DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241407

基于路径加速搜索的大用户直接参与省间现货高效交易方法

凡庆德[1]，包诗媛[1]，蒋东荣[1]，罗治强[2]，黄国栋[3]，曲建璋[4]

(1. 重庆市能源互联网工程技术研究中心(重庆理工大学)，重庆 400054；2. 国家电网公司国家电力调度控制中心，北京 100031；3. 中国电力科学研究院有限公司，北京 100192；4. 国网山东省电力公司电力科学研究院，山东 济南 250003)

摘要：在当前我国推进大用户直接参与省间电力现货市场交易的背景下，为解决交易路径搜索与成交对撮合匹配计算负担重的问题，提出了一种基于交易路径加速搜索的大用户直接参与省间电力现货高效交易方法。首先，构建了包含复合边的交易路径改进图论模型，以及基于路径改进表征的省间电力现货撮合交易模型，可有效描述大用户直接参与省间交易时的特征。然后，提出了基于通道权重参数引导的交易路径高效搜索方法，通过规避低重要性的交易路径降低了搜索负担。针对路径重要性，提出了基于改进 K-means 聚类算法与路径总权重变化趋势的判定策略，可确保所得核心路径的重要性显著高于被削减路径。基于所提方法实现交易路径搜索并应用于撮合交易过程。仿真结果表明，所提方法可在不影响现货交易决策结果的前提下，显著提升交易路径搜索与用户撮合匹配的效率。

关键词：省间电力现货交易；大用户直接参与；交易路径；撮合交易；输电通道权重参数

Efficient inter-provincial spot market trading method for large consumers based on accelerated path search

FAN Qingde[1], BAO Shiyuan[1], JIANG Dongrong[1], LUO Zhiqiang[2], HUANG Guodong[3], QU Jianzhang[4]

(1. Chongqing Engineering Technology Research Center of Energy Internet, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2. National Electric Power Dispatching and Control Center, State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 4. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China)

Abstract: In the context of promoting direct participation of large consumers in China's inter-provincial electricity spot markets, this paper proposes an efficient trading method based on accelerated path search to address the heavy computational burden associated with transaction path search and matching calculations. First, an improved graph-theoretical model of transaction path with composite edges is proposed, along with an inter-provincial spot market matching model characterized by enhanced path representations, effectively capturing the features of large-consumer direct participation in inter-provincial transactions. Then, an efficient transaction path search method guided by transmission channel weight parameters is proposed to reduce computational effort by avoiding paths of low importance. To assess path significance, a selection strategy based on the modified K-means clustering algorithm and the change trend of total path weights is proposed, ensuring that the identified core paths have significantly higher importance than the pruned ones. The proposed method is applied to the trading path search and matching process. Simulation results indicate that the proposed method greatly improves the efficiency of path searching and user matching without affecting spot transaction outcomes.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5108-202355448A-3-2-ZN).

Key words: inter-provincial electricity spot trading; large consumer direct participating; trading path; transaction matching; transmission channel weight parameters

基金项目：国家电网公司科技项目资助(5108-202355448A-3-2-ZN)“适应大用户直接参与的省间现货交易机制及关键技术研究”

0 引言

省间电力现货交易是“构建多层次全国统一电力市场体系”的重要组成部分[1-6]。当前省间现货交易模式中，主要由省级电网公司进行统一的电量和价格申报，而大用户和售电公司尚未直接参与[7]。为充分发挥省间现货市场电力余缺互济和大范围资源优化配置作用，我国正逐步推动符合准入条件的大型售电公司和电力用户等参与省间电力现货交易[8]。然而，大用户直接参与将为省间电力现货市场带来新的挑战。其一，现有交易网络模型和撮合交易模型未能计及大用户直接参与带来的交易节点与路径复合特征，难以直接应用。其二，我国现货市场采用撮合交易模式[9]，需经历交易路径搜索、信息按路径折算和集中排序撮合 3 个环节。这一过程中，交易路径组合数目繁多，搜索负担重；且大量用户与大量可行交易路径带来的复杂度叠加，将导致信息折算与排序匹配的组合数激增，撮合交易决策计算复杂。因此，亟需研究适用于大用户直接参与的省间电力现货交易模型与高效交易方法，以保障电力现货交易在要求的时间窗内及时完成。

针对交易模型的研究，主要包括交易路径表征模型和撮合交易模型两方面。在交易路径表征模型方面，文献[10]采用系数矩阵表示交易网络中各购、售电节点和转运节点间的连接关系。文献[11]针对跨区、跨省交易路径优化问题建立点-弧有向图模型，模型包含虚拟源点、虚拟收点、虚拟购售电节点和实际转运节点。文献[12-13]利用图论知识，将基于 ER 模型的能源互联网抽象为有向加权图，其中边的权重可反映线路的传输损耗、传输容量和报价等多种信息。在撮合交易模型方面，文献[14]给出了省间电力中长期市场的撮合交易模型与算法实现流程。文献[9]提出了考虑路径折算的省间电力现货交易模型，并计及了电量、网损折算和容量等各类约束。文献[13]分类讨论了交易路径输电功率与通道网损、容量等的关系，提出了更新撮合交易配对机制的改进模型。然而，文献[10-14]中的模型均基于节点与参与交易的省级主体在物理意义上一一对应的前提构建，难以准确描述同一省内有多个用户相互独立参与省间交易场景下的交易节点复合特征，以及交易路径耦合重叠复杂度高的特征。

针对省间电力现货撮合交易的研究，由于本文旨在降低交易决策计算负担以保障交易及时性，且撮合交易的计算负担主要来自于路径搜索环节，因此重点关注交易路径搜索方法。现有路径搜索研究按目的主要可分为搜索最优路径和搜索全部路径两类。在搜索最优路径方面，文献[13]使用 Dijkstra 算法确定所构建拓扑模型中的权重最小路径，从而得到交易参与方间能量损耗最低的路径。文献[15]采用 A-STAR 算法搜索跨区域省间现货交易网络中买卖节点间输电费用最低的交易路径。文献[16]基于 Floyd 算法求解系统故障后的潮流转移最短路径，对带权重的网络图进行规划和求解。除此之外，还有 Bellman-Ford 算法[17]、单源最短路(shortest path faster algorithm)算法[18]、Kruskal 算法[19]等，也可以实现带权重最短路径的搜索。上述研究均采用基于图论提出的算法。此外，也有学者将最优路径搜索问题构建为线性规划形式模型[10,20-21]。在搜索全部路径方面，主要包括深度优先搜索[22-23]和广度优先搜索[24]两类算法。深度优先搜索算法的主要思想是从起点开始，沿着每条分支尽可能深入，直到无法继续时再回溯并探索其他分支。广度优先搜索算法的主要思想是从起点开始，依次访问每一层的所有节点并储存，然后再访问下一层的节点。省间电力现货交易时，同一对购-售电用户之间可能存在多条可行路径，在输电通道容量不足的情况下，其交易可能需要拆分到不同路径上完成，因此需要搜索出所有可行路径。然而，我国省间电力交易网络规模庞大，若直接应用上述方法搜索购电与售电用户之间的所有可能路径，将导致需搜索的路径组合数目出现指数爆炸难题，计算负担难以承受。

因此，本文提出了基于路径加速搜索的大用户直接参与省间电力现货高效交易方法。在适应大用户直接参与交易带来的场景特征方面，提出了考虑复合边特征的交易路径改进模型和撮合交易改进模型。在提升撮合交易计算效率方面，提出了基于通道权重参数引导的交易路径高效搜索方法。该方法的核心思想在于，以网损、输电成本等对省间现货成交路径选取起关键作用的参数作为通道重要性权重，在路径搜索的过程中逐层剔除重要性较低的通道与路径，从而规避对最终被选为成交路径概率小的这部分路径进行搜索，减轻了计算负担。

1 适用于大用户直接参与的省间电力现货交易模型

1.1 考虑大用户直接参与的交易路径改进模型

现有研究通常将省间电力交易网络建模为图1所示的有向图形式[23]。该模型将省级电网和省间输电通道分别建模为有向图的节点和边，各省节点根据市场角色分为售电、购电和转运节点，售电节点到购电节点之间的输电通道按顺序连接，构成交易路径。

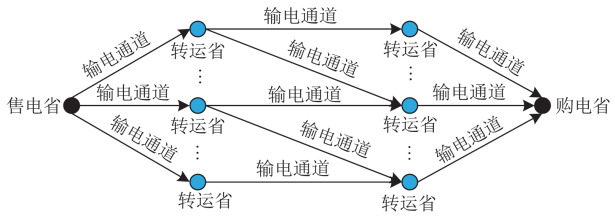


图 1　交易网络模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of transaction network model

然而，大用户直接参与省间电力现货交易时，各购、售电省节点都需进一步被拆分以表征同一省内的若干独立用户，以实现交易电量从“节点级”到“用户级”的精细化分解。图 1 所建模型难以满足上述要求。因此，本文提出如图 2 所示的改进交易网络模型。图中，考虑节点 h 对应的售电省内部有大用户 $s_1,s_2,\cdots,s_j$ 均可直接参与省间电力现货交易，则售电省 h 与其邻接转运省 m 间某输电通道 hm 上流过的电功率，应为多组购-售电用户对之间电功率交易量之和。为描述上述复合特征，将输电通道 hm 进一步表征为多条首、末节点相同，以及参数信息相同的复合边的集合 $hm=\{h_{s1}m,h_{s2}m,\cdots,h_{sj}m\}$。类似地，考虑节点 g 对应的购电省内部有大用户 $d_1,d_2,\cdots,d_k$ 均可直接参与省间电力现货交易，则购电省 g 与其邻接转运省 n 间某输电通道 ng 也可表征为多条首、末节点相同，以及参数信息相同的复合边的集合 $ng=\{ng_{d1},ng_{d2},\cdots,ng_{dk}\}$。上述复合边集合的实际物理对象仍对应同一输电通道，该输电通道流过的实际电功率为各复合边流过的电功率之和。

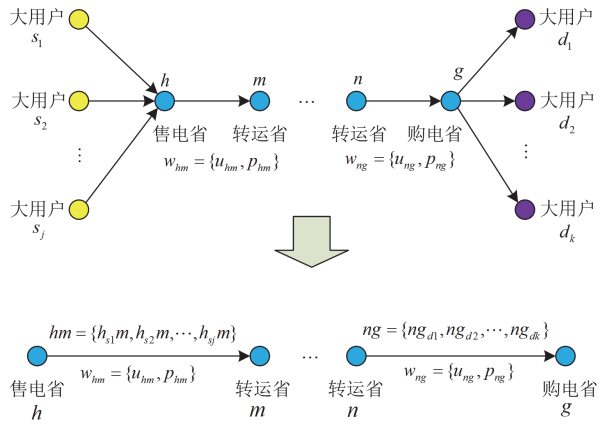


图 2　改进交易网络模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of improved transaction network model

网损率与输电费用是决定输电通道能否被选为成交路径的关键参数，在图 2 中被建模为各边的权重。以通道 hm 为例，其权重 w_{hm} 包括该通道的网损率 u_{hm} 和输电费用 p_{hm}。对于大用户 $s_1,s_2,\cdots,s_j$ 而言，其从节点 h 向节点 m 外送电功率时经过的实际物理输电通道相同，故复合边 $h_{s1}m,h_{s2}m,\cdots,h_{sj}m$ 的权重参数均为 w_{hm}。值得一提的是，事实上输电通道的网损率会随着其通过电功率数值的不同而变化，但在我国当前省间电力现货的交易规则下，认为网损率为由政府部门核定的常数。因此，本文亦将各通道网损率视为确定的常数权重参数。

进一步，可得从售电省 h 到购电省 g 某条完整交易路径的总网损率，如式(1)所示。

$$U_{hg}=1-\prod_{l=1}^{L}(1-u_{l,hg}) \tag{1}$$

式中：U_{hg} 为该交易路径的总网损率；$u_{l,hg}$ 为节点 h 到节点 g 某完整交易路径经过第 l 条输电通道的网损率；L 为该交易路径经过的输电通道数量。

该交易路径的总输电价格表示为

$$P_{hg}=\sum_{l=1}^{L}p_{l,hg} \tag{2}$$

式中：P_{hg} 为该交易路径的总输电价格；$p_{l,hg}$ 为该交易路径经过第 l 条输电通道的输电价格。

同一对购-售电节点间可能存在多条可行的交易路径，不同交易路径对应得到的总网损率和总输电成本数值不同。

1.2 基于路径改进表征的省间电力现货撮合交易模型

我国电力现货市场采用集中竞价撮合交易模式。首先，搜索所有购-售电用户对的可行路径，并根据搜索到的路径折算购电用户的申报电价至售电用户方。然后，按照图 3 所示的过程实现各购、售电用户间的依次成交[9,25]。

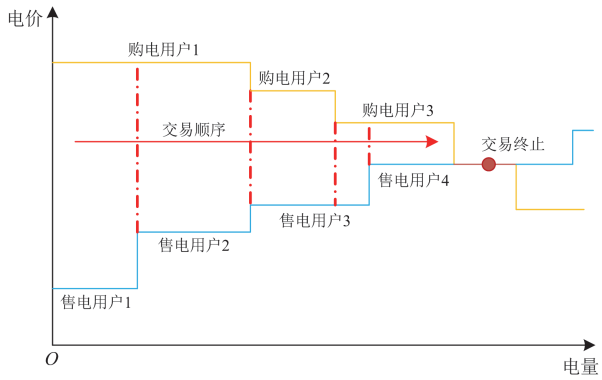


图 3　撮合交易机制的基本过程

Fig. 3 Basic process of matchmaking mechanism

1.2.1 交易总收益

撮合交易总收益 Y 的表达式如式(3)所示。

$$Y=\sum_{t\in T}\sum_{h\in\Theta}\sum_{g\in\Psi}\sum_{r\in\Upsilon_{h,g}}\sum_{j\in\Omega_h}\sum_{k\in\Omega_g}f_{jk,r,t}(C_{k,r,t}-C_{j,t}) \tag{3}$$

式中：$C_{k,r,t}$ 为 t 时刻购电用户 k 的申报电价经交易路径 r 折算到售电用户方的结果；$C_{j,t}$ 为 t 时刻售电用户 j 的申报电价；$f_{jk,r,t}$ 为 t 时刻购电用户 k 和售电用户 j 经交易路径 r 的成交电量折算到售电用户方的结果；Θ 为售电用户所在节点的集合；Ψ 为购电用户所在节点的集合；$\Upsilon_{h,g}$ 为售电节点 h 和购电节点 g 间可行交易路径的集合；Ω_h 为节点 h 对应省内售电大用户的集合；Ω_g 为节点 g 对应省内购电大用户的集合；T 为电力现货交易时段总数。

结合式(1)和式(2)得到考虑输电网损的价格折算关系，如式(4)所示。

$$C_{k,r,t}=C_{k,t}\prod_{l=1}^{L_r}(1-u_{r,l})-\sum_{l=1}^{L_r}\left[p_{r,l}\prod_{i=1}^{l}(1-u_{r,i})\right] \tag{4}$$

式中：$C_{k,t}$ 为 t 时刻购电用户 k 的申报电价；L_r 为交易路径 r 经过的输电通道数目；$u_{r,l}$ 为交易路径 r 经过的第 l 条输电通道的网损率；$p_{r,l}$ 为交易路径 r 经过的第 l 条输电通道的输电价格；$u_{r,i}$ 为交易路径 r 经过的第 i 条输电通道的网损率。

1.2.2 约束条件

为保证交易顺利进行，在进行购-售电用户匹配时，除了价差 $(C_{k,r,t}-C_{j,t})$ 大的用户对优先成交外，还需满足下列约束。

1) 交易电量约束

任意购-售电用户对间经过任意交易路径成交的电量应为非负值，不会出现从购电用户侧向售电用户侧输送电功率的情形，即

$$f_{jk,r,t}\geqslant 0 \tag{5}$$

多个购电用户向同一个售电用户购买电量时，购电总量不能超过该售电用户的申报电量，即

$$\sum_{g\in\Psi}\sum_{r\in\Upsilon_{h,g}}\sum_{k\in\Omega_g}f_{jk,r,t}\leqslant F_{j,h,t} \tag{6}$$

式中：$F_{j,h,t}$ 为 t 时刻节点 h 对应省内售电用户 j 的申报电量。

多个售电用户向同一个购电用户出售电量时，售电总量不能超过该购电用户的申报电量，即

$$\sum_{h\in\Theta}\sum_{r\in\Upsilon_{h,g}}\sum_{j\in\Omega_h}f_{jk,r,t}\prod_{l=1}^{L_r}(1-u_{r,l})\leqslant F_{k,g,t} \tag{7}$$

式中：$F_{k,g,t}$ 为 t 时刻节点 g 对应省内购电用户 k 的申报电量。

2) 输电通道容量约束

输电通道流过的电功率之和不能超过其自身输电容量，即

$$f_{hg,r,t}=\sum_{j\in\Omega_h}\sum_{k\in\Omega_g}f_{jk,r,t} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{f}_{\mathrm{r},t}\leqslant\boldsymbol{F}_{\mathrm{l,max}} \tag{9}$$

式中：$f_{hg,r,t}$ 为 t 时刻售电节点 h 和购电节点 g 间第 r 条交易路径流过的电功率；$\boldsymbol{f}_{\mathrm{r},t}$ 为所有购-售电节点对的所有交易路径流过的电功率依次排列得到的列向量；$\boldsymbol{F}_{\mathrm{l,max}}$ 为交易网络中各输电通道在现货交易时的传输容量组成的向量；$\boldsymbol{A}$ 为交易路径与输电通道的关联矩阵。

3) 交易路径容量约束

交易路径流过的电功率不能超过该路径自身输电容量，即

$$f_{hg,r,t}\leqslant F_{hg,r,\max} \tag{10}$$

$$F_{hg,r,\max}=\min\{F_{hg,r,l,\max}\,|\,l=1,2,\cdots,L_r\} \tag{11}$$

式中：$F_{hg,r,\max}$ 为售电节点 h 和购电节点 g 间第 r 条交易路径的输电容量；$F_{hg,r,l,\max}$ 为组成该交易路径的第 l 条输电通道的容量。

2 基于通道权重参数引导的交易路径高效搜索方法

2.1 问题分析与路径搜索效率提升思路

根据第 1 节所建模型，考虑大用户直接参与省间电力现货交易的计算负担主要来自两个方面：1) 可行交易路径数目与购、售电节点数以及交易网络的拓扑连接关系有关，在交易网络规模较大、拓扑连接复杂时，待搜索交易路径数目呈指数规律增加，计算负担沉重；2) 同一省内每个直接参与省间交易的大用户都需要各自独立地通过不同路径折算电量、电价并参与集中排序，导致式(3)—式(11)的表征复杂度较大，基于此实现撮合交易的过程复杂。鉴于此，本节提出了一种考虑大用户直接参与的省间电力现货交易路径高效搜索方法，其基本思想阐述如下。

如图 1 所示，相同的一对购-售电节点间通常存在多条可行交易路径。每条路径所经过的输电通道网损率和输电价格等参数各异，从而导致购电节点经不同路径折算到售电节点的价格各异。折算后购电价格高的路径将优先作为成交路径，称其重要性高。因此，为提升撮合交易决策效率，本文将规避被选中参与省间现货交易优先级靠后的低重要性路径的搜索与应用负担：1) 在路径搜索过程中逐层剔除网损率、输电价格等权重较高的低重要性输电

通道，从而降低待搜索路径数目；2) 为进一步降低撮合交易信息处理复杂度，在路径搜索完毕后，再次筛选重要性最高的一部分核心路径，作为模型式(3)—式(11)的输入参数。

所提方法的流程示意图如图 4 所示。针对第 1)点和第 2)点提出的通道重要性判断准则和核心路径筛选策略将分别在第 2.3 节和第 2.4 节介绍。经过上述流程得到的核心路径为所有路径中被选为成交路径可能性最大的一部分，最终成交路径在核心路径中通过第 1.2 节所提模型约束确定。因此，在所保留核心路径的总传输容量足够时，可保证基于所提方法确定的成交路径与真实的最优成交路径相一致。

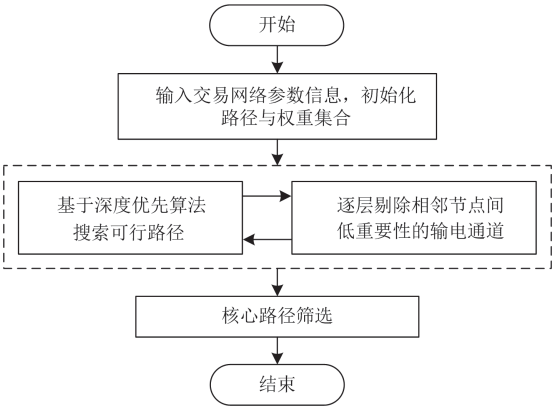


图 4 基于通道权重参数的交易路径搜索方法流程图

Fig. 4 Flowchart of transaction path search method based on transmission-line weight parameters

2.2 基于权重参数的重要输电通道保留准则

相邻省级电网之间一般存在多条跨省输电通道，例如，重庆电网和四川电网间的直接联络线包括洪板双回线、资铜双回线和黄万双回线共 6 条[26]。对应到交易网络模型中，即为相邻两节点间通过多条边连接。以图 2 中的节点 h 和节点 m 为例，假设其间输电通道有 $hm_1, hm_2, \cdots, hm_N$ 共 N 条，输电通道连接关系及各通道权重参数如图 5 所示。

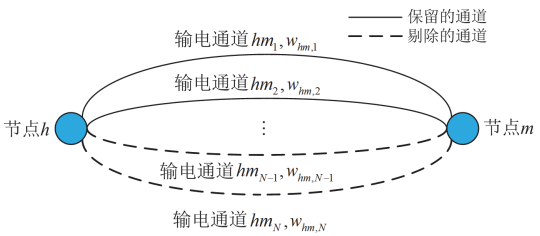


图 5 相邻节点输电通道连接关系示意图

Fig. 5 Schematic diagram of transmission lines connecting adjacent nodes

为实现 2.1 节所提思路，在路径搜索过程中逐层剔除如图 5 所示并联通道中重要性低的部分，需提出通道重要性判断准则。

决定通道重要性的依据为购电端价格折算到售电端后的变化量，对应物理含义为该笔交易电量的运输成本。第三方收取的输电费用越高、输电线路网损越高，则相同交易电量的运输成本越高，对应路径的重要性越低。据此，本文首先构造了反映通道重要性的综合权重指标，其含义为该通道在考虑网损影响时的输电价格，如式(12)所示。

$$\lambda_{hm,i} = p_{hm,i}(1+u_{hm,i}) \tag{12}$$

式中：$\lambda_{hm,i}$ 为节点 h 和节点 m 间第 i 条输电通道的综合权重指标；$p_{hm,i}$ 为节点 h 和节点 m 间第 i 条输电通道的输电价格；$u_{hm,i}$ 为节点 h 和节点 m 间第 i 条输电通道的网损率。

然后，将节点 h 和节点 m 间各输电通道按综合权重指标升序排列，即按重要性降序排列，得到 $\Lambda^{\text{top}} = \{\lambda_{hm,1}^{\text{top}}, \cdots, \lambda_{hm,i}^{\text{top}}, \cdots\}$，该集合实为 $\{\lambda_{hm,1}, \cdots, \lambda_{hm,i}, \cdots\}$ 按升序重新排列的结果，对应每条输电通道的容量集合为 $\{F_{hm,1}^{\text{top}}, \cdots, F_{hm,i}^{\text{top}}, \cdots\}$。

接着，为兼顾削减路径搜索负担与保留足够输电容量的需求，从而避免因容量不足导致的成交结果受影响，通过下述方式确定所需保留输电通道。

步骤 1：撮合交易预决策。

预决策需考虑以下简化假设：

1) 不考虑将各省直接参与购、售电交易的大用户作为单个成交对象，而将其购、售电量需求向相应省级节点聚合，聚合方式为电量直接相加，购、售电节点聚合电价为该节点对应各大用户申报电价取平均值；

2) 对于相邻两节点间并联的多条输电通道，将其聚合为一条虚拟通道，该虚拟通道的容量为若干并联输电通道的容量之和；

3) 不考虑通道网损率和输电价格导致的购电用户申报电价折算，即直接将各购、售电节点申报电价的聚合结果进行高低匹配集中撮合。

基于假设 1)—3)，采用图 3 所示撮合交易过程进行预决策，目的在于初步确定各节点对间需要保留的总通道输电容量。由于上述简化假设，使得参与交易决策的对象数和路径数相比原问题都大幅减少，从而保证预决策增加的计算负担在可接受范围。

步骤 2：确定所保留总通道输电容量。

仍以节点 h 和节点 m 为例说明，若经步骤 1 交易预决策得到两节点间的输电容量为 F_{hm}^{pre}，考虑预

决策简化假设导致 F_{hm}^{pre} 对真实的跨省交易输电容量需求有偏离的问题，保守地将节点 h 和节点 m 间的总输电通道容量需求扩大为 $F'_{hm}=1.2F_{hm}^{\text{pre}}$。

步骤 3：确定所需保留的重要输电通道。

选取 Λ^{top} 中排序在前的 I 个综合权重元素对应的输电通道，使得满足式(13)。

$$\begin{cases}\min\ I\\ \text{s.t. } F'_{hm}\geqslant\sum_{i=1}^{I}F_{hm,i}^{\text{top}}\end{cases}\tag{13}$$

式中：$F_{hm,i}^{\text{top}}$ 为节点 h 和节点 m 间重要性第 i 高的输电通道的容量。则 $F_{hm,i}^{\text{top}}(i=1,2,\cdots,I)$ 对应的输电通道即为所需保留的重要输电通道。

步骤 4：结果修正。

对于步骤 2 所确定的需保留输电通道容量 F'_{hm}，当 F'_{hm} 数值较大时，说明其所需的输电通道数目越多，很可能超过了总输电通道的平均数；另一方面，F'_{hm} 数值较大时，也说明其出于保守保留的总输电通道容量需求裕度($F'_{hm}-F_{hm}^{\text{pre}}=0.2F_{hm}^{\text{pre}}$)越大，这种裕度保留方式是足够的。而当 F'_{hm} 数值较小时，基于步骤 3 保留的输电通道数目小于总输电通道的平均数，但保留的容量需求裕度($0.2F_{hm}^{\text{pre}}$)可能不足。因此，将重要输电通道的保留结果按以下原则修正：

1) 如果基于步骤 3 得到的节点 h 和节点 m 间保留输电通道数目 I，大于该节点对间总输电通道数目的平均数，则 $F_{hm,i}^{\text{top}}(i=1,2,\cdots,I)$ 对应的通道即为最终重要输电通道保留结果；

2) 如果 I 小于总输电通道数目的平均数，则基于式(14)选出重要性高于平均水平的输电通道进行保留。

$$\lambda_{hm,i}<\frac{\sum_{i=1}^{N}\lambda_{hm,i}}{N}\tag{14}$$

上述判断准则将应用于 2.4 节路径搜索实施过程中步骤 2 的第 1)部分。

2.3 基于改进 K-means 聚类的核心路径筛选策略

本小节所提策略旨在路径搜索完成后，进一步筛选出总重要性最高的核心路径参与撮合交易，以降低撮合交易决策过程中的信息处理复杂度。该策略将应用于 2.4 节路径搜索实施过程中的步骤 3。

2.3.1 核心路径筛选指标与原则

路径总重要性由其经过各输电通道的重要性综合决定，其含义为该路径在考虑网损影响时的总输电价格。因此，可基于式(12)的通道综合权重指标扩展得到路径综合权重指标。以售电节点 h 与购电节点 g 间的交易路径 r 为例，表达式为

$$\lambda_{hg,r}=\sum_{l=1}^{L_r}\left[p_{r,l}\prod_{i=1}^{l}(1+u_{r,i})\right]\tag{15}$$

式中：$\lambda_{hg,r}$ 为售电节点 h 与购电节点 g 间交易路径 r 的综合权重指标。

在购、售电用户申报电价相同的前提下，为降低考虑网损的输电总成本导致的撮合交易总收益损失，所保留核心路径的综合权重应尽量小。

以式(15)定义的指标为依据，核心路径筛选遵循以下原则。

原则 1：为避免某些购-售电节点对的交易路径因综合权重普遍较大而被大量舍弃，使得该节点对间的输电容量不足，进而导致全系统购、售电量成交匹配无可行解的问题，应按购-售电节点对分组筛选核心路径。

原则 2：在原则 1 的基础上，应保证每组所保留路径的权重相互差值尽量小，而被保留路径与被舍弃路径在区分边界处的权重差值应尽量大。该原则的必要性阐释如下：对于同一节点对间的 2 条可行交易路径，记其综合权重差值为 $\lambda_{hg,r+1}-\lambda_{hg,r}$，该差值越大，则经过第 $r+1$ 条路径和第 r 条路径的输电成本差值越大，第 $r+1$ 条路径在全系统所有可行交易路径中的重要性排序中落后第 r 条路径的位次越多，该路径越应该被舍弃。

2.3.2 核心路径筛选策略

原则 2 的要求符合聚类问题特征。最常见的聚类算法为 K-means 算法[27]。传统 K-means 算法的聚类目标为“同一个类别内各样本点到该类别质心的距离最小，某类别内样本点到其他类别质心的距离最大”，未能直接考虑不同类别在区分边界处的样本距离。因此，本文改用升序排列的路径集合中相邻路径的综合权重指标差值作为聚类样本，对 K-means 算法进行改进。其中，聚类数目由“肘部法则”确定[28]。

利用所提改进算法，可得到权重差值数据集中取值最大的一个数据类别。该类别中的每个元素都表明，其对应作差的两条路径在全系统的重要性排序差异显著大于同一节点对间其他相邻路径的重要性排序差异。因此，该类别中的每个元素均可作为路径重要性层级的划分依据。基于此，再根据各元素在数据集内的位置关系特征最终确定哪些重要性层级被筛选为核心路径。

仍以售电节点 h 与购电节点 g 间的交易路径为例，所提路径筛选方法实现过程阐述如下。

首先，假设待筛选路径共有 R 条，按综合权重

指标升序排列，计算第 $r(r=1,2,\cdots,R-1)$ 条路径综合权重与第 $r+1$ 条路径综合权重的差值 $\Delta\lambda_{hg,r}=\left|\lambda_{hg,r+1}-\lambda_{hg,r}\right|$，构成综合权重差值数据集 $\Lambda=\{\Delta\lambda_{hg,2},\cdots,\Delta\lambda_{hg,R-1}\}$。

然后，根据 K-means 算法得到对 Λ 的聚类结果，其数据点分布一般满足如图 6(a)所示特征。假设数据点取值最大的类别为 $\Lambda'=\{\Delta\lambda_{hg,a},\Delta\lambda_{hg,b},\Delta\lambda_{hg,c},\Delta\lambda_{hg,d}\}$，则 R 条待筛选路径可分为如图 6(b)所示的 5 个重要性层级。

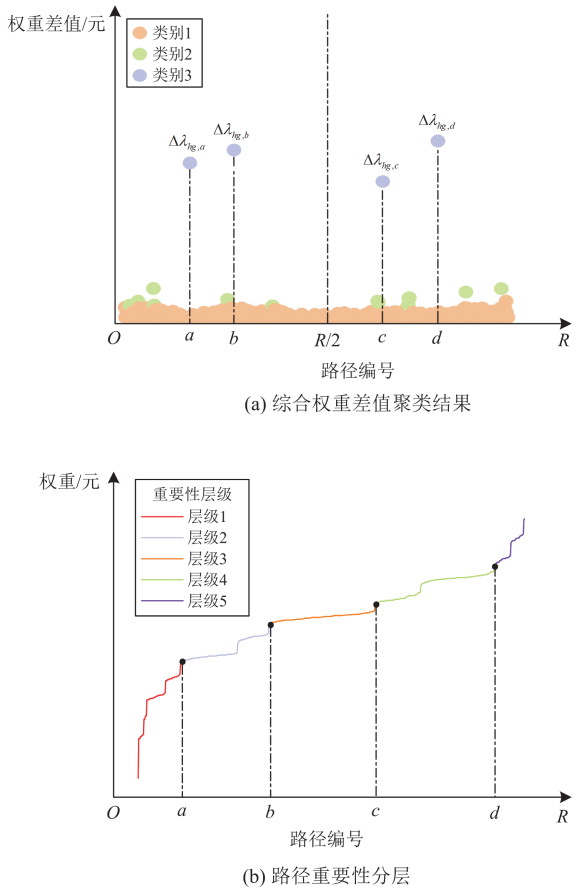


图 6 核心路径筛选过程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of core path selection

接着，根据路径的重要性层级确定核心路径。分为 3 种情况讨论。

情况 1：当 Λ' 中最大的元素下标 $d<R/2$ 时，说明 Λ' 中的元素均在 Λ 数据集序号较小的一侧，为兼顾路径重要性和数量需求，以保证足够路径传输容量，选取第 1 条至第 d 条路径为核心路径。

情况 2：当 Λ' 中最小的元素下标 $a>R/2$ 时，说明 Λ' 中的元素均在 Λ 数据集序号较大的一侧，为显著减小高低匹配环节的输入信息复杂度，选取第 1 条至第 a 条路径为核心路径。

情况 3：当 Λ' 中各元素下标一部分小于 $R/2$，另一部分大于 $R/2$ 时，根据 $\max\{b-a,c-b,d-c\}$ 确定核心路径筛选判据。例如图 6(a)中，由于 $\max\{b-a,c-b,d-c\}=c-b$，则 $\Delta\lambda_{hg,b}$ 作为筛选判据，选取第 1 条至第 b 条路径为核心路径。

最后，根据第 2.2 节撮合交易预决策得到的各购、售电节点对间需保留路径容量 F_{hg}^{pre}，修正上述核心路径筛选结果。若基于上述过程得到的核心路径总容量 $F_{hg}^{\text{k-means}}$ 大于 $1.2F_{hg}^{\text{pre}}$，则可认为保留的路径总容量已足够。若 $F_{hg}^{\text{k-means}}$ 小于 $1.2F_{hg}^{\text{pre}}$，则根据图 6(b)增补下一重要性层级的路径也作为核心路径，并更新现有核心路径总容量为 $F_{hg}^{\text{k-means}}$，再次比较 $F_{hg}^{\text{k-means}}$ 和 $1.2F_{hg}^{\text{pre}}$ 的大小；循环这一过程，直至最新的 $F_{hg}^{\text{k-means}}$ 大于 $1.2F_{hg}^{\text{pre}}$。

2.4 交易路径高效搜索方法实施过程

综合 2.1 节至 2.3 节，本文所提基于通道权重参数的交易路径高效搜索方法实施步骤如下所述。

步骤 1：算法初始化。

输入交易网络的参数信息，并初始化路径集合 Q、路径总权重集合 W，用于存储搜索到的所有路径及其总权重；同时，初始化当前搜得的路径 q。

步骤 2：计及低重要性通道削减的深度优先交易路径搜索。

1) 对于售电用户所在节点 h，令 $v=h$，从 v 出发，搜索其某一相邻下一级节点 v'，将节点 v' 标记为已访问，并以式(14)和式(15)为判据剔除 v 与每个 v' 之间的低重要性输电通道，保留的各通道记为 $y_{v-v'}$，更新路径 $q=(q,y_{v-v'})$。

2) 检查当前节点 v' 是否为购电用户所在节点，若不是，则更新 $v=v'$，跳转至 1)；若是，说明 q 已为完整路径，进入 3)。

3) 对于当前所在购电用户节点 g，记搜得的完整路径 q 为 q_{hg}，将路径 q_{hg} 添加到集合 Q 中，即 $Q=Q\cup\{q_{hg}\}$，计算该路径总权重 $w(q_{hg})=\{u(q_{hg}),r(q_{hg})\}$，并将其添加到集合 W 中，即 $W=W\cup\{w(q_{hg})\}$。

4) 回溯到上一级相邻节点，检验其是否还有未访问的其他下一级节点，若有，令回溯到的上一级节点为 v，其未访问的任一下一级节点为 v'，跳转至 1)；若没有，且当前节点不是售电用户所在节点，则继续回溯到再上一级节点，跳转至 4)；若已回溯到售电用户所在节点，说明当前售电用户所在节点

的相关路径已搜索完成，进入 5)。

5) 若还有其他售电用户所在节点未参与搜索，跳转至 1)；若没有，进入步骤 3。

步骤 3：核心路径筛选。

1) 对于步骤 2 搜得的所有交易路径 Q 及其总权重 W，按购、售电用户所在节点进行分类。

2) 对于购、售电用户所在节点相同的路径，根据第 2.3 节所提策略及各路径总权重，判定其是否属于核心路径。

3　算例分析

本文采用了两个典型的大用户直接参与省间电力现货交易的场景，实施了交易网络的路径搜索，以及基于搜索结果的省间电力现货撮合交易。其中，场景 S1 拓扑见图 7；场景 S2 的拓扑关系，两个场景的购/售电大用户信息，以及输电通道的网损率、价格、容量等参数见文献[29]。

本小节将从核心路径筛选策略的有效性、交易路径搜索方法的高效性以及搜索结果在撮合交易中的应用 3 个方面验证所提方法的有效性。

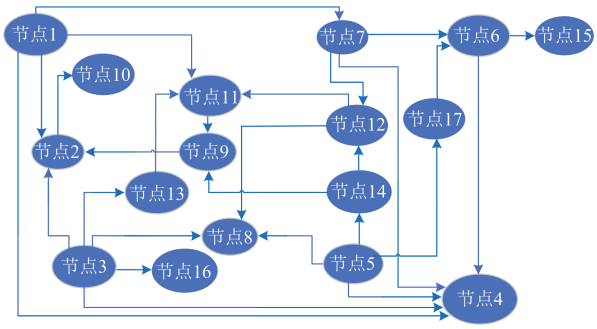


图 7　场景 S1 对应的交易网络拓扑图

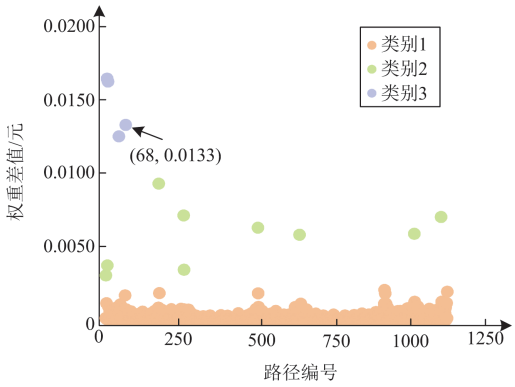
Fig. 7 Trading network topology diagram of S1

3.1　基于改进 K-means 聚类的核心路径筛选分析

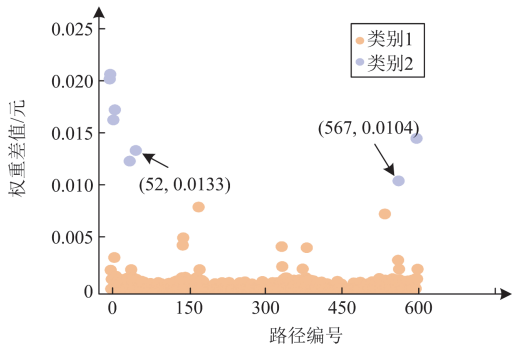
本节首先展示了所提改进 K-means 算法的聚类结果，并分析了基于该聚类结果的核心路径筛选结果，从而验证第 2.3 节所提方法有效性。

图 8 给出了场景 S1 中部分购-售电节点对间各可行交易路径的综合权重差值数据集聚类结果。可以看出，S1 中节点 1-8 之间各交易路径的综合权重差值数据被聚为 3 类，节点 1-4 之间各交易路径的综合权重差值数据都被聚为 2 类，图中紫色数据点对应综合权重差值最大的类别，即 2.3.2 节的数据集 Λ'。根据 2.3.2 节所提准则，选取图 8 中标注点作为核心路径筛选判据。

具体而言，图 8(a)中的数据点(68, 0.0133)代表节点 1-8 之间综合权重第 68 小的路径和第 69 小的路径间的权重差值为 0.0133。该数据点为节点 1-8 相应数据集 Λ' 中下标最大的元素，其下标 68 小于“节点 1-8 间的可行路径总数 1140/2(即 570)”，满足第 2.3.2 节所提方法的情况 1。因此，可确定综合权重最低(即重要性最高)的第 1 条至第 68 条路径为节点 1-8 间的核心路径。图 8(b)中的数据点(52, 0.0133)代表节点 1-4 之间综合权重第 52 小的路径和第 53 小的路径之间的权重差值为 0.0133。由图可知，节点 1-4 相应数据集 Λ' 中，部分元素下标小于“节点 1-4 间的可行路径总数 605/2(即 302.5)”，而另一部分大于 302.5。因此，可根据 2.3.2 节的情况 3 确定数据点(52, 0.0133)作为节点 1-4 间的核心路径筛选判据，综合权重最低(即重要性最高)的第 1 条至第 52 条路径为节点 1-4 间的核心路径。



(a) S1，节点1-8间路径



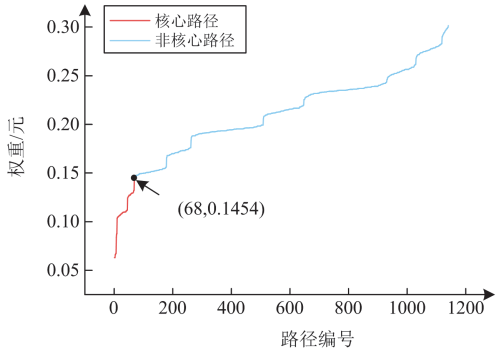
(b) S1，节点1-4间路径

图 8　综合权重差值数据集的聚类结果(部分)

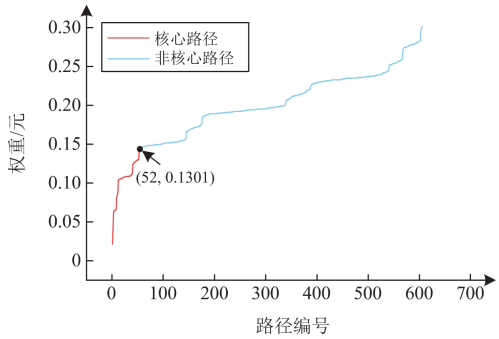
Fig. 8 Clustering results of weight difference dataset (partial)

进一步地，图 9 给出了图 8 讨论的节点对之间，各可行交易路径按升序排列时的综合权重变化趋势。图中，由图 8 确定的核心路径和非核心路径分别用红色和蓝色曲线区分。由图 9 可知，节点 1-8 之间，综合权重不大于 0.1454 的 68 条路径被选为核心路径；节点 1-4 之间综合权重不大于 0.1301 的 52 条路径被选为核心路径。其他购-售电节点对

间的核心路径同理可得，受限于篇幅本文不再一一展示。



(a) S1，节点1-8间路径



(b) S1，节点1-4间路径

图 9 交易路径的综合权重变化趋势(部分)

Fig. 9 Comprehensive weight change trend of the trading path (partial)

表 1 给出了各节点对的核心路径权重信息，其中“核心权重阈值”对应各节点对间核心路径与非核心路径分界点的权重，“核心权重占比”的计算公式为“(核心权重阈值 – 最小权重)/(最大权重 – 最小权重)”。由表 1 可知，各节点对间核心路径的权重稳定保持在其对应所有路径权重中最低的 35%~45%部分。这说明采用所提方法的核心路径选取结果较为稳定，可兼顾重要性和输电容量需求，从而验证了该方法的有效性。

3.2 基于通道权重参数的交易路径搜索分析

本节旨在验证所提交易路径搜索方法在计算效率和结果表征复杂度方面的优势。为方便后续阐述，定义本节对比的两种方法如下。

M1：基于深度优先思想的交易路径搜索方法，提供准确的基准解；

M2：本文第 2 节所提方法。

表 2 给出了两种方法分别在场景 S1 和 S2 中的路径搜索计算总用时。可以看出：1) 场景 S1 的交易网络拓扑规模较小，M1 的路径搜索总用时仅需 1.2720 s，而当交易网络规模扩展到场景 S2 的 100 节点时，M1 的路径搜索总用时增长到 593.74 s。这说明交易路径搜索负担将随着网络规模的扩大而呈指数增长趋势，在网络规模较大时搜索负担将难以承受，因此有必要研究交易路径的高效搜索方法。2) 对于场景 S1 和 S2，M2 的计算用时分别为 0.4239 s 和 264.38 s，相较 M1 计算效率分别提升了 66.67%和 55.47%，这说明所提方法能有效提升交易路径搜索效率。

表 1 核心路径权重信息

Table 1 Weight information of core path

场景	售-购节点对	核心权重阈值/元	最大权重/元	最小权重/元	核心权重占比/%
S1	节点 1-4	0.1435	0.3012	0.0216	43.60
	节点 1-2	0.1422	0.2992	0.0204	43.69
	节点 1-8	0.1455	0.3015	0.0629	34.62
	节点 3-4	0.1455	0.3185	0.0224	41.57
	节点 3-2	0.1455	0.3226	0.0224	41.01
	节点 3-8	0.1465	0.3215	0.0233	41.31
	节点 5-4	0.1230	0.3000	0.0224	36.24
	节点 5-2	0.1434	0.3033	0.0234	42.87
	节点 5-8	0.1442	0.3012	0.0234	43.48
S2	节点 1-99	0.5140	0.9330	0.1540	46.21
	节点 1-98	0.6060	0.1172	0.2540	38.34
	节点 1-97	0.5680	0.9350	0.2520	46.27
	节点 3-99	0.6490	0.1066	0.3490	41.84
	节点 3-98	0.8420	0.1302	0.4490	46.07

表 2 路径搜索计算总耗时

Table 2 Total time of path search calculation

s

场景	M1 用时	M2 用时
S1	1.2720	0.4239
S2	593.74	264.38

表 3 给出了两种方法分别在场景 S1 和 S2 的路径搜索结果数量。可以看出：1) 场景 S1 中通过 M1 搜得的全部可行路径数量级为 10^2~10^3 条，场景 S2 中通过 M1 搜得的全部可行路径数量级为 10^5~10^6 条，这说明交易路径搜索负担将随着网络规模的扩大而呈指数增长趋势，与表 2 所得结论一致；2) 采用 M2 时，场景 S1 和 S2 搜得的核心路径数量仅为几十至上百条，大幅降低了交易路径搜索结果的表征复杂度，从而降低了撮合交易计算难度。

3.3 路径搜索结果在撮合交易中的应用分析

本节将 3.2 节中 M1 和 M2 搜得的路径分别应用于撮合交易，发现成交路径、成交对象和成交量完全相同。受限于篇幅，仅给出场景 S1 的成交结

果信息如表 4 所示。

表 3 路径搜索结果数量

Table 3 Number of path search results

场景	售-购节点对	M1 搜索路径数/条	M2 搜索路径数/条
S1	节点 1-4	6.05×10^2	52
	节点 1-2	8.02×10^2	57
	节点 1-8	1.14×10^3	68
	节点 3-4	1.041×10^3	69
	节点 3-2	1.226×10^3	70
	节点 3-8	1.217×10^3	50
	节点 5-4	7.21×10^2	39
	节点 5-2	1.224×10^3	83
	节点 5-8	9.44×10^2	38
S2	节点 1-99	1.2448×10^6	102
	节点 1-98	5.4268×10^5	47
	节点 1-97	9.6192×10^5	145
	节点 3-99	7.2313×10^5	74
	节点 3-98	3.2090×10^5	125

表 4 S1 的撮合交易成交结果信息(按成交顺序排列)

Table 4 Transaction results of S1(arranged in matchmaking order)

成交用户编号	节点对	成交量/MWh	路径编号	成交用户编号	节点对	成交量/MWh	路径编号
购 28-售 27	8-5	30	1	购 25-售 18	8-3	30	1
购 29-售 28	8-5	30	1	购 26-售 19	8-3	30	1
购 30-售 29	8-5	30	1	购 27-售 20	8-3	30	1
购 16-售 30	4-5	30	1	购 13-售 15	2-1	30	2
购 17-售 23	4-5	30	1	购 14-售 16	2-1	30	2
购 18-售 24	4-5	30	1	购 15-售 5	2-1	30	2
购 19-售 25	4-5	30	1	购 6-售 7	4-3	30	1
购 20-售 26	4-5	30	1	购 7-售 6	8-5	30	1
购 21-售 21	4-3	30	1	购 5-售 8	4-3	30	1
购 22-售 22	4-3	30	1	购 5-售 6	4-5	10	2
购 8-售 10	2-1	30	1	购 4-售 5	2-1	30	2
购 9-售 11	2-1	30	1	购 4-售 4	2-1	10	2
购 10-售 12	2-1	30	1	购 3-售 6	8-5	30	1
购 11-售 13	2-1	30	1	购 2-售 4	2-1	20	2
购 12-售 14	2-1	30	1	购 2-售 2	2-3	10	1
购 23-售 9	8-3	30	1	购 1-售 3	4-5	30	2
购 24-售 17	8-3	30	1	购 3-售 2	8-3	20	2

由表 4 可知：1) 基于第 1 节所提模型成功实现了计及大用户直接参与的省间电力现货撮合交易，从而验证了所提模型的适用性与有效性；2) 由于先成交的购 8-售 10 等 5 对用户均从节点 2-1 间综合权重最低的 1 号路径流过电功率，使得购 13-售 15 用户对成交时该路径已没有剩余容量，只能从节点 2-1 间综合权重次低的 2 号路径流过电功率，分析其余流过路径编号为“2”的成交用户对可得到类似的原因，这验证了在同一节点对间搜索多条可行路径的必要性，以及基于本文所提策略保留的核心路径满足了撮合交易的容量需求；3) M2 搜得的路径数目少，但没有改变撮合交易计算结果，验证了所提路径搜索方法对交易最优决策的有效性。

4 结论

为解决大用户直接参与省间电力现货市场时交易决策负担重的问题，本文提出了基于路径加速搜索的省间现货高效交易方法。结合理论分析与算例测试，可得主要结论如下：

1) 针对现有省间电力现货撮合交易模型未能计及大用户直接参与市场带来新特征的问题，本文构建了包含复合边的交易路径改进图论模型，并基于此提出了改进的撮合交易模型。所建模型可有效应用于考虑大用户直接参与的省间电力现货撮合交易决策，将决策信息精细度从“节点级”提升至“用户级”。

2) 针对大用户直接参与省间电力现货市场时，交易路径搜索负担重与计及路径折算的集中排序撮合过程复杂的问题，本文提出了基于通道权重参数规避低重要性路径的交易路径高效搜索方法，并进一步提出了基于改进 K-means 聚类算法与路径总权重变化趋势的核心路径筛选策略。与传统方法相比，所提方法可大幅削减冗余路径搜索负担，在不影响撮合交易决策结果的前提下显著提升计算效率。

本文研究的交易路径搜索方法主要基于深度优先搜索思想展开，搜索效率提升程度仍有限。因此，未来可进一步研究效率更高的路径搜索方法，以满足省间日内现货交易的时间窗要求。

参考文献

[1] 皇甫奋宇，李晓鹏，李岩，等. 现货环境下的储能容量成本回收机制研究[J]. 电力系统保护与控制，2023, 51(12): 37-46.
HUANGFU Fenyu, LI Xiaopeng, LI Yan, et al. A cost recovery mechanism of storage capacity in the context of the power spot market[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 37-46.

[2] 黄宇翔，陈皓勇，牛振勇，等. 基于“能量-信息-价值”三层网络的虚拟电厂架构及运行关键技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(24): 169-187.
HUANG Yuxiang, CHEN Haoyong, NIU Zhenyong, et al. A review of virtual power plant architecture and key operational technologies based on a “energy-information-value” three-layer network[J]. Power System Protection

and Control, 2024, 52(24): 169-187.

[3] XIAO Dongliang, CHEN Haoyong, CAI Weijun, et al. Integrated risk measurement and control for stochastic energy trading of a wind storage system in electricity markets[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(4): 1002-1012.

[4] 关立, 常江, 孙大雁, 等. 省间电力现货市场试运行分析及思考[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(11): 2-10.
GUAN Li, CHANG Jiang, SUN Dayan, et al. Analysis and reflection on trial operation of inter-provincial electricity spot markets in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(11): 2-10.

[5] 刘昊, 郭烨, 孙宏斌. 省间电力现货交易优化设计与定价机制[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(4): 76-85.
LIU Hao, GUO Ye, SUN Hongbin. Optimal design and pricing method for inter-provincial electricity spot trading[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(4): 76-85.

[6] 许凌, 张希鹏, 曹益奇, 等. 考虑备用互济的省间现货电能与备用耦合出清模型[J]. 中国电力, 2023, 56(9): 48-56.
XU Ling, ZHANG Xipeng, CAO Yiqi, et al. Clearing model for inter-provincial spot electricity and reserve coupling considering reserve sharing[J]. Electric Power, 2023, 56(9): 48-56.

[7] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于加快建设全国统一电力市场体系的指导意见[EB/OL]. (2022-01-18) [2024-04-03]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/30/content_5671296.htm

[8] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于印发《电力现货市场基本规则(试行)》的通知(发改能源规〔2023〕1217号)[EB/OL]. (2023-09-07) [2024-04-03]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202309/content_6904881.htm

[9] 樊宇琦, 丁涛, 汤洪海, 等. 考虑路径折算的跨省跨区可再生能源增量现货交易模型[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(18): 103-112.
FAN Yuqi, DING Tao, TANG Honghai, et al. Cross-provincial and cross-regional incremental spot trading model for renewable energy considering path conversion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18): 103-112.

[10] 朱军飞, 李京, 李辉, 等. 考虑省间现货交易路径的ATC 计算方法研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(3): 199-206.
ZHU Junfei, LI Jing, LI Hui, et al. Study on ATC calculation method considering provincial spot trading path[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2022, 36(3): 199-206.

[11] 郑亚先, 程海花, 杨争林, 等. 计及清洁能源的跨区跨省交易路径优化建模与算法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 112-119.
ZHENG Yaxian, CHENG Haihua, YANG Zhenglin, et al. Path-optimized modeling and algorithm for trans-regional and trans-provincial electricity trading considering clean energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 112-119.

[12] 郭慧, 汪飞, 张笠君, 等. 基于撮合交易的能源互联网最小网损路由算法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 172-179.
GUO Hui, WANG Fei, ZHANG Lijun, et al. Matchmaking tradeoff based minimum loss routing algorithm in energy internet[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 172-179.

[13] 郭慧, 汪飞, 张笠君, 等. 基于能量路由器的能源互联网分层分区优化[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(16): 4726-4737, 4977.
GUO Hui, WANG Fei, ZHANG Lijun, et al. Hierarchical and zonal optimization of the energy router based energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4726-4737, 4977.

[14] 赵飞. 某省级电力市场中长期交易算法仿真实现[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
ZHAO Fei. Simulation and implementation of medium- and long-term trading algorithm in a provincial electricity market[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.

[15] 胡晨旭, 关立, 罗治强, 等. 跨区域省间富余可再生能源现货交易优化出清模型[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(13): 110-116.
HU Chenxu, GUAN Li, LUO Zhiqiang, et al. Optimal clearing model for trans-regional and cross-provincial spot trading of surplus renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(13): 110-116.

[16] 张英敏, 蒋容, 刘凯, 等. 含柔性直流电网的交直流系统潮流转移搜索与量化分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2553-2561.
ZHANG Yingmin, JIANG Rong, LIU Kai, et al. Path search and analysis on power flow transferring of power system with VSC-HVDC grid[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2553-2561.

[17] 韩伟一. 经典 Bellman-Ford 算法的改进及其实验评估[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(7): 74-77.
HAN Weiyi. Improvement and experimental evaluation on classical Bellman-Ford algorithm[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(7): 74-77.

[18] 沈玥名. 最小生成树博弈问题的研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2021.

SHEN Yueming. Research on minimum cost spanning tree game[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2021.

[19] USMAN WM, SAKETHI D, YUNIARTI R, et al. The hybrid of depth first search technique and Kruskal's algorithm for solving the multiperiod degree constrained minimum spanning tree problem[C] // 2015 4th International Conference on Interactive Digital Media (ICIDM), December 1-5, 2015, Bandung, Indonesia: 1-4.

[20] 朱军飞, 李京, 李辉, 等. 计及期权合约和交易路径的省间优化出清模型与算法研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(7): 89-95, 103.
ZHU Junfei, LI Jing, LI Hui, et al. Inter-provincial optimization clearing model and algorithm considering option contract and trading path[J]. Smart Power, 2022, 50(7): 89-95, 103.

[21] 程海花, 郑亚先, 耿建, 等. 基于拓展网络流方法的跨区跨省交易路径优化[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(9): 129-134.
CHENG Haihua, ZHENG Yaxian, GENG Jian, et al. Path optimization model of trans-regional and trans-provincial electricity trade based on expand network flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(9): 129-134.

[22] 曹振宇. 基于深度优先搜索和元启发式算法的公交网络优化[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
CAO Zhenyu. Transit network optimization based on depth-first-search and meta-heuristics algorithm[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.

[23] 罗治强, 姚寅, 董时萌, 等. 基于图论网络流算法的新能源跨区域交易路径输电定价策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(23): 130-136.
LUO Zhiqiang, YAO Yin, DONG Shimeng, et al. Transmission cost allocation strategy of a renewable energy cross-regional transaction path based on a graph theory network flow algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(23): 130-136.

[24] XUE Bike, SHI Fei, SHI Xinhong, et al. Transmission path optimization method combining sensitivity analysis with breadth first search theory suitable for large scale direct electricity trade[C] // 2016 IEEE International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), October 21-23, 2016, Shanghai, China: 481-484.

[25] HE Qianya, LIN Zhenjia, CHEN Haoyong, et al. Bi-level optimization based two-stage market clearing model considering guaranteed accommodation of renewable energy generation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(3): 433-445.

[26] 中国能源网. 川渝电网一体化"提档升级"[EB/OL]. (2020-09-03) [2024-04-01]. https://www.cnenergynews.cn/dianli/2020/09/03/detail_2020090376207.html.

[27] 余洋, 陆文韬, 陈东阳, 等. 光伏波动平抑下改进 K-means 的电池储能动态分组控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(7): 1-11.
YU Yang, LU Wentao, CHEN Dongyang, et al. Dynamic grouping control strategy for battery energy storage based on improved K-means under photovoltaic fluctuation suppression[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(7): 1-11.

[28] 周玉, 夏浩, 岳学震, 等. 基于改进 K-means 的局部离群点检测方法[J]. 工程科学与技术, 2024, 56(4): 66-77.
ZHOU Yu, XIA Hao, YUE Xuezhen, et al. Local outlier detection method based on improved K-means[J]. Advanced Engineering Sciences, 2024, 56(4): 66-77.

[29] CSDN. 撮合交易的购售双方申报信息及节点通道信息 [EB/OL]. [2024-09-04]. https://download.csdn.net/download/m0_71299620/89713714

收稿日期：2024-10-22；　　修回日期：2024-12-14

作者简介：

凡庆德(2000—)，男，硕士研究生，研究方向为电力市场、电力系统优化调度；E-mail: fqd0719@qq.com

包诗媛(1994—)，女，博士，讲师，研究方向为电力市场、电力系统优化调度；E-mail: baoshiyuan@cqut.edu.cn

蒋东荣(1970—)，男，通信作者，博士，教授，研究方向为电力市场、电力系统优化调度。E-mail: drjiang@cqut.edu.cn

(编辑　魏小丽)