

1. 基于交替方向乘子法的电-气联合市场分布式出清方法，其特征在于：包括以下步骤：

1) 以电能与天然气的总费用最小为目标，考虑电力系统的约束条件、天然气系统的约束条件以及电力系统与天然气系统的耦合约束，建立电-气联合市场出清模型；

2) 基于交替方向乘子法，根据增广拉格朗日函数将电-气联合市场出清模型等效地分解为天然气市场出清子模型和电力市场出清子模型；

3) 交替求解天然气市场出清子模型和电力市场出清子模型并更新对偶变量，直至满足交替方向乘子法的收敛准则，从而得到电-气联合市场的分布式出清结果。

2. 如权利要求 1 所述的基于交替方向乘子法的电-气联合市场分布式出清方法，其特征在于：所述电-气联合市场出清模型的目标函数表示为：

$$\min obj_{cost} = \sum_{t \in T} \sum_{u \in GS} p_u^s S_{u,t} \Delta t + \sum_{t \in T} \sum_{i \in CG} p_i^c P_{i,t}^c \Delta t + \sum_{t \in T} \sum_{i \in GG} p_i^g P_{i,t}^g \Delta t$$

其中， $S_{u,t}$ 表示第 u 个气源在第 t 个调度时段的出气量， p_u^s 表示第 u 个气源的天然气报价， $P_{i,t}^c$ 表示第 i 个燃煤机组在第 t 个调度时段的输出功率， p_i^c 表示第 i 个燃煤机组的电能报价， $P_{i,t}^g$ 表示第 i 个燃气机组在第 t 个调度时段的输出功率， p_i^g 表示第 i 个燃气机组的电能报价中的非成本部分， Δt 表示调度时间间隔， T 、 GS 、 CG 以及 GG 分别表示调度时段集合、气源集合、燃煤机组集合以及燃气机组集合， obj_{cost} 表示电能与天然气的总费用。

3. 如权利要求 1 所述的基于交替方向乘子法的电-气联合市场分布式出清方法，其特征在于：所述电力系统的约束条件包括功率平衡方程、发电机组输出功率约束、发电机组爬坡率约束及输电线路传输功率约束，天然气系统的约束条件包括节点气流平衡方程、气源出气量约束、气网节点气压约束、输气管道稳态气流方程、压缩机耗气量约束、压缩机压缩比约束、压缩机传输流量约束及气网节点实际天然气负荷修正方程，电力系统与天然气系统的耦合约束为燃气机组耗气量方程，燃气机组耗气量方程表示为：

$$G_{i,t} = \eta_i^g P_{i,t}^g, \forall i \in GG, t$$

其中， $G_{i,t}$ 表示第 i 个燃气机组在第 t 个调度时段的耗气量， η_i^g 表示第 i 个燃气机组的能量转换系数， $P_{i,t}^g$ 表示第 i 个燃气机组在第 t 个调度时段的输出功率， GG 表示燃气机组集合。

4. 如权利要求 1 所述的基于交替方向乘子法的电-气联合市场分布式出清方法，其特征在于：所述增广拉格朗日函数表示为：

$$L_d(G_{i,t}, P_{i,t}^g, \lambda_{i,t}^{co}) = obj_{gas} + obj_{power} + \sum_{t \in T} \sum_{i \in GG} \lambda_{i,t}^{co} (G_{i,t} - \eta_i^g P_{i,t}^g) + \sum_{t \in T} \sum_{i \in GG} \frac{d}{2} (G_{i,t} - \eta_i^g P_{i,t}^g)^2$$

其中, $G_{i,t}$ 表示第 i 个燃气机组在第 t 个调度时段的耗气量, $\lambda_{i,t}^{co}$ 表示第 i 个燃气机组在第 t 个调度时段的耗气量方程对偶变量, d 是引入的惩罚参数, obj_{gas} 表示总费用中的天然气费用, $obj_{power} = \sum_{t \in T} \sum_{u \in GS} p_u^s S_{u,t} \Delta t$, obj_{power} 表示总费用中的电能费用, $obj_{power} = \sum_{t \in T} \sum_{i \in CG} p_i^c P_{i,t}^c \Delta t + \sum_{t \in T} \sum_{i \in GG} p_i^g P_{i,t}^g \Delta t$, $S_{u,t}$ 表示第 u 个气源在第 t 个调度时段的出气量, p_u^s 表示第 u 个气源的天然气报价, $P_{i,t}^c$ 表示第 i 个燃煤机组在第 t 个调度时段的输出功率, p_i^c 表示第 i 个燃煤机组的电能报价, $P_{i,t}^g$ 表示第 i 个燃气机组在第 t 个调度时段的输出功率, p_i^g 表示第 i 个燃气机组的电能报价中的非成本部分, Δt 表示调度时间间隔, T 、 GS 、 CG 以及 GG 分别表示调度时段集合、气源集合、燃煤机组集合以及燃气机组集合, η_i^g 表示第 i 个燃气机组的能量转换系数。

5. 如权利要求 1 所述的基于交替方向乘子法的电-气联合市场分布式出清方法, 其特征在于: 所述天然气市场出清子模型表示为:

$$\begin{aligned} \min \mathcal{F}_g(G_{i,t}, P_{i,t}^{g,k}, \lambda_{i,t}^{co,k}) &= obj_{gas} + \sum_{t \in T} \sum_{i \in GG} \lambda_{i,t}^{co,k} (G_{i,t} - \eta_i^g P_{i,t}^{g,k}) + \sum_{t \in T} \sum_{i \in GG} \frac{d}{2} (G_{i,t} - \eta_i^g P_{i,t}^{g,k})^2 \\ s.t. \quad \sum_{u \in GS} v_{nu}^s S_{u,t} - D_{n,t}^g &= \sum_{p \in P} v_{np}^f F_{p,t} + \sum_{q \in C} v_{nq}^{cin} (F_{q,t}^{com} + \tau_{q,t}^{com}) - \sum_{q \in C} v_{nq}^{cout} F_{q,t}^{com} : \lambda_{n,t}^g, \forall n, t \\ S_{u \min} &\leq S_{u,t} \leq S_{u \max}, \forall u, t \\ \pi_{n \min} &\leq \pi_{n,t} \leq \pi_{n \max}, \forall n, t \\ F_{p,t}^2 &= c_{1p}^2 (\pi_{\bar{n},t}^2 - \pi_{\bar{m},t}^2), \forall p, t \\ \tau_{q,t}^{com} &= \eta_q^{com} F_{q,t}^{com}, \forall q, t \\ R_{q \min}^{com} \pi_{\bar{n},t} &\leq \pi_{\bar{m},t} \leq R_{q \max}^{com} \pi_{\bar{n},t}, \forall q, t \\ F_{q \min}^{com} &\leq F_{q,t}^{com} \leq F_{q \max}^{com}, \forall q, t \\ D_{n,t}^g &= D_{n,t}^{g0} + \sum_{i \in GG} v_{ni}^{gn} G_{i,t}, \forall n, t \\ G_{i,t} &\geq 0, \forall i \in GG, t \end{aligned}$$

其中, $P_{i,t}^{g,k}$ 、 $\lambda_{i,t}^{co,k}$ 分别表示 $P_{i,t}^g$ 、 $\lambda_{i,t}^{co}$ 在第 k 次迭代的数值, $P_{i,t}^g$ 表示第 i 个燃气机组在第 t 个调度时段的输出功率, $\lambda_{i,t}^{co}$ 表示第 i 个燃气机组在第 t 个调度时段的耗气量方程对偶变

权 利 要 求 书

量, d 是引入的惩罚参数, $G_{i,t}$ 表示第 i 个燃气机组在第 t 个调度时段的耗气量, obj_{gas} 表示总费用中的天然气费用, η_i^g 表示第 i 个燃气机组的能量转换系数, T 表示调度时段集合, GG 表示燃气机组集合, $S_{u,t}$ 表示第 u 个气源在第 t 个调度时段的出气量, $D_{n,t}^g$ 表示第 n 个气网节点在第 t 个调度时段的天然气负荷实际值, $F_{p,t}$ 表示第 p 个输气管道在第 t 个调度时段的传输流量, 该输气管道的进气端为气网节点 \bar{n} , 出气端为气网节点 \bar{m} , 即气流方向为从气网节点 \bar{n} 到 \bar{m} , $F_{q,t}^{com}$ 表示第 q 个压缩机在第 t 个调度时段的传输流量, 该压缩机的进气端为气网节点 \tilde{n} , 出气端为气网节点 \tilde{m} , 即气流方向为从气网节点 \tilde{n} 到 \tilde{m} , $\tau_{q,t}^{com}$ 表示第 q 个压缩机在第 t 个调度时段的耗气量, v_{nu}^s 表示气源-气网节点关联矩阵第 n 行第 u 列的元素, v_{np}^f 表示输气管道-气网节点关联矩阵第 n 行第 p 列的元素, v_{nq}^{cin} 表示压缩机进气端-气网节点关联矩阵第 n 行第 q 列的元素, v_{nq}^{cout} 表示压缩机出气端-气网节点关联矩阵第 n 行第 q 列的元素, P 、 C 分别表示输气管道集合、压缩机集合, GS 表示气源集合, $\lambda_{n,t}^g$ 表示第 n 个气网节点在第 t 个调度时段的节点气流平衡方程对偶变量, $S_{u\max}$ 、 $S_{u\min}$ 分别表示第 u 个气源的最大出气量、最小出气量, $\pi_{n,t}$ 表示第 n 个气网节点在第 t 个调度时段的气压值, $\pi_{n\max}$ 、 $\pi_{n\min}$ 分别表示第 n 个气网节点的最大气压值、最小气压值, c_{lp} 表示第 p 个输气管道的稳态传输常数, η_q^{com} 表示第 q 个压缩机的耗气量系数, $R_{q\max}^{com}$ 、 $R_{q\min}^{com}$ 分别表示第 q 个压缩机的最大压缩比、最小压缩比, $F_{q\max}^{com}$ 、 $F_{q\min}^{com}$ 分别表示第 q 个压缩机的最大传输流量、最小传输流量, $D_{n,t}^{g0}$ 表示第 n 个气网节点在第 t 个调度时段的天然气负荷预测值, v_{ni}^{gn} 表示燃气机组-气网节点关联矩阵第 n 行第 i 列的元素。

6. 如权利要求 1 所述的基于交替方向乘子法的电-气联合市场分布式出清方法, 其特征在于: 所述电力市场出清子模型表示为:

$$\begin{aligned} \min \mathcal{F}_e(G_{i,t}^{k+1}, P_{i,t}^g, \lambda_{i,t}^{co,k}) &= obj_{power} + \sum_{t \in T} \sum_{i \in GG} \lambda_{i,t}^{co,k} (G_{i,t}^{k+1} - \eta_i^g P_{i,t}^g) + \sum_{t \in T} \sum_{i \in GG} \frac{d}{2} (G_{i,t}^{k+1} - \eta_i^g P_{i,t}^g)^2 \\ s.t. \quad &\sum_{i \in CG \cup GG} P_{i,t} = \sum_{b \in B} D_{b,t}^e : \lambda_t^e, \forall t \\ &P_{i\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i\max}, \forall i \in CG \cup GG, t \\ &-\Delta t \cdot r_i \leq P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq \Delta t \cdot r_i, \forall i \in CG \cup GG, t \\ &Pl_{j\min} \leq \sum_{b \in B} H_{jb} \left(\sum_{i \in CG \cup GG} v_{bi} P_{i,t} - D_{b,t}^e \right) \leq Pl_{j\max} : \mu_{j,t}^{l-}, \mu_{j,t}^{l+}, \forall j, t \end{aligned}$$

其中, $G_{i,t}^{k+1}$ 表示 $G_{i,t}$ 在第 $k+1$ 次迭代的数值, $\lambda_{i,t}^{co,k}$ 表示 $\lambda_{i,t}^{co}$ 在第 k 次迭代的数值, $P_{i,t}^g$ 表示

权 利 要 求 书

第 i 个燃气机组在第 t 个调度时段的输出功率, $\lambda_{i,t}^{co}$ 表示第 i 个燃气机组在第 t 个调度时段的耗气量方程对偶变量, d 是引入的惩罚参数, $G_{i,t}$ 表示第 i 个燃气机组在第 t 个调度时段的耗气量, obj_{power} 表示总费用中的电能费用, η_i^g 表示第 i 个燃气机组的能量转换系数, T 表示调度时段集合, GG 表示燃气机组集合, CG 表示燃煤机组集合, $P_{i,t}$ 表示第 i 个发电机组在第 t 个调度时段的输出功率, $D_{b,t}^e$ 表示第 b 个电网节点在第 t 个调度时段的电力负荷预测值, B 表示电网节点集合, $P_{i\max}$ 、 $P_{i\min}$ 以及 r_i 分别表示第 i 个发电机组的最大输出功率、最小输出功率以及爬坡率, $t-1$ 表示上一调度时段, Δt 表示调度时间间隔, $Pl_{j\max}$ 、 $Pl_{j\min}$ 分别表示第 j 个输电线路的最大传输功率、最小传输功率, H_{jb} 为功率传输分布因子, 该因子表示第 b 个电网节点的注入功率对于第 j 个输电线路的传输功率的影响, v_{bi} 表示发电机组-电网节点关联矩阵第 b 行第 i 列的元素, λ_t^e 表示第 t 个调度时段的功率平衡方程对偶变量, $\mu_{j,t}^{l-}$ 、 $\mu_{j,t}^{l+}$ 为第 j 个输电线路在第 t 个调度时段的输电线路传输功率约束对偶变量。

7. 如权利要求 1 所述的基于交替方向乘子法的电-气联合市场分布式出清方法, 其特征在于: 所述步骤 3) 具体包括以下步骤:

3.1) 令迭代次数 $k=0$, 初始化变量 $\lambda_{i,t}^{co}$ 及 $P_{i,t}^g$, 得到 $\lambda_{i,t}^{co,0}$ 及 $P_{i,t}^{g,0}$;

3.2) 根据 $\lambda_{i,t}^{co,k}$ 、 $P_{i,t}^{g,k}$ 求解天然气市场出清子模型, 得到第 $k+1$ 次迭代的 $G_{i,t}$ 的数值 $G_{i,t}^{k+1}$, 其中, $P_{i,t}^{g,k}$ 、 $\lambda_{i,t}^{co,k}$ 分别表示 $P_{i,t}^g$ 、 $\lambda_{i,t}^{co}$ 在第 k 次迭代的数值, $P_{i,t}^g$ 表示第 i 个燃气机组在第 t 个调度时段的输出功率, $\lambda_{i,t}^{co}$ 表示第 i 个燃气机组在第 t 个调度时段的耗气量方程对偶变量, $G_{i,t}$ 表示第 i 个燃气机组在第 t 个调度时段的耗气量; 然后按照下式对 $G_{i,t}^{k+1}$ 进行更新:

$$G_{i,t}^{k+1} = \alpha_o G_{i,t}^{k+1} + (1 - \alpha_o) \eta_i^g P_{i,t}^{g,k}, \forall i \in GG, t$$

其中, α_o 为松弛因子, η_i^g 表示第 i 个燃气机组的能量转换系数, GG 表示燃气机组集合;

3.3) 根据 $\lambda_{i,t}^{co,k}$ 及更新后的 $G_{i,t}^{k+1}$ 求解电力市场出清子模型, 得到第 $k+1$ 次迭代的 $P_{i,t}^g$ 的数值 $P_{i,t}^{g,k+1}$;

3.4) 经过步骤 3.3) 后, 判断是否满足交替方向乘子法的收敛准则, 若满足, 则停止迭代计算; 若不满足, 则根据下式更新对偶变量, 并令 $k=k+1$, 返回步骤 3.2);

$$\lambda_{i,t}^{co,k+1} = \lambda_{i,t}^{co,k} + d (G_{i,t}^{k+1} - \eta_i^g P_{i,t}^{g,k+1}), \forall i \in GG, t$$

其中， d 是引入的惩罚参数。

8. 如权利要求 1 所述的基于交替方向乘子法的电-气联合市场分布式出清方法，其特征在于：所述交替方向乘子法的收敛准则表示为：

$$\|r^{k+1}\|_2 \leq \varepsilon^{pri} \text{ 且 } \|s^{k+1}\|_2 \leq \varepsilon^{dual}$$

其中，

$$\begin{aligned} r_{i,t}^{k+1} &= G_{i,t}^{k+1} - \eta_i^g P_{i,t}^{g,k+1}, \forall i \in GG, t \\ s_{i,t}^{k+1} &= -d\eta_i^g (P_{i,t}^{g,k+1} - P_{i,t}^{g,k}), \forall i \in GG, t \\ \varepsilon^{pri} &= \sqrt{N_g \cdot N_t} \varepsilon^{abs} + \varepsilon^{rel} \max \{ \|G^{k+1}\|_2, \|\eta^g P^{k+1}\|_2 \} \\ \varepsilon^{dual} &= \sqrt{N_g \cdot N_t} \varepsilon^{abs} + \varepsilon^{rel} \|\lambda^{co,k}\|_2 \end{aligned}$$

$r_{i,t}^{k+1}$ 、 $s_{i,t}^{k+1}$ 分别表示原始残差、对偶残差， ε^{pri} 、 ε^{dual} 分别为原始残差、对偶残差的收敛精度， ε^{abs} 、 ε^{rel} 分别为允许的绝对误差、相对误差， N_g 、 N_t 分别为燃气机组个数、调度时段个数， r^{k+1} 、 s^{k+1} 、 G^{k+1} 、 η^g 、 P^{k+1} 以及 $\lambda^{co,k}$ 分别为 $r_{i,t}^{k+1}$ 、 $s_{i,t}^{k+1}$ 、 $G_{i,t}^{k+1}$ 、 η_i^g 、 $P_{i,t}^{k+1}$ 以及 $\lambda_{i,t}^{co,k}$ 组成的列向量， $G_{i,t}^{k+1}$ 表示 $G_{i,t}$ 在第 $k+1$ 次迭代的数值， $G_{i,t}$ 表示第 i 个燃气机组在第 t 个调度时段的耗气量， $P_{i,t}^{g,k+1}$ 、 $P_{i,t}^{g,k}$ 分别表示第 $k+1$ 、第 k 次迭代得到的 $P_{i,t}^g$ 的数值， $P_{i,t}^g$ 表示第 i 个燃气机组在第 t 个调度时段的输出功率， d 是引入的惩罚参数， η_i^g 表示第 i 个燃气机组的能量转换系数， $\lambda_{i,t}^{co,k}$ 表示 $\lambda_{i,t}^{co}$ 在第 k 次迭代的数值， $\lambda_{i,t}^{co}$ 表示第 i 个燃气机组在第 t 个调度时段的耗气量方程对偶变量， GG 表示燃气机组集合。

9. 如权利要求 1 所述的基于交替方向乘子法的电-气联合市场分布式出清方法，其特征在于：所述电-气联合市场的分布式日前出清结果包括两部分内容：第一部分为燃煤机组、燃气机组以及气源的优化调度方案；第二部分为节点边际电价与节点边际气价，节点边际电价与节点边际气价分别表示为：

$$\begin{aligned} \rho_{b,t}^{LMP,e} &= -\lambda_t^e + \sum_{j \in J} \mu_{j,t}^{l-} H_{jb} - \sum_{j \in J} \mu_{j,t}^{l+} H_{jb} \\ \rho_{n,t}^{LMP,g} &= -\lambda_{n,t}^g \end{aligned}$$

其中， $\rho_{b,t}^{LMP,e}$ 表示第 b 个电网节点在第 t 个调度时段的边际电价， λ_t^e 表示第 t 个调度时段的功率平衡方程对偶变量， $\mu_{j,t}^{l-}$ 、 $\mu_{j,t}^{l+}$ 为第 j 个输电线路在第 t 个调度时段的输电线路传输功率约束对偶变量， H_{jb} 为功率传输分布因子，该因子表示第 b 个电网节点的注入功率对

权 利 要 求 书

于第 j 个输电线路的传输功率的影响, $\rho_{n,t}^{LMP,g}$ 表示第 n 个气网节点在第 t 个调度时段的边际气价, $\lambda_{n,t}^g$ 表示第 n 个气网节点在第 t 个调度时段的节点气流平衡方程对偶变量。

基于交替方向乘子法的电-气联合市场分布式出清方法

技术领域

本发明涉及一种电-气联合市场分布式出清方法，特别涉及基于交替方向乘子法的电-气联合市场分布式出清方法。

背景技术

为了进一步改善能源结构，促进低碳、绿色发展，需要加快电源结构清洁化以及提高天然气利用比例，但长期以来，电力系统与天然气系统都是独立运行的，两者之间存在严重的行业与技术壁垒。随着燃气机组的快速发展，电力系统和天然气系统的耦合越来越紧密，如何实现电力与天然气的综合利用与高效配置成为一大研究热点。在电-气互联系统中，燃气机组从天然气市场获得天然气，生产出电能再输出给电力市场，因此使得电力市场与天然气市场这两个不同的能源市场不可避免地联系在一起。为了保证电力和天然气可靠、安全、经济及高效的供应，有必要建立电-气联合市场，并研究电-气联合市场的出清策略。

为了更适应当前的市场结构，电-气联合市场的日前出清可以采用分布式策略。也就是，电力市场仅负责满足电力系统运行条件下的电力交易，天然气市场仅负责满足天然气系统运行条件下的天然气交易，而电力市场与天然气市场之间通过少量的信息交互来实现电-气联合市场的整体最优。

目前，最常用的分布式算法之一为交替方向乘子法，该方法是一种解决可分解凸优化问题的分布式计算框架，尤其适用于解决大规模分布式优化问题。其核心思想是通过引入对偶变量，将原问题的目标函数等价分解成若干个可求解的子问题，然后并行求解每一个子问题，经过连续迭代后协调子问题的解得到原问题的全局解。交替方向乘子法已经在电-气互联系统规划与运行的分布式优化问题中有所应用。然而，电-气联合市场的日前出清需要考虑天然气系统非凸非线性的复杂网络约束，因此如何在满足电力系统与天然气系统运行特性的前提下建立基于交替方向乘子法的电-气联合市场分布式出清模型成为关键。同时，交替方向乘子法在实际应用中常出现收敛速度较慢的缺点。考虑到电-气联合市场的分布式出清方法主要应用于日前市场，对计算效率提出了更高的要求。

发明内容

本发明的目的在于提供一种基于交替方向乘子法的电-气联合市场分布式出清方法。

为实现上述目的，本发明采用了以下技术方案：

1) 以全天电能与天然气的总费用最小为目标函数，考虑电力系统的约束条件、天然气系统的约束条件以及电力系统与天然气系统的耦合约束，建立电-气联合市场集中式出清模型；

2) 基于交替方向乘子法，根据增广拉格朗日函数将电-气联合市场集中式出清模型等效地分解为天然气市场出清子问题和电力市场出清子问题；

3) 交替求解天然气市场出清子问题和电力市场出清子问题并更新对偶变量，直至满足交替方向乘子法的收敛准则，从而得到电-气联合市场的分布式日前出清结果。

所述电-气联合市场集中式出清模型的目标函数如式(1)所示：

$$\min obj_{cost} = \underbrace{\sum_{t \in T} \sum_{u \in GS} p_u^s S_{u,t} \Delta t}_{obj_{gas}} + \underbrace{\sum_{t \in T} \sum_{i \in CG} p_i^c P_{i,t}^c \Delta t + \sum_{t \in T} \sum_{i \in GG} p_i^g P_{i,t}^g \Delta t}_{obj_{power}} \quad (1)$$

其中， $S_{u,t}$ 表示第 u 个气源在第 t 个调度时段的出气量， p_u^s 表示第 u 个气源的天然气报价， $P_{i,t}$ 表示第 i 个发电机组在第 t 个调度时段的输出功率（具体的， $P_{i,t}^c$ 表示第 i 个燃煤机组在第 t 个调度时段的输出功率， $P_{i,t}^g$ 表示第 i 个燃气机组在第 t 个调度时段的输出功率）， p_i^c 表示第 i 个燃煤机组的电能报价， p_i^g 表示第 i 个燃气机组的电能报价中的非成本部分， Δt 表示调度时间间隔， T 、 GS 、 CG 以及 GG 分别表示调度时段集合、气源集合、燃煤机组集合以及燃气机组集合， obj_{cost} 表示全天电能与天然气的总费用， obj_{gas} 表示总费用中的天然气费用， obj_{power} 表示总费用中的电能费用。

优选的，所述电力系统与天然气系统的耦合约束为燃气机组耗气量方程，如式(2)所示：

$$G_{i,t} = \eta_i^s P_{i,t}^g, \forall i \in GG, t \quad (2)$$

其中， $G_{i,t}$ 表示第 i 个燃气机组在第 t 个调度时段的耗气量， η_i^s 表示第 i 个燃气机组的能量转换系数。

优选的，所述增广拉格朗日函数如式(3)所示：

$$L_d(G_{i,t}, P_{i,t}^g, \lambda_{i,t}^{co}) = obj_{gas} + obj_{power} + \sum_{t \in T} \sum_{i \in GG} \lambda_{i,t}^{co} (G_{i,t} - \eta_i^s P_{i,t}^g) + \sum_{t \in T} \sum_{i \in GG} \frac{d}{2} (G_{i,t} - \eta_i^s P_{i,t}^g)^2 \quad (3)$$

其中， $\lambda_{i,t}^{co}$ 是第 i 个燃气机组在第 t 个调度时段的耗气量方程对偶变量； $d > 0$ ，是引入的惩罚参数（例如， $d = A \max(p_u^s)$ ， $A = 1 \sim 5$ ）。

优选的，所述天然气市场出清子问题（即天然气市场出清子模型）如式(4) - 式(13)所示：

$$\min \mathcal{F}_g(G_{i,t}, P_{i,t}^{g,k}, \lambda_{i,t}^{co,k}) = obj_{gas} + \sum_{i \in T} \sum_{i \in GG} \lambda_{i,t}^{co,k} (G_{i,t} - \eta_i^g P_{i,t}^{g,k}) + \sum_{i \in T} \sum_{i \in GG} \frac{d}{2} (G_{i,t} - \eta_i^g P_{i,t}^{g,k})^2 \quad (4)$$

$$s.t. \sum_{u \in GS} v_{nu}^s S_{u,t} - D_{n,t}^g = \sum_{p \in P} v_{np}^f F_{p,t} + \sum_{q \in C} v_{nq}^{cin} (F_{q,t}^{com} + \tau_{q,t}^{com}) - \sum_{q \in C} v_{nq}^{cout} F_{q,t}^{com} : \lambda_{n,t}^g, \forall n, t \quad (5)$$

$$S_{u \min} \leq S_{u,t} \leq S_{u \max}, \forall u, t \quad (6)$$

$$\pi_{n \min} \leq \pi_{n,t} \leq \pi_{n \max}, \forall n, t \quad (7)$$

$$F_{p,t}^2 = c_{1p}^2 (\pi_{\bar{n},t}^2 - \pi_{\bar{m},t}^2), \forall p, t \quad (8)$$

$$\tau_{q,t}^{com} = \eta_q^{com} F_{q,t}^{com}, \forall q, t \quad (9)$$

$$R_{q \min}^{com} \pi_{\bar{n},t} \leq \pi_{\bar{m},t} \leq R_{q \max}^{com} \pi_{\bar{n},t}, \forall q, t \quad (10)$$

$$F_{q \min}^{com} \leq F_{q,t}^{com} \leq F_{q \max}^{com}, \forall q, t \quad (11)$$

$$D_{n,t}^g = D_{n,t}^{g0} + \sum_{i \in GG} v_{ni}^{gn} G_{i,t}, \forall n, t \quad (12)$$

$$G_{i,t} \geq 0, \forall i \in GG, t \quad (13)$$

其中，式(4)为子模型目标函数，式(5)为节点气流平衡方程，式(6)为气源出气量约束，式(7)为气网节点气压约束，式(8)为输气管道稳态气流方程，式(9)为压缩机耗气量约束，式(10)为压缩机压缩比约束，式(11)为压缩机传输流量约束，式(12)为气网节点实际天然气负荷修正方程，式(13)为燃气机组耗气量约束； $P_{i,t}^{g,k}$ 、 $\lambda_{i,t}^{co,k}$ 分别表示 $P_{i,t}^g$ 、 $\lambda_{i,t}^{co}$ 在第 k 次迭代的数值， $D_{n,t}^g$ 表示第 n 个气网节点在第 t 个调度时段的天然气负荷实际值， $F_{p,t}$ 表示第 p 个输气管道（气流方向为从气网节点 \bar{n} 到 \bar{m} ）在第 t 个调度时段的传输流量， $F_{q,t}^{com}$ 表示第 q 个压缩机（气流方向为从气网节点 \tilde{n} 到 \tilde{m} ）在第 t 个调度时段的传输流量， $\tau_{q,t}^{com}$ 表示第 q 个压缩机在第 t 个调度时段的耗气量， v_{nu}^s 表示气源-气网节点关联矩阵第 n 行第 u 列的元素， v_{np}^f 表示输气管道-气网节点关联矩阵第 n 行第 p 列的元素， v_{nq}^{cin} 表示压缩机进气端-气网节点关联矩阵第 n 行第 q 列的元素， v_{nq}^{cout} 表示压缩机出气端-气网节点关联矩阵第 n 行第 q 列的元素， P 、 C 分别表示输气管道集合、压缩机集合， $\lambda_{n,t}^g$ 表示等式约束（式(5)）的对偶变量， $S_{u \max}$ 、 $S_{u \min}$ 分别表示第 u 个气源的最大出气量、最小出气量， $\pi_{n,t}$ 表示第 n 个气网节点在第 t 个调度时段的气压值， $\pi_{n \max}$ 、 $\pi_{n \min}$ 分别表示第 n 个气网节点的最大气压值、最小气压值， c_{1p} 表示第 p 个输气管道的稳态传输常数， η_q^{com} 表示第 q 个压缩机的耗气量系数，一般取为3%~5%， $R_{q \max}^{com}$ 、 $R_{q \min}^{com}$ 分别表示第 q 个压缩机的最大压缩比、最小压

缩比, $F_{q\max}^{com}$ 、 $F_{q\min}^{com}$ 分别表示压缩机 q 的最大传输流量、最小传输流量, $D_{n,t}^{g0}$ 表示第 n 个气网节点在第 t 个调度时段的天然气负荷预测值, v_{ni}^{gn} 表示燃气机组-气网节点关联矩阵第 n 行第 i 列的元素, $\pi_{\bar{n},t}$ 、 $\pi_{\bar{m},t}$ 分别表示第 p 个输气管道的进气端所在气网节点 \bar{n} 、出气端所在气网节点 \bar{m} 在第 t 个调度时段的气压值。

优选的, 所述电力市场出清子问题 (即电力市场出清子模型) 如式(14) - 式(18)所示:

$$\min \mathcal{F}_e(G_{i,t}^{k+1}, P_{i,t}^g, \lambda_{i,t}^{co,k}) = obj_{power} + \sum_{t \in T} \sum_{i \in GG} \lambda_{i,t}^{co,k} (G_{i,t}^{k+1} - \eta_i^g P_{i,t}^g) + \sum_{t \in T} \sum_{i \in GG} \frac{d}{2} (G_{i,t}^{k+1} - \eta_i^g P_{i,t}^g)^2 \quad (14)$$

$$s.t. \quad \sum_{i \in CG \cup GG} P_{i,t} = \sum_{b \in B} D_{b,t}^e : \lambda_t^e, \forall t \quad (15)$$

$$P_{i\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i\max}, \forall i \in CG \cup GG, t \quad (16)$$

$$-\Delta t \cdot r_i \leq P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq \Delta t \cdot r_i, \forall i \in CG \cup GG, t \quad (17)$$

$$Pl_{j\min} \leq \sum_{b \in B} H_{jb} \left(\sum_{i \in CG \cup GG} v_{bi} P_{i,t} - D_{b,t}^e \right) \leq Pl_{j\max} : \mu_{j,t}^{l-}, \mu_{j,t}^{l+}, \forall j, t \quad (18)$$

其中, 式(14)为子模型目标函数, 式(15)为功率平衡方程, 式(16)为发电机组输出功率约束, 式(17)为发电机组爬坡率约束, 式(18)为输电线路传输功率约束; $G_{i,t}^{k+1}$ 表示 $G_{i,t}$ 在第 $k+1$ 次迭代的数值, $D_{b,t}^e$ 表示电网节点 b 在调度时段 t 的电力负荷预测值, B 表示电网节点集合, $P_{i\max}$ 、 $P_{i\min}$ 以及 r_i 分别表示第 i 个发电机组的最大输出功率、最小输出功率以及爬坡率, $t-1$ 表示上一调度时段, $Pl_{j\max}$ 、 $Pl_{j\min}$ 分别表示第 j 个输电线路的最大传输功率、最小传输功率, H_{jb} 为功率传输分布因子, 表示第 b 个电网节点的注入功率对于第 j 个输电线路的传输功率的影响, v_{bi} 表示发电机组-电网节点关联矩阵第 b 行第 i 列的元素, λ_t^e 表示等式约束 (式(15)) 的对偶变量, $\mu_{j,t}^{l-}$ 、 $\mu_{j,t}^{l+}$ 分别表示不等式约束 (式(18)) 下限和上限的对偶变量。

优选的, 所述交替求解天然气市场出清子问题和电力市场出清子问题并更新对偶变量的具体步骤包括:

3.1) 令迭代次数 $k=0$, 初始化变量 $\lambda_{i,t}^{co}$ 及 $P_{i,t}^g$ (即给出 $\lambda_{i,t}^{co,0}$ 及 $P_{i,t}^{g,0}$), 给定参数 d 、 ε^{abs} 以及 ε^{rel} ;

3.2) 根据 $\lambda_{i,t}^{co,k}$ 、 $P_{i,t}^{g,k}$ 求解天然气市场出清子问题, 得到第 $k+1$ 次迭代的燃气机组耗气量 $G_{i,t}^{k+1}$, 如式(19)所示:

$$G_{i,t}^{k+1} \in \arg \left\{ \min \mathcal{F}_g \left(G_{i,t}, P_{i,t}^{g,k}, \lambda_{i,t}^{co,k} \right) \right. \\ \left. s.t. \quad \text{式(5)-式(13)} \right\} \quad (19)$$

输气管道的稳态气流方程（式(8)）为二次等式，导致天然气市场出清子问题为非凸非线性规划问题，可以采用序列线性规划方法进行求解；并利用超松弛方法，引入松弛因子 α_o （一般取为 1.5~1.8）对燃气机组耗气量 $G_{i,t}^{k+1}$ 进行二次更新，如式(20)所示：

$$G_{i,t}^{k+1} = \alpha_o G_{i,t}^{k+1} + (1 - \alpha_o) \eta_i^g P_{i,t}^{g,k}, \forall i \in GG, t \quad (20)$$

3.3) 根据 $\lambda_{i,t}^{co,k}$ 、二次更新后的 $G_{i,t}^{k+1}$ 求解电力市场出清子问题，得到第 $k+1$ 次迭代的燃气机组输出功率 $P_{i,t}^{g,k+1}$ ，如式(21)所示：

$$P_{i,t}^{g,k+1} \in \arg \left\{ \min \mathcal{F}_e \left(G_{i,t}^{k+1}, P_{i,t}^g, \lambda_{i,t}^{co,k} \right) \right. \\ \left. s.t. \quad \text{式(15)-式(18)} \right\} \quad (21)$$

3.4) 判断是否满足交替方向乘子法的收敛准则，若是，则停止计算并输出电-气联合市场的分布式日前出清结果；若否，则根据式(22)更新对偶变量，并令 $k = k+1$ ，返回步骤 3.2)。

$$\lambda_{i,t}^{co,k+1} = \lambda_{i,t}^{co,k} + d \left(G_{i,t}^{k+1} - \eta_i^g P_{i,t}^{g,k+1} \right), \forall i \in GG, t \quad (22)$$

优选的，所述交替方向乘子法的收敛准则为满足式(25)：

$$r_{i,t}^{k+1} = G_{i,t}^{k+1} - \eta_i^g P_{i,t}^{g,k+1}, \forall i \in GG, t \quad (23)$$

$$s_{i,t}^{k+1} = -d \eta_i^g \left(P_{i,t}^{g,k+1} - P_{i,t}^{g,k} \right), \forall i \in GG, t \quad (24)$$

$$\|r^{k+1}\|_2 \leq \varepsilon^{pri} \quad \text{且} \quad \|s^{k+1}\|_2 \leq \varepsilon^{dual} \quad (25)$$

$$\varepsilon^{pri} = \sqrt{N_g \cdot N_t} \varepsilon^{abs} + \varepsilon^{rel} \max \left\{ \|G^{k+1}\|_2, \|\eta^g P^{k+1}\|_2 \right\} \quad (26)$$

$$\varepsilon^{dual} = \sqrt{N_g \cdot N_t} \varepsilon^{abs} + \varepsilon^{rel} \|\lambda^{co,k}\|_2 \quad (27)$$

其中， $r_{i,t}^{k+1}$ 、 $s_{i,t}^{k+1}$ 分别表示原始残差、对偶残差， ε^{pri} 、 ε^{dual} 分别为原始残差、对偶残差的收敛精度， ε^{abs} 、 ε^{rel} 分别为允许的绝对误差、相对误差， N_g 、 N_t 分别为燃气机组个数、调度时段个数， r^{k+1} 、 s^{k+1} 、 G^{k+1} 、 η^g 、 P^{k+1} 以及 $\lambda^{co,k}$ 分别为 $r_{i,t}^{k+1}$ 、 $s_{i,t}^{k+1}$ 、 $G_{i,t}^{k+1}$ 、 η_i^g 、 $P_{i,t}^{k+1}$ 以及 $\lambda_{i,t}^{co,k}$ 对应组成的列向量。

优选的，所述电-气联合市场的分布式日前出清结果包含两部分内容：第一部分为燃煤机组、燃气机组以及气源的优化调度方案（燃煤机组输出功率 $P_{i,t}^c$ 、燃气机组输出功率 $P_{i,t}^g$ 、

及气源出气量 $S_{u,t}$)；第二部分为节点边际电价与节点边际气价，计算公式如式(28)、式(29)所示：

$$\rho_{b,t}^{LMP,e} = -\lambda_t^e + \sum_{j \in J} \mu_{j,t}^{l-} H_{jb} - \sum_{j \in J} \mu_{j,t}^{l+} H_{jb} \quad (28)$$

$$\rho_{n,t}^{LMP,g} = -\lambda_{n,t}^g \quad (29)$$

其中， $\rho_{b,t}^{LMP,e}$ 表示第 b 个电网节点在第 t 个调度时段的边际电价， $\rho_{n,t}^{LMP,g}$ 表示第 n 个气网节点在第 t 个调度时段的边际气价。

本发明的有益效果体现在：

本发明以电能与天然气的总费用最小为目标函数，建立了电-气联合市场出清模型，基于交替方向乘子法将出清模型等效地分解为天然气市场出清子问题和电力市场出清子问题，交替求解两个子问题并更新对偶变量，从而得到电-气联合市场日前出清的优化结果。本发明实现了电-气联合市场的分布式高效出清，不仅充分满足了分属于不同运营主体的电力系统与天然气系统的电-气联合市场的出清需求，而且保证了电力和天然气可靠、安全、经济及高效的供应，有利于电-气互联系统的进一步发展及推广。

附图说明

图 1 为实施例中基于交替方向乘子法的电-气联合市场分布式出清方法流程图。

图 2 为实施例中的电-气互联系统示意图；其中，B1~B118 为电网节点编号，N1~N40 为气网节点编号。

图 3 为实施例中 1#燃煤机组的日前调度结果以及所在节点的边际电价。

图 4 为实施例中 2#燃气机组的日前调度结果以及所在节点的边际电价。

图 5 为实施例中 2#气源的日前调度结果以及所在节点的边际气价。

具体实施方式

以下结合附图及实施例，对本发明作进一步详细说明。应当理解，此处所描述的实施例仅用以解释本发明，并不用于限制本发明的保护范围。

参见图 1，本发明提供的基于交替方向乘子法的电-气联合市场分布式出清方法，包括以下步骤：

步骤 1：获取电-气联合市场分布式出清所需要的系统数据与报价信息。

以图 2 所示的电-气互联系统为例，进行电-气联合市场分布式出清的仿真分析。该电-气互联系统由 IEEE 118 节点电力系统和 40 节点天然气系统组成，包含 42 台燃煤机组、12 台燃气机组、12 个气源、186 条输电线路、35 条输气管道和 4 台压缩机。其中，燃煤

机组的报价区间为[19.9, 25.0] \$/MWh，燃气机组的电能报价的非成本部分均为 0 \$/MWh，气源的报价区间为[92880, 100080] \$/Mm³，调度时间间隔为 1 小时，所有压缩机的耗气量系数均为 3%。

步骤 2: 以全天电能与天然气的总费用最小为目标函数，考虑电力系统的约束条件（上述式(15)-式(18)）、天然气系统的约束条件（上述式(5)-式(12)）以及电力系统与天然气系统的耦合约束（上述式(2)），建立电-气联合市场集中式出清模型（目标函数见上述式(1)）。

步骤 3: 基于交替方向乘子法，根据增广拉格朗日函数（上述式(3)）将电-气联合市场集中式出清模型等效地分解为天然气市场出清子问题（上述式(4) -式(13)）和电力市场出清子问题（上述式(14) -式(18)）。

步骤 4: 令交替方向乘子法的迭代次数 $k=0$ ，初始化变量： $\lambda_{i,t}^{co,0} = -\max(p_u^s) = -100080$ 以及 $P_{i,t}^{g,0} = 0$ ；给定参数 $d = 2 \max(p_u^s) = 200160$ 、 $\varepsilon^{abs} = 10^{-4}$ 以及 $\varepsilon^{rel} = 10^{-4}$ 。

步骤 5: 根据 $\lambda_{i,t}^{co,k}$ 、 $P_{i,t}^{g,k}$ 求解天然气市场出清子问题，得到第 $k+1$ 次迭代的燃气机组耗气量 $G_{i,t}^{k+1}$ 。由于输气管道的稳态气流方程为二次等式，因而天然气市场出清子问题为非凸非线性规划问题，难以直接求解。为了解决该问题，本实施例中采用基于二阶锥松弛与序列线性规划的求解方法，具体步骤如下所示：

5.1) 令序列线性规划的迭代次数 $z=0$ ，初始化气压变化步长 $\Delta\pi_n^0 = \pi_{n\max}$ ，惩罚因子 $\omega=10^5$ ，参数 $a=0.2$ 、 $b=0.4$ ，收敛精度 $\varepsilon=10^{-3}$ 。

5.2) 当交替方向乘子法的迭代次数 $k=0$ 时，求解基于二阶锥松弛的天然气市场出清子问题，如式(30)所示，得到初始节点气压 $\pi_{n,t}^0$ （即 $\pi_{n,t}$ 在第 z 次迭代的数值， $z=0$ ）与初始管道气流 $F_{p,t}^0$ （即 $F_{p,t}$ 在第 z 次迭代的数值， $z=0$ ）；其余情况（即 $k>0$ ）， $\pi_{n,t}^0 = \pi_{n,t}^k$ 、 $F_{p,t}^0 = F_{p,t}^k$ 。

$$\begin{aligned} \pi_{n,t}^0, F_{p,t}^0 \in \arg \left\{ \min \mathcal{F}_g \left(G_{i,t}, P_{i,t}^{g,k}, \lambda_{i,t}^{co,k} \right) \right. \\ \left. s.t. \text{ 式(5) - 式(7), 式(9) - 式(13)} \right\} \\ F_{p,t}^2 + c_{1p}^2 \pi_{m,t}^2 \leq c_{1p}^2 \pi_{n,t}^2, \forall p, t \end{aligned} \quad (30)$$

5.3) 根据第 z 次的迭代值求解基于序列线性规划的天然气市场出清子问题（如式(31)所示），得到第 $z+1$ 次的迭代值。

$$\begin{aligned}
 G_{i,t}^{z+1}, \pi_{n,t}^{z+1}, F_{p,t}^{z+1} \in \arg \left\{ \min \mathcal{F}_g \left(G_{i,t}, P_{i,t}^{g,k}, \lambda_{i,t}^{co,k} \right) + \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} \omega \left(\Delta F_{p,t}^{z+1} + \Delta \bar{F}_{p,t}^{z+1} \right) \right. \\
 \left. \begin{aligned}
 & s.t. \quad \text{式(5)-式(7),式(9)-式(13)} \\
 & -\Delta F_{p,t}^{z+1} \leq F_{p,t}^z \left(2F_{p,t}^{z+1} - F_{p,t}^z \right) + c_{1p}^2 \pi_{m,t}^z \left(2\pi_{m,t}^{z+1} - \pi_{m,t}^z \right) - c_{1p}^2 \pi_{n,t}^z \left(2\pi_{n,t}^{z+1} - \pi_{n,t}^z \right) \leq \Delta \bar{F}_{p,t}^{z+1}, \forall p, t \\
 & \left| \pi_{n,t}^{z+1} - \pi_{n,t}^z \right| \leq \Delta \pi_n^z, \forall n, t
 \end{aligned} \right\} \quad (31)
 \end{aligned}$$

其中, $\Delta F_{p,t}^{z+1}$ 、 $\Delta \bar{F}_{p,t}^{z+1}$ 表示第 $z+1$ 次迭代的两个松弛变量, $\Delta \pi_n^z$ 表示第 $z+1$ 次迭代的气压变化步长。

5.4) 判断收敛准则 (如式(32)所示) 是否满足, 如果是, 令 $G_{i,t}^{k+1} = G_{i,t}^{z+1}$ 、 $\pi_{n,t}^{k+1} = \pi_{n,t}^{z+1}$ 、 $F_{p,t}^{k+1} = F_{p,t}^{z+1}$, 并前往步骤 6; 否则, 根据式(33) - 式(35)更新气压变化步长为 $\Delta \pi_n^{z+1}$, 令 $z = z+1$, 并返回步骤 5.3)。

$$obj_{err}^{z+1} = \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} \left| F_{p,t}^{z+1} - c_{1p} \sqrt{\left(\pi_{n,t}^{z+1} \right)^2 - \left(\pi_{m,t}^{z+1} \right)^2} \right| \leq \varepsilon \quad (32)$$

$$\gamma^{z+1} = \left[\sum_{t \in T} \sum_{p \in P} \omega \left(\Delta F_{p,t}^{z+1} + \Delta \bar{F}_{p,t}^{z+1} \right) + obj_{err}^{z+1} \right] / \left[\mathcal{F}_g^{z+1} \left(G_{i,t}, P_{i,t}^k, \lambda_{i,t}^{co,k} \right) + obj_{err}^{z+1} \right], \gamma^z \in (0, 1] \quad (33)$$

$$\beta_1^{z+1} = -a \cdot \log(\gamma^{z+1}) + b, \beta_2^{z+1} = (1 - \gamma^{z+1}) / \beta_1^{z+1} \quad (34)$$

$$\Delta \pi_n^{z+1} = \beta_2^{z+1} \pi_{n\max} / (z+1)^{\beta_1^{z+1}} \quad (35)$$

为了验证超松弛方法的有效性, 设置了三组不同的算例: 1) 不利用超松弛方法对 $G_{i,t}^{k+1}$ 进行二次更新, 即不考虑式(20); 2) 利用超松弛方法对 $G_{i,t}^{k+1}$ 进行二次更新, 令 $\alpha_o = 1.5$; 3) 利用超松弛方法对 $G_{i,t}^{k+1}$ 进行二次更新, 令 $\alpha_o = 1.8$ 。

步骤 6: 根据 $\lambda_{i,t}^{co,k}$ 、 $G_{i,t}^{k+1}$ 求解电力市场出清子问题, 得到第 $k+1$ 次迭代的燃气机组输出功率 $P_{i,t}^{g,k+1}$ 。

步骤 7: 判断是否满足交替方向乘子法的收敛准则 (上述式(25)), 若是, 则停止计算并输出电-气联合市场的分布式日前出清结果; 若否, 则更新对偶变量 (上述式(22)), 令 $k = k+1$, 并返回步骤 5。

本实施例中, 天然气市场出清子问题和电力市场出清子问题的求解是利用 Matlab 平台和 Gurobi 优化软件实现的。三种不同分布式方法的算例结果如表 1 所示 (包括总费用、天然气费用、电能费用、迭代次数以及计算时间)。此外, 为了比较分布式方法与集中式方法的异同, 表 1 中还展示了集中式方法的算例结果。

表 1. 不同分布式方法与集中式方法的算例结果对比

算例	总费用 (10^6 \$)	天然气费用 (10^6 \$)	电能费用 (10^6 \$)	交替方向乘子 法迭代次数	计算时 间 (秒)
不考虑超松弛的分布式方法 (即不 行二次更新)	9.5314	6.4830	3.0484	45	1366.82
考虑超松弛的分布式方法, $\alpha_o = 1.5$	9.5313	6.4829	3.0484	39	1135.74
考虑超松弛的分布式方法, $\alpha_o = 1.8$	9.5306	6.4828	3.0478	34	1014.25
集中式方法	9.5313	6.4817	3.0496	\	33.08

从表 1 可以看出, 三种不同分布式方法求解得到的算例结果差别不大, 且考虑超松弛的分布式方法所需要的迭代次数和计算时间明显少于不考虑超松弛的分布式方法。在本实施例中, 松弛因子 $\alpha_o = 1.8$ 的加速效果明显优于 $\alpha_o = 1.5$ 。对比分布式方法与集中式方法的算例结果, 天然气费用的最大相对误差为 0.020%, 电能费用的最大相对误差为 0.059%, 该误差范围在工程应用上是可以接受的。

电-气联合市场的分布式日前出清结果包含两部分内容: 第一部分为燃煤机组、燃气机组以及气源的优化调度方案; 第二部分为节点边际电价与节点边际气价。以 1#燃煤机组、2#燃气机组以及 2#气源为例, 电-气联合市场日前分布式出清的优化结果如图 3、图 4 及图 5 所示。

总之, 本发明提出的电-气联合市场分布式出清方法可以得到与集中式方法基本一致的优化结果, 且考虑超松弛的分布式方法能够明显降低迭代次数与计算时间, 从而有效提高分布式出清方法的计算效率。从调度结果看, 本实施例分布式方法求解得到的结果, 可以解决相互独立运行的电力系统与天然气系统的协同优化调度及联合市场出清问题, 从而实现电力与天然气的综合利用与高效配置。

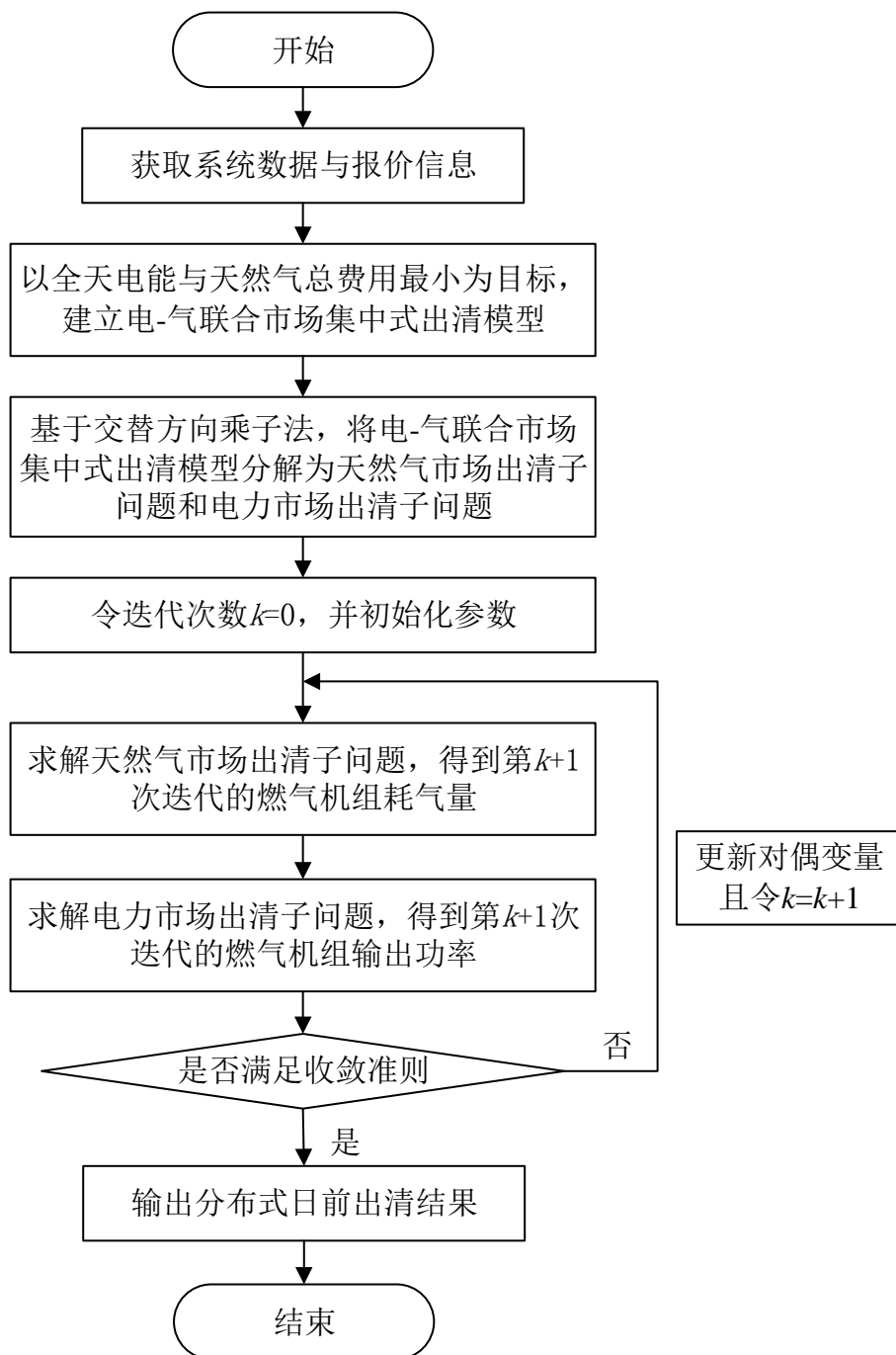


图 1

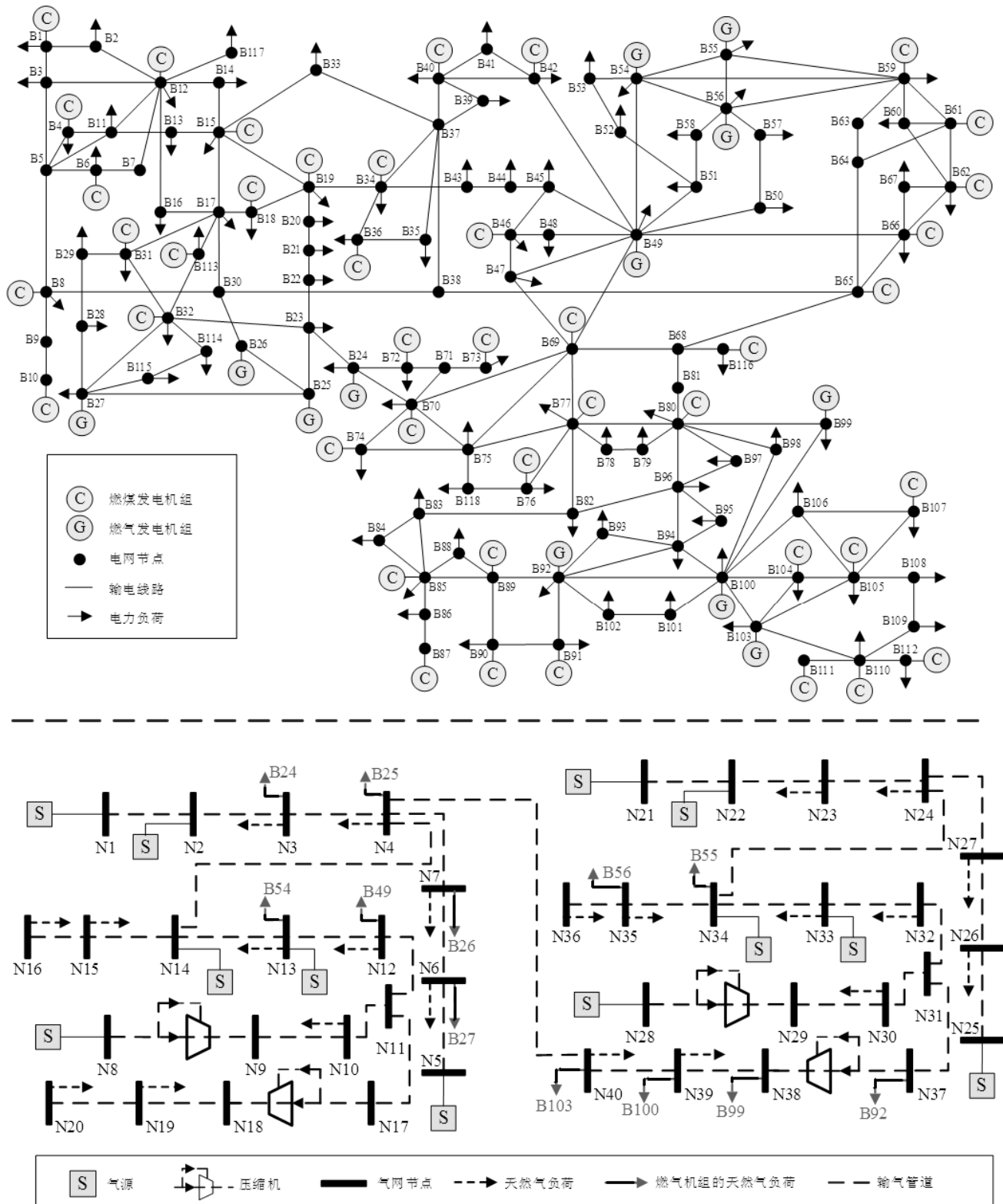


图 2

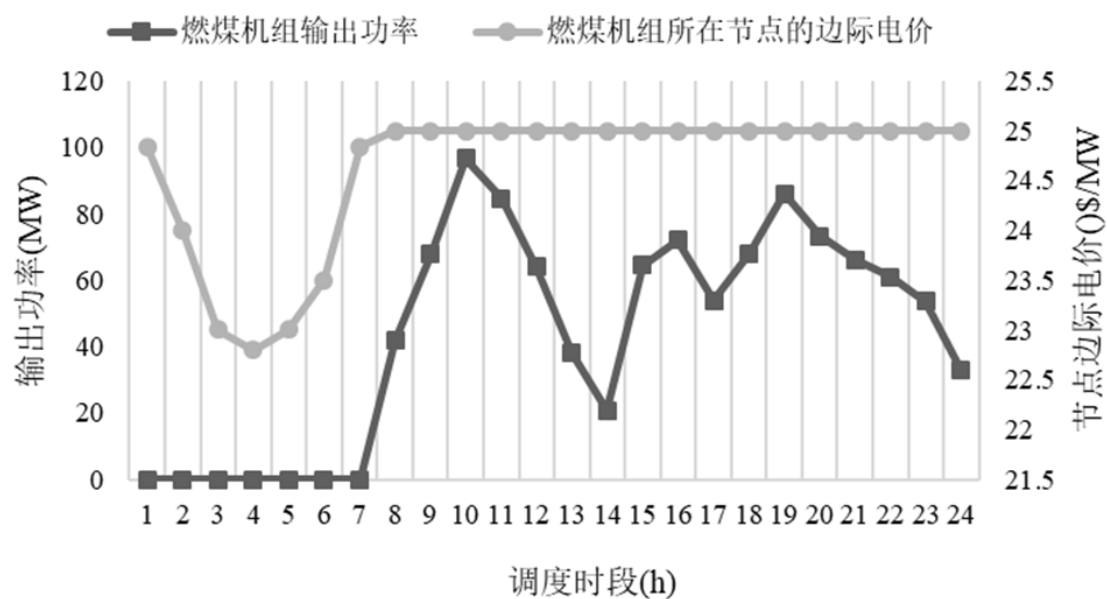


图 3

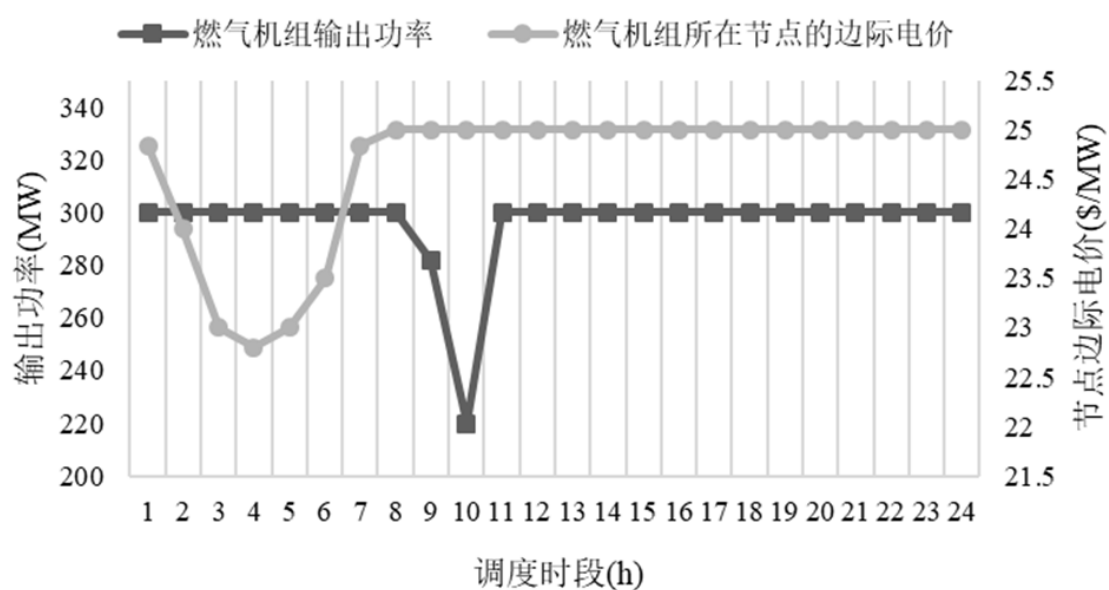


图 4

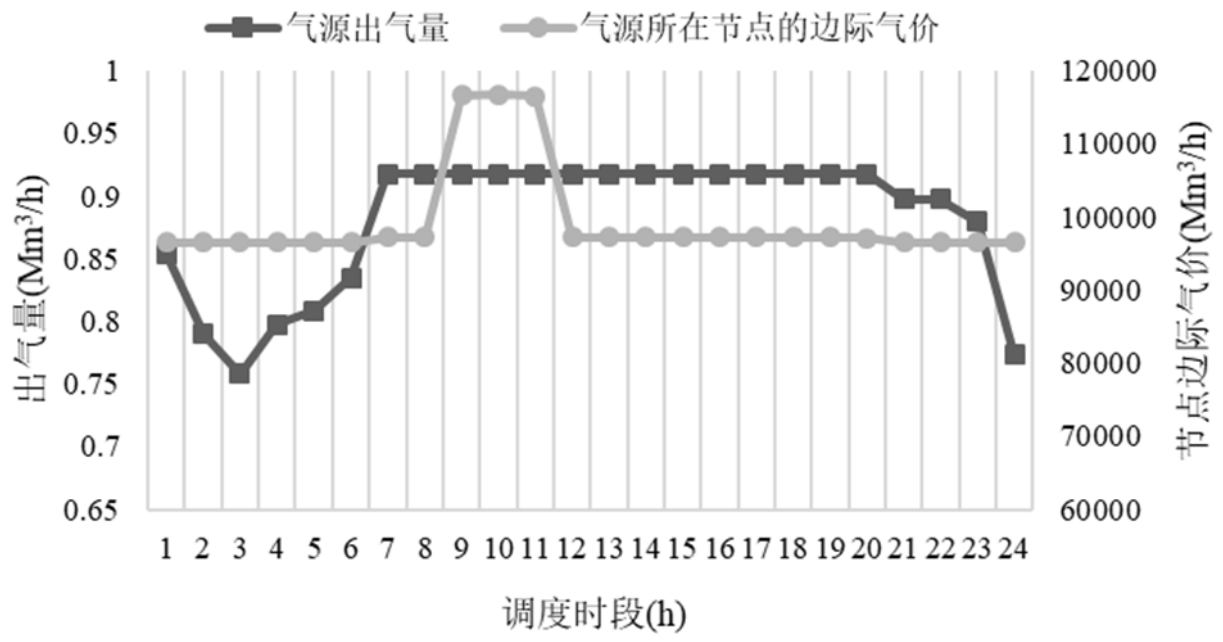


图 5

本发明公开了一种基于交替方向乘子法的电-气联合市场分布式出清方法，以全天电能与天然气的总费用最小为目标，建立电-气联合市场集中式出清模型。基于交替方向乘子法，引入对偶变量将集中式出清模型等效地分解为天然气市场出清子模型和电力市场出清子模型。交替求解天然气市场出清子模型和电力市场出清子模型并更新对偶变量，直至满足交替方向乘子法的收敛准则，从而得到电-气联合市场的分布式日前出清结果。本发明考虑了电力系统与天然气系统相互独立运行的实际情况，提出了分布式高效出清方法，促进了电力与天然气的综合利用与高效配置。

专 利 代 理 委 托 书

☒ 声明填写的专利代理委托信息与专利代理委托书扫描文件是一致的。
根据专利法第 19 条的规定

委 托 西安通大专利代理有限责任公司 机构代码 (61200)

1. 代为办理名称为 基于交替方向乘子法的电-气联合市场分布式出清方法 的发明创造
申请或专利 (申请号或专利号为) 以及在专利权有效期内的全部专利事务。

2. 代为办理名称为

专利号为 的专利权评价报告或实用新型专利检索报告。

3. 其他

专利代理机构接受上述委托并指定专利代理人

【代理人姓名】 范巍

【代理人姓名】

办理此项委托。

委托人 (单位或个人)

西安交通大学

(盖章或签字)

被委托人 (专利代理机构)

西安通大专利代理有限责任公司

(盖章)

2019年09月29日

发明专利请求书

_代理机构内部编号PCN19006706				此框内容由国家知识产权局填写		
⑦ 发明名称	基于交替方向乘子法的电-气联合市场分布式出清方法			① 申请号 (发明)		
				②分案提交日		
				③申请日		
⑧ 发明人	发明人 1	别朝红	<input type="checkbox"/> 不公布姓名	④费减审批		
	发明人 2	刘凡	<input type="checkbox"/> 不公布姓名	⑤向外申请审批		
	发明人 3	寇宇	<input type="checkbox"/> 不公布姓名	⑥挂号号码		
⑨第一发明人国籍 中国				居民身份证件号码 370102197010223325		
⑩ 申请人	申请人(1)	姓名或名称：西安交通大学		用户代码		
		居民身份证件号码或统一社会信用代码/组织机构代码 12100000435230200R		电子邮箱		
		<input checked="" type="checkbox"/> 请求费减且已完成费减资格备案				
		国籍或注册国家（地区） 中国				
		省、自治区、直辖市 陕西省				
		市县 西安市				
		城区（乡）、街道、门牌号咸宁西路 28 号				
	申请人(2)	经常居所地或营业所所在地 中国		邮政编码710049		电话
		姓名或名称：		用户代码		申请人类型
		居民身份证件号码或统一社会信用代码/组织机构代码 <input type="checkbox"/> 请求费减且已完成费减资格备案				
		国籍或注册国家（地区）				
		省、自治区、直辖市				
		市县				
		城区（乡）、街道、门牌号				
	申请人(3)	经常居所地或营业所所在地		邮政编码		电话
		姓名或名称：		用户代码		申请人类型
		居民身份证件号码或统一社会信用代码/组织机构代码 <input type="checkbox"/> 请求费减且已完成费减资格备案				
		国籍或注册国家（地区）				
		省、自治区、直辖市				
		市县				
		城区（乡）、街道、门牌号				
	经常居所地或营业所所在地		邮政编码		电话	

发 明 专 利 请 求 书

① 联 系 人	姓 名		电 话			
	邮政编码		电子邮箱			
	省、自治区、直辖市					
	市县					
	城区(乡)、街道、门牌号					
⑫代表人为非第一署名申请人时声明 特声明第 署名申请人为代表人						
⑬ 专 利 代 理 机 构	<input checked="" type="checkbox"/> 声明已经与申请人签订了专利代理委托书且本表中的信息与委托书中相应信息一致					
	名称西安通大专利代理有限责任公司		机构代码61200			
	代 理 人 (1)	姓 名范巍		代 理 人 (2)	姓 名	
		执业证号6120017403.0			执业证号	
		电 话029-62693980			电 话	
⑭分案申请		原申请号	针对的分案申请号	原申请日 年 月 日		
⑮生物 材料样品	保藏单位代码		地址	是否存活 <input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否		
	保藏日期 年 月 日		保藏编号	分类命名		
⑯序列表		<input type="checkbox"/> 本专利申请涉及核苷酸或氨基酸序列表				
⑰遗传资源		<input type="checkbox"/> 本专利申请涉及的发明创造是依赖于遗传资源完成的				
⑱ 要 求 优 先 权 声 明	序 号	原受理机构名称	在先申请日	在先申请号	⑲ 不 丧 失 新 颖 性 宽 限 期 声 明	<input type="checkbox"/> 已在中国政府主办或承认的国际展览会上首次展出 <input type="checkbox"/> 已在规定的学术会议或技术会议上首次发表 <input type="checkbox"/> 他人未经申请人同意而泄露其内容
	1					
	2					
	3					
	4					
	5					
	6					
	7					
8						
⑳保密请求		根据国家相关法律, 涉及国家秘密的信息不得在国际联网的计算机信息系统中存储、处理、传递, 故任何单位和个人认为其专利申请需要按照保密专利申请处理的, 不得通过电子专利申请系统提交。				
㉑同日申请		<input type="checkbox"/> 声明本申请人对同样的发明创造在申请本发明专利的同日申请了实用新型专利				
㉒提前公布		<input checked="" type="checkbox"/> 请求早日公布该专利申请	㉓摘要附图	指定说明书附图中的图为摘要附图。		

发 明 专 利 请 求 书

<p>②④ 申请文件清单</p> <p>1. 发明专利请求书 共5页</p> <p>2. 权利要求书 共0页</p> <p>3. 说明书 共0页</p> <p>4. 说明书附图 共0页</p> <p>5. 说明书摘要 共0页</p> <p>权利要求的项数 9 项</p>	<p>②⑤ 附加文件清单</p> <p>1. 专利代理委托书 共2页</p> <p>2. 实质审查请求书 共1页</p>
<p>②⑥ 全体申请人或专利代理机构签章</p> <p>西安通大专利代理有限责任公司</p> <p>2019年09月29日</p>	<p>②⑦ 国家知识产权局审核意见</p> <p>年 月 日</p>

发 明 专 利 请 求 书 外 文 信 息 表

发明名称		
发明人姓名	发明人 1	
	发明人 2	
	发明人 3	
申请人名称及地址	申请人 1	名称 地址
	申请人 2	名称 地址
	申请人 3	名称 地址

附页

【发明人】

发明人 4	王旭	<input type="checkbox"/> 不公布姓名
-------	----	--------------------------------

发明人 5	贺元康	<input type="checkbox"/> 不公布姓名
-------	-----	--------------------------------

发明人 6	陈天恩	<input type="checkbox"/> 不公布姓名
-------	-----	--------------------------------

【发明人外文信息】

发明人 4	
-------	--

发明人 5	
-------	--

发明人 6	
-------	--

实 质 审 查 请 求 书

请按照“注意事项”正确填写本表各栏

		本框由国家知识产权局填写
① 专 利 申 请	申请号	递交日
	发明创造名称 基于交替方向乘子法的电-气联合市场分布式出清方法	申请号条码
	申请人(*应当填写第一署名申请人) 西安交通大学	挂号条码
<p>② 请求内容:</p> <p>根据专利法第 35 条的规定, 请求对上述专利申请进行实质审查。</p> <p><input type="checkbox"/> 申请人声明, 放弃专利法实施细则第 51 条规定的主动修改的权利。</p>		
<p>③附件清单</p>		
<p>④备注</p> <p><input type="checkbox"/> 该申请为 PCT 国际申请, 实质审查费不予减免</p> <p><input type="checkbox"/> 该申请为 PCT 国际申请, 已由欧洲专利局、日本专利局、瑞典专利局作出国际检索报告, 实质审查费减免 20%</p> <p><input type="checkbox"/> 该申请为 PCT 国际申请, 已由中国作出国际检索报告及专利性国际初步报告, 实质审查费减免 100%</p> <p><input type="checkbox"/></p>		
<p>⑤申请人或专利代理机构签字或者盖章</p> <p>西安通大专利代理有限责任公司</p> <p>2019年09月29日</p>		<p>⑥国家知识产权局处理意见</p> <p>年 月 日</p>