

1. 基于序列线性规划的电-气联合市场集中式出清方法, 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-气联合市场集中式出清的非凸非线性规划模型; 所述天然气系统的约束条件包括输气管道稳态气流方程和非线性管存方程;

2) 对所述非凸非线性规划模型中的输气管道稳态气流方程和非线性管存方程进行松弛, 从而将电-气联合市场集中式出清的非凸非线性规划模型转换为二阶锥规划模型; 求解该二阶锥规划模型得到初始节点气压与初始管道气流;

3) 对所述非凸非线性规划模型中的输气管道稳态气流方程和非线性管存方程进行一阶泰勒展开, 从而将所述非凸非线性规划模型转换为序列线性规划模型; 迭代求解该序列线性规划模型直至满足收敛准则, 得到电-气联合市场的调度方案;

4) 基于所述序列线性规划模型中的对偶变量, 得到电-气联合市场出清的节点边际电价与节点边际气价。

2. 如权利要求 1 所述的基于序列线性规划的电-气联合市场集中式出清方法, 其特征在于: 所述非凸非线性规划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,  $P_{i,t}^g$  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,  $\Delta t$  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 所述的基于序列线性规划的电-气联合市场集中式出清方法, 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以及输电线路传输功率约束;

所述功率平衡方程表示为:

$$\sum_{i \in CG \cup GG} P_{i,t} = \sum_{b \in B} D_{b,t}^e : \lambda_t^e, \forall t$$

所述发电机组输出功率约束表示为:

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

所述发电机组爬坡率约束表示为:

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

所述输电线路传输功率约束表示为：

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

其中， $D_{b,t}^e$ 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， $P_{i,t}$ 表示第***i***个发电机组在第***t***个调度时段的输出功率，***GG***表示燃气机组集合，***CG***表示燃煤机组集合， $P_{i\max}$ 、 $P_{i\min}$ 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， $\Delta t$ 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， $\lambda_t^e$ 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。

4. 如权利要求1所述的基于序列线性规划的电-气联合市场集中式出清方法，其特征在于：所述天然气系统的约束条件还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、管存平衡方程、压缩机耗气量约束、压缩机压缩比约束以及压缩机传输流量约束；

所述节点气流平衡方程表示为：

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

所述气源出气量约束表示为：

$$S_{u\min} \leq S_{u,t} \leq S_{u\max}, \forall u, t$$

所述气网节点气压约束表示为：

$$\pi_{n\min} \leq \pi_{n,t} \leq \pi_{n\max}, \forall n, t$$

所述输气管道稳态气流方程表示为：

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

所述非线性管存方程表示为：

$$L_{p,t} = \frac{2}{3} c_{2p} \left( \pi_{\bar{n},t} + \pi_{\bar{m},t} - \frac{\pi_{\bar{n},t} \pi_{\bar{m},t}}{\pi_{\bar{n},t} + \pi_{\bar{m},t}} \right), \forall p, t$$

所述管存平衡方程表示为：

## 权 利 要 求 书

$$L_{p,t} = L_{p,t-1} + (F_{p,t}^{in} - F_{p,t}^{out}) \Delta t, \forall p, t$$

$$\sum_{p \in P} L_{p,24} = \sum_{p \in P} L_{p,0}$$

所述压缩机耗气量约束表示为：

$$\tau_{q,t}^{com} = \eta_q^{com} F_{q,t}^{com}, \forall q, t$$

所述压缩机压缩比约束表示为：

$$R_{q\min}^{com} \pi_{\tilde{n},t} \leq \pi_{\tilde{m},t} \leq R_{q\max}^{com} \pi_{\tilde{n},t}, \forall q, t$$

所述压缩机传输流量约束表示为：

$$F_{q\min}^{com} \leq F_{q,t}^{com} \leq F_{q\max}^{com}, \forall q, t$$

其中， $S_{u,t}$  表示第  $u$  个气源在第  $t$  个调度时段的出气量， $GS$  表示气源集合， $D_{n,t}^g$  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， $F_{p,t}^{in}$ 、 $F_{p,t}^{out}$  分别表示第  $p$  个输气管道在第  $t$  个调度时段的进气端传输流量、出气端传输流量，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， $v_{np}^{in}$  表示输气管道进气端-气网节点关联矩阵第  $n$  行第  $p$  列的元素， $v_{np}^{out}$  表示输气管道出气端-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， $F_{p,t}$  表示第  $p$  个输气管道在第  $t$  个调度时段的平均传输流量， $c_{1p}$  和  $c_{2p}$  分别表示第  $p$  个输气管道的稳态传输常数和暂态传输常数， $\Delta t$  表示调度时间间隔， $L_{p,t}$  表示第  $p$  个输气管道在第  $t$  个调度时段的管存， $t-1$  表示上一调度时段， $L_{p,0}$ 、 $L_{p,24}$  分别表示第  $p$  个输气管道在第一个调度时段之前、最后一个调度时段的管存， $\eta_q^{com}$  表示第  $q$  个压缩机的耗气量系数， $R_{q\max}^{com}$ 、 $R_{q\min}^{com}$  分

## 权 利 要 求 书

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。

5. 如权利要求 1 所述的基于序列线性规划的电-气联合市场集中式出清方法, 其特征在于: 所述电力系统与天然气系统的耦合约束包括燃气机组的耗气量以及气网节点的实际天然气负荷;

所述燃气机组的耗气量表示为:

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

所述气网节点的实际天然气负荷表示为:

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

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,  $\eta_i^g$  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,  $D_{n,t}^g$  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,  $D_{n,t}^{g0}$  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 所述的基于序列线性规划的电-气联合市场集中式出清方法, 其特征在于: 所述二阶锥规划模型中, 构成天然气系统的约束条件的输气管道稳态气流方程、非线性管存方程分别表示为:

$$F_{p,t}^2 + c_{1p}^2 \pi_{\bar{m},t}^2 \leq c_{1p}^2 \pi_{\bar{n},t}^2, \forall p, t$$

$$L_{p,t} = \frac{1}{2} c_{2p} (\pi_{\bar{n},t} + \pi_{\bar{m},t}), \forall p, t$$

其中,  $F_{p,t}$  表示第  $p$  个输气管道在第  $t$  个调度时段的平均传输流量,  $c_{1p}$  和  $c_{2p}$  分别表示第  $p$  个输气管道的稳态传输常数和暂态传输常数,  $L_{p,t}$  表示第  $p$  个输气管道在第  $t$  个调度时段的管存,  $\pi_{\bar{n},t}$ 、 $\pi_{\bar{m},t}$  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。

7. 如权利要求 1 所述的基于序列线性规划的电-气联合市场集中式出清方法, 其特征在于: 所述序列线性规划模型的目标函数表示为:

$$\min \text{obj}_{cost}^{z+1} + \text{obj}_{penalty}^{z+1}$$

所述序列线性规划模型中，构成天然气系统的约束条件的输气管道稳态气流方程、非线性管存方程分别表示为：

$$\begin{aligned} -\Delta F_{p,t}^{z+1} &\leq F_{p,t}^z (2F_{p,t}^{z+1} - F_{p,t}^z) + c_{1p}^2 \pi_{\bar{m},t}^z (2\pi_{\bar{m},t}^{z+1} - \pi_{\bar{m},t}^z) - c_{1p}^2 \pi_{\bar{n},t}^z (2\pi_{\bar{n},t}^{z+1} - \pi_{\bar{n},t}^z) \leq \Delta \bar{F}_{p,t}^{z+1}, \forall p, t \\ L_{p,t}^{z+1} - \frac{2}{3} c_{2p} \left[ 1 - \frac{\pi_{\bar{n},t}^z}{(\pi_{\bar{n},t}^z + \pi_{\bar{m},t}^z)^2} \right] \pi_{\bar{m},t}^{z+1} - \frac{2}{3} c_{2p} \left[ 1 - \frac{\pi_{\bar{m},t}^z}{(\pi_{\bar{n},t}^z + \pi_{\bar{m},t}^z)^2} \right] \pi_{\bar{n},t}^{z+1} &= 0, \forall p, t \end{aligned}$$

所述序列线性规划模型中还包括气网节点气压逼近约束：

$$|\pi_{n,t}^{z+1} - \pi_{n,t}^z| \leq \Delta \pi_n^z, \forall n, t$$

其中， $obj_{cost}^{z+1}$  表示第  $z+1$  次迭代的电能与天然气的总费用， $obj_{penalty}^{z+1}$  表示第  $z+1$  次迭代的惩罚项， $\Delta F_{p,t}^{z+1}$ 、 $\Delta \bar{F}_{p,t}^{z+1}$  表示第  $z+1$  次迭代的两个松弛变量， $F_{p,t}^{z+1}$ 、 $\pi_{n,t}^{z+1}$ 、 $L_{p,t}^{z+1}$  分别表示  $F_{p,t}$ 、 $\pi_{n,t}$ 、 $L_{p,t}$  的第  $z+1$  次迭代值， $\Delta \pi_n^z$  表示第  $z+1$  次迭代的气压变化步长， $F_{p,t}$  表示第  $p$  个输气管道在第  $t$  个调度时段的平均传输流量， $L_{p,t}$  表示第  $p$  个输气管道在第  $t$  个调度时段的管存， $\pi_{n,t}$  表示第  $n$  个气网节点在第  $t$  个调度时段的气压值， $\pi_{\bar{n},t}$ 、 $\pi_{\bar{m},t}$  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， $c_{1p}$  和  $c_{2p}$  分别表示第  $p$  个输气管道的稳态传输常数和暂态传输常数。

8. 如权利要求 7 所述的基于序列线性规划的电-气联合市场集中式出清方法，其特征在于：气压变化步长  $\Delta \pi_n^z$  根据以下公式进行迭代更新：

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

其中，

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

$$\gamma^{z+1} = (obj_{penalty}^{z+1} + obj_{err}^{z+1}) / (obj_{cost}^{z+1} + obj_{err}^{z+1}), \gamma^{z+1} \in (0, 1]$$

$$obj_{err}^{z+1} = \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} |errL_{p,t}^{z+1}| + |errF_{p,t}^{z+1}|$$

$$errL_{p,t}^{z+1} = L_{p,t}^{z+1} - \frac{2}{3} c_{2p} \left( \pi_{\bar{n},t}^{z+1} + \pi_{\bar{m},t}^{z+1} - \frac{\pi_{\bar{n},t}^{z+1} \pi_{\bar{m},t}^{z+1}}{\pi_{\bar{n},t}^{z+1} + \pi_{\bar{m},t}^{z+1}} \right), \forall p$$

$$errF_{p,t}^{z+1} = F_{p,t}^{z+1} - c_{1p} \sqrt{(\pi_{\bar{n},t}^{z+1})^2 - (\pi_{\bar{m},t}^{z+1})^2}, \forall p$$

$errL_{p,t}^{z+1}$  表示第  $z+1$  次迭代的第  $p$  个输气管道在第  $t$  个调度时段的管存  $L_{p,t}^{z+1}$  的计算误差， $errF_{p,t}^{z+1}$  表示第  $z+1$  次迭代的第  $p$  个输气管道在第  $t$  个调度时段的平均传输流量  $F_{p,t}^{z+1}$  的计算误差， $obj_{err}^{z+1}$  表示第  $z+1$  次迭代的总计算误差， $\gamma^{z+1}$ 、 $\beta_1^{z+1}$ 、 $\beta_2^{z+1}$  表示第  $z+1$  次迭代的辅助变量的值， $a$ 、 $b$  表示给定的参数， $\pi_{n\max}$  表示第  $n$  个气网节点的最大气压值， $T$  表示调度时段集合， $P$  表示输气管道集合。

9. 如权利要求 1 所述的基于序列线性规划的电-气联合市场集中式出清方法，其特征在于：所述收敛准则表示为：

$$\max |errL_{p,t}^{z+1}| \leq \varepsilon_1 \text{ 且 } \max |errF_{p,t}^{z+1}| \leq \varepsilon_1$$

或者，所述收敛准则表示为：

$$obj_{err}^{z+1} \leq \varepsilon_2$$

其中， $errL_{p,t}^{z+1}$  表示第  $z+1$  次迭代的第  $p$  个输气管道在第  $t$  个调度时段的管存  $L_{p,t}^{z+1}$  的计算误差， $errF_{p,t}^{z+1}$  表示第  $z+1$  次迭代的第  $p$  个输气管道在第  $t$  个调度时段的平均传输流量  $F_{p,t}^{z+1}$  的计算误差， $obj_{err}^{z+1}$  表示第  $z+1$  次迭代的总计算误差， $obj_{err}^{z+1} = \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} |errL_{p,t}^{z+1}| + |errF_{p,t}^{z+1}|$ ， $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  表示给定的收敛精度。

10. 如权利要求 1 所述的基于序列线性规划的电-气联合市场集中式出清方法，其特征在于：所述节点边际电价与节点边际气价分别表示为：

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

$$\rho_{n,t}^{LMP,g} = -\lambda_{n,t}^g$$

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， $\lambda_t^e$  表示第  $t$  个调度时段的功率平衡方程对偶变量， $H_{jb}$  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于第  $j$  个输电线路的传输功率的影响， $\mu_{j,t}^{l-}$ 、 $\mu_{j,t}^{l+}$  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， $J$  表示输电线路集合， $\rho_{n,t}^{LMP,g}$  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。

### 技术领域

本发明涉及一种电-气联合市场集中式出清方法，特别涉及基于序列线性规划的电-气联合市场集中式出清方法。

### 背景技术

能源危机、气候变暖以及环境恶化日益严重，为了进一步促进新能源的大规模利用、提高综合能源利用效率，一种新的能源利用体系“能源互联网”应用而生。能源互联网是以电、气、热等多种能源网络为载体，以能源技术与信息技术深度融合为特征，实现能源互济互补和高效利用的一体化能源系统。能源互联网的一大特征是实现多类型能源的综合利用，而不同类型的能源在传输速度和储存能力上存在明显差异。与电力、天然气相比，热力的最大特点在于不能远距离传输，因此能源互联网在输送层面主要由电-气互联系统组成。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，电-气互联系统不再是两个能源系统的简单叠加，还产生了很多新的问题与挑战。

国内外学者针对电-气互联系统已经开展了很多研究工作，主要集中于潮流计算、扩展规划等问题。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。目前，在电-气联合市场的研究中天然气系统的网络特征刻画较为简单，很少考虑天然气系统运行特性对电-气联合市场的影响。天然气系统的稳态传输特性通常采用输气管道的 Weymouth 稳态气流方程描述。与电力系统相比，天然气系统最大的不同点在于其传输具有明显的慢动态特性。天然气在管道传输过程中，随着沿线气压的降低，天然气的流速变缓，从而在管道中会滞留一部分天然气，称之为“管存”。管存对于维护天然气系统的正常运行、保证天然气供应的安全可靠具有重要意义。然而，现有的电-气互联系统研究大多忽略了管存对于系统运行的影响或者仅仅考虑线性化后的近似管存。

电-气联合市场集中式出清主要解决日前层面的系统优化问题，对计算效率和精度有较高要求，而输气管道的稳态气流方程为二次等式，导致电-气互联系统的优化问题是一个非凸非线性的混合整数规划问题，难以直接求解。目前通常采用的两种近似方法分别为分段线性化方法与二阶锥松弛方法。分段线性化方法的计算精度很大程度上取决于分段数，因此计算精度与计算效率难以同时保证。可见，分段线性化方法不适用于求解电-气

联合市场集中式出清问题。二阶锥松弛方法存在不可避免的计算误差且无法应用于处理非线性管存方程，因此二阶锥松弛方法也不适用于电-气联合市场的集中式出清。

在电-气联合市场集中式出清的建模中尚未见到考虑天然气系统的复杂运行特性，例如管存的非线性精细化方程，并获得考虑非线性天然气管存的市场出清结果的报道，因此，建立考虑天然气非线性传输特性的电-气联合市场集中式出清模型，并能够实现可行、高效的求解是优化电-气互联系统资源配置亟需解决的问题。

## 发明内容

本发明的目的在于提供一种基于序列线性规划的电-气联合市场集中式出清方法。

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的非凸非线性规划模型；所述天然气系统的约束条件包括输气管道稳态气流方程和非线性管存方程；

2) 对步骤 1) 中的输气管道稳态气流方程和非线性管存方程进行松弛，从而将电-气联合市场集中式出清的非凸非线性规划模型转换为电-气联合市场集中式出清的二阶锥规划模型；求解该二阶锥规划模型得到初始节点气压与初始管道气流；

3) 对步骤 1) 中的输气管道稳态气流方程和非线性管存方程进行一阶泰勒展开，从而将电-气联合市场集中式出清的非凸非线性规划模型转换为电-气联合市场集中式出清的序列线性规划模型；迭代求解该序列线性规划模型直至满足收敛准则，得到电-气联合市场的日前调度方案（气源出气量  $S_{u,t}$ 、燃煤机组输出功率  $P_{i,t}^c$ 、燃气机组输出功率  $P_{i,t}^g$ ）以及计算节点边际电价与气价所需的对偶变量（功率平衡方程对偶变量  $\lambda_t^e$ 、输电线路传输功率约束对偶变量  $\mu_{j,t}^{l-}$ 、 $\mu_{j,t}^{l+}$ 、节点气流平衡方程对偶变量  $\lambda_{n,t}^g$ ）；

4) 基于所述序列线性规划模型中的对偶变量，得到电-气联合市场日前出清的节点边际电价与节点边际气价。

优选的，所述目标函数表示为：

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

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  $i$  个燃煤机组的电价,  $p_i^g$  表示第  $i$  个燃气机组的电价中的非成本部分,  $\Delta t$  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, 所述电力系统的约束条件包括功率平衡方程 (式(2))、发电机组输出功率约束 (式(3))、发电机组爬坡率约束 (式(4)) 以及输电线路传输功率约束 (式(5)):

$$\sum_{i \in CG \cup GG} P_{i,t} = \sum_{b \in B} D_{b,t}^e : \lambda_t^e, \forall t \quad (2)$$

$$P_{i \min} \leq P_{i,t} \leq P_{i \max}, \forall i \in CG \cup GG, t \quad (3)$$

$$-\Delta t \cdot r_i \leq P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq \Delta t \cdot r_i, \forall i \in CG \cup GG, t \quad (4)$$

$$Pl_{j \min} \leq \sum_{b \in B} H_{jb} \left( \sum_{i \in CG \cup GG} v_{bi} P_{i,t} - D_{b,t}^e \right) \leq Pl_{j \max} : \mu_{j,t}^{l-}, \mu_{j,t}^{l+}, \forall j, t \quad (5)$$

其中,  $D_{b,t}^e$  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,  $Pl_{j \max}$ 、 $Pl_{j \min}$  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,  $\lambda_t^e$  表示等式约束 (式(2)) 的对偶变量,  $\mu_{j,t}^{l-}$ 、 $\mu_{j,t}^{l+}$  表示不等式约束 (式(5)) 下限和上限的对偶变量。

优选的, 所述天然气系统的约束条件包括节点气流平衡方程 (式(6))、气源出气量约束 (式(7))、气网节点气压约束 (式(8))、上述输气管道稳态气流方程 (式(9))、上述非线性管存方程 (式(10))、管存平衡方程 (式(11)-式(12))、压缩机耗气量约束 (式(13))、压缩机压缩比约束 (式(14)) 以及压缩机传输流量约束 (式(15)):

$$\sum_{u \in GS} v_{nu}^s S_{u,t} - D_{n,t}^g = \sum_{p \in P} (v_{np}^{in} F_{p,t}^{in} - v_{np}^{out} F_{p,t}^{out}) + \sum_{q \in C} v_{nq}^{cin} (F_{q,t}^{com} + \tau_{q,t}^{com}) - \sum_{q \in C} v_{nq}^{cout} F_{q,t}^{com} : \lambda_{n,t}^g, \forall n, t \quad (6)$$

$$S_{u \min} \leq S_{u,t} \leq S_{u \max}, \forall u, t \quad (7)$$

$$\pi_{n \min} \leq \pi_{n,t} \leq \pi_{n \max}, \forall n, t \quad (8)$$

$$F_{p,t}^2 = c_{1p}^2 (\pi_{n,t}^2 - \pi_{m,t}^2), \forall p, t \quad (9)$$

$$L_{p,t} = \frac{2}{3} c_{2p} \left( \pi_{\bar{n},t} + \pi_{\bar{m},t} - \frac{\pi_{\bar{n},t} \pi_{\bar{m},t}}{\pi_{\bar{n},t} + \pi_{\bar{m},t}} \right), \forall p, t \quad (10)$$

$$L_{p,t} = L_{p,t-1} + (F_{p,t}^{in} - F_{p,t}^{out}) \Delta t, \forall p, t \quad (11)$$

$$\sum_{p \in P} L_{p,24} = \sum_{p \in P} L_{p,0} \quad (12)$$

$$\tau_{q,t}^{com} = \eta_q^{com} F_{q,t}^{com}, \forall q, t \quad (13)$$

$$R_{q\min}^{com} \pi_{\bar{n},t} \leq \pi_{\bar{m},t} \leq R_{q\max}^{com} \pi_{\bar{n},t}, \forall q, t \quad (14)$$

$$F_{q\min}^{com} \leq F_{q,t}^{com} \leq F_{q\max}^{com}, \forall q, t \quad (15)$$

其中,  $D_{n,t}^s$  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, 第  $p$  个输气管道 (气流方向为从气网节点  $\bar{n}$  到  $\bar{m}$ ) 在第  $t$  个调度时段的进气端 (气网节点  $\bar{n}$ ) 传输流量  $F_{p,t}^{in}$  及出气端 (气网节点  $\bar{m}$ ) 传输流量  $F_{p,t}^{out}$  满足  $F_{p,t}^{in}, F_{p,t}^{out} \geq 0$ ,  $F_{q,t}^{com}$  表示第  $q$  个压缩机 (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,  $\tau_{q,t}^{com}$  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,  $v_{np}^{in}$  表示输气管道进气端-气网节点关联矩阵第  $n$  行第  $p$  列的元素,  $v_{np}^{out}$  表示输气管道出气端-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  $\bar{n}$ ) - 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  $\bar{m}$ ) - 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,  $\lambda_{n,t}^s$  表示等式约束 (式(6)) 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,  $F_{p,t}$  表示第  $p$  个输气管道在第  $t$  个调度时段的平均传输流量, 即  $F_{p,t} = (F_{p,t}^{in} + F_{p,t}^{out}) / 2$ ,  $c_{1p}$  和  $c_{2p}$  分别表示第  $p$  个输气管道的稳态传输常数和暂态传输常数,  $L_{p,t}$  表示第  $p$  个输气管道在第  $t$  个调度时段的管存,  $L_{p,0}$ 、 $L_{p,24}$  分别表示第  $p$  个输气管道在全天第一个调度时段之前、最后一个调度时段的管存,  $\eta_q^{com}$  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,  $F_{q\max}^{com}$ 、 $F_{q\min}^{com}$  分别表示第  $q$  个压缩机的最大传输流量、最小传输流量。

优选的, 所述电力系统与天然气系统的耦合约束包括燃气机组的耗气量计算式 (式(16)) 以及气网节点的实际天然气负荷表达式 (式(17)):

$$G_{i,t} = \eta_i^g P_{i,t}^g, \forall i \in GG, t \quad (16)$$

$$D_{n,t}^g = D_{n,t}^{g0} + \sum_{i \in GG} v_{ni}^{gn} G_{i,t}, \forall n, t \quad (17)$$

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,  $\eta_i^g$  表示第  $i$  个燃气机组的能量转换系数,  $D_{n,t}^{g0}$  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。

优选的, 对上述输气管道稳态气流方程 (式(9)) 和非线性管存方程 (式(10)) 进行松弛, 得到对应约束的变形式, 即输气管道稳态气流方程的二阶锥约束 (式(18)) 以及线性管存近似方程 (式(19)):

$$F_{p,t}^2 + c_{1p}^2 \pi_{\bar{m},t}^2 \leq c_{1p}^2 \pi_{\bar{n},t}^2, \forall p, t \quad (18)$$

$$L_{p,t} = \frac{1}{2} c_{2p} (\pi_{\bar{n},t} + \pi_{\bar{m},t}), \forall p, t \quad (19)$$

所述电-气联合市场集中式出清的二阶锥规划模型如式(20)所示:

$$\begin{aligned} & \min \text{obj}_{cost} \\ & \text{s.t. 式(2) - 式(8), 式(11) - 式(19)} \end{aligned} \quad (20)$$

优选的, 对上述输气管道稳态气流方程 (式(9)) 和非线性管存方程 (式(10)) 进行一阶泰勒展开, 得到的输气管道稳态气流方程和非线性管存方程第  $z+1$  次的迭代公式如式(21)和式(22)所示:

$$F_{p,t}^z (2F_{p,t}^{z+1} - F_{p,t}^z) + c_{1p}^2 \pi_{\bar{m},t}^z (2\pi_{\bar{m},t}^{z+1} - \pi_{\bar{m},t}^z) - c_{1p}^2 \pi_{\bar{n},t}^z (2\pi_{\bar{n},t}^{z+1} - \pi_{\bar{n},t}^z) = 0, \forall p, t \quad (21)$$

$$L_{p,t}^{z+1} - \frac{2}{3} c_{2p} \left[ 1 - \frac{\pi_{\bar{n},t}^z}{(\pi_{\bar{n},t}^z + \pi_{\bar{m},t}^z)^2} \right] \pi_{\bar{m},t}^{z+1} - \frac{2}{3} c_{2p} \left[ 1 - \frac{\pi_{\bar{m},t}^z}{(\pi_{\bar{n},t}^z + \pi_{\bar{m},t}^z)^2} \right] \pi_{\bar{n},t}^{z+1} = 0, \forall p, t \quad (22)$$

其中,  $F_{p,t}^{z+1}$ 、 $\pi_{n,t}^{z+1}$ 、 $L_{p,t}^{z+1}$  分别表示  $F_{p,t}$ 、 $\pi_{n,t}$ 、 $L_{p,t}$  的第  $z+1$  次迭代值,  $F_{p,t}^z$ 、 $\pi_{n,t}^z$ 、 $L_{p,t}^z$  分别表示  $F_{p,t}$ 、 $\pi_{n,t}$ 、 $L_{p,t}$  的第  $z$  次迭代值;

所述电-气联合市场集中式出清的序列线性规划模型如式(23)所示:

$$\begin{aligned} & \min \text{obj}_{cost}^{z+1} + \text{obj}_{penalty}^{z+1} = \text{obj}_{cost}^{z+1} + \sum_{i \in T} \sum_{p \in P} \omega (\Delta F_{p,t}^{z+1} + \Delta \bar{F}_{p,t}^{z+1}) \\ & \text{s.t. 式(2) - 式(8), 式(11) - 式(17), 式(22)} \\ & -\Delta F_{p,t}^{z+1} \leq F_{p,t}^z (2F_{p,t}^{z+1} - F_{p,t}^z) + c_{1p}^2 \pi_{\bar{m},t}^z (2\pi_{\bar{m},t}^{z+1} - \pi_{\bar{m},t}^z) - c_{1p}^2 \pi_{\bar{n},t}^z (2\pi_{\bar{n},t}^{z+1} - \pi_{\bar{n},t}^z) \leq \Delta \bar{F}_{p,t}^{z+1}, \forall p, t \\ & |\pi_{n,t}^{z+1} - \pi_{n,t}^z| \leq \Delta \pi_n^z, \forall n, t \end{aligned} \quad (23)$$

其中,  $obj_{cost}^{z+1}$  表示第  $z+1$  次迭代的全天电能与天然气的总费用,  $obj_{penalty}^{z+1}$  表示第  $z+1$  次迭代的惩罚项,  $obj_{penalty}^{z+1} = \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} \omega (\Delta F_{p,t}^{z+1} + \Delta \bar{F}_{p,t}^{z+1})$ ,  $\omega$  表示惩罚因子 (一般取为  $10^4 \sim 10^6$ ),  $\Delta F_{p,t}^{z+1}$ 、 $\Delta \bar{F}_{p,t}^{z+1}$  表示第  $z+1$  次迭代的两个松弛变量 (决策变量, 在每次迭代中通过求解优化模型得到),  $\Delta \pi_n^z$  表示第  $z+1$  次迭代的气压变化步长并根据如下公式 (式(24)-式(29)) 不断迭代更新:

$$errL_{p,t}^{z+1} = L_{p,t}^{z+1} - \frac{2}{3} c_{2p} \left( \pi_{\bar{n},t}^{z+1} + \pi_{\bar{m},t}^{z+1} - \frac{\pi_{\bar{n},t}^{z+1} \pi_{\bar{m},t}^{z+1}}{\pi_{\bar{n},t}^{z+1} + \pi_{\bar{m},t}^{z+1}} \right) \quad (24)$$

$$errF_{p,t}^{z+1} = F_{p,t}^{z+1} - c_{1p} \sqrt{\left( \pi_{\bar{n},t}^{z+1} \right)^2 - \left( \pi_{\bar{m},t}^{z+1} \right)^2} \quad (25)$$

$$obj_{err}^{z+1} = \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} |errL_{p,t}^{z+1}| + |errF_{p,t}^{z+1}| \quad (26)$$

$$\gamma^{z+1} = (obj_{penalty}^{z+1} + obj_{err}^{z+1}) / (obj_{cost}^{z+1} + obj_{err}^{z+1}), \gamma^{z+1} \in (0,1] \quad (27)$$

$$\beta_1^{z+1} = -a \cdot \log(\gamma^{z+1}) + b, \beta_2^{z+1} = (1 - \gamma^{z+1}) / \beta_1^{z+1} \quad (28)$$

$$\Delta \pi_n^{z+1} = \beta_2^{z+1} \pi_{n \max} / (z+1)^{\beta_1^{z+1}} \quad (29)$$

其中,  $errL_{p,t}^{z+1}$  表示第  $z+1$  次迭代的第  $p$  个输气管道在第  $t$  个调度时段的管存  $L_{p,t}^{z+1}$  的计算误差,  $errF_{p,t}^{z+1}$  表示第  $z+1$  次迭代的第  $p$  个输气管道在第  $t$  个调度时段的平均传输流量  $F_{p,t}^{z+1}$  的计算误差,  $obj_{err}^{z+1}$  表示第  $z+1$  次迭代的总计算误差,  $\gamma^{z+1}$ 、 $\beta_1^{z+1}$ 、 $\beta_2^{z+1}$  均表示第  $z+1$  次迭代的辅助变量,  $a$ 、 $b$  均表示给定的参数 ( $a$  一般取为  $0.1 \sim 0.25$ ,  $b$  一般取为  $0.2 \sim 0.5$ )。

优选的, 所述序列线性规划模型的收敛准则为满足式(30)或者满足式(31);

$$\max |errL_{p,t}^{z+1}| \leq \varepsilon_1 \text{ 且 } \max |errF_{p,t}^{z+1}| \leq \varepsilon_1 \quad (30)$$

$$obj_{err}^{z+1} \leq \varepsilon_2 \quad (31)$$

其中,  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  表示给定的收敛精度。

优选的, 所述节点边际电价与节点边际气价的计算公式如式(32)、式(33)所示:

$$\rho_{b,t}^{LMP,e} = -\lambda_t^e + \sum_{j \in J} \mu_{j,t}^{l-} H_{jb} - \sum_{j \in J} \mu_{j,t}^{l+} H_{jb} \quad (32)$$

$$\rho_{n,t}^{LMP,g} = -\lambda_{n,t}^g \quad (33)$$

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,  $J$  表示输电线路集合,

$\rho_{n,t}^{LMP,g}$  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,考虑输气管道稳态气流方程和非线性管存方程,建立了计及天然气系统复杂运行特性的电-气联合市场集中式出清模型,针对该模型利用一阶泰勒展开式提出了一种基于序列线性规划的求解方法,可以考虑非线性管存等天然气系统复杂运行特性对于电-气联合市场集中式出清的影响,并实现对电-气联合市场在日前层面的集中式出清的非凸非线性规划的求解,获得了有效的电-气互联系统在日前层面的优化调度(发电机组、气源的优化调度)方案与市场出清(节点边际电价、节点边际气价)结果。

## 附图说明

图 1 为实施例中基于序列线性规划的电-气联合市场集中式出清方法流程图。

图 2 为实施例中的电-气互联系统示意图;其中, B1~B39 为电网节点编号, N1~N20 为气网节点编号。

图 3 为实施例中考虑不同管存方程时 2#气源的出气量调度结果。

图 4 为实施例中考虑不同管存方程时 15#电网节点的节点边际电价出清结果。

图 5 为实施例中考虑不同管存方程时 13#气网节点的节点边际气价出清结果。

## 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,而非对本发明保护范围的限制。

参见图 1,本发明提供的基于序列线性规划的电-气联合市场集中式出清方法,包括以下步骤:

步骤 1: 获取电-气联合市场集中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-气联合市场集中式出清的仿真分析。该电-气互联系统由 IEEE 39 节点电力系统和 20 节点天然气系统组成,包含 6 台燃煤机组、4 台燃气机组、6 个气源、46 条输电线路、17 条输气管道和 2 台压缩机。其中,燃煤机组、燃气机组和气源的详细数据与报价信息分别如表 1、表 2 和表 3 所示,调度时间间隔为 1 小时,所有压缩机的耗气量系数均为 3%。

表 1. 电-气互联测试系统中燃煤机组的详细数据与报价信息

燃煤机组编号	电网节点	最大输出功率 (MW)	最小输出功率 (MW)	爬坡率 (MW/min)	电能报价 (\$/MWh)
1	30	500	150	10	23.667
2	31	700	200	14	18.919
3	33	700	200	14	18.919
4	34	500	150	10	23.667

## 说明书

5	36	700	200	14	18.919
6	39	1000	300	20	15.345

表 2. 电-气互联测试系统中燃气机组的详细数据与报价信息

燃气机组编号	电网节点	气网节点	最大输出功率(MW)	最小输出功率(MW)	爬坡率(MW/min)	电能报价的非成本部分(\$/MWh)	能量转换系数(Mm <sup>3</sup> /MWh)
1	32	12	800	160	32	0	0.000208
2	35	13	800	160	32	0	0.000208
3	37	3	350	70	14	0	0.00025
4	38	2	350	70	14	0	0.00025

表 3. 电-气互联测试系统中气源的详细数据与报价信息

气源编号	气网节点	最大出气量(Mm <sup>3</sup> /h)	最小出气量(Mm <sup>3</sup> /h)	天然气报价(\$/Mm <sup>3</sup> )
1	1	0.9662	0	92880
2	8	1.8344	0	96480
3	13	0.05	0	100080
4	2	0.35	0	100080
5	5	0.20	0	100080
6	14	0.04	0	100080

步骤 2: 以全天电能与天然气的总费用最小为目标函数（上述式(1)），考虑电力系统的约束条件（上述式(2)-式(5)）、天然气系统的约束条件（上述式(6)-式(15)）以及电力系统与天然气系统的耦合约束（上述式(16)-式(17)），建立电-气联合市场集中式出清的非凸非线性规划模型。

步骤 3: 对输气管道稳态气流方程（上述式(9)）和非线性管存方程（上述式(10)）进行松弛，得到电-气联合市场集中式出清的二次规划模型（上述式(20)），利用 Matlab 平台和 Gurobi 优化软件求解得到初始节点气压  $\pi_{n,t}^0$  与初始管道气流  $F_{p,t}^0$ 。

步骤 4: 利用一阶泰勒展开式，对输气管道稳态气流方程（上述式(9)）和非线性管存方程（上述式(10)）进行近似，得到电-气联合市场集中式出清的序列线性规划模型（上述式(23)）。其中，惩罚因子  $\omega$  设为  $10^5$ ，初始气压变化步长  $\Delta\pi_n^0$  设为各气网节点的气压最大值，参数  $a$ 、 $b$  分别设为 0.2、0.4。

步骤 5: 利用 Matlab 平台和 Gurobi 优化软件迭代求解序列线性规划模型直至满足收敛准则，得到电-气联合市场的日前调度方案以及计算节点边际电价与气价所需的对偶变量。

求解序列线性规划模型中,为了说明管存对于市场出清结果的影响,设置了三个不同的算例:1)不考虑管存方程,简称不考虑管存;2)考虑线性管存近似方程(即基于二阶锥规划模型求解得到初始值,再根据序列线性规划模型迭代求解,其中式(22)替换为式(19)),简称线性化管存;3)考虑非线性管存方程(即基于二阶锥规划模型求解得到初始值,再根据序列线性规划模型迭代求解),简称非线性管存。设置收敛精度 $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 分别为 $10^{-6}$ 、 $10^{-5}$ 时,给定的三个不同算例的出清结果、迭代次数以及计算时间如表4所示。考虑不同管存方程时2#气源的出气量调度曲线如图3所示。

表 4. 三个不同算例的出清结果、迭代次数以及计算时间

算例	总费用 ( $10^6$ \$)	天然气费用 ( $10^6$ \$)	电能费用 ( $10^6$ \$)	迭代次数	计算时间 (秒)
不考虑管存方程	5.25756	3.81041	1.44715	8	23.61
考虑线性管存近似方程	5.24976	3.80165	1.44811	7	24.57
考虑非线性管存方程	5.24979	3.80166	1.44813	9	26.35

步骤 6: 基于序列线性规划模型最后一次迭代的对偶变量,得到电-气联合市场日前出清的节点边际电价(上述式(32))与节点边际气价(上述式(33))。在实施例中,15#电网节点的节点边际电价日曲线如图4所示,13#气网节点的节点边际气价日曲线如图5所示。

从表4可以看出,在电-气联合市场的集中式出清中是否考虑管存对于优化结果影响很大,总费用、天然气费用以及电能费用存在明显差异。而对比考虑线性化管存近似方程的算例2与考虑非线性管存方程的算例3时发现,它们的费用结果、迭代次数以及计算时间都十分接近。从图3、图4和图5中的仿真结果可以看出,不考虑管存方程与考虑管存方程相比,气源出气量、节点边际电价和节点边际气价具有很大差异;而考虑线性管存近似方程(算例2)与考虑非线性管存方程(算例3)相比,节点边际电价与节点边际气价也存在一定差异(考虑非线性管存方程的节点边际电价与节点边际气价更高,从而有利于保证燃煤机组、燃气机组以及气源按照调度方案进行能源供应)。

综上所述,考虑管存更加符合天然气系统实际运行特点、可以更好地利用管存的存储特性对天然气和电力资源进行优化配置、有利于减少系统全天运行总费用,因此在电-气联合市场的集中式出清模型中考虑管存的非线性、精细化方程是十分有必要的。此外,考虑非线性管存方程并没有大幅度增加迭代次数与计算时间,说明本发明方法可以具有较高的求解效率,可以适用于电-气互联系统在日前层面的市场出清。

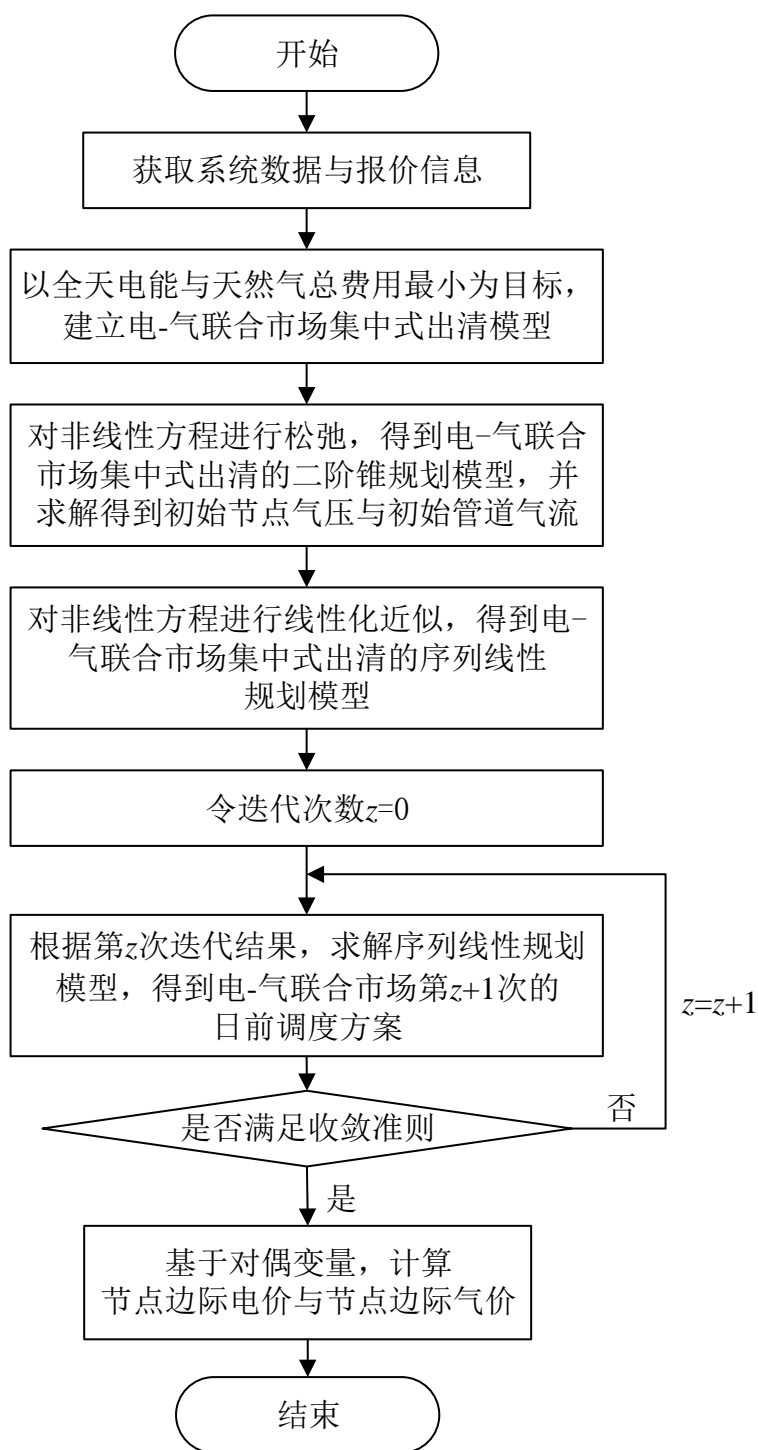


图 1



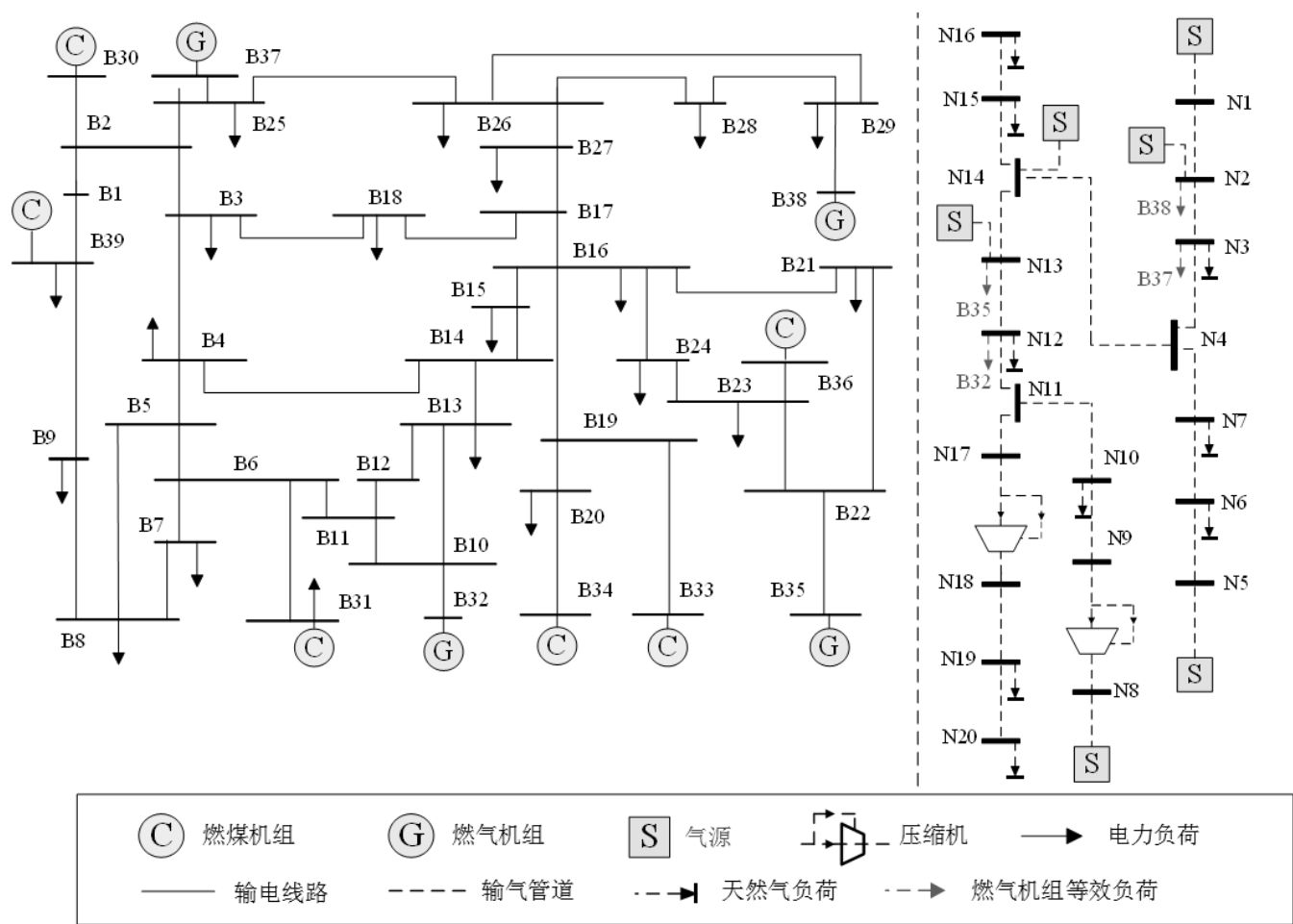


图 2

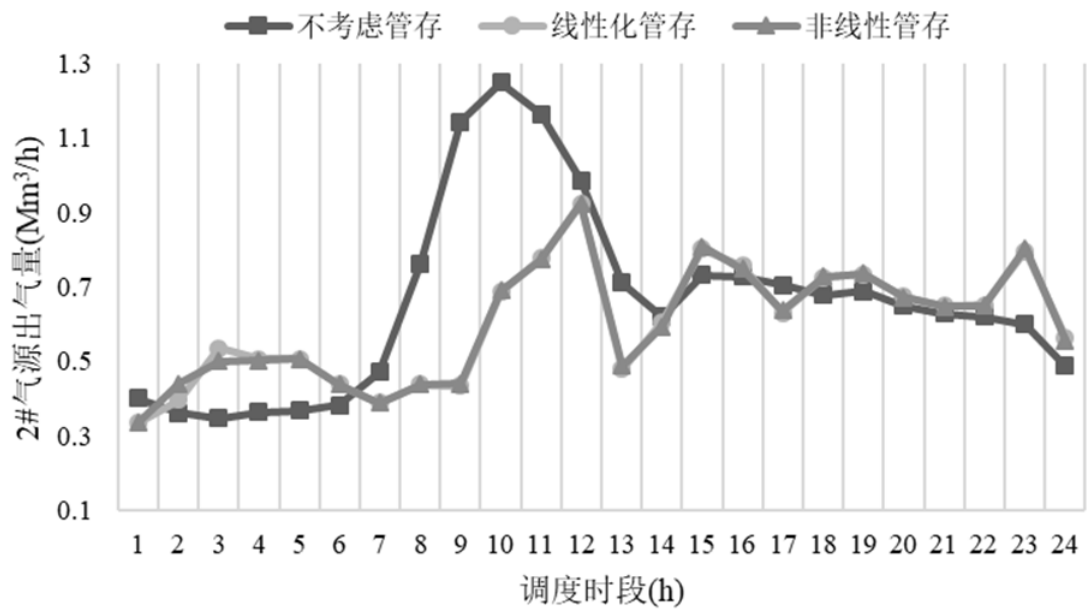


图 3

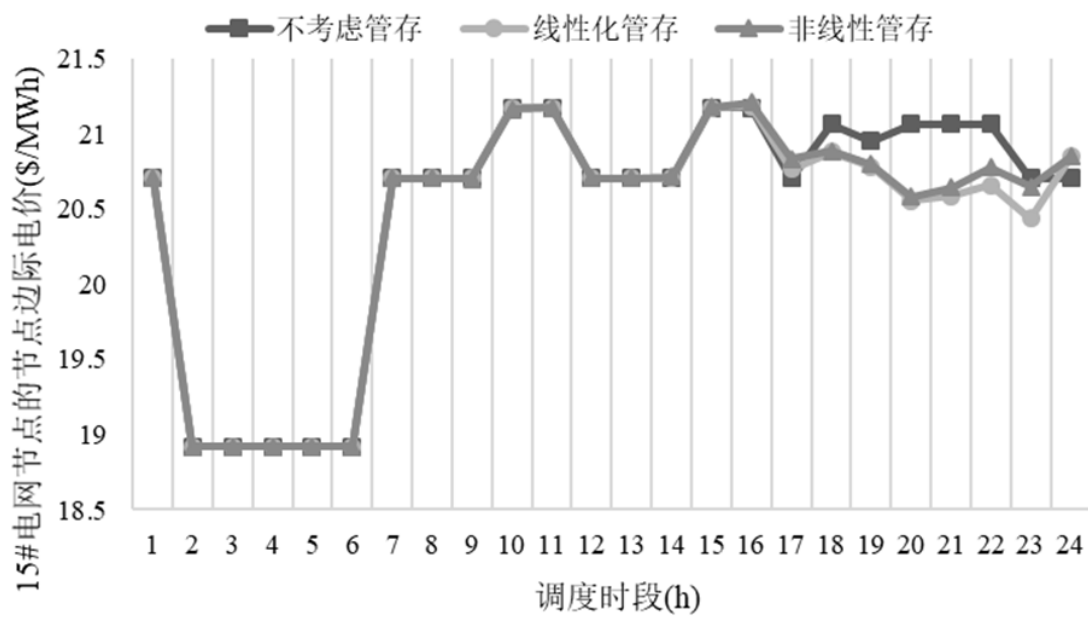


图 4

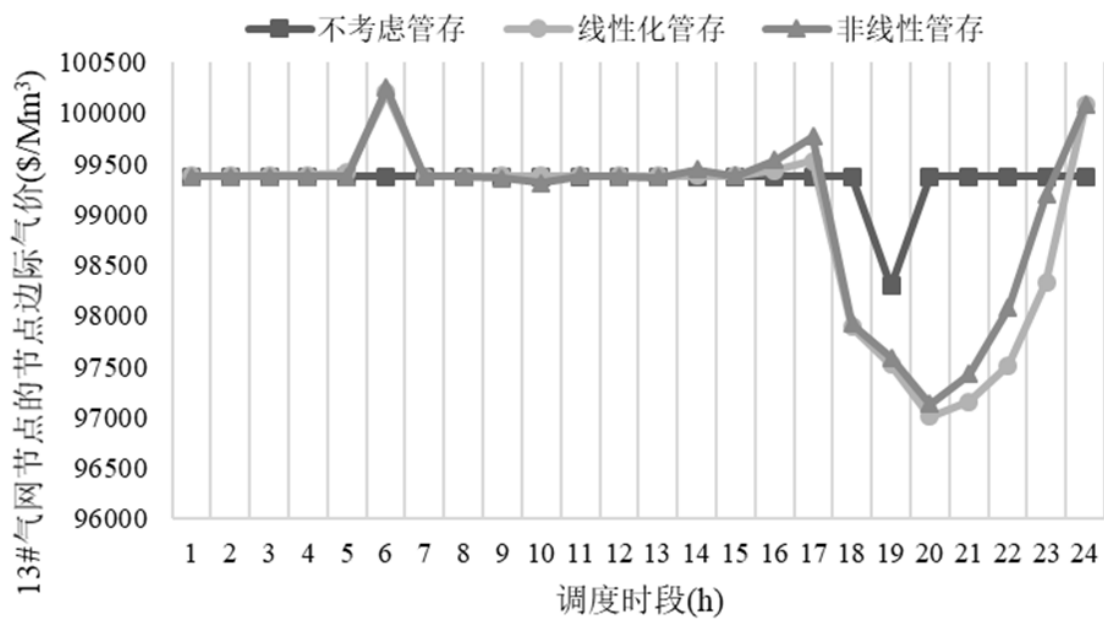


图 5

本发明公开了一种基于序列线性规划的电-气联合市场集中式出清方法，以全天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，对输气管道稳态气流方程和非线性管存方程进行一阶泰勒展开，得到电-气联合市场集中式出清的序列线性规划模型。求解序列线性规划模型，得到电-气联合市场的日前调度方案，并计算节点边际电价与节点边际气价。本发明考虑了非线性管存等天然气系统复杂运行特性对于电-气联合市场集中式出清的影响，实现了电-气互联系统在日前层面的优化调度与市场出清。

# 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 基于序列线性规划的电-气联合市场集中式出清方法 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

【图片描述】 专利代理委托书扫描文件

# 发 明 专 利 请 求 书

_代理机构内部编号PCN19006705				此框内容由国家知识产权局填写		
⑦ 发明名称	基于序列线性规划的电-气联合市场集中式出清方法			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	王旭	<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	申请人类型 大专院校	
		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 10 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	寇宇	<input type="checkbox"/> 不公布姓名
-------	----	--------------------------------

发明人 5	马晓伟	<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 基于序列线性规划的电-气联合市场集中式出清方法	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>