

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191321

# 考虑增量用电负荷分配的煤改电/煤改气联合分阶段规划

杨楠<sup>1</sup>, 隆舰艇<sup>1</sup>, 黄悦华<sup>1</sup>, 袁伟<sup>2</sup>, 刘颂凯<sup>1</sup>, 邢超<sup>3</sup>, 张磊<sup>1</sup>

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 国家能源集团荆门发电有限公司, 湖北 荆门 448000;  
3. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217)

**摘要:** 随着我国供暖改造规模的不断扩大, 如何根据各种供暖方式的优势及特点研究最优的清洁化供暖改造方案对于我国能源结构转型, 缓解环境危机具有重要意义。提出了一种考虑增量用电负荷分配的“煤改电”、“煤改气”联合分阶段规划方法。首先, 基于发电能源结构和清洁能源实际发电量构建了“煤改电”增量用电负荷分配模型, 精细化分析“煤改电”产生的新增电量。然后, 以“煤改电”、“煤改气”分阶段改造方案为决策变量, 以用户供暖支出的经济成本、供暖改造的环境成本和能源成本为优化目标, 构建“煤改电”、“煤改气”联合分阶段规划模型。最后, 利用向量序优化算法对模型进行求解。仿真结果验证了所提方法的正确性和有效性。

**关键词:** “煤改电”和“煤改气”; 增量用电负荷分配; 联合分阶段规划; 向量序优化

## Joint staged planning of coal-to-electricity/coal-to-gas considering incremental electricity load distribution

YANG Nan<sup>1</sup>, LONG Jianting<sup>1</sup>, HUANG Yuehua<sup>1</sup>, YUAN Wei<sup>2</sup>, LIU Songkai<sup>1</sup>, XING Chao<sup>3</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, Three Gorges University, Yichang 443002, China;  
2. National Energy Group Jingmen Power Generation Co., Ltd., Jingmen 448000, China;  
3. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China)

**Abstract:** With the continuous expansion of the scale of heating transformation in China, it is of great significance to study an optimal clean heating transformation scheme according to the advantages and characteristics of various heating modes for the transformation of energy structure and mitigation of an environmental crisis. In this paper, a joint staged planning method of "coal-to-electricity" and "coal-to-gas" considering incremental electricity load distribution is proposed. First, based on the energy structure of power generation and the actual power generation of clean energy, an incremental load distribution model of "coal to electricity" is constructed to analyze the incremental power generated by "coal to electricity" in detail. Then, taking the staged planning schemes of "coal-to-electricity" and "coal-to-gas" as decision variables, and taking the economic cost of user heating expenditure, the environmental and energy cost of heating reconstruction as optimization objectives, a joint staged planning model of "coal-to-electricity" and "coal-to-gas" is established. Finally, the model is solved by a vector order optimization algorithm. The correctness and validity of the proposed method are verified by the simulation results.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607104) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SDHZ2018112).

**Key words:** "coal-to-electricity" and "coal-to-gas"; incremental electricity load distribution; combined staged planning; vector order optimization algorithm

## 0 引言

为解决我国日益严重的环境问题<sup>[1]</sup>, 从 2017 年

起京津冀及周边地区“2+26”城市开始推动冬季供暖的“煤改电”、“煤改气”工作。然而, 由于相关规划缺乏科学指导, 供暖改造工作又导致我国天然气供需失衡, 造成了大范围的气荒, 严重影响了居民的正常生活。与此同时, 随着经济下行压力增大, 我国冬季电力负荷持续走低, 出现大规模的弃风弃

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51607104); 国家电网有限公司科技项目资助(SDHZ2018112)

光现象,造成了严重的清洁能源浪费<sup>[2]</sup>。因此,研究一种能够统筹考虑“煤改电”、“煤改气”的科学合理的规划方法,对于提升我国清洁能源消纳能力,改善能源结构,缓解环境危机都具有重要的理论与实际意义。

目前,关于供暖“煤改电”、“煤改气”规划的研究比较少见<sup>[3-6]</sup>。文献[3]结合太阳能和天然气能源供应系统的优点,研究提出了一种太阳能、天然气的联合供热系统,取得了显著的节能和经济效益。文献[4]从经济效益、社会效益和配电网运行状况等方面,提出了一种用于评估“煤改电”工程综合效益的评价指标体系。文献[5]针对京津冀地区冬季散煤采暖对大气环境造成严重污染的问题,提出了在农村地区采用空气源热泵的供暖方案,同时实现采暖和电力需求侧响应。文献[6]对大城市中的“煤改气”工程进行了详尽的费用-效益分析,并提出了相关措施及建议。上述文献虽然从多个角度对供暖改造问题开展研究,但大都针对单一的“煤改电”或者“煤改气”问题,而关于供暖“煤改电”、“煤改气”联合规划的研究,目前尚未见报道。

从前期工程实践来看,我国现有的供暖改造方法主要存在三个问题:1)供暖“煤改电”、“煤改气”项目是独立规划,无法充分发挥多种能源形式之间的互补优势和协同效益。以河北省为例,其首先是直接划定省内“煤改电”、“煤改气”供暖改造比例,然后再按照该比例进行独立的规划,由于改造比例划分缺乏科学依据,“煤改气”规模过大,直接导致该省在2017年出现严重气荒<sup>[7-9]</sup>。而另一方面,近几年来我国“三北”地区清洁能源的消纳问题日益严重,尤其在甘肃、新疆等地,2017年弃风弃光率均超过20%<sup>[10-11]</sup>。如果能够对“煤改电”、“煤改气”工程进行统筹规划,科学设计“煤改电”、“煤改气”比例,不仅可以有效缓解北方天然气供应紧张的局面,还可以提升我国的清洁能源消纳能力,实现能源结构的综合优化。2)对“煤改电”产生的新增电量缺乏精细化的分析和度量。我国供电来源较为多样,包括燃煤火电、水电、核电、风力发电、光伏发电等。只有尽量引导“煤改电”产生的增量负荷消纳风电、光伏等清洁能源,才能够改善我国供电结构,实现环境效益最大化。然而清洁能源发电量会受到装机容量和环境气候因素的制约,如果在“煤改电”过程中缺乏对新增电量的精确计算和分析,则有可能导致“煤改电”产生的增量负荷过大,反而促进化石能源的消耗,降低“煤改电”的环境效益。3)目前“煤改电”、“煤改气”规划方法较为粗放,大多考虑一次性规划,缺乏统筹整个规划周期

内综合效益的全局性视角。一次改造规模过大,是导致北方在短时间内出现天然气供应紧张的主要原因之一。事实上,天然气管道、清洁能源的建设、投产都不是一次性完成,而是分期、分批次实现。因此,只有分阶段、有序地推进“煤改电”、“煤改气”工程,才能够保证供暖负荷与能源发展相适应,实现整个规划周期内的经济、环境、能源等方面的综合效益最大化。

综上所述,本文从供暖负荷宏观分配的角度出发,通过精细化的分析“煤改电”的新增电量,综合考虑“煤改电”、“煤改气”的优势和特点,提出了一种考虑增量用电负荷分配的联合分阶段规划方法。首先基于发电能源结构和清洁能源实际发电量构建了“煤改电”新增电量分析模型,在此基础上,以“煤改电”、“煤改气”分阶段改造方案为决策变量,以用户供暖支出的经济成本、供暖改造的环境成本和能源成本为优化目标,构建“煤改电”、“煤改气”联合分阶段规划模型;然后,通过向量序优化算法对上述模型进行求解计算;最后,基于修改后的2017年河北省供暖改造工程实例验证了所提方法的正确性和有效性。根据所提的供暖改造策略对“煤改电”和“煤改气”进行联合分阶段规划,可以有效促进我国供暖改造与清洁能源的发展情况相适应,从而缓解天然气供给压力,提升电网对清洁能源的消纳能力,同时也可以提高供暖改造工程的综合效益。

与传统基于工程经验的规划方法相比,本文方法的创新性包括:1)提出了一种“煤改电”、“煤改气”分阶段联合规划的思路,从而使规划决策能够充分发挥不同供暖改造方式的优势和特点,计及规划周期内天然气供应能力和清洁能源装机规模的变化,有效提升了供暖改造的综合效益和规划科学性;2)本文方法通过在规划过程中对“煤改电”新增电量进行精确分析,精细化提高了系统的清洁能源消纳能力,从而为我国的能源结构变革提供理论指导。

## 1 “煤改电”新增电量分析方法

### 1.1 供暖改造的负荷转移过程

供暖改造本质上是对供暖负荷进行转移的过程。在以燃煤锅炉为基础的传统供暖系统中供暖负荷是一种燃煤负荷,政府通过基于“煤改电”、“煤改气”的供暖改造工程,将因供暖而产生的燃煤负荷转化为更为清洁环保的电负荷和天然气负荷,其具体过程如图1所示。

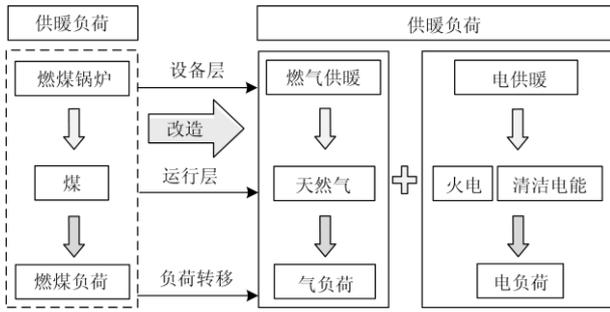


图1 供暖负荷转移过程图  
Fig.1 Heating load transfer process chart

### 1.2 “煤改电”环节中新增电量的分析模型

我国供电来源较为多样,包括燃煤火电、水电、核电、风力发电、光伏发电等。因此,为实现环境效益最大化,应当首先对“煤改电”产生的新增电量进行精细化的来源分析,然后以此为基础确定相应的“煤改电”规划方案,从而最大限度的消纳风电、光伏等清洁能源。同时考虑到在我国的电源结构中,燃煤火电是最主要的化石能源发电形式,因此在本文的计算和分析中,假设化石能源发电即为燃煤火力发电。

对于一个存在弃风、弃光现象的区域电网而言,在一个典型日内,“煤改电”增量用电负荷分配示意图如图2所示。

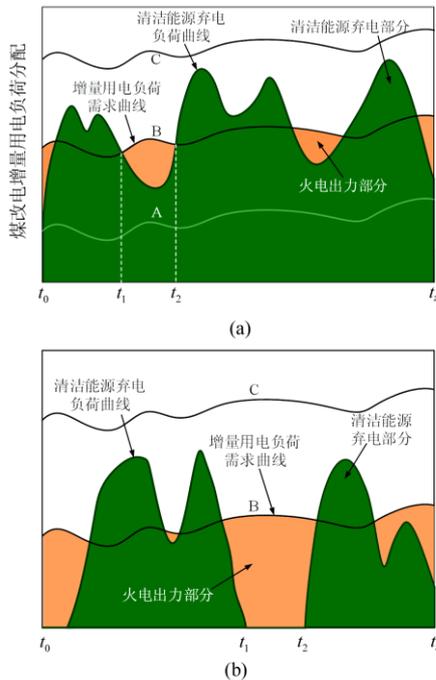


图2 “煤改电”增量用电负荷分配示意图  
Fig.2 Schematic chart of incremental electricity load distribution for “coal to electricity”

在图2中,清洁能源弃电负荷曲线为风电、光伏发电的最大可供负荷与其实际发电负荷的差值,而弃电负荷曲线与时间的积分就是该典型日的清洁能源弃电量,根据《可再生能源法》,这部分电量应当被优先消纳。而清洁能源弃电负荷曲线又分为两种典型情形(图2),前者是清洁能源在整个典型日所有时段内均有弃电情况发生,后者则是在典型日部分时段有弃电情况发生。从趋势上来看,由于“煤改电”增量用电负荷与“煤改电”的用户数量成正比关系,因而,在图2(a)中,增量用电负荷曲线可分为三种情形:1)整个典型日内的“煤改电”增量用电负荷均低于清洁能源弃电负荷,如曲线A所示,此时,系统所有“煤改电”增量用电负荷均可用于消纳清洁能源弃电负荷;2)典型日内的“煤改电”增量用电负荷只在部分时段低于清洁能源弃电负荷,如曲线B所示,此时,系统某些时段(如 $t_1 \sim t_2$ 时段)的部分“煤改电”增量用电负荷会由燃煤火电机组承担;3)整个典型日内的“煤改电”增量用电负荷均高于清洁能源弃电负荷,如曲线C所示,此时,清洁能源弃电负荷得到全额消纳,且剩余的增量用电负荷由燃煤火电机组承担。而在图2(b)中所示的情形中,仅存在前文所述的2)、3)两种情形,在此不再赘述。

为精确表征“煤改电”过程中新增电量的分配情况,定义“煤改电”新增火电电量系数为

$$\alpha = \frac{DW_c}{DW_z} \quad (1)$$

其中

$$\Delta W_z = \int_{t_0}^{t_z} P^E(t) dt \quad (2)$$

$$\Delta W_c = \int_{t_0}^{t_z} [P^E(t) - \min(P^E(t), P^W(t))] dt \quad (3)$$

式中: $\alpha$ 为“煤改电”新增火电电量系数; $DW_c$ 为“煤改电”产生的新增火电发电量; $DW_z$ 为“煤改电”产生的新增总发电量; $P^E(t)$ 为典型日内的“煤改电”总增量用电负荷; $P^W(t)$ 为区域电网内的清洁能源总弃电负荷。

区域内“煤改电”总增量用电负荷数学模型为

$$P^E(t) = N^E \times P_u^E(t) \quad (4)$$

式中: $N^E$ 为“煤改电”的用户数量; $P_u^E(t)$ 为单位“煤改电”用户的增量用电负荷,其取值根据典型日单位电供暖用户的供暖热负荷需求计算得到<sup>[12]</sup>。

考虑到对于一个区域电网而言(例如中国电网往往以省为单位划分区域电网),其清洁能源电厂存在区域内和区域外之分。因此,区域电网内的清洁能源总弃电负荷的数学模型为

$$P^W(t) = \sum_{i=1}^{l_1} P_i^{IW}(t) + \sum_{j=1}^{l_0} P_j^{OW}(t) \quad (5)$$

式中： $P_i^{IW}(t)$ 、 $P_j^{OW}(t)$ 分别为典型日区域内清洁能源电厂*i*的弃电负荷和区域外电厂*j*的弃电负荷； $l_1$ 、 $l_0$ 分别为区域内和区域外存在弃电问题的清洁能源电厂数量。

区域外清洁能源电厂向区域电网供电时，其供电负荷一般会受到输电断面热稳极限的制约。同时，本文假设区域内网架建设合理，区域内的清洁能源电厂供电不存在卡脖子现象。那么在典型日内某时刻下给区域电网供电的区域外各清洁能源电厂的弃电负荷为

$$P_j^{OW}(t_a) = \begin{cases} P_j^O(t_a), & P_j^O(t_a) \leq P_j^{OM} \\ P_j^{OM}, & P_j^O(t_a) > P_j^{OM} \end{cases}, j=1,2,L, l_0 \quad (6)$$

式中： $P_j^{OW}(t_a)$ 为典型日内 $t_a$ 时的区域外清洁能源电厂*j*的弃电负荷； $P_j^O(t_a)$ 为 $t_a$ 时各清洁能源电厂的最大弃电负荷； $P_j^{OM}$ 为区域外各清洁能源电厂输送到该区域的输电断面热稳极限。

综上，可得到“煤改电”新增火电电量系数为

$$\alpha = \frac{\int_{t_0}^{t_2} \left[ N^E P_u^E(t) - \min \left( N^E P_u^E(t), \sum_{i=1}^{l_1} P_i^{IW}(t) + \sum_{j=1}^{l_0} P_j^{OW}(t) \right) \right] dt}{\int_{t_0}^{t_2} (N^E P_u^E(t)) dt} \quad (7)$$

由式(7)可知，“煤改电”新增火电电量系数可以作为详细计算“煤改电”所带来的经济、环境、能源成本的重要参数。其与区域电网内的清洁能源总弃电负荷、单位“煤改电”用户的增量用电负荷及“煤改电”的用户数量有关。单位“煤改电”用户的增量用电负荷相对比较稳定，而在用电负荷不变的情况下，区域电网内的清洁能源总弃电负荷会随着清洁能源发电装机规模的增加而增加。

## 2 考虑增量用电负荷分配的煤改电、煤改气联合分阶段规划模型

本文考虑“煤改电”中的增量用电负荷分配情况，以“煤改电”、“煤改气”改造方案为决策变量，以经济、环境、能源的综合成本最小为优化目标，考虑天然气、供暖、输电网络的相关约束条件，构建“煤改电”、“煤改气”联合分阶段规划模型。

### 2.1 目标函数

“煤改电”、“煤改气”联合分阶段规划模型的目标函数为

$$L_{obj}(N_q^E, N_q^G) = \min \left( C^C(N_q^E, N_q^G), C^N(N_q^E, N_q^G), C^E(N_q^E, N_q^G) \right) \quad (8)$$

式中： $q$ 为供暖改造阶段，本文中以规划期内的各个年度进行阶段划分； $N_q^E$ 、 $N_q^G$ 分别为第 $q$ 阶段内改造完成的“煤改电”和“煤改气”的用户数量； $C^C$ 为经济成本指标； $C^N$ 为能源成本指标； $C^E$ 为环境成本指标。

#### 2.1.1 经济成本指标

定义经济成本指标为

$$C^C = C^{CI} + C^{CO} \quad (9)$$

式中： $C^{CI}$ 为用户承担的供暖设施改造投资成本； $C^{CO}$ 为规划周期内各种供暖设备的运行成本。

1) 投资成本主要包括：考虑政府补贴后，用户承担的设备购买安装、保暖改造、线路改造、管道铺设等总成本。考虑资金的时间价值<sup>[13-14]</sup>，其计算公式为

$$C^{CI} = \sum_{q=1}^Q \delta_q (C_q^{IE} + C_q^{IG}) = \sum_{q=1}^Q \delta_q \left( \sum_{p=1}^{N_q^E} C_{q,p}^{IE} + \sum_{h=1}^{N_q^G} C_{q,h}^{IG} \right) \quad (10)$$

其中

$$\delta_q = \frac{1}{(1+r)^q} \quad (11)$$

式中： $C_q^{IE}$ 、 $C_q^{IG}$ 分别为第 $q$ 阶段“煤改电”和“煤改气”的改造投资成本； $C_{q,p}^{IE}$ 、 $C_{q,h}^{IG}$ 分别为第 $q$ 阶段第 $p$ 户“煤改电”用户和第 $h$ 户“煤改气”用户的改造投资成本； $Q$ 为规划期内划分的阶段数； $\delta_q$ 为净现值转化因子； $r$ 为贴现率。

2) 运行成本主要包括：“煤改电”用户的购电成本、“煤改气”用户的购气成本、传统燃煤用户购煤成本。计算公式为

$$C^{CO} = \sum_{q=1}^Q \delta_q (C_q^{OE} + C_q^{OG} + C_q^{OF}) = \sum_{q=1}^Q \delta_q \left( \sum_{p=1}^{M_q^E} (g^{EP} W_{q,p}^P + g^{EV} W_{q,p}^V) + \sum_{h=1}^{M_q^G} g^G G_{q,h} + \sum_{l=1}^{N_q^F} g^F F_{q,l} \right) \quad (12)$$

其中

$$N_q^F = N_{q-1}^F - N_q^E - N_q^G \quad (13)$$

$$M_q^E = \sum_{q'=1}^q N_{q'}^E, M_q^G = \sum_{q'=1}^q N_{q'}^G \quad (14)$$

$$G_{q,h} = G_{q,h}^{aver} \cdot t_q, F_{q,l} = F_{q,l}^{aver} \cdot t_q \quad (15)$$

$$W_{q,p}^P = \int_0^{t_q} P_{q,p}^P dt, \quad W_{q,p}^V = \int_0^{t_q} P_{q,p}^V dt \quad (16)$$

式中:  $C_q^{\text{OE}}$ 、 $C_q^{\text{OG}}$ 、 $C_q^{\text{OF}}$  分别为第  $q$  阶段内“煤改电”、“煤改气”和燃煤供暖的运行成本;  $W_{q,p}^P$  和  $W_{q,p}^V$  分别为第  $q$  阶段整个供暖期内第  $p$  户“煤改电”用户的峰时段和谷时段用电量;  $G_{q,h}$ 、 $F_{q,l}$  分别为第  $q$  阶段第  $h$  户“煤改气”用户的用气量、第  $l$  户未改造用户的用煤量;  $G_{q,h}^{\text{aver}}$ 、 $F_{q,l}^{\text{aver}}$  为第  $q$  阶段第  $h$  户“煤改气”用户的日均用气量、第  $l$  户未改造用户的日均用煤量;  $t_q$  为第  $q$  阶段的供暖时长; 第  $g^G$ 、 $g^F$ 、 $g^{\text{EP}}$  和  $g^{\text{EV}}$  分别为天然气、煤、峰时段和谷时段用电的单位价格;  $M_q^E$ 、 $M_q^G$  分别为前  $q$  个阶段共完成改造的“煤改电”和“煤改气”的总用户数量;  $P_{q,p}^P$ 、 $P_{q,p}^V$  分别为第  $q$  阶段整个供暖期内第  $p$  户“煤改电”用户的峰时段电负荷和谷时段电负荷;  $N_q^F$ 、 $N_{q-1}^F$  分别为第  $q$ 、 $q-1$  阶段改造完成后剩余未改造的用户数量, 即仍采用燃煤供暖的用户。

### 2.1.2 能源成本指标

能源成本指标表征系统对不可再生的化石能源的消耗量, 其定义为

$$C^N = \lambda_G C^{\text{NG}} + \lambda_F (C_F^{\text{NF}} + C_E^{\text{NF}}) \quad (17)$$

式中:  $C^{\text{NG}}$ 、 $C_F^{\text{NF}}$ 、 $C_E^{\text{NF}}$  分别为规划期内“煤改气”用户消耗的天然气的量、燃煤供暖用户的煤耗量、燃煤火电机组发出“煤改电”所需电能而产生的煤耗量;  $\lambda_G$ 、 $\lambda_F$  分别为天然气和煤的折标准煤系数。

其中, 各种化石能源消耗量计算如式(18)所示。

$$\begin{cases} C^{\text{NG}} = \sum_{q=1}^Q \sum_{h=1}^{M_q^G} G_{q,h} \\ C_F^{\text{NF}} = \sum_{q=1}^Q \sum_{l=1}^{N_q^F} F_{q,l} \\ C_E^{\text{NF}} = \sum_{q=1}^Q (\gamma_F \cdot \alpha_q \cdot \Delta W_z^q) \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $\alpha_q$  为第  $q$  阶段的“煤改电”新增火电电量系数;  $\gamma_F$  为燃煤火电机组发出单位电量时的耗煤量;  $\Delta W_z^q$  为第  $q$  阶段内“煤改电”用户的总耗电量。

$\Delta W_z^q$  的计算公式为

$$\Delta W_z^q = \sum_{p=1}^{M_q^E} (W_{q,p}^P + W_{q,p}^V) \quad (19)$$

### 2.1.3 环境成本指标

与传统的燃煤供暖相比, 燃气供暖和电供暖排放相对较少的污染气体, 有较大的环境效益。针对我国目前严重的环境问题, 本文主要考虑的污染物包括  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$  和颗粒物。定义环境成本指标为<sup>[15-17]</sup>

$$C^E = \sum_{d=1}^{\xi} \sigma_d C_d^E \quad (20)$$

其中

$$C_d^E = C_E^{\text{NF}} e_d^E + C^{\text{NG}} e_d^G + C_F^{\text{NF}} e_d^F \quad (21)$$

式中:  $\xi$  为污染物的种类;  $\sigma_d$  为第  $d$  种污染物的排放权重因子<sup>[18]</sup>;  $C_d^E$  为第  $d$  种污染物的排放量;  $e_d^G$ 、 $e_d^F$  和  $e_d^E$  分别为燃气供暖单位气耗量、燃煤直接供暖单位煤耗量、燃煤火电机组单位煤耗量所排放的第  $d$  种污染物的量。

### 2.2 约束条件

#### 1) 天然气最大供给容量约束

对于一个区域而言, 受现阶段天然气开发能力、输气管道建设、非供暖用天然气负荷、外购力度等因素的影响, 每个供暖改造阶段内供暖用天然气容量受区域内外天然气最大供给容量的限制。

$$W_q^G \leq W_q^{\text{IG}} + W_q^{\text{OG}} \quad (22)$$

式中:  $W_q^{\text{IG}}$ 、 $W_q^{\text{OG}}$  分别为第  $q$  阶段区域内天然气最大供给容量和区域外天然气最大供给容量。

#### 2) 增量用电负荷约束

区域内各阶段“煤改电”增量用电负荷总量不得高于其最大供电负荷。

$$P_q^E + P_q^{\text{BE}} \leq P_q^{\text{ME}} \quad (23)$$

式中:  $P_q^E$  为区域内第  $q$  阶段“煤改电”增量用电负荷;  $P_q^{\text{BE}}$  为非供暖用电负荷;  $P_q^{\text{ME}}$  为最大供电负荷。

#### 3) 供暖负荷平衡约束

$$P_q^{\text{EH}} + P_q^{\text{GH}} + P_q^{\text{FH}} = P_q^{\text{L}} \quad (24)$$

式中:  $P_q^{\text{EH}}$ 、 $P_q^{\text{GH}}$ 、 $P_q^{\text{FH}}$  分别为区域内第  $q$  阶段的电供暖负荷、天然气供暖负荷和燃煤供暖负荷;  $P_q^{\text{L}}$  为区域内供暖负荷总需求。

## 3 基于向量序优化的规划模型求解

考虑增量用电负荷分配和经济、环境、能源多指标的供暖改造规划问题是一个典型的多目标优化问题, 而向量序优化算法具备序比较和目标软化的两个特点, 对本文模型具有很好的适用性<sup>[19-21]</sup>。求解流程如图 3 所示。

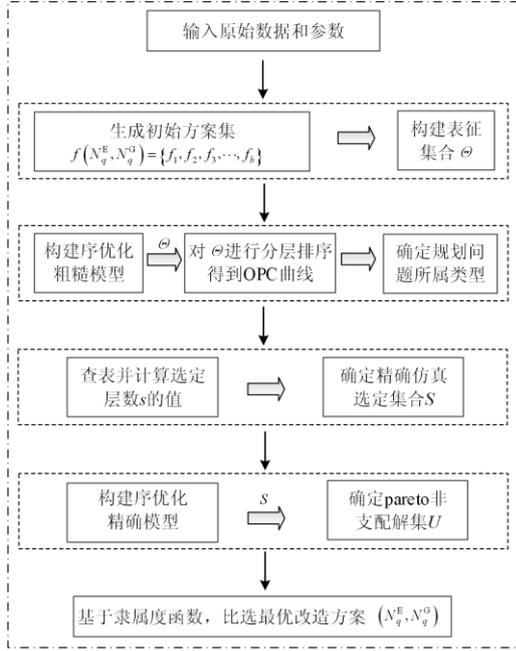


图3 求解流程图

Fig. 3 Solution flow chart

本文算法的基本步骤如下所述。

**步骤 1:** 输入原始数据和参数。初始化求解所需的数据, 包括负荷数据、机组出力数据、供暖设施数据(造价、能耗参数、排污参数)以及各种供暖燃料的单位价格。

**步骤 2:** 基于约束条件式(22)一式(24), 生成供暖改造规划初始方案集  $f(N_q^E, N_q^G) = \{f_1, f_2, f_3, \dots, f_b\}$ 。依照均匀分布抽取  $n$  个可行解构成表征集合  $\theta$ ,  $n$  的个数与解空间的大小密切相关, 研究表明<sup>[22]</sup>, 在解空间小于  $10^8$  时,  $n$  的个数一般选 1 000。

**步骤 3:** 以式(8)为基础构建序优化粗糙模型, 采用式(25)对式(19)中各阶段耗电量进行简化计算。并利用该粗糙模型对表征集合中的解进行排序分层得出序曲线(Ordered Performance Curve, OPC), 进而确定供暖改造规划问题所属类型。

$$\Delta \bar{W}_z^q = \sum_{p=1}^{M_q^E} t_q (\bar{W}_{q,p}^P + \bar{W}_{q,p}^V) \quad (25)$$

式中:  $\Delta \bar{W}_z^q$  为粗糙模型中第  $q$  阶段区域供暖耗电量计算值;  $\bar{W}_{q,p}^P$ 、 $\bar{W}_{q,p}^V$  分别为第  $q$  阶段第  $p$  户“煤改电”用户的日均峰时段用电量和日均谷时段用电量。

**步骤 4:** 在确定 OPC 曲线类型的基础上, 选取粗糙评估结果的前  $s$  层中包含的可行解作为选定集合  $S$ , 其中求解  $s$  的具体公式为

$$s(k, \vartheta) = [e^{Z_0} k^v \vartheta^\varepsilon + \phi] \quad (26)$$

式中:  $s$  为关于  $k$ 、 $\vartheta$  的函数, 其中  $k$  为足够好解的个数,  $\vartheta$  为指定前  $\vartheta$  层为真实足够好解;  $e$  为自然对数;  $Z_0$ 、 $v$ 、 $\varepsilon$  为回归参数, 可根据 OPC 类型确定<sup>[20]</sup>;  $\phi$  为噪声分量。

**步骤 5:** 以式(8)作为序优化精确模型, 并对选定集合  $S$  进行排序分层从而形成 Pareto 非支配解集  $U$ 。

**步骤 6:** 根据隶属度函数<sup>[23]</sup>对解集  $U$  中的各供暖改造规划方案进行排序, 并比选出最优规划方案。本文通过比较各种方案的隶属度值, 以确定各供暖改造方案综合成本的大小关系, 隶属度值越大, 综合成本越小。

$$Y_\mu = \sum_{m=1}^{\varphi} \left( \frac{y_m^{\max} - y_m^\mu}{y_m^{\max} - y_m^{\min}} \right) \quad (27)$$

式中:  $\mu$  为供暖改造方案;  $Y_\mu$  为方案  $\mu$  的隶属度值, 该值越大, 供暖改造的综合成本越小;  $\varphi$  为“煤改电”和“煤改气”联合分阶段规划模型中成本指标的个数;  $y_m^\mu$  为方案  $\mu$  中第  $m$  个成本指标值;  $y_m^{\max}$ 、 $y_m^{\min}$  分别为第  $m$  个成本指标在解集  $U$  中的最大值和最小值。

## 4 算例分析

### 4.1 参数设置

本文选择修改后的河北省2017年供暖改造工程实例进行仿真验证。2017年, 河北省内待改造用户数量为 254 万, 供暖改造规划周期为 3 年, 以规划期内的每个年度划分供暖改造阶段。河北省内天然气最大供给量为  $1.62 \times 10^9 \text{ m}^3$ , 各阶段最大新增供气量均为  $5.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 各阶段最大天然气外购量均为  $6.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。目前河北省的跨省输电通道主要包括榆横-潍坊、锡盟-胜利等<sup>[24]</sup>, 其中榆横-石家庄、锡盟-承德等通道可为河北省输送新能源电量。因此河北省可利用的清洁能源弃电负荷包括省内和省外两个部分, 具体弃电负荷数据如附录 A 表 A1 所示, 其负荷曲线类型与图 2(a)一致。单位“煤改电”用户的典型日增量用电负荷数据如附录 A 表 A2 所示。贴现率  $r$  为 0.07; 折标煤系数  $\lambda_G$ 、 $\lambda_F$  分别为 1.2 和 0.7; 燃煤火电机组发出单位电量时的耗煤量  $\gamma_F$  取  $0.45 \text{ kg/kWh}$ 。

由于河北省内各地区清洁供暖改造的优惠政策存在差异, 为方便计算, 本文对河北省内所有供暖改造用户的优惠标准进行统一, 在计及各种补贴后,

单位用户需承担的供暖改造投资成本、燃料成本以及各供暖方式下的日均能耗水平如表 1 所示。

表 1 各供暖方式的相关参数

Table 1 Related parameters of various heating methods

供暖方式	电供暖		燃气供暖	燃煤供暖
	峰时段	谷时段		
能耗量	18 kWh/天	22 kWh/天	9 m <sup>3</sup> /天	20 kg/天
单位价格	0.46 元/kWh	0.23 元/kWh	1.4 元/m <sup>3</sup>	0.6 元/kg
改造成本	3 000 元		2 500 元	—

由于“煤改电”产生的增量用电负荷由清洁能源发电机组和燃煤火电机组两部分承担, 因此本文需要计算燃煤火电机组的污染物排放。燃气、燃煤供暖设备以及燃煤火电机组的污染物排放水平如表 2 所示<sup>[25]</sup>。根据文献[18], 由 CO<sub>2</sub>、CO、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub> 和颗粒各种污染物的环境价值确定其权重系数分别为: 0.002、0.070、0.562、0.352、0.014。

表 2 各种设备的污染物排放水平

Table 2 Pollutant emission level of various equipment

污染物种类	燃气供暖/ (g/m <sup>3</sup> )	燃煤供暖/ (g/kg)	燃煤火电机组/ (g/kg)
CO <sub>2</sub>	2 184	2 026.4	623
CO	0.006	1.36	0.23
NO <sub>x</sub>	1.84	9.08	8.27
SO <sub>x</sub>	0.63	16	16
颗粒物	0.30	286.2	238.5

为验证本文方法的有效性和正确性, 分别采用以下 3 种规划方法对本文算例进行计算, 并对其计算结果。

方法一: “煤改电”、“煤改气”独立一次性规划。该方法即为 2017 年河北省供暖改造所采用的思路;

方法二: “煤改电”、“煤改气”联合一次性规划;

方法三: “煤改电”、“煤改气”联合分阶段规划, 即本文所提方法。

## 4.2 仿真结果及分析

### 4.2.1 本文方法的规划结果及分析

利用本文向量序优化算法的粗糙模型对“煤改电”、“煤改气”联合分阶段规划模型的解空间进行预筛选, 得到的 OPC 曲线如图 4(a)所示。对比多目标优化的标准序曲线图 4(b)可知, 本文对应的问题类型为 Neutral 型。

本文向量序优化算法中令  $k=1$  和  $\theta=2$ , 其他参数的具体数值可根据 OPC 曲线类型参考文献[20]求得。结合式(25)计算得到  $s$  值为 2, 即取粗糙评估结果中的前两层可行解作为选定集合  $S$ 。并利用向量

序优化精确模型对选定集合进行进一步排序分层, 结果如图 5 所示。

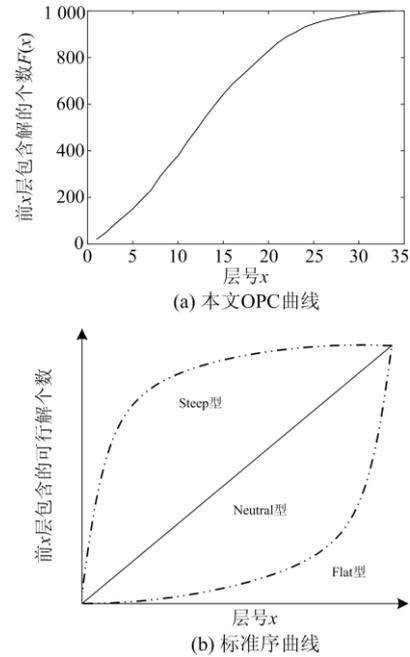


图 4 OPC 曲线

Fig. 4 OPC curve

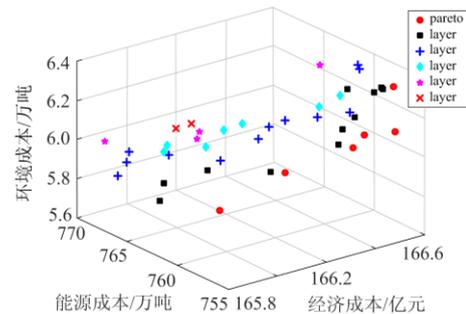


图 5 精确仿真的排序分层结果

Fig. 5 Sorting stratified results by precise simulation

在图 5 中, 第一层(红色圆点)上的可行解构成供暖改造规划的 Pareto 非支配解集。具体规划方案如表 3 所示。

表 3 Pareto 非支配解集对应的规划方案

Table 3 Planning scheme corresponding to Pareto frontier

方案编号	煤改气/万户			煤改电/万户			隶属度值
	一期	二期	三期	一期	二期	三期	
6	149	23	0	54	16	12	1.372 6
<b>19</b>	<b>150</b>	<b>33</b>	<b>0</b>	<b>55</b>	<b>14</b>	<b>2</b>	<b>2.003 0</b>
140	150	23	0	55	13	13	1.350 2
328	150	24	0	54	15	11	1.518 0
558	149	20	0	54	14	17	0.886 2
574	147	32	0	55	15	5	1.768 4

由表 3 可知, 19 号方案的隶属度值最大, 为 2.003 0, 因而其为本文方法的最优方案。在该方案中第一、二、三阶段的“煤改电”用户数量分别为 55、14、2 万户, “煤改气”用户数量分别为 150、33、0 万户。

为进一步研究供暖改造过程中, “煤改电”用户数量与电网清洁能源消纳能力之间的关系, 计算不同“煤改电”用户下的新增火电电量系数和清洁能源利用率如图 6 所示。在一个典型日下, 对清洁能源弃电电量利用率的具体定义为

$$\kappa = \frac{\Delta W'_w}{\Delta W_w} = \frac{\int_{t_0}^{t_z} [\max(P^E(t), P^W(t)) - P^E(t)] dt}{\int_{t_0}^{t_z} P^W(t) dt} \quad (28)$$

式中:  $\kappa$  为清洁能源弃电电量利用率;  $DW_w$  为区域内典型日下清洁能源总弃电量;  $\Delta W'_w$  为区域供暖消纳的清洁能源弃电量。

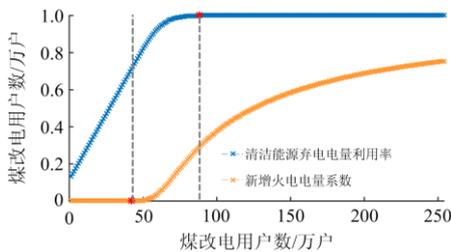


图 6 第一阶段清洁能源及火电利用情况

Fig. 6 Clean energy and thermal power utilization in the first stage

由图 6 可知, 新增火电电量系数在“煤改电”用户数达到 45 万户时开始从 0 递增, 表明在本文算例中, 如果“煤改电”用户数小于 45 万户, 其“煤改电”新增电量将全部由清洁能源承担(即前文 1.2 节的分析中提到的情形一), 在“煤改电”用户数超过 45 万户以后, 仅依赖清洁能源的弃电负荷已不足以完全满足“煤改电”增量负荷的需求, 需要增加火电出力以维持区域电网的功率平衡(即前文 1.2 节的分析中提到的情形二)。清洁能源弃电电量利用率在“煤改电”用户数达到 80 万户以后变为 1, 表明此时清洁能源弃电负荷已经被完全消纳, 之后无论“煤改电”用户数如何增长都无法进一步提升清洁能源利用率(即前文 1.2 节的分析中提到的情形三)。

为进一步研究供暖改造过程中, “煤改电”用户数量与环境、能源成本之间的关系, 计算第一个阶段内不同“煤改电”用户下的环境、能源成本如图 7 所示。

由图 7 可以看出, 供暖改造的环境成本和能源成本都是随着“煤改电”用户数的增加呈先降后升的关系, 能源成本在“煤改电”用户数为 63 万户时

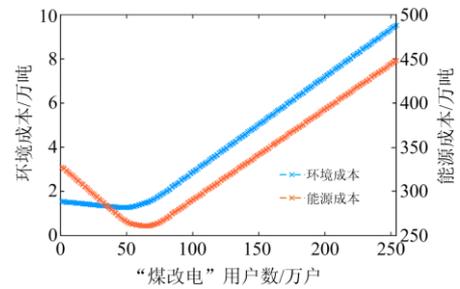


图 7 “煤改电”用户数量与环境、能源成本关系图

Fig. 7 Relation diagram between the users' number of "coal-to-electricity" and environmental and energy costs

达到最低, 环境成本在“煤改电”用户数为 52 万户时达到最低。其原因在于, 在“煤改电”用户数较小时, “煤改电”产生的增量负荷全部由清洁能源承担, 此时“煤改电”的环境和能源成本极低, 因此随着“煤改电”用户数量的增加, 区域电网内的环境、能源总成本也会降低。但是, 在“煤改电”用户数量增大到一定程度后, 仅依靠清洁能源已无法满足“煤改电”产生的增量负荷, 还需要增加火电出力才能满足系统的功率平衡, 此时“煤改电”的能源、环境效益会随着“煤改电”用户数量的增加而降低, 并最终低于“煤改气”的能源、环境效益。在这种情况下, 继续扩大“煤改电”用户数量, 意味着压缩“煤改气”的用户数量, 从而导致区域电网内的环境、能源总成本增加。

由此可见, 对“煤改电”产生的新增电量进行精确分析, 是保证“煤改电”环境、能源效益的重要前提。只有合理的控制“煤改电”的用户规模, 才能够保证供暖改造的能源、环境效益最大化。

为进一步研究供暖改造过程中, 分阶段规划对“煤改电”环境效益的影响, 计算不同规划阶段下, “煤改电”用户与新增火电电量系数的关系曲线如图 8 所示。

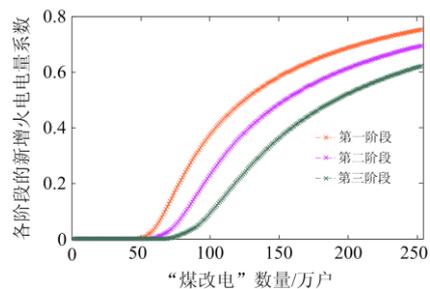


图 8 各阶段下的新增火电电量系数

Fig. 8 New thermal power coefficient in each stage

由图 8 可知, 随着时间的推移, 新增火电电量系数曲线的上升拐点被显著推迟。其原因是, 随着

时间的推移,清洁能源电厂的装机容量也会逐渐扩大,这意味着会有更多的清洁能源来承担“煤改电”产生的增量用电负荷。由此可见,在供暖改造过程中引入分阶段规划的思路,可以让规划决策充分计及整个规划周期内清洁能源的投运增容情况,更加合理的安排“煤改电”的用户规模。

#### 4.2.2 对比分析

1) “煤改电”、“煤改气”联合规划的必要性分析  
为验证“煤改电”、“煤改气”联合规划的必要性,利用方法一和方法二分别对本文算例进行求解,并将两种方法所得规划方案及其能源消耗情况进行对比,具体结果如表4和表5所示。

表4 方法一、二的规划结果

Table 4 Planning results of method 1 and method 2

方法	煤改气/万户	煤改电/万户
一	232	22
二	150	94

表5 方法一、二的各种能耗量

Table 5 Various energy consumption of method 1 and method 2

方法	天然气/10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>			煤/万吨			消纳清洁能源弃电量/(10 <sup>9</sup> kWh)
	总量	外购	缺口	总量	燃煤火电	燃煤供暖	
一	73.2	10.4	1.94	43.2	0	43.2	3.41
二	48.6	0	0	252	252	0	12.2

由表4和表5可知,如果按照方法一的方案进行供暖改造,会导致天然气供给不足,在外购 $1.04 \times 10^9 \text{ m}^3$ 天然气的情况下,仍有 $1.94 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的天然气缺口。这是由于方法一缺乏对“煤改气”、“煤改电”规划的统筹协调,直接设定规划比例,从而导致“煤改气”用户过高,导致天然气需求超过了实际的天然气供应能力,出现“气荒”。

与方法一相比,规划周期内方法二所得规划方案对清洁能源弃电电量的消纳能力增加了 $8.79 \times 10^9 \text{ kWh}$ ,但与此同时,火电燃煤消耗也增加了252万吨。其原因是,由于方法二所得规划方案的“煤改电”用户数量较高,其增量用电负荷提升了电网对清洁能源弃电负荷的消纳能力。但是,由于增量用电负荷过大,仅依靠清洁能源已无法满足“煤改电”产生的增量负荷,还需要大幅增加火电出力才能满足系统的功率平衡,这就导致火电燃煤消耗也有所增加。另一方面,方法二所得规划方案中供暖煤耗降低到0。其原因是,方法一所得规划方案中存在供气缺口,部分已完成“煤改气”的用户无法实现供气,须采用燃煤进行供暖,故存在43.2万吨的供暖煤耗。而方法二统筹考虑了天然气最大

供给容量约束,其所得规划方案中所有“煤改气”的用户均可实现供气,不存在燃煤直接供暖,因此方法二所得规划方案中没有供暖煤耗。相较于方法二中高额的火电燃煤消耗,方法一中较低的天然气缺口带来的燃煤供暖煤耗相对较低,这就导致方法二所得规划方案的煤耗总量增加了209万吨。

两种方法所得规划方案的各项具体成本结果如表6所示。相较于方法一,利用方法二所得规划方案的经济成本减小了8亿元。其主要原因是方法一所得规划方案中“煤改气”用户过多,导致天然气供需失衡,部分已经完成气供暖改造的用户无法实现供气,而这类用户原有的燃煤供暖设施已经被拆除,为正常供暖必须另外购买安装供暖设备,这部分由于“气荒”而产生的额外成本大幅度提高了方法一的经济成本,而在方法二所得的规划方案中,不存在供气缺口,所有完成供暖改造的用户均实现正常供暖,因此,方法二所得到的规划方案的经济成本更低。

表6 方法一、二的各成本值

Table 6 Various cost values of method 1 and method 2

方法	经济成本/亿元	环境成本/万吨	能源成本/万吨	隶属度值
一	179	4.94	908	1.0214
二	171	6.49	760	1.1429

相较于方法一,利用方法二所得规划方案的环境成本增加了1.55万吨。其原因是,由于方法二所得规划方案的“煤改电”用户数量过高,虽然在一定程度上提升了电网的清洁能源弃电负荷消纳能力,但由于需要大幅增加火电出力才能满足系统的功率平衡,这就导致“煤改电”的环境成本大大增加,从而进一步导致方法二所得规划方案的环境成本比方法一更高。

相较于方法一,利用方法二所得规划方案的能源成本降低了148万吨。其原因包括:1)由于方法二所得规划方案使得更多的清洁能源弃电电量被用来承担供暖负荷,这在一定程度上降低了因供暖导致的化石能源消耗量;2)天然气的折标煤系数比煤更大,由于方法一所得规划方案消耗的天然气更多,因而方法一所得规划方案的能源成本更高。

综上所述,方法二所得规划方案除了环境成本以外,其经济、能源成本以及综合成本均优于方法一。由此可见,相较于方法一中的“煤改电”和“煤改气”单独规划,方法二在充分考虑各种能源供给约束的基础上,将“煤改电”和“煤改气”两种不同的供暖改造方式进行统筹联合规划,可以缓解天

然气供给压力,解决“气荒”问题,并提升清洁能源的消纳能力,从而促进我国能源的可持续发展,同时也可以有效降低用户的供暖费用以及供暖能耗,从而提升供暖改造工程的综合效益。

2) 在联合规划模型中考虑分阶段规划的必要性分析

为验证在联合规划模型中考虑分阶段规划的必要性,利用方法三对本文算例进行求解,并将所得规划方案的能源消耗情况与方法二进行对比,具体结果如表 7 所示。

表 7 方法二、三的各种能耗量

Table 7 Various energy consumption of method 2 and method 3

方法	天然气/ $10^8 \text{ m}^3$			煤/万吨			消纳清洁能源弃电量/ ( $10^9 \text{ kWh}$ )
	总量	外购	缺口	总量	燃煤 火电	燃煤 供暖	
二	48.6	0	0	252	252	0	12.2
三	55.7	0	0	136	14.3	122	9.84

由表 7 可知,由于方法二和方法三均考虑了天然气供给约束,所以上述方法的规划结果都不会导致“气荒”问题。与方法二相比,方法三所得规划方案的天然气消耗量增加了  $7.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其原因是,虽然受天然气最大供给容量约束的限制,方法三在第一年规划的“煤改气”用户数和方法二相同,但是由于方法三是采用分阶段规划的方式,其在第二阶段和第三阶段根据天然气供应能力的增长情况,追加了“煤改气”用户,所以在整个规划周期内,方法三的天然气消耗会更多。

与方法二相比,规划周期内方法三所得规划方案的火电煤耗大幅降低了 238 万吨,供暖煤耗增加了 122 万吨,但从总体来看,其总煤耗量降低了 116 万吨。其原因是,方法三对“煤改电”采用分阶段规划的思路,让每个规划阶段的“煤改电”增量用电负荷处于一个合理的水平,让其尽可能在不大幅增加火电出力的前提下最大限度的消纳清洁能源弃电负荷,这就使得方法三所得规划方案的火电煤耗大幅降低。由于方法三不会一次性完成对所有燃煤供暖用户的改造,而是根据清洁能源电厂的投运增量情况逐步增加“煤改电”用户,这就导致在整个规划周期内,方法三的规划方案还存在一定的供暖煤耗。但是从总体来看,方法三的规划方案能够降低“煤改电”规划的煤耗,提升其环境效益。

与方法二相比,规划周期内方法三所得规划方案消纳的清洁能源弃电量降低了  $2.36 \times 10^9 \text{ kWh}$ 。其原因是,方法三而是根据清洁能源电厂的投运情况逐步增加“煤改电”用户,同时为了提升“煤改电”的环境效益,对每个阶段“煤改电”规模进行了限

制,这在一定程度上降低了电网的清洁能源消纳能力。

两种方法所得规划方案的各项具体成本结果如表 8 所示。

表 8 方法二、三的各成本值

Table 8 Various cost values of method 2 and method 3

方法	经济成本/ 亿元	环境成本/ 万吨	能源成本/ 万吨	隶属度值
二	171	6.20	760	0.710 7
三	166	5.65	764	2.003 0

由表 8 可知,相较于方法二,利用方法三所得规划方案的经济成本降低了 5 亿元。其原因是“煤改电”的改造投资成本和燃料成本均略高于“煤改气”,而方法三在采用分阶段规划的思路后,在整个规划周期内对“煤改电”、“煤改气”用户进行了布局,根据天然气供应能力的增长情况分阶段追加了“煤改气”用户,这就使方法三规划的“煤改气”用户比方法二更多,从而降低了方法三的经济成本。

相较于方法二,利用方法三所得规划方案的环境成本降低了 0.55 万吨。其原因是,方法三是根据清洁能源电厂的投运情况逐步增加“煤改电”用户,让每个规划阶段的“煤改电”增量用电负荷处于一个合理的水平,从而有效降低了“煤改电”的煤耗,并进而降低了整个规划方案的环境成本。

相较于方法二,利用方法三所得规划方案在规划周期内的能源成本增加了 4 万吨。其原因是,由于方法三为了提升“煤改电”的环境效益,对每个阶段“煤改电”规模进行了限制,这在一定程度上降低了电网的清洁能源消纳能力,这就导致与方法二相比,在整个区域内,更多的供暖负荷是由化石能源来承担,从而在总体上增加了方法三所得规划方案的能源成本。

综上所述,与方法二相比,方法三的能源成本虽然偏高,但是其经济成本、环境成本以及综合成本都更低。由此可见,本文方法通过在联合规划模型中引入分阶段规划的思路,可以帮助供暖改造的决策者在整个规划周期内,根据天然气供应能力的增长情况和清洁能源电厂的投运情况对“煤改电”、“煤改气”的方案进行合理规划,让每个规划阶段的“煤改电”增量用电负荷都处于一个合理的水平,从而最大限度的挖掘供暖改造的环境效益,也可以有效降低用户承担的供暖成本,从而进一步提高供暖改造工程的综合效益。

## 5 结论

本文从供暖负荷的宏观分配角度出发,通过精

细化分析“煤改电”的新增电量, 综合考虑“煤改电”、“煤改气”的优势和特点, 提出了一种统筹兼顾经济、环境、能源等综合成本的联合分阶段规划方法。仿真结果表明:

1) 对“煤改电”产生的新增电量进行精确分析, 是保证“煤改电”环境、能源效益的重要前提。只有合理地控制“煤改电”的用户规模, 才能够保证供暖改造的能源、环境效益最大化。

2) 本文提出的“煤改电”和“煤改气”联合规划的思路, 可以统筹兼顾经济、环境、能源多方面的综合成本和各种实际工程约束, 使规划决策能够充分发挥不同供暖改造方式的优势和特点, 避免因

供暖改造导致的“气荒”问题出现, 并提高电网对清洁能源的消纳能力, 同时也可以有效提升供暖改造工程的综合效益。

本文方法通过在供暖改造的联合规划模型中引入分阶段规划的思路, 可以帮助规划决策者在整个规划周期内, 根据天然气供应能力的增长情况和清洁能源电厂的投运情况对“煤改气”、“煤改电”的方案进行合理规划, 让每个规划阶段的“煤改电”增量用电负荷处于一个合理的水平, 从而最大限度地挖掘供暖改造的环境效益, 降低其经济成本, 进一步提升供暖改造的综合效益。

附录 A

表 A1 河北省内以及省外可利用的典型日清洁能源弃风及弃光负荷

Table A1 Available clean energy abandonment load inside and outside the Hebei Province in typical days

时刻	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	
第一 阶段	$P_{in}^{wind} / MW$	675	723	613	379	576	486	375	472	346	205	56	246
	$P_{in}^{light} / MW$	0	0	0	0	0	0	58	150	246	320	380	446
	$P_{out}^{wind} / MW$	624	506	408	614	592	549	618	377	315	300	176	204
	$P_{out}^{light} / MW$	0	0	0	0	0	0	36	100	186	223	275	330
	时刻	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00
	$P_{in}^{wind} / MW$	164	206	265	253	304	395	459	386	694	705	606	409
	$P_{in}^{light} / MW$	480	476	350	246	95	0	0	0	0	0	0	0
	$P_{out}^{wind} / MW$	79	105	246	306	478	609	394	409	485	643	546	650
$P_{out}^{light} / MW$	386	413	304	196	86	0	0	0	0	0	0	0	
第二 阶段	时刻	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00
	$P_{in}^{wind} / MW$	1 046	1 316	509	719	846	1 204	1 049	791	864	298	308	506
	$P_{in}^{light} / MW$	0	0	0	0	0	0	196	264	389	450	592	746
	$P_{out}^{wind} / MW$	546	476	408	576	460	430	516	405	278	300	246	197
	$P_{out}^{light} / MW$	0	0	0	0	0	0	50	98	176	200	252	289
	时刻	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00
	$P_{in}^{wind} / MW$	390	356	459	209	405	669	975	853	1159	1003	894	719
	$P_{in}^{light} / MW$	720	643	405	250	113	0	0	0	0	0	0	0
$P_{out}^{wind} / MW$	183	97	304	245	394	480	445	409	485	490	546	546	
$P_{out}^{light} / MW$	350	304	276	178	96	0	0	0	0	0	0	0	
第三 阶段	时刻	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00
	$P_{in}^{wind} / MW$	1 598	1 473	1 200	1 579	1 622	1 109	895	823	1 149	759	649	402
	$P_{in}^{light} / MW$	0	0	0	0	0	0	250	305	504	786	895	1089
	$P_{out}^{wind} / MW$	493	506	378	550	546	412	546	402	208	300	245	204
	$P_{out}^{light} / MW$	0	0	0	0	0	0	36	100	186	223	275	330
	时刻	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00
	$P_{in}^{wind} / MW$	510	294	356	590	760	719	960	1 286	1 209	1 592	1 576	1 300
	$P_{in}^{light} / MW$	1 196	908	780	405	246	55	0	0	0	0	0	0
$P_{out}^{wind} / MW$	153	195	260	478	394	500	406	409	485	514	546	306	
$P_{out}^{light} / MW$	320	276	225	146	43	0	0	0	0	0	0	0	

表 A2 单位“煤改电”用户的典型日增量用电负荷

Table A2 Incremental electricity load of typical daily for unit user of "coal to electricity"

时刻	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00
$P_{\text{e}}^{\text{E}}/\text{kW}$	1.80	1.90	1.96	2.00	2.06	2.12	2.20	2.16	2.10	2.06	2.00	1.90
时刻	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00
$P_{\text{e}}^{\text{E}}/\text{kW}$	1.78	1.70	1.60	1.50	1.46	1.40	1.44	1.50	1.58	1.62	1.68	1.74

## 参考文献

- [1] 林伯强. 雾霾治理背景下冬季取暖可大范围推广“煤改电”[N]. 第一财经日报, 2017-01-12(A11).
- [2] 郑翔宇, 贾嵘, 温栋, 等. 考虑新能源消纳的跨省跨区发电权新型交易模式研究[J]. 高压电器, 2017, 53(5): 121-126.  
ZHENG Xiangyu, JIA Rong, WEN Dong, et al. Research of the inter-district trans-provincial power generation right new exchange pattern based on new energy accommodation[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(5): 121-126.
- [3] SU D, ZHANG Q, WANG G, et al. Market analysis of natural gas for district heating in China[J]. Energy Procedia, 2015, 75(7): 2713-2717.
- [4] 侯斌, 于雪皎, 郑小宇, 等. 基于组合赋权法的“煤改电”综合效益评价指标体系研究[J]. 电工电气, 2018(5): 7-13, 22.  
HOU Bin, YU Xuejiao, ZHENG Xiaoyu, et al. Research on evaluation index system of "coal-to-electricity" project comprehensive benefits based on combination weighting method[J]. Electrotechnics Electric, 2018(5): 7-13, 22.
- [5] 乐慧, 李好玥, 江亿. 用空气源热泵实现农村采暖的“煤改电”时为电力削峰填谷[J]. 中国能源, 2016, 38(11): 9-15.  
LE Hui, LI Haoyue, JIANG Yi. Using air source heat pump to realize "coal-to-electricity" for rural heating and to reduce peak and fill valley for electricity[J]. China Energy, 2016, 38(11): 9-15.
- [6] 毛显强, 彭应登, 郭秀锐. 国内大城市煤改气工程的费用效益分析[J]. 环境科学, 2002(5): 121-125.  
MAO Xianqiang, PENG Yingdeng, GUO Xiurui. Cost-benefit analysis of "coal-to-gas" conversion projects in major cities in China[J]. Environmental Science, 2002(5): 121-125.
- [7] 环境保护部, 发展改革委, 财政部, 等. 关于印发《京津冀及周边地区 2017 年大气污染防治工作方案》的通知 [EB/OL]. [2017-03-23]. [http://dqhj.mep.gov.cn/dtxx/201703/t20170323\\_408663.shtml](http://dqhj.mep.gov.cn/dtxx/201703/t20170323_408663.shtml).
- [8] 环境保护部, 发展改革委, 工业部, 等. 关于印发《京津冀及周边地区 2017-2018 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》的通知(环大气[2017]110 号)[EB/OL]. [2017-08-24]. [http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201708/t20170824\\_420330.htm](http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201708/t20170824_420330.htm).
- [9] 周淑慧. 对当前我国天然气供应紧张问题的思考[J]. 国际石油经济, 2018, 26(2): 28-37.  
ZHOU Shuhui. Reflections on the current shortage of natural gas supply in China[J]. International Petroleum Economy, 2018, 26(2): 28-37.
- [10] 国家能源局. 2017 年风电并网运行情况[EB/OL]. [2018-02-01]. [http://www.nea.gov.cn/2018-02/01/c\\_136942234.htm](http://www.nea.gov.cn/2018-02/01/c_136942234.htm).
- [11] 国家能源局. 国家能源局新闻发布会介绍 2017 年度相关能源情况等[EB/OL]. [2018-01-24]. [http://www.nea.gov.cn/2018-01/24/c\\_136921015.htm](http://www.nea.gov.cn/2018-01/24/c_136921015.htm).
- [12] 王志强, 王珊, 张馨月, 等. 计及用户响应行为差异性的区域电采暖负荷特性建模[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 67-79.  
WANG Zhiqiang, WANG Shan, ZHANG Xinyue, et al. Modeling for load characteristics of regional electric heating system considering difference of users response behaviors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 67-79.
- [13] 刘旭娜, 魏俊, 张文涛. 基于信息熵和模糊分析法的配电网投资效益评估及决策[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 48-56.  
LIU Xuna, WEI Jun, ZHANG Wentao. Investment benefits evaluation and decision for distribution network based on information entropy and fuzzy analysis method[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 48-56.
- [14] 田鑫, 石永锋, 方继辉. 基于全寿命周期成本理论的燃气轮机进气系统优化研究[J]. 热力发电, 2018, 47(7): 46-51.  
TIAN Xin, SHI Yongfeng, FANG Jihui. Research on air intake system optimization of gas turbine based on life cycle cost theory[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(7): 46-51.
- [15] 马麟, 刘建鹏. 考虑时序特性和环境效益的多目标多类型分布式电源规划[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 32-40.  
MA Lin, LIU Jianpeng. Multi-objective planning of

- multi-type distributed generation considering timing characteristics and environmental benefits[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 32-40.
- [16] DANG C, WANG X, SHAO C, et al. Distributed generation planning for diversified participants in demand response to promote renewable energy integration[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(8): 1559-1572.
- [17] BARATI F, SEIFI H, SEPASIAN M S, et al. Multi-period Integrated framework of generation, transmission, and natural gas grid expansion planning for large-scale systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2527-2537.
- [18] 魏学好, 周浩. 中国火力发电行业减排污染物的环境价值标准估算[J]. 环境科学研究, 2003, 16(1): 53-56.  
WEI Xuehao, ZHOU Hao. Estimation of environmental value standards for emission reduction of pollutants in China's thermal power industry[J]. Environmental Science Research, 2003, 16(1): 53-56.
- [19] 李辰雷, 卫志农, 韩连山. 序优化理论在配电网重构中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 41-48.  
LI Chenlei, WEI Zhinong, HAN Lianshan. Application of ordinal optimization in distribution network reconstruction[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 41-48.
- [20] 鄢晶, 蒋霖, 杜治. 基于向量序优化的含分布式电源的配电网规划[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(8): 1-7.  
YAN Jing, JIANG Lin, DU Zhi, et al. Planning of distribution network containing distributed generation based on vector ordinal optimization[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(8): 1-7.
- [21] ZHAO Q C, HO Y C, JIA Q S. Vector ordinal optimization[J]. Journal of Optimization Theory and Application, 2005, 125(2): 259-274.
- [22] LEE L H, LAU T W E, HO Y C. Explanation of goal softening in ordinal optimization[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1999, 44(1): 94-99.
- [23] 李妍, 王洁, 王少荣. 计及新能源特性的配电网评估指标及其隶属度函数的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 43-49.  
LI Yan, WANG Jie, WANG Shaorong. Research on evaluation indices of new energy generation characteristics and membership functions[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 43-49.
- [24] 国家电网公司. 促进新能源发展白皮书 2018[EB/OL]. [2018-04-08]. <http://www.sgcc.com.cn/>.
- [25] 庞军, 吴健, 马中, 等. 我国城市天然气替代燃煤集中供暖的大气污染减排效果[J]. 中国环境科学, 2015, 35(1): 55-61.  
PANG Jun, WU Jian, MA Zhong, et al. Atmospheric pollution reduction effect of urban natural gas replacing coal-fired central heating in China[J]. Environmental Science of China, 2015, 35(1): 55-61.

收稿日期: 2019-10-25; 修回日期: 2020-01-13

作者简介:

杨楠(1987—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统运行与控制、电力系统规划、电力系统的机组组合、主动配电网; E-mail: ynyyayy@ctgu.edu.cn

隆舰艇(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统规划; E-mail: 2507749518@qq.com

刘颂凯(1990—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统在线安全分析、海量数据挖掘与降维。E-mail: skliu0120@163.com

(编辑 姜新丽)