出问题。在此背景下,区域综合能源系统<sup>[1]</sup>RIES(Regional Integrated Energy System)应运而生。RIES将可再生能源的互补优势和能源共享应用到实际生产中,并通过电力、天然气、热和冷多能系统的相互耦合实现能源的高效利用<sup>[2-4]</sup>。

RIES中所包含的设备和负荷类型众多,导致能量耦合方式的多样化。对同一用能需求,可以选择多种供能方式,确定不同供能策略。为了提高RIES的用能效率,应该选择RIES中合适的供能路径。文献[5]在固定的供能方式下,对包含太阳能的冷热电三联供CCHP(Combined Cooling Heating and Power)综合系统的设备容量进行优化设计,但未考虑到设备组合方式的多样性。文献[6]构建了CCHP的基本物理架构,并通过系统经济调度进行动态建模求解,从而实现了综合能源系统更为经济的运行方式。文献[7]建立了综合能源系统的混合整数线性规划模型,在此基础上对系统中的设备容量进行了优化。文献[8-9]采取“以热定电”、“以电定热”的基本运行策略,对能源系统的投资成本和废物排放量进行了优化分析。以上研究都是在确定的供能方式下对系统进行优化分析,未充分考虑供能路径的多样性。针对此类研究的不足,文献

[10-11]充分考虑了RIES设备的多样性,以实际系统的多种用能方式为前提,对RIES设备类型和容量进行了优化设计。在综合能源系统评估指标方面,文献[12]仅以经济性为单目标对系统进行评估分析;文献[13-16]中除了考虑RIES运行的经济性外,还从环境保护和节能性指标方面对系统进行了探讨。

现有研究成果大多是从RIES的设备选型、容量配置和基本运行策略3个层面进行探讨,在以下几个方面仍需要做进一步的深入分析:

(1)现有的研究中,大多以某一种设备类型(燃气轮机等)为核心,或者以少数几种确定的设备组成系统供能结构,应进一步考虑园区供能设备组合的多样性;

(2)所建的优化模型在实际计算时应进一步考虑冷、热、气能源的供能延时特性;

(3)每类负荷有多种供能方式可供选择,可以考虑建立一种直观、清晰的优化模型描述多种设备耦合方式下的最佳供能路径。

鉴于此,本文从能耗分析的基本原理和RIES多能耦合的特点出发,基于改进Petri网技术,建立了RIES能耗Petri网推理模型。所建模型可以直观地描述系统运行状态的连续性,具备一定的图形化表现能力和分析计算能力。然后,在满足负荷需求和基本运行条件下,充分考虑冷、热的供能时序性,从系统运行成本、污染物排放量和一次能源消耗量3个方面对系统供能路径进行优化。最后,通过对系统进行仿真求解,并应用效用系数法对所得结果进行综合分析,从而得到不同场景下的最优供能方案。

收稿日期:2019-11-26;修回日期:2020-08-19

基金项目:国网浙江省电力有限公司科技项目(5211JY180016)

Project supported by the Science and Technology Program of State Grid Zhejiang Electric Power Co.,Ltd.(5211JY180016)

## 1 RIES基本架构及能耗特性分析

### 1.1 能耗分析基本原理

RIES能耗过程复杂,包含大量设备及多种能源之间的转换,在不同的设备中存在不同的能源消耗和转化形式,但是对系统整体而言应遵循能量守恒定律,综合能耗可用下式计算<sup>[17]</sup>:

$$E = \sum_{i=1}^n e_i p_i \quad (1)$$

其中, $E$ 为综合能耗; $n$ 为消耗的能源品种数; $e_i$ 为RIES实际运行时消耗的第 $i$ 种能源的值; $p_i$ 为第 $i$ 种能源的折算因子,计算时按能量的当量值折算,其中电力的折标准煤系数为 $0.1229 \text{ kgce}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,天然气的折标准煤系数为 $1.3300 \text{ kgce}/\text{m}^3$ (油田)和 $1.2143 \text{ kgce}/\text{m}^3$ (气田),应用能源的等价值原理<sup>[19]</sup>将热能转换成标准煤进行计算。

### 1.2 RIES能耗状况分析

如果仅考虑耦合设备在能源转换过程中的单一种类能源消耗情况,可以建立如图1所示的分析模型。

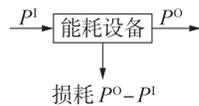


图1 单一设备能耗状况分析模型

Fig.1 Energy consumption analysis model of single equipment

图1中, $P^I$ 、 $P^O$ 分别为某类能源在传输过程中的输入和输出量,此类能源的总能耗利用率 $U$ 和损耗率 $L$ 分别为:

$$U = P^O/P^I \quad (2)$$

$$L = (P^I - P^O)/P^I = 1 - U \quad (3)$$

RIES实际运行时,系统内的独立设备和耦合设备中都存在多种类型能源的消耗和转换。在基本物理架构和设备层面,RIES大多包括冷、热、电、气各种能源的生产、传输、存储以及各种类型的能源负荷<sup>[18]</sup>。一般RIES的典型物理架构如图2所示。图中,P2G为电转气设备; $P_e^I$ 、 $P_g^I$ 和 $P_h^I$ 分别为系统中电能、天然气和热能的输入量; $S_c$ 和 $S_h$ 分别为蓄电和储热装置中的储备量; $P_c^O$ 、 $P_h^O$ 和 $P_e^O$ 分别为系统冷、热、电负荷的输出量。

RIES的系统边界共分为输入(供给)端、转换环节和输出(负荷)端。基于图2得到多种设备能耗状况分析模型为:

$$\begin{matrix} \text{能源种类} \\ \begin{bmatrix} C_e^0 \\ C_g^0 \\ C_h^0 \end{bmatrix} \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} \text{输入的} \\ \text{各种能源} \\ \begin{bmatrix} P_e^I \\ P_g^I \\ P_h^I \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} \Rightarrow \dots \Rightarrow \\ \text{能源转换} \\ \text{传输过程} \end{matrix} \begin{matrix} \text{输出的} \\ \text{各种能源} \\ \begin{bmatrix} P_e^O \\ P_h^O \\ P_c^O \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4)$$

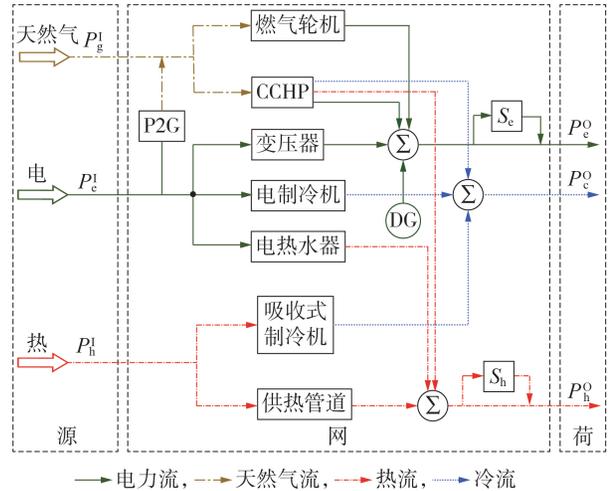


图2 RIES基本物理架构示意图

Fig.2 Physical architecture diagram of RIES

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1^O/P_1^I \\ P_2^O/P_2^I \\ \vdots \\ P_n^O/P_n^I \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (P_1^I - P_1^O)/P_1^I \\ (P_2^I - P_2^O)/P_2^I \\ \vdots \\ (P_n^I - P_n^O)/P_n^I \end{bmatrix} \quad (5)$$

各个能耗设备的能源利用率                      各个能耗设备的能源损耗率

其中, $C_e^0$ 、 $C_g^0$ 和 $C_h^0$ 分别为系统中电能、天然气和热能。

## 2 基于改进Petri网的能耗优化模型

RIES中能源类型、能量运输管道网络和能耗设备是3个关键的因素。除此以外,本文所建推理模型还考虑了运行过程中与能耗相关的其他因素(如时间因素、外部计算控制和设备操作等),并能够清晰地表示各种设备的耦合关联关系和能量流分布情况。

由于RIES中所含设备众多,对同样的负荷需求,理论上有多条供能途径;本文以年一次能源消耗量最低为目标,综合考虑年总费用和污染物排放量,并应用Petri网对其进行图形化建模,通过对推理模型进行分析计算,从而得到满足负荷需求的最优RIES供能路径。

### 2.1 带时间约束的模糊有色Petri网的基本原理

传统的模糊有色Petri网<sup>[19]</sup>是在普通Petri网的基础上对其模糊有色化,并且在每一个模糊有色变迁上都标有一个阈限函数 $\mu$ ;本文考虑RIES中的时间约束特性,利用带时间约束的模糊有色Petri网TFPCN(Temporal Fuzzy Colored Petri Net)对RIES供能路径进行能耗优化分析。所建模型中每个变迁赋予不同的时序区间,若时间约束为 $[0,0]$ ,则该变迁为瞬时变迁<sup>[20]</sup>,对应综合能源系统中的电能部分,在Petri模型中用实心矩形表示;其他热能、气能、冷能的传输具有不同的延时特性,其对应的变迁不是瞬时变迁,用空心矩形表示。

TFCPN 的基本推理模型图如图 3 所示,其构成的 3 个主要元素为带有标识的模糊有色库所和变迁以及连接它们的有向弧。在 RIES 中分别用不同颜色库所代表不同类型能源,变迁的激发表示能源之间的转换和传输。

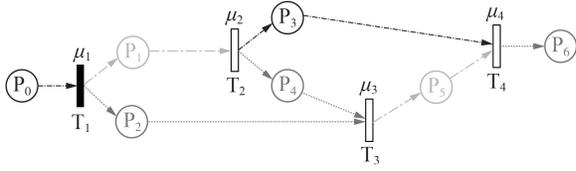


图 3 TFCPN 的基本推理模型

Fig.3 Basic inference model of TFCPN

### 2.2 RIES-TFCPN 模型的形式化定义

本文构建的 RIES-TFCPN 优化模型如下:

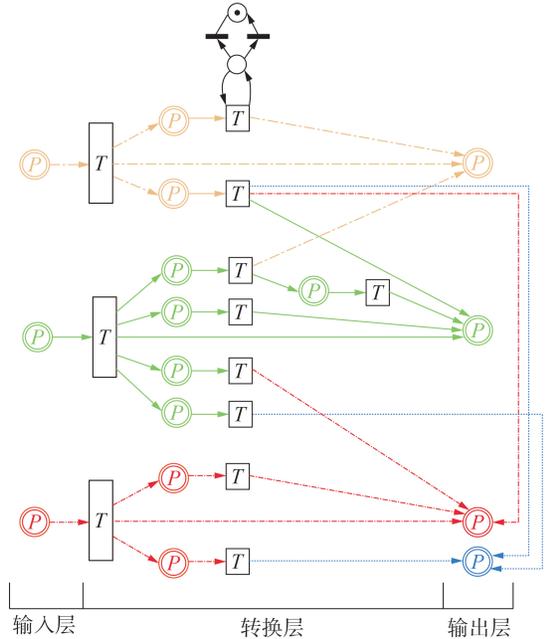
$$f_{TFCPN} = (P, T, G, Y_1, Y_0, \mathbf{M}_0(P), \mathbf{T}_p, \mathbf{D}_R) \quad (6)$$

其中,  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$  为 TFCPN 模型中库所的集合,代表实际 RIES 中不同类型的能源以及能源设备,每一类型的能源由不同颜色表示;  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$  为变迁集合,且遵循 Petri 网基本规则 ( $T \cap P = \emptyset$ ),即  $T$  集合与  $P$  集合不相交,代表实际系统中一系列或单个设备连续的工作过程,如能量分配或能量转换;  $G = \{G_1, G_2, \dots, G_k\}$  为控制变迁激发的函数集合,在实际中用于控制系统能量的变化;  $Y_1$  为  $P \times T$  上的模糊关系函数,表征 TFCPN 模型中库所到对应变迁上的连接强度  $\alpha_k$  和输入量  $i_k$ ,  $Y_1(i_k, \alpha_k)$  和  $\alpha_k$  可根据实际需求采用不同的定义方式,且当  $\alpha_k$  代表“能源运输网络的最大传输率”时  $Y_1(i_k, \alpha_k) = \min\{i_k, \alpha_k\}$ ,当  $\alpha_k$  代表“设备或管道传输损耗率”时  $Y_1(i_k, \alpha_k) = i_k \alpha_k$  为表征能源传输损耗的函数;  $Y_0$  为  $T \times P$  上的模糊关系函数,其具体含义与  $Y_1$  类似,不再赘述;  $\mathbf{M}_0(P)$  为库所的标识矩阵,可以定量地表示 RIES 用能情况,在模型初始运行时给每个离散库所分配一个非负数托肯来代表设备处于运行或者停止状态,并分配一个连续量来表示系统能耗活动中能源消耗量与转化量以及负荷端的用能量,  $\mathbf{M}_i$  为模型中  $\mathbf{M}_0(P)$  矩阵的列向量,对应库所  $P_i$  中的标识,且时刻  $\tau$  的标识值记为  $\mathbf{M}_i(\tau)$ ,模型中离散库所集  $P_d$  和连续库所集  $P_c$  中的标识分别记为  $\mathbf{M}_d$  和  $\mathbf{M}_c$ ;  $\mathbf{T}_p = [\mathbf{T}_{p1} \ \mathbf{T}_{p2} \ \dots \ \mathbf{T}_{pn}]$  为库所的时间区间记录矩阵,各元素表示库所中事件发生的时间点约束区间的列向量,即 RIES 中各设备进行能源转换和传输的时间点约束;  $\mathbf{D}_R = [D_{R1} \ D_{R2} \ \dots \ D_{Rq}]$  为变迁的时间区间向量,各元素表示模型中库所和对应变迁之间的时序区间约束,表征不同类型能源的供能延时特性<sup>[21]</sup>。

### 2.3 推理模型图形化建模

与传统 Petri 网类似, TFCPN 采用图形化的建模

方式。不同的是, TFCPN 模型在结构上仅反映系统的配置情况。从纵向来看,模型主要分为输入结构、转换结构和输出结构 3 个层面。从横向来看,每种类型的用能负荷都包含多条供能推理路径,每条供能路径由供能源、转换设备和用能负荷组成。针对图 2 所示的典型 RIES 结构建立其 TFCPN 模型如图 4 所示。



“O” — 离散控制结构, “I” — 离散设备的启停操作, “·” — 标识

图 4 TFCPN 推理模型

Fig.4 Inference model of TFCPN

### 2.4 TFCPN 模型推理计算规则

(1) 变迁的激发。

要使变迁  $O_j$  ( $O_j$  为变迁  $T_j$  输出库所的集合) 可以被激发, 则  $T_j$  此时使能且满足:  $\forall P_i \in O_j$ , 使  $|O(P_i, T_j) + \mathbf{M}_i(\tau)| \leq K_i$ , 即变迁  $T_j$  在  $P_i$  的当前标识  $\mathbf{M}_i(\tau)$  下是可以被激发的, 其中  $O(P_i, T_j)$  为模型中库所和变迁对应的输出对象总集,  $K_i$  为对应标识激发的使能值。同时按照相应的时限约束进行下一步计算。

(2) 标识的计算。

能耗运算过程不仅包含能源的量变, 而且包括不同类型能源之间的转换, 即能源的质变。能源的量变由对应各个库所中标识的变化来体现, 能源的质变由模型中库所及变迁的颜色变化来体现。随着各个变迁通过控制结构被激发, 各库所中标识数目也发生相应的变化<sup>[21]</sup>。当  $T_j$  在  $t + \Delta t$  时刻激发后, 库所标识数目的同步更新规则如下:

$$\mathbf{M}_i(t + \Delta t) = \begin{cases} \mathbf{M}_i(t) - I(P_i, T_j) & \forall P_i \in I_{P_j} \\ \mathbf{M}_i(t) + I(P_i, T_j) & \forall P_i \in O_{P_j} \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $I(P_i, T_j)$  为模型中库所和变迁对应的输入对象总集;  $I_{P_j}$  为  $T_j$  的输入对象集;  $O_{P_j}$  为  $T_j$  的输出对象集。

(3) 冷、热的供能时序性能耗分析计算。

RIES 中冷、热能源与电能的传输特性以及时间尺度不同, 电能的传输为瞬时完成, 在计及其状态变化时都处于同一个时间断面<sup>[22]</sup>; 但是冷、热能的传输速率较慢, 往往能量的传输会横跨多个时间断面, 所以当不同类型的能源系统发生故障时, 对用户造成能源缺供时的体验不同。电能一旦中断供应, 用户将立马停电; 冷、热负荷如果中断供能, 由于用户侧的温度为连续变量, 不会发生突变, 所以其缺供能源的反馈具有滞后性, 即冷热负荷允许短时间段内中断供能。

为了使计算更加贴近实际情况, 本文在应用 Petri 网对冷、热子系统进行能耗分析计算时, 如果负荷库所的阈值温度处于用户可接受范围内, 对应的变迁就不会被激发, TFCPN 模型中的时间区间向量  $D_R$  相应发生变化。

以热水系统为例, 对热系统进行能耗计算时, 首先, 将所选典型日平均分为  $D$  个时间段, 则每  $i_d (i_d = 1, 2, \dots, D)$  个时间段内的热水负荷总能耗  $E_h(i_d)$  为:

$$E_h(i_d) = \frac{P(i_d)c(t_d - t_{in}) + R(t(i_d) - t_a(i_d))}{\xi} \quad (8)$$

其中,  $P(i_d)$  为第  $i_d$  个时间段内的热水使用量;  $c$  为水的比热容;  $t_d$  为用户期望的热水温度;  $t_{in}$  为进入热水系统的冷水温度;  $R$  为热容器的热阻;  $t(i_d)$  为第  $i_d$  个时间段内的热水平均温度;  $t_a(i_d)$  为第  $i_d$  个时间段内的环境平均温度;  $\xi$  为热水负荷对应的比例系数。

### 3 基于 TFCPN 的能耗优化过程

#### 3.1 RIES 能耗优化目标函数

(1) 年总能耗量。

RIES 中设备的能耗按照设备输出 1 kgce 所需要的初始能源量计算, 记为设备单耗量。在对 RIES 进行能耗分析计算时, 应列出各台设备能源消耗的单耗量, 可得  $v_{ij} = z_{ij}v_i$ , 其中  $z_{ij}$  为第  $i$  台设备的第  $j$  种能源的单耗量,  $v_{ij}$  为第  $i$  台设备的第  $j$  种能源的能耗率,  $v_i$  为第  $i$  台设备的能耗率。

RIES 中各种能源的计量单位不一致, 为统一计算, 本文将各种能源按照 1.1 节中的能耗分析基本原理, 统一换算为标准煤的形式。然后利用能耗系数计量矩阵记录系统运行过程中的能源消耗情况, 即  $W(p_c^{n_0}, T_c) = [z_{ij}]_{n_0 \times m_0}$ , 其中  $p_c^{n_0}$  为 TFCPN 模型中对应的记录库所的行向量,  $T_c$  为记录时间的列向量,  $n_0$  为用能设备总数,  $m_0$  为系统能源消耗类型总数。

RIES-TFCPN 中, 第  $i$  台设备的能耗总量  $E_{fi}$  为:

$$E_{fi} = \sum_{j=1}^{m_0} z_{ij}v_i \quad (9)$$

在一个供能宏周期内, RIES 能耗总量  $E_f$  为:

$$E_f = \sum_{i=1}^{n_0} E_{fi} \quad (10)$$

在同一个供能宏周期内, 不同供能路径累计的能耗量越小, 对应的供能方式越节能。

(2) 经济成本。

本文在能耗优化过程中同时考虑每条供能路径的运行成本和污染物排污量, 年总费用  $C_{total}$  为年等额投资成本  $C_{inv}$  和年运维成本  $C_{ope}$  之和<sup>[22]</sup>, 具体计算过程见附录 A。

(3) 环境指标。

本文选择二氧化碳排放量为衡量其环境效益的指标, 则污染物排放总量  $R_f$  的计算公式为:

$$R_f = \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^{m_0} \mu_j E_j^h \quad (11)$$

其中,  $H$  为设备的年总运行小时数;  $E_j^h$  为第  $j$  种类型能源在第  $h$  小时的使用量;  $\mu_j$  为第  $j$  种能源的单位排放系数。太阳能、风电等为无污染能源, 其值为 0。

#### 3.2 运行约束条件

系统应满足基本的能量平衡约束和设备在每个时间段内的运行状态约束, 以及电、热、气、冷网络功率平衡约束和耦合节点功率平衡约束。

(1) 运行状态约束。

$$S_i^t \in \{0, 1\} \quad (12)$$

其中,  $S_i^t$  为第  $i$  台设备在  $t$  时刻的运行状态。

(2) 输出功率约束。

$$P_i^t \leq P_i^{\max} \quad (13)$$

其中,  $P_i^t$  为第  $i$  台设备在  $t$  时刻的实际输出功率;  $P_i^{\max}$  为第  $i$  台设备输出功率的最大值<sup>[23]</sup>。

(3) 能量平衡约束。

在每一时刻, 电能需要满足如下约束:

$$\sum_{i=1}^{n_0} (P_{e,i}^0 - P_{e,i}^1) = P_{e,i}^{\text{dem}} \quad (14)$$

热能和冷能需要满足如下约束:

$$\sum_{j=1}^{m_0} \sum_{i=1}^{n_0} (P_{j,i}^0 - P_{j,i}^1) \geq P_j^{\text{dem, av}} \quad (15)$$

其中,  $P_{e,i}^0$ 、 $P_{e,i}^1$  和  $P_{e,i}^{\text{dem}}$  分别为第  $i$  台设备的输出功率、输入电功率和电负荷需求;  $P_{j,i}^1$ 、 $P_{j,i}^0$  分别为第  $i$  台设备的第  $j$  类能源的输入功率和输出功率;  $P_j^{\text{dem, av}}$  为系统中第  $j$  类能源平均用能需求。

#### 3.3 求解步骤

本文利用 TFCPN 模型与加权和<sup>[24]</sup>相结合的方法对 RIES 进行优化求解, 在 Petri 网运算过程中, 应用熵权分析法<sup>[25]</sup>对能耗、费用和污染物排放的标识赋予相应的权重值, 并利用效用系数分析的决策方

法得到最优供能方案。求解流程图如图 5 所示。

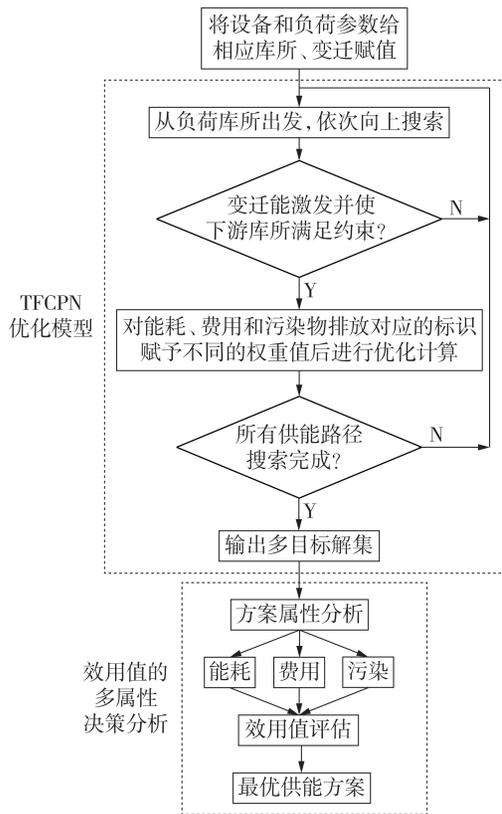


图 5 求解流程图

Fig.5 Flowchart of calculation

在求解能耗目标时,根据能耗计算规则,令设备的单耗量  $z_{ij}$  求和部分等于  $u_i$ , 即  $u_i = \sum_{j=1}^{m_0} z_{ij}$ , 则节能目标函数可转化为线性规划标准形式  $E_f = w$  求解。在求解费用和污染物排放目标时,在优化模型中加入以下约束:

$$\begin{cases} x + x_{\max}(b-1) \leq y \leq x \\ x_{\min}b \leq y \leq x_{\max}b \end{cases} \quad (16)$$

此时,一个连续变量  $x$  和二进制变量  $b$  的积可以用一个变量  $y = bx$  表示,由此可以将费用和污染物排放函数转化为线性目标进行求解。

## 4 实例仿真

### 4.1 系统模型和设备参数

本文对上海某一实际综合园区进行仿真计算,该园区内安装有光伏发电、电热锅炉、燃气锅炉、燃气轮机、吸收式制冷装置、电制冷装置以及一定容量的储热和储电装置,园区的基本物理架构如图 6 所示。应用 DeST 对园区负荷进行逐时模拟得到全年负荷曲线,并选择春、夏、秋、冬 4 个典型日的负荷数据代表各个季节每日负荷需求,对冷、热负荷的时序能耗分析时,采用 15 min 为一个时间段进行计算。

综合园区的太阳辐射密度和典型日负荷数据如

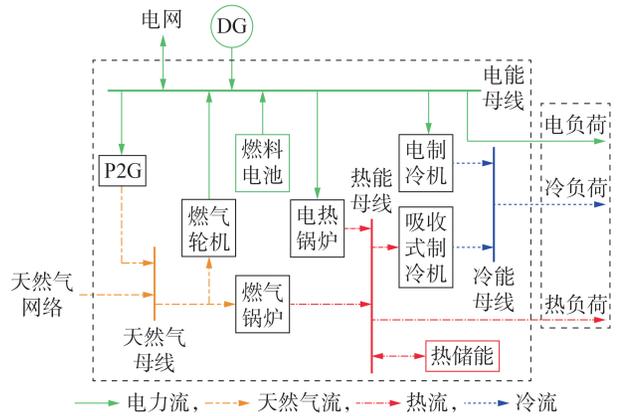


图 6 综合园区物理架构示意图

Fig.6 Schematic diagram of physical structure of comprehensive park

附录 B 中图 B1 所示,其中各台设备的经济技术参数如附录 B 中表 B1 和 B2 所示,冷、热负荷能耗参数如附录 B 中表 B3 所示。电、气的实时价格如附录 B 中表 B4 所示,对应的峰谷平时段的具体时间如附录 B 中表 B5 所示。计算时,天然气热值取 10 kW/h。能源的污染物排放系数如附录 B 中表 B6 所示。

### 4.2 优化过程结果及分析

#### (1) 模型建立。

园区的能耗环节 TFCPN 推理模型如图 7 所示,模型中每个变迁都有一个与变迁  $T_1$  相同的离散控制结构,通过控制模型中变迁的激发和相应库所中标识的变化,表示出园区负荷供能方式的变化情况。图 7 中,  $P_1 - P_3$  为综合园区 TFCPN 能耗推理模型中各能源的输入库所;  $P_4 - P_{11}$  为模型中各转换设备库所;  $P_{12} - P_{14}$  为模型中的负荷需求库所。负荷库所和供能母线的能耗系数计量矩阵  $W^N$  (单位为 kgce) 为:

$$W^N = \begin{matrix} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ \begin{matrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} P_{ei_0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_{bi_0} & 0 \\ 0 & 0 & P_{ci_0} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (17)$$

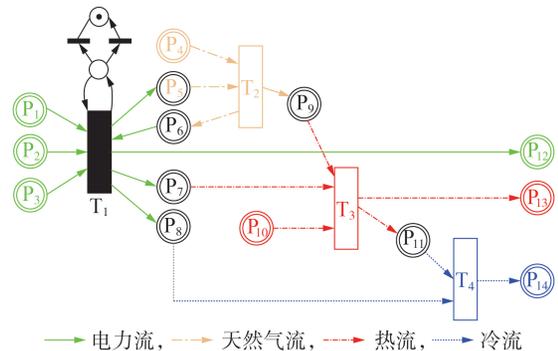


图 7 综合园区 TFCPN 能耗推理模型

Fig.7 Energy consumption inference model of comprehensive park based on TFCPN

其中,  $P_{e_i_0}$ 、 $P_{h_i_0}$  和  $P_{c_i_0}$  分别为每个时间段的电、热和冷负荷需求。

TFCPN 模型中各库所和变迁的具体含义如附录 B 中表 B7、B8 所示。

由于热储能和蓄电池的经济成本较高,而且蓄电池不利于回收,所以不作为系统常规供能方式,仅当系统发生故障时作为备用能源。由于 DG 污染物排放量可以近似为 0,所以优先采用此种方式给用户供能,但是由于 DG 出力的不确定性,需要采用其他方式与其配合供能。

### (2) 优化过程和结果。

结合实际综合园区的运行情况,应用熵权分析法得到系统年总费用、污染物排放量和能耗的权重系数分别为 0.5、0.3、0.2。然后,结合 TFCPN 模型的推理计算规则以及加权求和的方法,计及 3.2 节所述实际运行约束条件,并考虑冷、热负荷能耗的时序性,对园区进行能耗优化仿真计算,求解得到年总费用与年总能耗量、年污染物排放量的 Pareto 最优解集如图 8 所示。

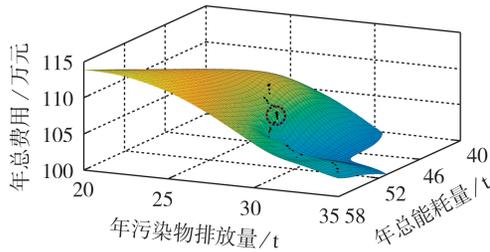


图 8 RIES 多目标优化的帕累托前端

Fig.8 Pareto front end of RIES multi-objective optimization

根据实际园区对费用、能耗和污染排放的性能需求及对应的约束条件,可以限定目标函数的取值范围,从而选取图 8 中符合 RIES 多目标优化的 12 种供能方案,即图中圆圈围内区域。12 种供能方案的系统配置如附录 B 中表 B9 所示,根据本文所建 TFCPN 模型,在考虑和不考虑冷、热负荷供能的时序性情况下,分别计算得到各个方案对应的能耗、费用和污染物排放量目标值,如附录 B 中表 B10 和表 B11 所示,从而得到 2 种情况的计算结果差值,如表 1 所示。

由表 1 可知,考虑冷、热负荷的时序性时 RIES 的能源利用率更高,而费用值、污染物排放量和能耗量更低,即根据本文所建立的 TFCPN 模型,考虑冷、热负荷的时序性优化得到的供能方案的能效更好。

同时为了使各个目标值之间的对比关系更加明显,得到 12 种方案的多个目标值如图 9 所示。由图可知,方案  $L_1$ — $L_{12}$  的投资总费用依次递增,污染物排放量依次递减,但能耗量不是单向变化。很明显,方案  $L_1$  的经济性最好,但环保性不佳;同理,方案  $L_{10}$  环保性较好,但投资成本过高。因此,在建设综合园

表 1 考虑和不考虑冷、热能的供能时序性结果差值

Table 1 Difference results of energy supply sequence with and without considering cooling and heating energy

方案	费用差值 / 万元	排放量差值 / t	能耗差值 / t	能源利用率差值 / %	购电差值 / (MW·h)	天然气差值 / (MW·h)
$L_1$	12	0.9	0.9	-0.6	1.5	9
$L_2$	5	1.2	2.5	-2.1	2.0	5
$L_3$	16	1.2	1.2	-1.7	2.3	3
$L_4$	18	1.1	1.3	-2.4	1.5	-2
$L_5$	15	0.6	0.8	-0.4	2.2	24
$L_6$	12	1.0	2.3	-0.4	2.5	31
$L_7$	19	1.9	1.8	-1.2	2.0	31
$L_8$	22	0.9	0.8	-0.7	1.0	42
$L_9$	2	1.2	0.9	-0.6	0.7	47
$L_{10}$	44	0.9	1.1	-0.8	1.0	50
$L_{11}$	47	1.2	1.1	-1.4	1.8	32
$L_{12}$	48	1.3	0.8	-1.2	0.8	29

区时,应该结合当地实际情况对各方面因素进行全面考虑,从而选择出最适合的供能方案。

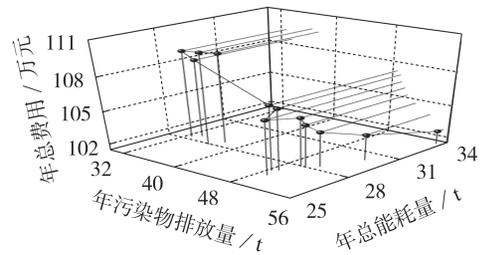


图 9 各供能方案的目标值

Fig.9 Target values of each energy supply scheme

为了得到综合评价指标最优的供能方案,本文设置优秀、好、一般、较差、差 5 个不同的评价级别对各属性进行评估。评估结果如附录 B 中表 B12 所示。为了使综合评估结果更加直观,本文通过效用系数分析法将 12 种方案的属性评价结果进一步映射为对应的最大、最小和平均效用值,如表 2 所示。

表 2 方案  $L_1$ — $L_{12}$  的最大、最小和平均效用值

Table 2 Maximum, minimum and average utilities of  $L_1$ — $L_{12}$

方案	平均效用值	最大效用值	最小效用值
$L_1$	0.55	0.59	0.51
$L_2$	0.53	0.57	0.49
$L_3$	0.57	0.61	0.53
$L_4$	0.65	0.69	0.61
$L_5$	0.61	0.65	0.57
$L_6$	0.59	0.63	0.55
$L_7$	0.58	0.62	0.54
$L_8$	0.55	0.59	0.51
$L_9$	0.56	0.60	0.52
$L_{10}$	0.62	0.66	0.58
$L_{11}$	0.61	0.65	0.57
$L_{12}$	0.58	0.62	0.54

由表 2 可知,综合考虑能耗、经济 and 环境污染

指标时, $L_4$ 为综合能耗最优的供能方式。并且在着重考虑经济性时,应优先选择 $L_1$ ;着重考虑环境因素时,由于燃料电池系统污染物排放量少,优先选择 $L_9$ — $L_{12}$ 为主要供能方式。

## 5 结论

本文针对RIES能耗过程进行了深入的研究,应用TFPCN方法建立了系统能耗推理模型,并在满足负荷需求和基本运行条件下,考虑了冷能、热能的供能时序性,从综合能源系统运行成本、污染物排放量和一次能源消耗量3个方面对系统供能路径进行优化,通过对实际算例系统进行能耗仿真分析,得到了系统的最优供能方式;应用改进Petri网的方法对RIES进行优化建模,不仅能清晰直观地分析系统的多条供能路径,并结合其推理规则可以快速准确搜索到最优的供能路径,从而达到节能减排的效果。在当前算例条件下,研究结果表明:

(1)当RIES在实际运行中着重考虑经济性指标时,可以优先选择以燃气内燃系统为主供能方式;

(2)当RIES在实际运行中着重考虑环境污染指标时,应优先选择使用燃料电池系统为主供能方式;

(3)DG系统在实际运行时,由于其能耗可近似为0,应优先选择其作为常规供能方式;

(4)考虑冷、热负荷的时序性时RIES的能源利用率更高,而费用值、污染物排放量和能耗量更低。

在实际建设综合园区时,应该结合当地实际情况对各方面因素进行全面考虑,从而选择出最适合的供能方式。在后续的研究中,将着重考虑如何建立Petri网物理分析模型,来描述设备损耗与传输功率的变化关系,进而考虑源端与负荷端出力随机性和能源品位差异,探讨RIES能源耦合方式以及电网、热网、气网的随机可靠性问题。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 郝然,艾芊,朱宇超,等. 基于能源集线器的区域综合能源系统分层优化调度[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):171-178.  
HAO Ran, AI Qian, ZHU Yuchao, et al. Hierarchical optimal dispatch based on energy hub for regional integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 171-178.
- [2] 甘霖,陈瑜玮,刘育权,等. 含可再生能源的微网冷-热-电多能流协同优化与案例分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):275-281.  
GAN Lin, CHEN Yuwei, LIU Yuquan, et al. Coordinative optimization of multiple energy flows for microgrid with renewable energy resource and case study[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 275-281.
- [3] 熊文,刘育权,苏万煌,等. 考虑多能互补的区域综合能源系统多种储能优化配置[J]. 电力自动化设备,2019,39(1):118-126.  
XIONG Wen, LIU Yuquan, SU Wanhuang, et al. Optimal configuration of multi-energy storage in regional integrated energy system considering multi-energy complementation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 118-126.
- [4] KOU Y N, ZHENG J H, LI Zhiqiang, et al. Many-objective optimization for coordinated operation of integrated electricity and gas network[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(3): 350-363.
- [5] 程洁. 基于冷热电三联供系统的综合能源系统设计与研究[D]. 北京:华北电力大学,2017.  
CHENG Jie. The design and research of comprehensive energy based on the CCHP system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [6] 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.  
WANG Chengshan, HONG Bowen, GUO Li, et al. General modeling method for optimal dispatching of cold, hot and electric power supply micromicronetworks[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 26-33.
- [7] ZHOU Z, LIU P, LI Z, et al. An engineering approach to the optimal design of distributed energy systems in China[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 53(2): 387-396.
- [8] SMITH A, LUCK R, MAGO P J. Analysis of a combined cooling, heating, and power system model under different operating strategies with input and model data uncertainty[J]. Energy and Buildings, 2010, 42(11): 2231-2240.
- [9] MAGO P J, HUEFFED A K. Evaluation of a turbine driven CCHP strategies[J]. Energy & Buildings, 2010, 42(10): 1628-1636.
- [10] YANG Y, ZHANG S J, XIAO Y H. Optimal design of distributed energy resource systems based on two-stage stochastic programming[J]. Applied Thermal Engineering, 2017(110): 1358-1370.
- [11] 管霖,陈鹏,唐宗顺,等. 考虑冷热电存储的区域综合能源站优化设计方法[J]. 电网技术,2016,40(10):2934-2941.  
GUAN Lin, CHEN Peng, TANG Zongshun, et al. Integrated energy station design considering cold and heat storage[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2934-2941.
- [12] REN H, GAO W, ZHOU W, et al. Multi-criteria evaluation for the optimal adoption of distributed residential energy systems in Japan[J]. Energy Policy, 2009, 37(12): 5484-5493.
- [13] 陈玉林. 基于生命周期分析的冷热电联供系统优化设计[J]. 建筑科学,2014,30(2):30-34.  
CHEN Yulin. Optimal design of CCHP system based on life-cycle analysis[J]. Building Science, 2014, 30(2): 30-34.
- [14] 张涛,朱彤,高乃平,等. 分布式冷热电能源系统优化设计及多指标综合评价方法的研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3706-3713.  
ZHANG Tao, ZHU Tong, GAO Naiping, et al. Optimization design and multi-criteria comprehensive evaluation method of combined cooling heating and power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3706-3713.
- [15] 蒋润花,曾蓉,李洪强,等. 考虑气候条件及建筑类型等因素的分布式冷热电三联产系统的多目标优化及评估[J]. 中国电机工程学报,2016,36(12):3206-3214.  
JIANG Runhua, ZENG Rong, LI Hongqiang, et al. Multi-objective optimization and evaluation of distributed CCHP system considering influence of climate condition and building type [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3206-3214.
- [16] 陈柏森,廖清芬,刘涤尘,等. 区域综合能源系统的综合评估指标与方法[J]. 电力系统自动化,2017,41(1):1-9.  
CHEN Baisen, LIAO Qingfen, LIU Dichen, et al. Comprehensive evaluation indices and methods for regional energy sys-

- tem[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(1): 1-9.
- [17] 胡秀莲, 李爱仙, 陈海红, 等. 综合能耗计算通则: GB/T 2589—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [18] 白牧可, 唐巍, 闫涛, 等. 基于虚拟分区调度和二层规划的城市配电网光伏-储能优化配置[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5): 141-148.  
BAI Muke, TANG Wei, YAN Tao, et al. Optimization configuration of photovoltaic generation and energy storage in urban active power distribution grid based on scheduling of virtual partition and bi-level programming[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 141-148.
- [19] LUO X, KEZUNOVIC M. Implementing fuzzy reasoning Petri nets for fault section estimation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 676-685.
- [20] 尹久, 曹华军, 杜彦斌. 基于扩展一阶混合Petri网的机械制造系统碳流动态建模方法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(23): 152-160.  
YIN Jiu, CAO Huajun, DU Yanbin. Carbon flow dynamic modeling method for mechanical manufacturing system based on extended first-order hybrid Petri net[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(23): 152-160.
- [21] 赖晓平, 周鸿兴. 电力系统网络拓扑分析的有色Petri网模型[J]. 电网技术, 2000, 24(12): 5-10.  
LAI Xiaoping, ZHOU Hongxing. Colored Petri net model for power system network topology analysis[J]. Power System Technology, 2000, 24(12): 5-10.
- [22] 杜琳, 孙亮, 陈厚合. 计及电转气规划的综合能源系统运行多指标评价[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 110-116.  
DU Lin, SUN Liang, CHEN Houhe. Multi-index evaluation of integrated energy system with P2G planning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 110-116.
- [23] 程林, 张靖, 黄仁乐, 等. 基于多能互补的综合能源系统多场景规划案例分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 282-287.  
CHENG Lin, ZHANG Jing, HUANG Renle, et al. Case study on multi-scenario planning of integrated energy system based on multi-energy complementarity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 282-287.
- [24] 徐斌, 赵普猛, 黎莹. 区间参数压电智能桁架结构/控制的多目标非概率可靠性拓扑优化[J]. 振动工程学报, 2013, 26(2): 169-177.  
XU Bin, ZHAO Pumeng, LI Ying. Multi-objective non-probabilistic reliability topological optimization of interval parameter piezoelectric intelligent truss structure/control[J]. Journal of Vibration Engineering, 2013, 26(2): 169-177.
- [25] 王森, 王蕾, 陈飞, 等. 大数据环境下基于影子价格的配电网综合评价方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 94-101.  
WANG Sen, WANG Lei, CHEN Fei, et al. Comprehensive evaluation method of distribution network based on shadow price in big data environment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 94-101.

#### 作者简介:



胡列翔

胡列翔(1960—), 男, 浙江杭州人, 教授级高级工程师, 硕士, 主要研究方向为电网规划与建设管理(E-mail: hu\_liexiang@zj.sgcc.com.cn);

王蕾(1982—), 女, 河北邢台人, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为电网规划、电力系统分析(E-mail: wang\_lei1@zj.sgcc.com.cn);

董明枫(1995—), 男, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 通信作者, 主要研究方向为综合能源系统建模仿真及可靠性分析(E-mail: dmfs123@163.com)。

(编辑 李莉)

## Energy consumption modeling and optimal operation analysis of regional integrated energy system based on improved Petri net

HU Liexiang<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>2</sup>, DONG Mingfeng<sup>3</sup>, LI Hongzhong<sup>4</sup>, SUN Ke<sup>1</sup>, HU Zhesheng<sup>2</sup>

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China;

2. State Grid Zhejiang Economic Research Institute, Hangzhou 310008, China;

3. Jiangmen Power Supply Company of Southern Power Grid, Jiangmen 529000, China;

4. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** The regional integrated energy system contains many types of equipments and loads, and the mode of coupling among the equipments is diverse, so it is often difficult to determine the optimal power supply mode in actual operation. Based on the basic principle of energy consumption analysis and the specific modeling principle of temporal fuzzy colored Petri net, an energy consumption optimization inference model of regional integrated energy system is proposed. The proposed model optimizes the energy supply path of the integrated energy system from three aspects of operating cost, pollutant emissions and primary energy consumption under the load demand and basic operating conditions. The optimal energy supply mode under different demand scenarios is obtained by simulating the energy consumption of the system. Finally, the effectiveness and practicability of the proposed model are verified by taking a practical regional integrated energy system as an example.

**Key words:** regional integrated energy system; temporal fuzzy colored Petri net; energy consumption model; energy consumption rate; entropy method

## 附录 A

本文在能耗优化过程中同时考虑每条供能路径的运行成本和污染物排污量，年总费用  $C_{\text{total}}$  为年等额投资成本  $C_{\text{inv}}$  和年运维成本  $C_{\text{ope}}$  之和，基本计算公式为：

$$C_{\text{total}} = C_{\text{inv}} + C_{\text{ope}} \quad (\text{A1})$$

年等额投资成本  $C_{\text{inv}}$  是系统总投资成本通过等额分配到运行周期中的每一年的成本值，计算公式为：

$$C_{\text{inv}} = \sum_{i=1}^{n_0} (\omega_i c_i P_i^N + f_i c_i P_i^N) \quad (\text{A2})$$

其中， $P_i^N$  为设备的额定容量； $c_i$  为设备的单位投资成本； $f_i$  为设备的固定运行维护成本系数； $\omega_i$  为设备的年等额投资折算系数，其计算公式如式 (A3) 所示。

$$\omega_i = \frac{\sigma(1+\sigma)^N}{(1+\sigma)^N - 1} \quad (\text{A3})$$

其中， $\sigma$  为年利率； $N$  为设备的寿命。

年运维成本  $C_{\text{ope}}$  包括设备的运行维护费用  $C_{\text{om}}$  和燃料费用  $C_{\text{fuel}}$ ，计算公式为：

$$C_{\text{ope}} = C_{\text{om}} + C_{\text{fuel}} \quad (\text{A4})$$

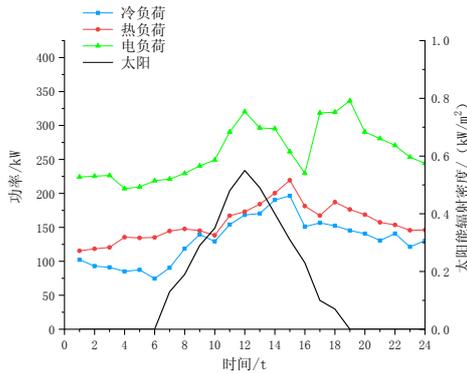
$C_{\text{om}}$  和  $C_{\text{fuel}}$  的计算公式分别为：

$$C_{\text{om}} = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^{n_0} a_i P_i^h \quad (\text{A5})$$

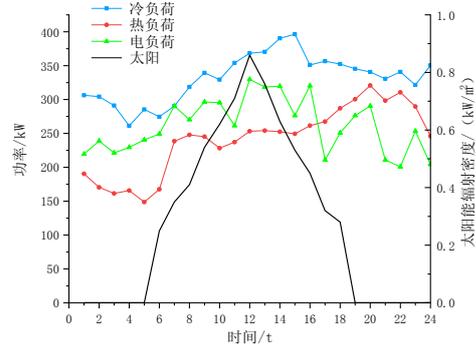
$$C_{\text{fuel}} = \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^{m_0} u_j^h E_j^h \quad (\text{A6})$$

其中， $H$  为设备的年总运行小时数； $a_i$  为设备的单位可变运行维护成本； $P_i^h$  为设备  $i$  在第  $h$  小时的出力值； $u_j^h$  为第  $j$  种能源在第  $h$  小时的价格； $E_j^h$  为第  $j$  种能源在第  $h$  小时的使用量。

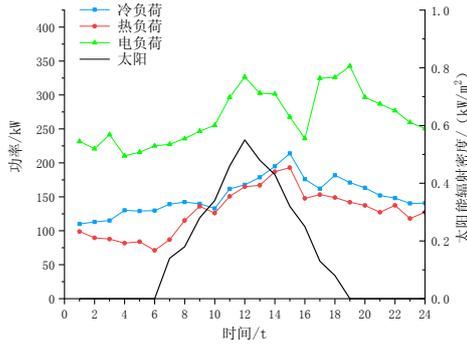
## 附录 B



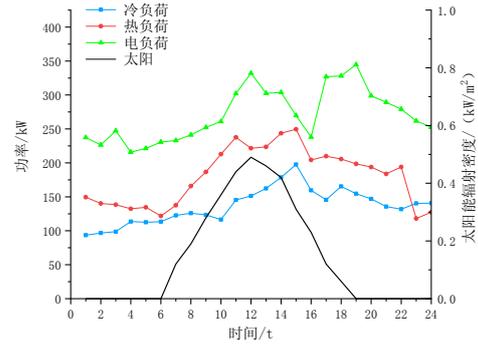
(a) 春季典型日



(b) 夏季典型日



(c) 秋季典型日



(d) 冬季典型日

图 B1 综合园区 4 个典型日的负荷曲线及太阳辐射密度变化曲线

Fig.B1 Load curve and solar radiation density curve of comprehensive area in four typical days

表 B1 设备的经济及技术参数

Table B1 Economic and technical parameters of equipments

设备	额定功率/kW	电效率	热效率 或 COP	单位投资成本 /(元 kW <sup>-1</sup> )	固定维护 成本系数	可变维护成本 /[元 (kW h) <sup>-1</sup> ]	寿命/a	经济运行负 载范围/%
电热锅炉	350	—	0.95	1 047	0.04	0.013	15	10~100
吸收式制冷机	210	—	1.2	789	0.03	0.013	15	5~100
电制冷机	200	—	3.5	598	0.03	0.013	15	10~100
燃气锅炉	200	—	0.85	782	0.04	0.026	15	26~100
燃气轮机	280	0.24	0.54	9 112	0.01	0.059	15	40~100
DG	300	0.15	—	12 000	0.02	0.039	25	30~100
P2G	260	—	0.65	9 350	0.02	0.042	20	28~100
燃料电池	240	0.85	—	11 240	0.03	0.038	10	32~100

注: COP 为设备性能系数。

表 B2 储能设备的经济及技术参数

Table B2 Economic and technical parameters of storage equipment

设备	储存消耗 功率/kW	输入功率/kW	输出功率/kW	单位投资/[元 (kW h) <sup>-1</sup> ]	固定维护 成本系数	可变维护成本/ [元 (kW h) <sup>-1</sup> ]	寿命/a
蓄电池	0.01	0.98	0.98	544	0.01	0.013	5
储热罐	0.02	0.95	0.95	102	0.01	0.026	20

表 B3 冷、热负荷能耗计算参数

Table B3 Calculation parameters of cooling and heating load energy consumption

$c/[J (kg \cdot ^\circ C)^{-1}]$	$t_d/^\circ C$	$t_m/^\circ C$	$R/(^\circ C in^2 \cdot W^{-1})$	$k/\%$	夏季室温/ $^\circ C$	冬季室温/ $^\circ C$
$4.2 \times 10^3$	70	21	0.684	31.6	26	25

表 B4 能源的峰谷平价格

Table B4 Energy price during peak, even and valley periods

时段	电价格/[元 (kW h) <sup>-1</sup> ]	气价格/(元 m <sup>-3</sup> )
峰时段	1.097	0.387
平时段	0.875	0.387
谷时段	0.539	0.387

表 B5 能源的峰谷平时间段  
Table B5 Peak, even and valley periods of energy

时段	具体时间
峰时段	[11:00—15:00), [19:00—21:00)
平时段	[07:00—11:00), [15:00—19:00), [21:00—24:00)
谷时段	[00:00—07:00)

表 B6 能源的污染物排放系数  
Table B6 Emission conversion factors of energy

能源类别	污染物排放系数/[kg (kW h) <sup>-1</sup> ]
电	0.968
天然气 (燃气锅炉 GB)	0.184
天然气 (燃气轮机 GT)	0.226

表 B7 系统 TFCPN 模型中变迁及其含义  
Table B7 Transition and its meaning in system TFCPN Model

变迁	含义	变迁	含义
T <sub>1</sub>	电力母线上的电能传输	T <sub>3</sub>	热源的热能传输
T <sub>2</sub>	气源的天然气传输	T <sub>4</sub>	冷源的冷气传输
T <sub>d1</sub>	开关控制结构	T <sub>d2</sub>	开关控制结构

表 B8 系统 TFCPN 模型中库所及其含义  
Table B8 The place and its meaning in the system TFCPN model

库所	含义	库所	含义
P <sub>1</sub>	DG	P <sub>d1</sub>	开关
P <sub>2</sub>	电网	P <sub>9</sub>	燃气锅炉
P <sub>3</sub>	燃料电池	P <sub>10</sub>	热储能
P <sub>4</sub>	天然气	P <sub>11</sub>	吸收式制冷机
P <sub>5</sub>	P2G	P <sub>12</sub>	电负荷
P <sub>6</sub>	燃气轮机	P <sub>13</sub>	热负荷
P <sub>7</sub>	电热锅炉	P <sub>14</sub>	冷负荷
P <sub>8</sub>	电制冷机	P <sub>d2</sub>	开关

表 B9 12 种供能方案的系统配置  
Table B9 System configuration of 12 Energy supply schemes

供能方案	DG	燃气轮机	电网购电	燃料电池	电热锅炉	燃气锅炉	电制冷机	吸收式制冷机
L <sub>1</sub>	✓	✓				✓	✓	
L <sub>2</sub>	✓	✓				✓		✓
L <sub>3</sub>	✓	✓			✓		✓	
L <sub>4</sub>	✓	✓			✓			✓
L <sub>5</sub>	✓		✓		✓		✓	
L <sub>6</sub>	✓		✓		✓			✓
L <sub>7</sub>	✓		✓			✓	✓	
L <sub>8</sub>	✓		✓			✓		✓
L <sub>9</sub>	✓			✓	✓		✓	
L <sub>10</sub>	✓			✓	✓			✓
L <sub>11</sub>	✓			✓		✓	✓	
L <sub>12</sub>	✓			✓		✓		✓

表 B10 考虑冷、热能的供能时序性计算结果

Table B10 Calculation results of energy supply sequence considering cooling and heating energy

方案	费用/万元	排放/t	能耗/t	能源利用率/%	购电/(MW h)	天然气/(MW h)
L <sub>1</sub>	1 02.7	55.4	33.6	80.2	12.7	82
L <sub>2</sub>	1 03.8	53.4	30.1	83.3	11.2	87
L <sub>3</sub>	1 04.6	51.4	28.4	84.2	10.2	86
L <sub>4</sub>	1 05.2	50.2	28.1	86.5	7.4	94
L <sub>5</sub>	1 05.8	49.8	28.3	70.2	6.4	98
L <sub>6</sub>	1 06.3	49.3	26.4	71.2	4.3	102
L <sub>7</sub>	1 06.9	49.1	27.1	73.6	4.4	101
L <sub>8</sub>	1 07.2	48.6	26.9	74.3	4.6	105
L <sub>9</sub>	1 08.5	33.6	28.6	73.2	3.7	116
L <sub>10</sub>	1 09.3	32.8	28.3	76.2	3.6	118
L <sub>11</sub>	1 09.5	37.5	28.5	78.6	3.9	123
L <sub>12</sub>	1 09.7	36.6	27.9	79.8	4.1	125

表 B11 不考虑冷、热的供能时序性计算结果

Table B11 Calculation results of energy supply sequence without considering cooling and heating energy

方案	费用/万元	排放/t	能耗/t	能源利用率/%	购电/(MW h)	天然气/(MW h)
L <sub>1</sub>	1 039	56.3	34.5	79.6	14.2	91
L <sub>2</sub>	1 043	54.6	32.6	81.2	13.2	92
L <sub>3</sub>	1 062	52.6	29.6	82.5	12.5	89
L <sub>4</sub>	1 070	51.3	29.4	84.1	8.9	92
L <sub>5</sub>	1 073	50.4	29.1	69.8	8.6	122
L <sub>6</sub>	1 075	50.3	28.7	70.8	6.8	133
L <sub>7</sub>	1 088	51.0	28.9	72.4	6.4	132
L <sub>8</sub>	1 094	49.5	27.7	73.6	5.6	147
L <sub>9</sub>	1 105	34.8	29.5	72.6	4.4	163
L <sub>10</sub>	1 137	33.7	29.4	75.4	4.6	168
L <sub>11</sub>	1 142	38.7	29.6	77.2	5.7	155
L <sub>12</sub>	1 145	37.9	28.7	78.6	4.9	154

表 B12 方案 L<sub>1</sub>—L<sub>12</sub> 的属性评价表Table B12 Attribute evaluation of L<sub>1</sub>-L<sub>12</sub>

方案	属性	评估结果				
		差	较差	一般	好	优秀
L <sub>1</sub>	费用	0	0	0.2	0.2	0.5
	污染	0.6	0.2	0.1	0	0
	能耗	0.2	0.2	0.5	0	0
L <sub>2</sub>	费用	0	0.2	0.1	0.6	0
	污染	0.3	0.3	0.3	0	0
	能耗	0.5	0.2	0.2	0	0
L <sub>3</sub>	费用	0	0	0.7	0.2	0
	污染	0.2	0.2	0.5	0	0
	能耗	0	0.4	0.3	0.2	0

续表

方案	属性	评估结果				
		差	较差	一般	好	优秀
L <sub>4</sub>	费用	0	0.1	0.6	0.3	0
	污染	0	0	0.6	0.1	0.2
	能耗	0	0.4	0.3	0.2	0
L <sub>5</sub>	费用	0.1	0.2	0.6	0	0
	污染	0	0	0.5	0.2	0.2
	能耗	0	0.2	0.4	0.1	0
L <sub>6</sub>	费用	0	0	0.2	0.2	0.5
	污染	0.6	0.2	0.1	0	0
	能耗	0.1	0.5	0.3	0	0
L <sub>7</sub>	费用	0.3	0.5	0.1	0	0
	污染	0	0	0.2	0.2	0.5
	能耗	0	0	0.3	0.3	0.3
L <sub>8</sub>	费用	0.7	0.2	0	0	0
	污染	0	0	0.2	0.2	0.5
	能耗	0	0.4	0.4	0.1	0
L <sub>9</sub>	费用	0.7	0.2	0	0	0
	污染	0	0	0.2	0.2	0.5
	能耗	0	0	0.1	0.2	0.5
L <sub>10</sub>	费用	0.7	0.2	0	0	0
	污染	0	0	0.2	0.2	0.5
	能耗	0	0	0.2	0.3	0.4
L <sub>11</sub>	费用	0.7	0.2	0	0	0
	污染	0	0	0.2	0.2	0.5
	能耗	0	0	0.3	0.3	0.3
L <sub>12</sub>	费用	0.7	0.2	0	0	0
	污染	0	0	0.2	0.2	0.5
	能耗	0	0.1	0.3	0.2	0.3