

引导氢能源汽车用户行为的 能源站氢价决策模型及求解方法

颜燕玉¹, 谢仕炜^{1*}, 吴秋伟², 张亚超¹, 郑灵炜¹

- (1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建省 福州市 350108;
2. 清华大学深圳国际研究生院清华-伯克利深圳学院, 广东省 深圳市 518055)

An Energy Station Hydrogen Pricing Model and Its Solution Method to Guide User Behaviors of Hydrogen Energy Vehicles

YAN Yanyu¹, XIE Shiwei^{1*}, WU Qiuwei², ZHANG Yachao¹, ZHENG Lingwei¹

- (1. School of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian Province, China;
2. Tsinghua-Berkeley Shenzhen Institute, Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: The exponential growth in hydrogen energy vehicles is anticipated to have a substantial impact on the operating state of power-traffic coupled networks. How to implement a hydrogen energy pricing strategy that effectively accounts for user behaviors and to guide them hold great significance for collaborative scheduling and interactions within these networks. In light of this, this paper proposes a pricing strategy model for coupled networks that takes into account user behaviors for hydrogen energy vehicles. Firstly, a traffic user equilibrium model, addressing energy constraints through variational inequalities (VIs), is initially established, followed by the introduction of a second-order cone program for the distribution network's hydrogen demands. Subsequently, a novel hydrogen pricing model is put forward, reformulated into a mathematical programming problem utilizing VIs, and solved using a second-order fixed point iteration algorithm that leverages the projection-contraction method. Based on the aforementioned, a hydrogen pricing model is proposed and recast into a corresponding mathematical programming problem with VIs. To address this problem, a second-order fixed point iteration algorithm is designed by incorporating the projection-contraction algorithm. The efficacy of the model and approach is confirmed through case studies, highlighting the critical role of energy constraints in the development of hydrogen pricing strategies within such networks.

KEY WORDS: power-traffic coupled network; hydrogen

energy vehicle; variational inequality; energy consumption constraints; hydrogen energy pricing

摘要: 氢能源汽车的迅速增长势必给电力-交通耦合网络的运行带来影响。研究如何有效考虑用户行为并通过氢能源定价策略对其进行引导,对耦合网络的协同调度和交互具有重大意义。针对该背景,提出计及氢能源汽车用户行为的耦合网络定价策略模型。首先,建立考虑能耗约束的交通用户均衡模型,通过推广变分不等式进行等效描述;其次,构建含氢能源汽车制氢需求的配电网二阶锥优化模型。该文提出一种氢能定价策略模型,将其转化为含有变分不等式的数学规划问题;基于此,设计二阶不动点迭代算法和投影-收缩算法进行求解;最后,通过算例对所提模型和方法的有效性进行验证,结果表明,考虑能耗约束对耦合网络氢能源定价是必要的。

关键词: 电力-交通耦合网络; 氢能源汽车; 变分不等式; 能耗约束; 氢能源定价

0 引言

随着我国氢能传输技术的成熟与发展,氢能源在交通等领域的应用成为助力“双碳”目标的重要举措^[1]。《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》报告指出,预计到2025年,我国可再生能源制氢量达10~20万t/年;到2035年,我国将形成氢能产业体系,构建涵盖交通、储能、工业等领域的多元氢能应用生态^[2]。氢能源汽车作为新型交通工具,由于其具备能量密度高、能量转化效率高和零碳排放等显著优势,拥有着广阔的发展空间^[3]。文

基金项目: 国家自然科学基金项目(52307087)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52307087).

献[2]指出,未来将逐步推进氢能源汽车与纯电动汽车的互补模式,不断提升交通领域氢能应用市场规模。目前,氢燃料电池汽车保有量持续快速增长,规模位居全球第 3。中国汽车工程学会组织编制的《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》预计 2030 年我国氢燃料电池汽车保有量将达到 100 万辆,城市中氢能源汽车的渗透率预期将持续增加^[4]。

然而,高比例氢能源汽车的接入将对能源系统的安全经济运行带来挑战。特别地,当前很大比例的氢能源由电解水制氢获取,氢能源汽车的加氢行为和需求分布势必对电网和交通网的运行带来影响^[2-3],也对传统运行机制和方法带来冲击与挑战。目前,大多数关于车网互动的研究以电动汽车为例进行分析。文献[5]从变分不等式理论出发,建立了电力-交通耦合网络均衡的数学理论框架。在此基础上,文献[6-7]进一步探讨耦合网络的动态特性,提出动态网络均衡模型以描述用户行为对交通流时空演化和电网充电价格变化的影响。然而,上述研究以电动汽车为研究对象,未充分考虑氢能源汽车的接入影响。文献[8]指出,在电力-交通耦合网络中考虑氢燃料电池汽车等新兴场景,对于网络规划和运行具有重要意义。此外,文献[9-10]分别对插电式电动汽车、燃料电池汽车和插电式氢电混合动力汽车进行建模,并讨论其对耦合网络及能源站运行策略的影响。

上述文献主要基于传统用户均衡(user equilibrium, UE)原则对耦合网络建模,存在一定局限性。为更进一步考虑用户出行决策的影响因素,当前文献针对传统 UE 模型进行了若干拓展。文献[11-12]考虑用户出行需求量与价格的影响关系,建立计及电动汽车用户弹性需求对充电价格响应的均衡模型。文献[13]假设用户出行选择受到行驶成本的影响,提出考虑用户出行成本预算的电力-交通耦合网络充电站定价策略。文献[14]提出耦合网络的协同最优定价模型,论证通过道路拥堵收费策略,可将 UE 状态转化为系统最优运行状态,实现系统经济性提升。在此基础上,文献[15]进一步考虑了用户需求的不确定性,提出电力交通耦合系统的鲁棒联合定价策略。文献[16]考虑了电动汽车出行者的路径偏好,提出离散选择模型以描述受环境因素影响下的用户行为。文献[17]探讨以电动汽车充电站可用容量为信号来调控 EV 车流,提出一种不同于价格响应的充电流调节方法。

文献[18-19]分别加入电池容量约束、道路容量约束进行充电站规划决策。

上述涉及车网互动的研究大多基于电动汽车对耦合网络均衡状态进行初步的探索^[5-7,11-19],并未计及氢能源汽车及其行为对耦合网络状态的影响,且尚未对于能源站中加氢价格的定价策略进行研究。此外,当前在车网互动中对用户均衡研究,通常不考虑电池容量对用户选择的影响,难以准确描述两网交互影响和交通流的实际分布。考虑到实际交通用户出行时需考虑其车辆剩余里程的限制,在均衡状态中引入能耗约束有助于获得更加准确的能源需求分布,亦是本文关注的问题之一。鉴于考虑能耗约束的行为建模具有一定复杂性,如何在不引入松弛或近似前提下对能耗约束进行建模,也是传统数学方法面临的挑战之一^[5]。

针对现有研究的不足,本文提出一种计及氢能源汽车用户行为的耦合网络定价策略模型。首先,建立含氢能源汽车的交通流模型,并引入推广变分不等式方法以描述含能耗约束下的用户均衡状态,证明其等价性;其次,建立含氢能源车制氢需求的配电网优化运行模型,并提出氢能定价策略;基于前文分析,进一步将耦合网络中的氢能源定价问题描述为含有变分不等式的数学规划(mathematical program with variational inequality, MPVI)问题,并利用模型变量的可分离性,设计二阶不动点迭代算法对等效问题进行求解。最后,基于实际 56 节点配电网与 Sioux Falls 交通系统仿真,验证了所提模型和求解算法的有效性。

1 考虑能耗约束的交通网模型

定义交通网中用户类型集合为 $U = \{H, G\}$,其中含加氢需求的汽车归为氢能源汽车,记为 $h \in H$,无加氢需求的氢能源汽车以及其他一般汽车归为非氢能源汽车,记为 $g \in G$ 。 \mathcal{N}_T 为交通网节点集合,其包含能源站节点集合 \mathcal{N}_{ES} ; $\mathcal{A} = \mathcal{A}^h \cup \mathcal{A}^g \cup \mathcal{A}^r$ 为路段集合;用户出行需求起点-终点(origin-destination, O-D)对记为 $s \in \mathcal{S} = \mathcal{S}^h \cup \mathcal{S}^g$,其中 \mathcal{S} 为所有用户需求对集合;对于任意 O-D 交通需求对,其出行需求量记为 $Q_s = Q_s^h \cup Q_s^g$; $\mathcal{P} = \mathcal{P}^h \cup \mathcal{P}^g$ 为所有可行路径集合; \mathbf{R}_+ 为非负实数集合; f_p 为穿过路径 $p \in \mathcal{P}$ 的交通流量 ($f_p = \{f_p^h \cup f_p^g, \forall p \in \mathcal{P}\} \in \mathbf{R}_+^{|\mathcal{P}|}$); x_a 为路段 $a \in \mathcal{A}$ 的流量。

不失一般性,本文考虑任意需求对至少存在 1

条连通路径,且所有氢能源汽车的出行路径均经过1个能源站节点。此外,考虑氢能源汽车在行驶过程中具有能耗限制,其最大允许能量消耗为 a_s^{\max} ,且到达能源站进行能量补充后认为剩余电池容量可以顺利到达终点。需指出,本文关注具有加氢需求的氢能源汽车行为如何影响耦合网络,即关注氢能源汽车在城市出行中需要同时寻找加氢地点。

1.1 混合静态交通流数学模型

对于一个含能源站的交通网络,本节建立其拓扑模型,如图1所示。考虑到汽车用户具有进入站内加氢行为或者经过能源站继续行驶的不同选择,将网络中的路段归为:氢能源车加氢路段和排队路段 $a \in \mathcal{A}^h$ 、非氢能源车旁通路段 $a \in \mathcal{A}^s$ 以及所有类型汽车均可通行的通用路段 $a \in \mathcal{A}^r$ 。如图1所示,能源站的存在使得模型中路段被表示为由3个节点和3条路段组成。基于上述分析,建立考虑能耗约束的混合静态交通流数学模型如下:

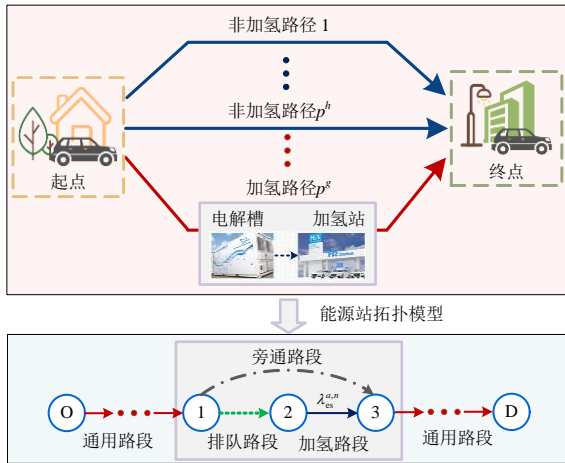


图1 含能源站的交通网络示意图及拓扑变换

Fig. 1 Schematic diagram and topology transformation of transportation network with energy stations

1) 不同路段行驶时间函数。

根据图1所示拓扑模型,本节将路段旅行时间函数分为如下4类:

①氢能源汽车排队路段。在站内所需的排队时间,采用基于排队理论构建的Davidson函数进行描述,具体表达式如下:

$$T_a(x_a) = \bar{R} \frac{x_a}{c_n - x_a}, \forall n \in \mathcal{N}_{ES}, n \in a \in \mathcal{A}^h \quad (1)$$

式中: \bar{R} 为形状参数; c_n 为能源站最大车流容量; $n \in a$ 表示加氢路段 a 穿过能源站节点 n 。需指出,考虑到排队时间随需求流量的增加而缓慢增大,式(1)通过路段目前流量与能源站最大剩余容量的

比值反应站内拥堵情况,式中形状参数根据排队拥堵情况与时间的比例关系进行调整取值。

②氢能源汽车加氢路段。用户加氢时间与其自身实际氢需求量有关,描述为

$$T_a(x_a) = t^0 + \frac{E_H}{v_H}, \forall a \in \mathcal{A}^h \quad (2)$$

式中: t^0 为固定常数,表示基础加氢时间; E_H 为氢能源汽车的氢需求量; v_H 为加氢速率。

③非氢能源汽车旁通路段。由于旁通路段非常短,将其在静态模型中的行驶时间近似为0,故有

$$T_a(x_a) = 0, \quad \forall a \in \mathcal{A}^s \quad (3)$$

④通用路段。路段行驶时间随流量严格单调递增,可表示如下:

$$T_a(x_a) = t_a^0 [1 + 0.15 (\frac{x_a}{C_a})^4], \quad \forall a \in \mathcal{A}^r \quad (4)$$

式中: t_a^0 为路段 a 的自由行驶时间; C_a 为路段 a 的车辆容量。

2) 交通流与能耗约束条件。

在交通网络拓扑结构确定的前提下,将所有O-D需求对里连通路径中的可行路径集合视为已知参数,建立路段路径流量等式约束如下:

$$x_a = \sum_{s \in \mathcal{S}^h} \sum_{p \in \mathcal{P}^h} f_p^h \xi_{ap}^h + \sum_{s \in \mathcal{S}^s} \sum_{p \in \mathcal{P}^s} f_p^s \xi_{ap}^s, \quad \forall a \in \mathcal{A} \quad (5)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}_s^h} f_p^h = Q_s^h, \quad \forall s \in \mathcal{S}^h, f_p^h \in \mathbf{R}_+ \quad (6)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}_s^s} f_p^s = Q_s^s, \quad \forall s \in \mathcal{S}^s, f_p^s \in \mathbf{R}_+ \quad (7)$$

式中: ξ_{ap}^h 、 ξ_{ap}^s 分别为汽车 h 和 g 的路段-路径关联系数; f_p^h 、 f_p^s 分别为汽车 h 和 g 所选路径 p 的交通流量。式(5)定义了路段流量与对应路径流量的等式关系;式(6)、(7)分别定义为氢能源汽车和非氢能源汽车的出行需求量守恒关系。

为获得更符合实际的流量分布模型,需进一步考虑车辆行驶过程中的能耗限制,以保证用户出行方案的可行性。本文重点关注具有加氢需求的氢能源汽车出行行为,其出发时需要考虑剩余容量是否能达到加氢站点。换言之,在一次行程中,若车载剩余氢能源不足,驾驶员需考虑途径加氢站进行补给,即需考虑达到加氢站点所需要的能耗是否在剩余里程范围内。因此,为计及氢能源汽车的能耗约束限制对电力交通融合系统均衡状态的影响,车辆在出行前中需考虑能耗约束,引入如下约束条件:

$$\Delta e_{sa} = d_a \phi_a + \theta T_a, \forall a \in \mathcal{A}^h, s \in \mathcal{S}^h \quad (8)$$

$$\Delta e_{sp} = \sum_{a \in \mathcal{A}^h} \xi_{ap}^h \Delta e_{sa}, \forall p \in \mathcal{P}^h, s \in \mathcal{S}^h \quad (9)$$

式中： Δe_{sa} 为氢能源汽车在路段 a 上的能源消耗； d_a 为路段 a 的距离； ϕ_a 为在路段 a 上行驶单位距离需要消耗的能量； θ 为路段单位耗时与能量相关系数； n 为路径 p 从起始节点到达能源站节点所消耗的能量。式(8)表示路段能耗为距离与时间的线性总和，即路段距离越长、耗时越久，则拥堵现象越严重，能耗增大；式(9)为各条路径在到达能源站前所经过的路段能耗总和。

3) 用户个体出行成本。

本节计算用户出行成本的前提为汽车司机均遵从利己原则，理性选择出行路径使得出行总费用最低，并将行驶的时间成本作为其中一个因素来衡量出行费用。根据上述，对于氢能源汽车个体用户，其需考虑出行行驶时间、途中加氢时间以及不同的站点的加氢成本来选择能源站；对于非氢能源汽车用户仅需要考虑时间成本，因此可定义不同汽车用户所有路径的出行成本函数如下：

$$c_p^g = \sum_{a \in \mathcal{A}^g \cup \mathcal{A}^s} w_0 T_a(x_a) \xi_{ap}^g \quad (10)$$

$$c_p^h = \sum_{a \in \mathcal{A}^g \cup \mathcal{A}^h} [w_0 T_a(x_a) + w_1 \lambda_{es}^{a,n} E_H] \xi_{ap}^h, \quad n \in a \in \mathcal{A}^h, \forall p \in \mathcal{P}^h \quad (11)$$

式中： w_0 为时间-费用转换权重； w_1 为氢价权重； $\lambda_{es}^{a,n}$ 为位于加路段 a 的能源站 $n \in \mathcal{N}_{ES}$ 的加氢价格。

1.2 含能耗约束的用户均衡描述

为了更好地考虑能耗约束对路网宏观交通流量的影响，引入混合用户均衡模型可以有效反映路网中各路段路径的状况和汽车用户的出行决策。根据 Wardrop 第一原则，用户基于网络中的交通状况相关信息独立选取成本最小的出行路径；当用户不能通过改变路径选择而获益，此时即系统达到稳定均衡点。鉴于在实际交通系统中，用户的出行需求受到其出行成本的影响外还需考虑车辆能耗约束。氢能源汽车用户根据出行目的地选择路径时需考虑路径能量消耗 Δe_{sp} ，若由于途径路线所需能耗过高而未能到达能源站，则此计划出行路径视为不可行方案。显然，采用传统 UE 模型并不能刻画此约束对用户决策的影响。为有效计及氢能源车能耗对出行路径选择的影响，本文研究含能耗约束的交通均衡状态，其具有如下逻辑关系式：

$$f_p^h > 0 \Rightarrow \Delta e_{sp} \leq a_s^{\max} \text{ 且 } c_p^h = c_s^h, s \in \mathcal{S}^h, p \in \mathcal{P}_s^h \quad (12)$$

$$f_p^h = 0 \Rightarrow \Delta e_{sp} > a_s^{\max} \text{ 或 } c_p^h \geq c_s^h, \forall s \in \mathcal{S}^h, p \in \mathcal{P}_s^h \quad (13)$$

$$f_p^g > 0 \Rightarrow c_p^g = c_s^g, \forall s \in \mathcal{S}^g, p \in \mathcal{P}_s^g \quad (14)$$

$$f_p^g = 0 \Rightarrow c_p^g \geq c_s^g, \forall s \in \mathcal{S}^g, p \in \mathcal{P}_s^g \quad (15)$$

式中 c_s^h 、 c_s^g 为需求对之间最小的路径行驶费用。

式(12)、(13)描述了含能耗约束的氢能源汽车用户均衡状态，即任意 O-D 对中有出行需求的路径，其在路径上的能量消耗不超过最大允许消耗且产生的出行成本为所在需求对的最小出行费用；式(14)、(15)定义了非氢能源汽车的用户均衡状态，即在相同的 O-D 对之间，所有流量不为 0 路径上产生的出行费用相等且为最小出行成本，而在所有非出行路径上的出行费用则大于或等于最小出行成本。

考虑到上述对于均衡状态的逻辑表达式的复杂性，构造如下等价非线性互补约束：

$$f_p^h \geq 0, \quad \forall p \in \mathcal{P}_s^h, s \in \mathcal{S}^h \quad (16)$$

$$\gamma_{sp} \geq 0, \quad \forall p \in \mathcal{P}_s^h, s \in \mathcal{S}^h \quad (17)$$

$$f_p^h (a_s^{\max} - \Delta e_{sp}) \geq 0, \quad \forall p \in \mathcal{P}_s^h, s \in \mathcal{S}^h \quad (18)$$

$$f_p^h \gamma_{sp} (a_s^{\max} - \Delta e_{sp}) = 0, \quad \forall p \in \mathcal{P}_s^h, s \in \mathcal{S}^h \quad (19)$$

$$c_p^h - \gamma_{sp} (a_s^{\max} - \Delta e_{sp}) - c_s^h = 0, \quad \forall p \in \mathcal{P}_s^h, s \in \mathcal{S}^h \quad (20)$$

$$f_p^h [c_p^h - \gamma_{sp} (a_s^{\max} - \Delta e_{sp}) - c_s^h] = 0, \quad \forall p \in \mathcal{P}_s^h, s \in \mathcal{S}^h \quad (21)$$

$$f_p^g \geq 0, \quad \forall p \in \mathcal{P}_s^g, s \in \mathcal{S}^g \quad (22)$$

$$c_p^g - c_s^g \geq 0, \quad \forall p \in \mathcal{P}_s^g, s \in \mathcal{S}^g \quad (23)$$

$$f_p^g (c_p^g - c_s^g) = 0, \quad \forall p \in \mathcal{P}_s^g, s \in \mathcal{S}^g \quad (24)$$

式中 γ_{sp} 为引入的辅助变量。

对于式(16)–(21)：

1) 当 $f_p^h > 0$ 时，由式(17)–(19)可得 $a_s^{\max} \geq \Delta e_{sp}$ 且 $\gamma_{sp} (a_s^{\max} - \Delta e_{sp}) = 0$ ，将其带入式(20)、(21)，可得 $c_p^h = c_s^h$ 。

2) 当 $f_p^h = 0$ 时，式(18)可分为 2 种可能性分析，

① 电池容量足够但是出行成本较大的情况，若 $a_s^{\max} \geq \Delta e_{sp}$ ，通过式(17)、(20)可推出 $c_p^h - c_s^h \geq \gamma_{sp} (a_s^{\max} - \Delta e_{sp}) \geq 0$ ，即 $c_p^h \geq c_s^h$ ；② $a_s^{\max} \leq \Delta e_{sp}$ 则为不满足能耗约束而导致不可行出行方案的情况。

经以上数学推导分析，其结果符合逻辑关系式(12)、(13)。对于式(22)–(24)，分别考察 $f_p^g > 0$ 和

$f_p^g = 0$ 的情形即可验证其等价于用户均衡描述表达式(14)、(15)。

1.3 用户均衡的等价变分不等式

现有文献已证明变分不等式与非线性互补约束的等价性,前者具有良好的数学性质,其对于映射函数为非线性表达式的情形具有较好的实用性,避免了传统引入二进制变量松弛方法的繁琐性^[14]。针对于本文涉及到的电力交通非线性耦合关系问题,转化为变分不等式问题更有利于高效求解。

因此,可构造等价推广变分不等式对本节问题进行描述,以下给出含能耗约束的混合用户均衡状态与变分不等式的等价性。

定理 1: 静态交通网络中,给定加氢价格 λ_n^a ,若交通流以及能量消耗满足含能耗约束的用户均衡状态(式(16)–(24)),当且仅当其满足如下推广变分不等式问题:

$$\begin{aligned} & \sum_{s,p} [c_p^{h^*}(f_p^{h^*}) - \gamma_{sp}^*(a_s^{\max} - \Delta e_{sp}^*)](f_p^h - f_p^{h^*}) + \\ & \sum_{s,p} f_p^{h^*}(a_s^{\max} - \Delta e_{sp}^*)(\gamma_{sp} - \gamma_{sp}^*) + \\ & \sum_{s,p} c_p^{g^*}(f_p^{g^*})(f_p^g - f_p^{g^*}) \geq 0 \end{aligned} \quad (25)$$

证明: 见附录 A。

进一步定义: $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} f_p^g, \forall p \in \mathcal{P}_s^g, s \in \mathcal{S}^g \\ f_p^h, \forall p \in \mathcal{P}_s^h, s \in \mathcal{S}^h \\ \gamma_{sp}, \forall p \in \mathcal{P}_s^h, s \in \mathcal{S}^h \end{bmatrix}$

$\mathcal{F}(\mathbf{x}) =$

$$\begin{bmatrix} c_p^g(f_p^g), & \forall p \in \mathcal{P}_s^g, s \in \mathcal{S}^g \\ c_p^h(f_p^h) - \gamma_{sp}(a_s^{\max} - \Delta e_{sp}), & \forall p \in \mathcal{P}_s^h, s \in \mathcal{S}^h \\ f_p^h(a_s^{\max} - \Delta e_{sp}), & \forall p \in \mathcal{P}_s^h, s \in \mathcal{S}^h \end{bmatrix}$$

则式(25)可写成以下矩阵形式:

$$(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*)^T \mathcal{F}(\mathbf{x}^*) \geq 0 \quad (26)$$

2 含氢能源车制氢需求的配电网模型

定义表示辐射状电力网络拓扑有向图为 $G_E = (\mathcal{N}_E, \mathcal{L})$,其中 \mathcal{N}_E 和 \mathcal{L} 分别表示为配电网节点和线路的集合,其中节点集合由平衡节点 $\{0\}$ 和其余节点 $\mathcal{N}_+ = \{1, 2, \dots, |\mathcal{N}_+|\}$ 构成。为研究氢能汽车对电力与交通网的影响,本文考虑氢气由电解水产生,产生的氢气储存在能源站以满足燃料电池电动汽车的行驶要求。因此,能源站节点即为电力网与交通网的耦合节点,节点集合可表示为 \mathcal{N}_{ES} ,且有

$\mathcal{N}_{ES} \subset \mathcal{N}_E$ 。根据相关研究统计表明,通过能源站的氢能汽车交通路段流量 x_a 与氢需求负荷 p_n^H 存在线性关系,其映射关系可表示为

$$p_n^H = \sum_{a \in \mathcal{A}^h} \sigma_{a,n} \frac{E_H x_a K_H}{\eta}, \quad \forall n \in \mathcal{N}_{ES} \quad (27)$$

式中: $\sigma_{a,n}$ 为路段 a 与能源站节点 n 的关联系数; K_H 为 1 kg 氢气的发电量; η 为电氢转换效率。后文将氢需求负荷记为 \mathbf{p}_H 。与文献[5,7]相同,本文考虑加氢需求 E_H 为给定值,亦可通过设定不同需求组的氢能车来区分不同加氢量,但为了聚焦研究重点问题,考虑固定加氢值可在不影响模型有效性前提下简化问题的复杂性。

如下建立含氢能源车制氢需求的配电网最优潮流模型。首先,电力潮流应满足如下电流、电压幅值、线路功率限制和发电机功率约束:

$$0 \leq \tilde{I}_{mn} \leq \bar{I}^2, \quad \forall (m,n) \in \mathcal{L} \quad (28)$$

$$\underline{U}^2 \leq \tilde{U}_n \leq \bar{U}^2, \quad \forall n \in \mathcal{N}_+ \quad (29)$$

$$0 \leq p_{mn}^\ell \leq \bar{p}^\ell, \quad 0 \leq q_{mn}^\ell \leq \bar{q}^\ell, \quad \forall (m,n) \in \ell \in \mathcal{L} \quad (30)$$

$$\underline{p}_n^G \leq p_n^G \leq \bar{p}_n^G, \quad \underline{q}_n^G \leq q_n^G \leq \bar{q}_n^G, \quad \forall n \in \mathcal{N}_+ \quad (31)$$

式中: \bar{I} 为线路电流幅值上限; \bar{U} 、 \underline{U} 分别为节点电压幅值的上下限; \tilde{U}_n 、 \tilde{I}_{mn} 分别为节点电压和线路电流幅值的平方; p_{mn}^ℓ 、 q_{mn}^ℓ 分别为线路 ℓ 的有功和无功功率; \bar{p}^ℓ 、 \bar{q}^ℓ 分别为线路有功和无功功率上限; p_n^G 、 q_n^G 为节点 n 的有功和无功注入功率; \bar{p}_n^G 、 \underline{p}_n^G 、 \bar{q}_n^G 、 \underline{q}_n^G 分别为发电机有功和无功功率上下限。

其次,配电网中任意节点需满足节点功率平衡约束,且任意线路 2 点之间都应满足欧姆定律、支路首端功率方程。通过去掉电流、电压的相角,保留幅值,将上述约束进行相角松弛可得

$$p_n^G - p_n^D - p_n^H = \sum_{i \in \Pi(n)} p_{ni}^\ell - (p_{mn}^\ell - \tilde{I}_{mn} R_{mn}^\ell), \quad \forall (m,n) \in \ell \in \mathcal{L} \quad (32)$$

$$q_n^G - q_n^D = \sum_{i \in \Pi(n)} q_{ni}^\ell - (q_{mn}^\ell - \tilde{I}_{mn} X_{mn}^\ell), \quad \forall (m,n) \in \ell \in \mathcal{L} \quad (33)$$

$$\tilde{U}_n = \tilde{U}_m - 2(p_{mn}^\ell R_{mn}^\ell + q_{mn}^\ell X_{mn}^\ell) + \tilde{I}_{mn} (Z_{mn}^\ell)^2, \quad \forall (m,n) \in \ell \in \mathcal{L} \quad (34)$$

$$\tilde{I}_{mn} = \frac{(p_{mn}^\ell)^2 + (q_{mn}^\ell)^2}{\tilde{U}_m}, \quad \forall (m,n) \in \ell \in \mathcal{L} \quad (35)$$

式中: $\Pi(n)$ 为以 n 为首节点的所有线路末节点集合; p_n^D 、 q_n^D 分别为节点 n 的有功、无功负荷; R_{mn}^ℓ 、

X_{mn}^ℓ 、 Z_{mn}^ℓ 分别为线路 ℓ 的电阻、电抗和阻抗。

配电网运营商一般采用节点边际电价作为售电价格，其等价求解节点有功功率平衡约束的拉格朗日对偶变量 λ_n 。考虑到电氢之间的转换关系及实际中站点服务所需成本，本文定义能源站的加氢价格 $\lambda_H = [\lambda_{es}^{a,n}]$, $\forall a \in \mathcal{A}^h, n \in \mathcal{N}_{ES}$ 为

$$\begin{cases} \lambda_{es}^{a,n} = \sigma_{a,n} \lambda_n \vartheta + \lambda_{srv} \\ 0 \leq \lambda_{es}^{a,n} \leq \lambda_{es}^{\max} \end{cases} \quad (36)$$

式中： ϑ 为电氢价格转换系数； λ_{srv} 为站点加氢基础服务费； λ_{es}^{\max} 为每个能源站加氢价格的上限。根据文献[7]中证明，当 p_n^H 属于一定范围时，二阶锥模型强对偶性质仍可满足。

此外，为保证模型的凸性，对非线性等式(35)可采用如下二阶锥不等式约束进行松弛^[6]：

$$\|(2p_{mn}^\ell \ 2q_{mn}^\ell \ \tilde{I}_{mn} - \tilde{U}_m)^T\|_2 \leq \tilde{I}_{mn} + \tilde{U}_m, \forall (m,n) \in \mathcal{L} \quad (37)$$

综上，含氢能源汽车氢需求负荷的配电网最优潮流问题可表述为

$$\begin{cases} \min \sum_{n \in \mathcal{N}_+} [a_n (p_n^G)^2 + b_n p_n^G] + \sum_{i \in \Pi(0)} b_0 p_{0i}^\ell \\ \text{s.t. 式(27)—(34)、(36)—(37)} \end{cases} \quad (38)$$

式中： a_n 、 b_n 、 b_0 均为发电成本系数； $\sum_{i \in \Pi(0)} p_{0i}^\ell$ 为

以平衡节点为首节点的所有线路流出的总功率，即从上级电网流入的总功率。一般地，配电网最优潮流以运行经济最小化为目标函数，其包括发电经济成本和向上级主网购电的成本。

3 能源站氢能价格决策模型及其求解算法

考虑氢能源汽车加氢行为后，电力-交通耦合网络之间的互动机理如图 2 所示。具体而言，配电网通过电价影响交通侧能源站的氢能价格策略，而交通网中的氢能源汽车用户根据上级加氢价格，在考虑能耗约束前提下制定出行策略，从而影响电解氢负荷分布，进而将反作用于定价策略。需指出，该过程中，电力网络实时调控中心无法直接控制用户行为，而是通过定价手段引导用户。虽然当前电力和交通分属不同部门，随着能源互联网的发展，类似的角色将在不久的将来得到普及。

上述互动过程使得定价策略模型存在如下复杂耦合关系：1) 在配电网侧，有功平衡约束中包含了电解氢所需的电力负荷 p_H ，对应能源站中氢能源汽车加氢需求的电解氢负荷，其由交通网侧用户

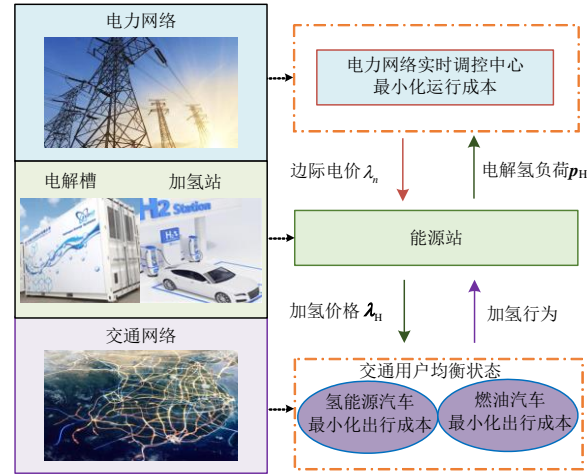


图 2 含氢能源汽车的电力-交通耦合网络互动框架

Fig. 2 Power-traffic coupling network interaction framework for hydrogen energy vehicles

行为及最终均衡状态所确定；2) 在交通网侧，所有用户在能源站氢能价格 λ_H 给定前提下，进行出行路线和加氢决策，最终达到均衡状态，可表示为参数型变分不等式问题 $(x - x^*)^T \mathcal{F}(x^*, \lambda_H) \geq 0$ 。

根据上述分析，耦合网络中的氢能源定价问题本质上属于 Stackelberg 博弈问题，可描述为含有变分不等式的数学规划：

$$\begin{cases} \min \sum_{n \in \mathcal{N}_+} [a_n (p_n^G)^2 + b_n p_n^G] + \sum_{i \in \Pi(0)} b_0 p_{0i}^\ell \\ \text{s.t. 式(27)—(34)、(37)、(32): } \lambda_n \\ \lambda_{es}^{a,n} = \sigma_{a,n} \lambda_n \vartheta + \lambda_{srv}, 0 \leq \lambda_{es}^{a,n} \leq \lambda_{es}^{\max} \\ \lambda_H = [\lambda_{es}^{a,n}], \forall a \in \mathcal{A}^h, n \in \mathcal{N}_{ES} \\ (x - x^*)^T \mathcal{F}(x^*, \lambda_H) \geq 0 \end{cases} \quad (39)$$

在 MPVI 模型中，配电网有功平衡约束包含变量 p_n^H ，其由变分不等式的解 x^* 界定，而求解变分不等式问题需给定参数 λ_H ，其由有功平衡约束式(32)的对偶变量 λ_n 计算得到，使得最终均衡解难以用传统方法有效求解。为此，本文引入二阶不动点映射来描述 MPVI 问题。首先，给定氢能源需求 p_H ，求解最优潮流并获得该状态下的边际电价 λ_n ，进而得到加氢价格 λ_H 。该过程可定义为一个需求 p_H 到价格 λ_H 的映射，即 $f(x): p_H \rightarrow \lambda_H$ 。其次，给定加氢价格 λ_H 后，可通过变分不等式问题唯一确定交通网侧的用户均衡状态 x^* ，故可进一步获得均衡状态下能源站的制氢需求 p_H ，此过程可定义为映射 $g(x): \lambda_H \rightarrow p_H$ 。综上，MPVI 问题可转化为一个二阶不动点的问题，求解满足 $g(f(p_H^*)) = p_H^*$ 的解即为满足不动点的解。结合上述框架，可通过如下定理进一步说明耦合网络均衡状态的存在性问题。

定理 2: 网络中所有变量的可行域 $\Omega = \Omega_{\text{PDN}} \cup \Omega_{\text{TN}}$ 皆为有界凸闭集合, 对偶变量满足 $\|\lambda_n\| \leq R$, $R \in \mathbf{R}_+$ 为足够大的正实数, 且相关函数为集合内的连续映射函数, 则本文所提的二阶映射不动点问题至少存在 1 个均衡解。

证明: 1) 集合凸闭性: 对于配电网模型, 网络中所有变量的可行域 Ω_{PDN} 为有界凸闭集合; 对于交通网模型, 所有约束均为有界凸约束, 交通流的可行域 Ω_{TN} 同为有界凸闭集合。

2) 映射连续性:

① $f(\mathbf{x}): \mathbf{p}_H \rightarrow \lambda_H$ 。式(27)中任意氢需求负荷 p_n^H 为连续变量, 其影响着配电网有功功率平衡。由于配电网中凸松弛的精确性, 节点边际电价 λ_n 为有功平衡约束(32)的对偶最优解。又因对偶变量均定义为连续变量, 所以线性依赖于 λ_n 的加氢价格 $\lambda_{\text{es}}^{a,n}$ 也为连续变量。因此 $f(\cdot)$ 是关于自变量 \mathbf{p}_H 的连续映射函数。

② $g(\mathbf{x}): \lambda_H \rightarrow \mathbf{p}_H$ 。由于路段旅行时间函数(1)–(4)在可行域 Ω_{TN} 内是连续的且与用户个体出行成本函数(10)–(11)正相关。在加氢价格 $\lambda_{\text{es}}^{a,n}$ 连续的情况下, 因其与式(11)的线性关系, 价格的变化会引起相应的路段旅行时间变化, 进而使得路径流量 f_p 发生改变。由式(5)可知 x_a 为 f_p 的线性总和, x_a 的连续变化将通过式(27)引起变量 p_n^H 的连续变化。综上, 在 \mathbf{p}_H 非无穷大的情况下, $g(\cdot)$ 为连续映射函数。

根据 Brouwer 不动点定理, 求解网络均衡解的二阶不动点问题 $g(f(\mathbf{p}_H^*)) = \mathbf{p}_H^*$ 存在至少 1 个解, 即耦合网络均衡状态模型具有存在性。证毕。

配电网和交通网之间的互动体现为加氢价格和氢需求负荷的变动, 本质上为氢能源需求到自身的映射: $\mathbf{p}_H^k \rightarrow \lambda_H^{k+1} \rightarrow \mathbf{p}_H^{k+1}$ 。因此, 当给定氢需求负荷 \mathbf{p}_H 且可唯一确定交通网侧内部均衡解时, 采用二阶不动点迭代算法求解均衡解。二阶不动点迭代算法(算法 1)的步骤为:

1) 初始化。设置初值 \mathbf{p}_H^0 、 λ_H^0 和收敛误差限 ε_1 ; 记录迭代次数 $k=0$ 并开始迭代。

2) 求解配电网最优潮流子问题。输入 \mathbf{p}_H^k , 求解目标函数, 提取边际电价并通过一定的定价规则获得加氢价格 λ_H^{k+1} 。

3) 求解交通网混合用户均衡子问题。输入 λ_H^{k+1} , 求解交通网络汽车用户出行决策均衡问题式(25)(算法 2), 获得制氢需求分布 \mathbf{p}_H^{k+1} 。

4) 收敛判断。判断是否满足如下条件:

$$\|\mathbf{p}_H^{k+1} - \mathbf{p}_H^k\| \leq \varepsilon_1, \|\lambda_H^{k+1} - \lambda_H^k\| \leq \varepsilon_1$$

若满足则迭代收敛; 否则, $k = k + 1$ 并返回步骤 2)。

需指出, 步骤 3) 在定价策略给定的情况下求解考虑含能耗约束的混合静态交通网络均衡问题, 其涉及了给定参数 λ_H 下推广变分不等式问题(25)的计算。投影-收缩算法 II 基于变分不等式属性, 通过预估-校正方式确保迭代点与最优解距离严格单调递减, 加快并优化迭代。其收敛性已在文献[5]中证明, 能有效获得交通网络的均衡解。结合本文问题特征, 其采用投影-收缩算法 II (算法 2) 求解的步骤如下:

1) 初始化。给定参数 $\beta_0 = 1$, $\nu \in (0, 1)$, $\gamma \in [1, 2)$, 收敛允许误差 ε_2 , 初始变量 $\mathbf{x}_0 \in \Omega_{\text{TN}}$, 迭代次数设置为 $l = 0$ 。

2) 计算预估步。给定加氢价格 λ_H^{k+1} 及上一代变量 \mathbf{x}_l , 通过投影计算预估点:

$$\tilde{\mathbf{x}}_l = \Pi_{\Omega_{\text{TN}}}(\mathbf{x}_l - \beta_l \mathcal{F}(\mathbf{x}_l))$$

计算准则为

$$r_l = \frac{\beta_l \|\mathcal{F}(\mathbf{x}_l) - \mathcal{F}(\tilde{\mathbf{x}}_l)\|}{\|\mathbf{x}_l - \tilde{\mathbf{x}}_l\|}$$

当 $r_l > \nu$ 时, 调整寻找满足 Lipschitz 连续条件的参数 β_l 并重新更新预估点:

$$\begin{cases} \beta_l = \frac{2}{3} \beta_l \min\{1, \frac{1}{r_l}\} \\ \tilde{\mathbf{x}}_l = \Pi_{\Omega_{\text{TN}}}(\mathbf{x}_l - \beta_l \mathcal{F}(\mathbf{x}_l)) \\ r_l = \frac{\beta_l \|\mathcal{F}(\mathbf{x}_l) - \mathcal{F}(\tilde{\mathbf{x}}_l)\|}{\|\mathbf{x}_l - \tilde{\mathbf{x}}_l\|} \end{cases}$$

3) 计算校正步。定义方向表达式 $d(\mathbf{x}_l, \tilde{\mathbf{x}}_l)$ 和迭代步长 α_l :

$$d(\mathbf{x}_l, \tilde{\mathbf{x}}_l) = (\mathbf{x}_l - \tilde{\mathbf{x}}_l) - \beta_l [\mathcal{F}(\mathbf{x}_l) - \mathcal{F}(\tilde{\mathbf{x}}_l)]$$

$$\alpha_l = \frac{(\mathbf{x}_l - \tilde{\mathbf{x}}_l)^T d(\mathbf{x}_l, \tilde{\mathbf{x}}_l)}{\|d(\mathbf{x}_l, \tilde{\mathbf{x}}_l)\|^2}$$

根据预估点对迭代点进行修正, 计算出 \mathbf{x}_{l+1} :

$$\mathbf{x}_{l+1} = \Pi_{\Omega_{\text{TN}}}(\mathbf{x}_l - \gamma \alpha_l \beta_l \mathcal{F}(\tilde{\mathbf{x}}_l))$$

4) 判断收敛条件是否满足。

$$\|\mathbf{x}_{l+1} - \mathbf{x}_l\| \leq \varepsilon_2$$

满足则算法收敛, 继续计算氢需求负荷 \mathbf{p}_H^{k+1} ; 否则更新 $\beta_{l+1} = \beta_l$, $l = l + 1$, 返回步骤 2)。

算法 2 中 $\Pi_{\Omega_{\text{TN}}}$ 表示在可行域 Ω_{TN} 中进行欧几里得投影, 寻找欧式空间中范数距离最近的解。根据文献[20], 算法产生的序列 $\{x_l\}$ 满足式(40)则收敛于推广变分不等式(26)的最终解。

$$\|x_{l+1} - x^*\| \leq \|x_l - x^*\| - [\gamma(2-\gamma)(1-\nu)/2] \|x_l - \Pi_{\Omega_{\text{TN}}}(x_l - \beta_l \mathcal{F}(x_l))\| \quad (40)$$

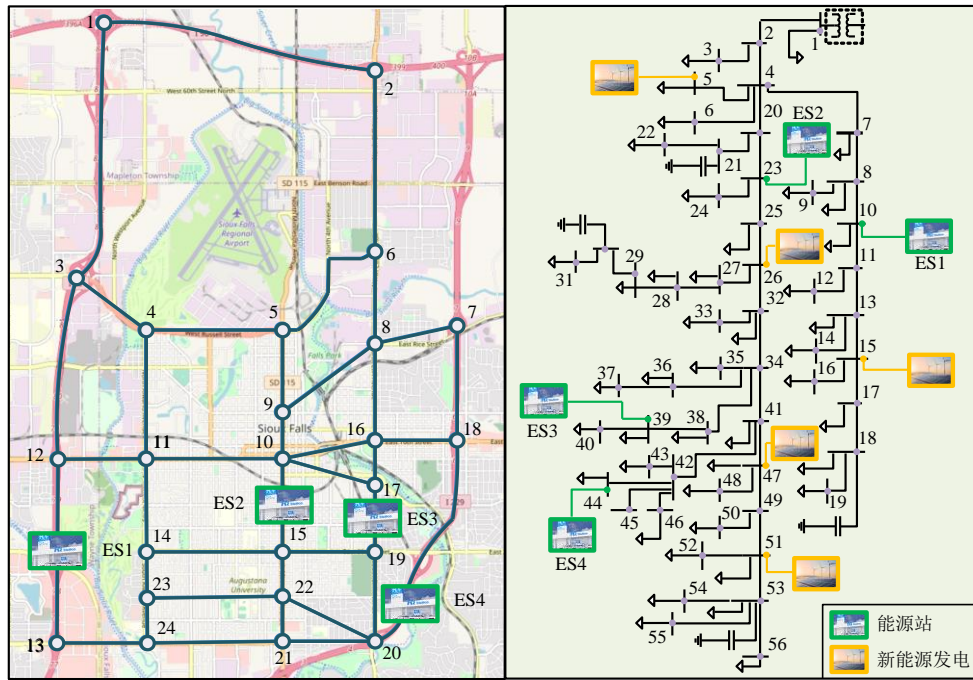


图 3 耦合网络拓扑测试系统
Fig. 3 Test system of a coupled network topology

4.2 求解算法分析

为验证二阶不动点迭代算法解决 MPVI 模型的有效性, 本节通过可视化仿真过程中参数的迭代收敛误差。图 4 表明, 在第 7 次迭代时, 加氢价格和氢需求的迭代误差同时达到 10^{-5} 的收敛标准, 说明算法可收敛到均衡解。此外, 迭代收敛误差随迭代次数增加而减小, 前 3 次迭代误差下降明显, 之后变化缓慢, 直到第 7 次迭代稳定(耗时 229.89 s), 这验证了算法的效率和有效性。

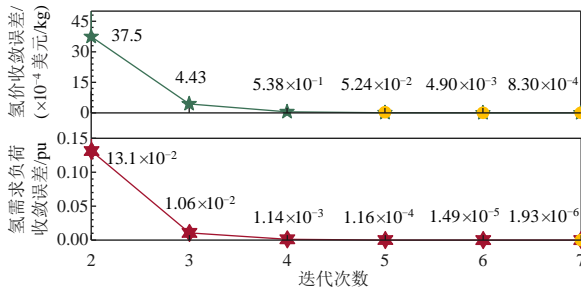


图 4 二阶不动点迭代算法收敛误差曲线
Fig. 4 Convergence error curve of second-order fixed point iterative algorithm

4 仿真算例

4.1 算例介绍

本文采用实际 56 节点配电网与 Sioux Falls 交通系统作为测试系统, 拓扑结构如图 3 所示。基于 Matlab 平台及 Yalmip 工具箱编程进行仿真, 模型中涉及的凸优化问题均调用 Gurobi 进行求解。测试系统与仿真所需参数均已上传网络^[21]。

为验证采用推广变分不等式约束(26)的有效性, 图 5 给出算法 2 每次循环求解的迭代曲线。结果表明, 二阶不动点算法迭代次数虽在增加, 但投影-收缩算法 II 迭代误差曲线并无显著变化。此外, 由曲线可看出, 误差随投影迭代次数的增加首先明显降低, 随后均呈现减缓趋势, 且 7 次循环求解达到要求精度的次数变化不大。该结果表明, 投影-收缩算法 II 在求解本文所提的推广变分不等式问

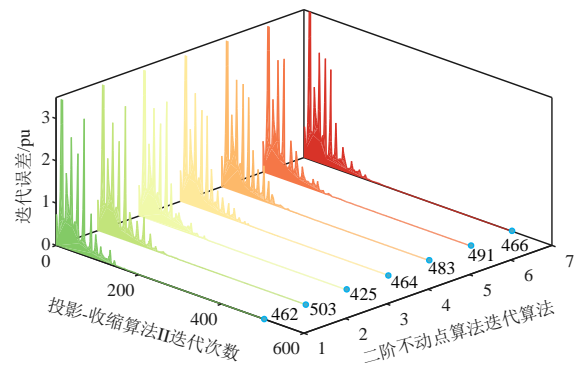


图 5 算法 2 循环迭代曲线
Fig. 5 Loop iteration curve of algorithm 2

题时具有一定的稳定性。

表1对比了算法2及其他算法对二阶不动点迭代算法收敛的影响,对应3种算法的迭代收敛曲线如图6所示(以最后一次二阶不动点迭代结果为例)。结果显示,在相同收敛精度(10^{-5})条件下,投影-收缩算法I虽能达到收敛,但迭代次数最多,总耗时为362.73s,且迭代过程波动大,稳定性较差;而基本投影算法虽迭代次数少于本文算法,但因误差调整速率较慢,平均迭代次数多,耗时长,总计800.18s。因此,采用投影-收缩算法II时,显示出较高的计算效率和明显的优势,即在处理推广变分不等式问题上具备较好的性能。

表1 求解推广变分不等式(26)的算法对比

Table 1 Comparison of algorithms for solving generalized variational inequalities (26)

算法	平均迭代次数	平均迭代时间/s	外层算法收敛次数
投影-收缩算法 I ^[20]	867	33.61	10
投影-收缩算法 II	471	30.48	7
基本投影算法 ^[5]	3 948	130.42	6

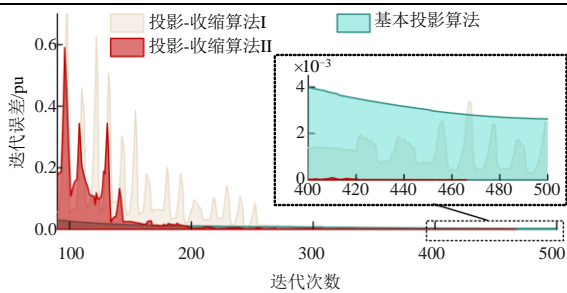
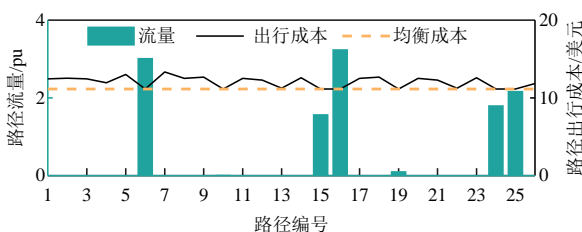


图6 不同算法迭代收敛对比图

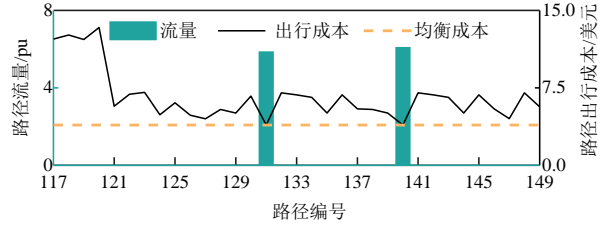
Fig. 6 Comparison of iterative convergence of different algorithms

4.3 仿真结果分析

为验证通过二阶不动点迭代算法求解MPVI问题的均衡解是否满足逻辑关系式(12)–(15),图7、8给出了不同类型用户的部分O-D需求对的出行情况分布。可以看出,非氢能源汽车用户出行决策中,流量不为0的路径所对应的出行成本均为同一O-D对所有路径的最小值,即均衡成本;其余路径的出行成本均大于均衡成本,为不被考虑的出行路径,车流量皆为0。综上,所得结果满足非氢能源汽车的用户均衡状态条件(14)及(15)。



(a) O-D对(1-21)



(b) O-D对(3-23)

图7 非氢能源汽车部分需求对均衡流量及成本

Fig. 7 Equilibrium flow and cost of non-hydrogen energy vehicles for some O-D pair

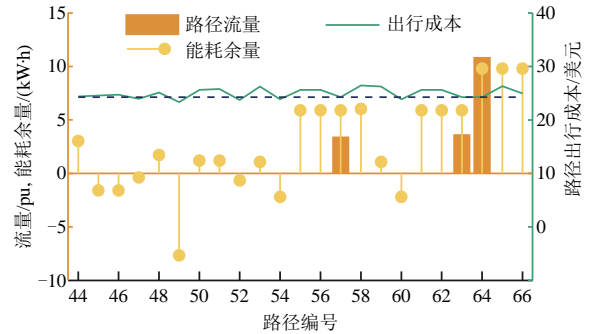


图8 氢能源汽车部分需求对均衡流量、成本及能耗余量

Fig. 8 Equilibrium flow, cost and energy consumption margin of hydrogen energy vehicles for some O-D pairs

图8结果表明,在O-D需求对(1-21)的所有路径中,氢能源汽车用户的路径选择同时受到出行成本大小以及能耗的影响。此外,路径能耗余量为正的时候,只有其出行成本为最小值,即均衡成本,才存在路径流量;反之,不满足能耗约束,即能耗余量为负值,即便出行成本低于均衡值,路径车流量也为0(例如路径47、49、52、54和60)。仿真结果符合式(12)、(13)所定义的含能耗约束的氢能源汽车用户均衡状态,表明求解结果的准确性。

仿真进一步测试了不考虑能耗约束(not energy consumption constraint, NECC)时交通网氢能源汽车用户均衡解,并与含能耗约束(energy consumption constraint, ECC)的结果进行对比,如图9、10所示。

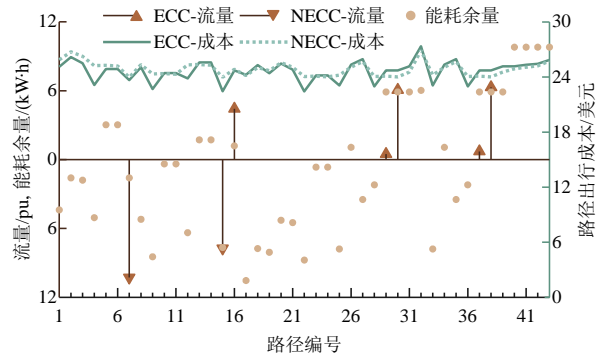


图9 考虑能耗与否对均衡流量与成本的影响

Fig. 9 Impact on equilibrium flow and cost for have consider energy consumption constraint or not

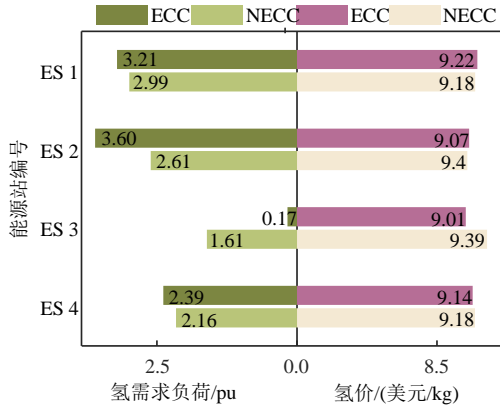


图 10 能源站氢价与氢需求负荷分布

Fig. 10 Hydrogen price and hydrogen demand load distribution of energy stations

通过对比可知，在同一个系统下，含能耗约束与不含能耗约束对路径出行费用影响不大。然而，考虑能耗与不考虑能耗情况下，用户选择的路径具有较大差异，如前者路径 16、29、30、37 和 38 有流量通过，而后者用户则主要选择路径 7 和 15 作为出行方案。上述结果主要原因在于，路径 7、15 的能耗余量为负值，为不可行路径。然而，在不考虑能耗约束下却将其视为可行路径，且此 O-D 对所有车流量都集中于这 2 条路径，这会导致车辆在途中因不足够的电量而无法行驶的状况出现。考虑能耗约束后，调整出行成本，重新预估出行路径并进行用户决策，更贴近实际情况。

图 10 对比了 ECC 和 NECC 的 4 个能源站 (energy station, ES) 的加氢价格和氢需求负荷分布。由图 10 可知，无能耗约束的条件下在 4 个站点的分布较为平均，ES3 因氢价最高而氢需求较小。考虑能耗约束后，到达 ES3 站点所需能量最多，即使其站点氢价最低，有加氢需求的大多数用户也无法到达站点。这些用户只能通过选择其余 3 个能源站进行加氢行为或放弃此次出行计划。结果再次验证，考虑含能耗的用户行为对于电网制定准确电价策略具有重要意义。

仿真进一步给出了在未考虑能耗情况下的电网出力决策方案(即发电机组出力)，并测试其在应对实际用户行为(即考虑能耗约束)情况下的表现，定义为 NECC*。图 11 对比了 ECC、NECC 和 NECC* 对应的节点电压分布规律。结果表明，NECC* 的节点电压均低于 ECC 的电压，且节点 10 和 23 的电压低于其他情况。此外，在 NECC 下，节点 39 的电压骤降，负荷接入远超其他节点。因此，实际应用中，考虑能耗约束有助于优化电网节点电压分

布，提升运行经济性。

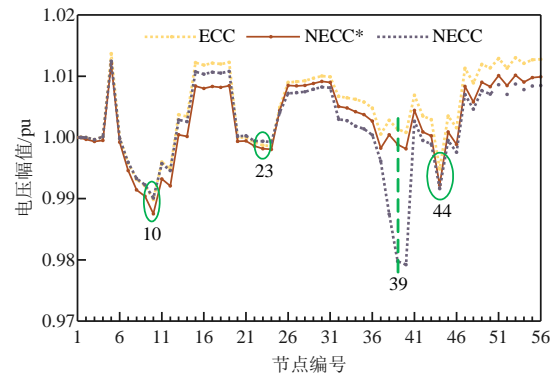


图 11 节点电压分布对比

Fig. 11 Comparison of node voltage distribution

表 2 给出本文定价策略与统一定价(即各个站点价格统一)的对比结果。其中全体用户成本定义为各条路段所有用户成本的总和。结果显示，灵活定价策略能将流量从 ES1 和 4 分配到其他站点，降低系统全体用户成本，即社会运行成本。综上，通过耦合网络定价模型的测试，本文提出的方法可在提高经济性的前提下缓解全路段的拥堵情况。

表 2 不同定价方案对比

Table 2 Comparison of different pricing schemes

定价方案	氢需求负荷/pu				全体用户成本/ ($\times 10^5$ 美元)	电网运行 成本/美元
	ES1	ES2	ES3	ES4		
本文定价	3.21	3.60	0.17	2.39	3.111 5	983.90
统一定价	3.44	3.49	0.03	2.42	3.111 7	984.33

4.4 灵敏度分析

为分析氢能源车渗透率对耦合网络定价策略和运行状态影响，本节在用户出行需求不变情况下，基于不同渗透率求解 MPVI 模型。图 12—15 展示了氢车渗透率 30%~70% 变化下的氢价、发电机有功出力、氢需求负荷与电网成本对比。结果显示，氢车用户增加使 ES1 和 2 的加氢需求集中，氢价较其他站点高，对渗透率敏感度大。ES3 用户需

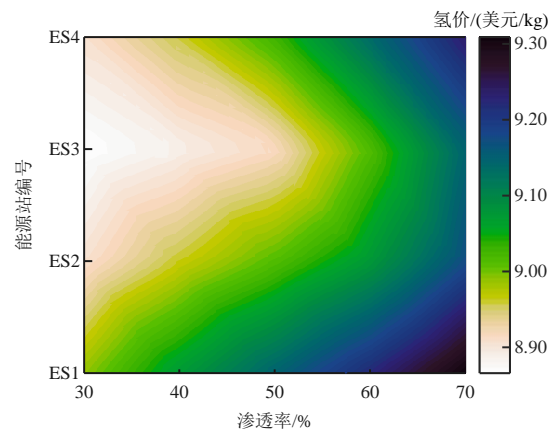


图 12 氢能源价格变化规律

Fig. 12 Variations in hydrogen energy price

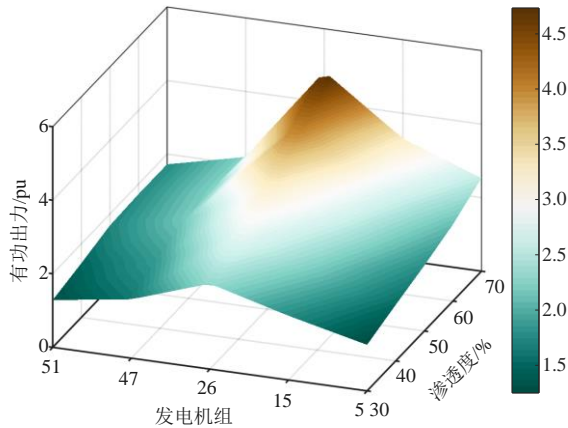


图13 发电机组出力分布变化

Fig. 13 Change in the generator output distributions

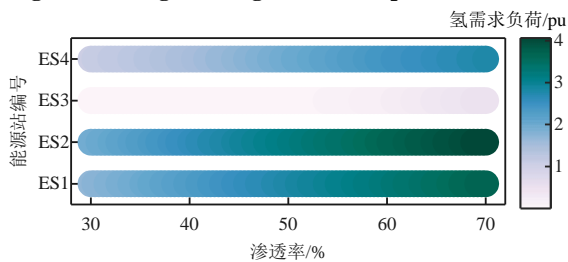


图14 各能源站氢需求变化

Fig. 14 Variation of hydrogen demand for energy stations

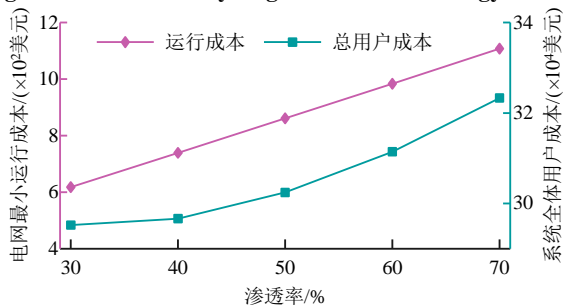


图15 电网运行成本变化

Fig. 15 Variation of grid operation costs

求量变化小, 与前文结论一致。渗透率约 50% 时, 站 3 氢价上升, 标明加氢需求增至一定程度时定价策略影响显著。氢车比例超过非氢车后, 发电机 26 有功快速增加, 因靠近站 ES1 和 2, 需求增导致有功输出增。此外, 图 14 和 15 显示, 电网和社会成本随氢车渗透率增近线性增长, 凸显考虑氢车在城市运营中的重要性。

为研究能耗约束力的灵敏性, 本节测试了不同最大能耗参数对能源站氢需求分布的影响, 结果如图 16 所示。由图 16 可知, 曲线拐点均出现在允许最大能耗为 60 kW h 时; 此时, ES1、2、4 的氢需求减少, 而站 ES3 呈线性增长。结果还显示, 电网最小运行成本随最大能耗增加而升高, 但在 66 kW h 的能耗约束后, 曲线趋于平稳, 与 NECC 交通网测试一致。综上, 考虑能耗约束的交通网模

型的有效性受最大能耗限制的影响, 选择更加符合实际情况的运行能耗可使得氢需求负荷分布更加准确。

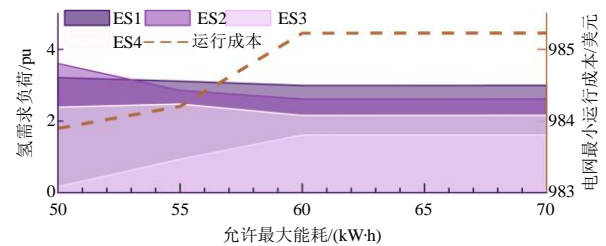


图16 不同允许能耗的仿真结果

Fig. 16 Results under different allowable consumption

5 结论

为支撑未来氢能源汽车发展, 本文提出考虑用户行为的氢能源汽车耦合网络定价策略模型。相比传统的车网互动运行机制, 本文模型能更准确描述能源站制氢需求及负荷分布。仿真结果显示, 本算法不仅求解效率高, 还具备稳定性。通过多组方案比较, 发现考虑能耗约束的用户行为定价模型, 能有效反映实际交通流, 优化氢能定价策略, 提升电网运行经济性。进一步的分析证实, 随着氢能车需求增加, 考虑能耗约束对定价策略至关重要。

由于用户的决策会影响上级定价策略, 考虑用户的有限理性行为对耦合网络系统的优化设计具有重要意义。未来的工作将继续基于本文所提框架, 进一步考虑有限理性行为下的用户选择及其对耦合网络的影响。此外, 本文将在所考虑的静态交通模型中结合希尔伯特空间, 研究动态流的氢能源汽车用户行为特性, 考虑时间尺度更短的耦合网络实时最优氢能定价策略。

参考文献

- [1] 方晓强. 关于碳达峰碳中和目标下氢能源的发展及加氢站的选址探究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(21): 101-103.
FANG Xiaoqiang. Research on the development of hydrogen energy and site selection of hydrogen refueling stations under the goals of carbon peaking and carbon neutrality[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2023, 43(21): 101-103(in Chinese).
- [2] 国家发展改革委, 国家能源局. 《氢能产业发展中长期规划(2021-2035年)》[EB/OL]. (2022). https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220323_1320038.html.
- [3] 高洁, 刘嘉玉, 裴治, 等. 中国氢燃料电池汽车产业现状及发展趋势分析[J]. 内燃机与配件, 2023(23): 109-112.

- GAO Jie, LIU Jiayu, PEI Zhi, et al. Analysis on present situation and development trend of hydrogen fuel cell automobile industry in China[J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2023(23): 109-112(in Chinese).
- [4] 刘东. 我国氢能源汽车产业发展的关键问题及对策[J]. *中国科技人才*, 2023(4): 51-57.
- LIU Dong. Key issues and countermeasures for the development of hydrogen energy vehicle industry in China [J]. *Science and Technology Talents of China*, 2023(4): 51-57(in Chinese).
- [5] 谢仕炜, 林伟伟, 张亚超. 基于变分不等式理论的电力-交通耦合网络均衡状态研究[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(17): 6220-6238.
- XIE Shiwei, LIN Weiwei, ZHANG Yachao. Research on coupled power-transportation network equilibrium state based on variational inequality theory[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(17): 6220-6238(in Chinese).
- [6] XIE Shiwei, XU Yan, ZHENG Xiaodong. On dynamic network equilibrium of a coupled power and transportation network[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(2): 1398-1411.
- [7] 谢仕炜, 胡志坚, 王珏莹. 考虑时-空耦合的城市电力-交通网络动态流量均衡[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(24): 8408-8423.
- XIE Shiwei, HU Zhijian, WANG Jueying. Dynamic flow equilibrium of urban power and transportation networks considering the coupling in time and space[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(24): 8408-8423(in Chinese).
- [8] 胡泽春, 邵成成, 何方, 等. 电网与交通网耦合的设施规划与运行优化研究综述及展望[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(12): 3-19.
- U Zechun, SHAO Chengcheng, HE Fang, et al. Review and prospect of research on facility planning and optimal operation for coupled power and transportation networks [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(12): 3-19(in Chinese).
- [9] LAI Shuying, QIU Jing, TAO Yuechuan, et al. Charging/refueling navigation strategies for plug-in hybrid hydrogen and electric vehicles with irrationalities and energy substitution[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2024, 20(1): 583-595.
- [10] TAO Yuechuan, QIU Jing, LAI Shuying, et al. Integrated electricity and hydrogen energy sharing in coupled energy systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(2): 1149-1162.
- [11] 谢仕炜, 陈铠悦, 张亚超, 等. 考虑需求弹性的电力-交通网络双层博弈模型——基于拟变分不等式[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(6): 2185-2196.
- XIE Shiwei, CHEN Kaiyue, ZHANG Yachao, et al. A two-layer game model for power-transportation coupled networks considering demand elasticity——based on Quasi-variational inequalities[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(6): 2185-2196(in Chinese).
- [12] QIAN Tao, SHAO Chengcheng, LI Xuliang, et al. Multi-agent deep reinforcement learning method for EV charging station game[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(3): 1682-1694.
- [13] 谢龙韬, 谢仕炜, 陈铠悦, 等. 考虑用户出行成本预算的电力-交通耦合网络充电定价策略[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(7): 201-209.
- XIE Longtao, XIE Shiwei, CHEN Kaiyue, et al. Pricing strategy of charging station in power-transportation coupling network considering user travel cost budget [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(7): 201-209(in Chinese).
- [14] XIE Shiwei, WU Qiuwei, HATZIARGYRIOU N D, et al. Collaborative pricing in a power-transportation coupled network: a variational inequality approach[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(1): 783-795.
- [15] 谢仕炜, 张亚超, 舒胜文, 等. 考虑混合需求不确定性的电力-交通耦合网络最优定价策略[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(22): 8652-8665.
- XIE Shiwei, ZHANG Yachao, SHU Shengwen, et al. Optimal pricing strategies of power-traffic coupled networks considering mixed demand uncertainties [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(22): 8652-8665(in Chinese).
- [16] CAO Zhiao, HAN Yinghua, ZHAO Qiang, et al. Traffic and power flow optimization of coupled power-transportation networks considering environment-aware user behavior[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2024, 10(2): 3940-3955.
- [17] LI Ke, SHAO Chengcheng, SHAHIDEHPOUR M, et al. A capacity-based regulation method for coordinating electric vehicle charging flows in coupled distribution and transportation networks[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2024, 15(3): 3066-3079.
- [18] WANG Guibin, XU Zhao, WEN Fushuan, et al. Traffic-constrained multiobjective planning of electric-vehicle charging stations[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2013, 28(4): 2363-2372.
- [19] WANG Xu, SHAHIDEHPOUR M, JIANG Chuanwen, et al. Coordinated planning strategy for electric vehicle charging stations and coupled traffic-electric networks [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(1): 268-279.
- [20] 何炳生. 论求解单调变分不等式的一些投影收缩算法 [J]. *计算数学*, 1996(1): 54-60.
- HE Bingsheng. On some projection and contraction methods for solving monotone variational inequalities [J].

Mathematica Numerica Sinica, 1996(1): 54-60(in Chinese).

[21] XIE Shiwei. 实际56节点配电网与Sioux Falls交通系统测试数据[EB/OL]. (2024-02-20). <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.25250752.v1>.

附录A 定理1的证明

证明: ①充分性: 对于氢能源车路径 $p \in \mathcal{P}_s^h$, $s \in \mathcal{S}^h$, 可知 $f_p^{h*} \geq 0$, $\gamma_{sp}^* \geq 0$, 根据式(18)、(19)有:

$$f_p^{h*}(a_s^{\max} - \Delta e_{sp}^*) \geq 0 \quad (\text{A1})$$

$$f_p^{h*} \gamma_{sp}^* (a_s^{\max} - \Delta e_{sp}^*) = 0 \quad (\text{A2})$$

又有 $\gamma_{sp} \geq 0$, 则有:

$$\gamma_{sp} f_p^{h*} (a_s^{\max} - \Delta e_{sp}^*) \geq 0 \quad (\text{A3})$$

将式(A3)与(A2)相减, 可得:

$$\gamma_{sp} f_p^{h*} (a_s^{\max} - \Delta e_{sp}^*) - f_p^{h*} \gamma_{sp}^* (a_s^{\max} - \Delta e_{sp}^*) \geq 0 \quad (\text{A4})$$

对式(A4)求和可得:

$$\sum_{s,p} (\gamma_{sp} - \gamma_{sp}^*) f_p^{h*} (a_s^{\max} - \Delta e_{sp}^*) \geq 0 \quad (\text{A5})$$

根据式(20)、(21)有:

$$c_p^{h*} - \gamma_{sp}^* (a_s^{\max} - \Delta e_{sp}^*) - c_s^{h*} \geq 0 \quad (\text{A6})$$

$$f_p^{h*} [c_p^{h*} - \gamma_{sp}^* (a_s^{\max} - \Delta e_{sp}^*) - c_s^{h*}] = 0 \quad (\text{A7})$$

又因 $f_p^h \geq 0$, 则有:

$$f_p^h [c_p^{h*} - \gamma_{sp}^* (a_s^{\max} - \Delta e_{sp}^*) - c_s^{h*}] \geq 0 \quad (\text{A8})$$

将式(A8)与(A7)相减, 可得:

$$f_p^h [c_p^{h*} - \gamma_{sp}^* (a_s^{\max} - \Delta e_{sp}^*) - c_s^{h*}] - f_p^{h*} [c_p^{h*} - \gamma_{sp}^* (a_s^{\max} - \Delta e_{sp}^*) - c_s^{h*}] \geq 0 \Rightarrow (f_p^h - f_p^{h*}) [c_p^{h*} - \gamma_{sp}^* (a_s^{\max} - \Delta e_{sp}^*) - c_s^{h*}] \geq 0$$

将其求和, 可得:

$$\sum_{s,p} (f_p^h - f_p^{h*}) [c_p^{h*} - \gamma_{sp}^* (a_s^{\max} - \Delta e_{sp}^*) - c_s^{h*}] \geq 0 \quad (\text{A9})$$

因 $\sum_{s,p} (f_p^h - f_p^{h*}) c_s^{h*} = \sum_s c_s^{h*} \sum_p (f_p^h - f_p^{h*}) = 0$, 则可推得:

$$\sum_{s,p} (f_p^h - f_p^{h*}) [c_p^{h*} - \gamma_{sp}^* (a_s^{\max} - \Delta e_{sp}^*)] \geq 0 \quad (\text{A10})$$

同理, 对于非氢能源车路径 $p \in \mathcal{P}_s^g$, $s \in \mathcal{S}^g$ 有:

$$\sum_{s,p} c_p^{g*} (f_p^{g*} - f_p^g) \geq 0 \quad (\text{A11})$$

②必要性: 对于推广变分不等式形式(26), 如果 \mathbf{x}^* 是其中的一个解, 则 $\mathbf{x}^* = (f_p^{g*}, f_p^{h*}, \gamma_{sp}^*)^T \geq 0$. 将 $\mathbf{x} = \mathbf{0}$ 和 $\mathbf{x} = 2\mathbf{x}^* = (2f_p^{g*}, 2f_p^{h*}, 2\gamma_{sp}^*)^T$ 代入式(26), 可得 $\pm \mathbf{x}^{*T} \mathcal{F}(\mathbf{x}^*) \geq 0$, 因此 $\mathbf{x}^{*T} \mathcal{F}(\mathbf{x}^*) = 0$. 要证明 \mathbf{x}^* 是非线性互补约束的解, 需证 $\mathcal{F}(\mathbf{x}^*) \geq 0$. 以变分不等式中第1个式子为例, 即有:

$$\sum_{s,p} f_p^{h*} (a_s^{\max} - \Delta e_{sp}^*) \geq 0, \forall p \in \mathcal{P}_s^h, s \in \mathcal{S}^h \quad (\text{A12})$$

针对式(A12), 采用反证法证明. 如果式(A12)存在某一分量小于0, 即 $f_p^{h*} (a_s^{\max} - \Delta e_{sp}^*) < 0$, 取 γ_{sp} , 使得 $\gamma_{sp}' =$

$$\begin{cases} \gamma_{sp}', & t \neq j \\ \gamma_{sp}' + 1, & t = j \end{cases}, \gamma_{sp}' \geq 0, \text{ 带入推广变分不等式后, 可得:}$$

$$\sum_{s,p} (\gamma_{sp} - \gamma_{sp}^*) f_p^{h*} (a_s^{\max} - \Delta e_{sp}^*) = f_p^{h*} (a_s^{\max} - \Delta e_{sp}^*) < 0$$

此时, 与 γ_{sp}^* 是推广变分不等式的解矛盾.

同理可得 \mathbf{x}^* 其余2个分量 f_p^{g*} 和 f_p^{h*} 均满足非线性互补约束. 综上, 定理证毕.



颜燕玉

在线出版日期: 2024-09-30.

收稿日期: 2024-02-21.

作者简介:

颜燕玉(2001), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力-交通融合系统, yanyyyu@126.com;

*通信作者: 谢仕炜(1993), 男, 博士, 讲师, 主要从事电力-交通系统交叉学科研究, shiwei_xie@126.com.

(责任编辑 马晓华, 邱丽萍)