非合作多模态出行系统的多智能体优化

Md Nafees Fuad Rafi
研究生研究助理，中佛罗里达大学土木、环境与建筑工程系
mdnafeesfuad.rafi@ucf.edu

郭兆淼，博士
助理教授，德克萨斯大学奥斯汀分校 Maseeh 土木、建筑与环境工程系 zguo@utexas.edu

arXiv:2601.03777v1 [stat.ME] 7 Jan 2026

字数：7057 字 $+1$ 个表格 $\times 250 = 7307$ 字

提交日期：2026年1月8日

摘要

尽管多模式出行系统有望为出行者、司机、环境以及缓解交通拥堵带来诸多益处，但这类系统通常涉及多个非合作决策者，他们可能只顾优化自身目标，而不考虑系统整体效益。本文旨在探讨多模式出行系统中出行者与网约车司机之间基于市场的交互。我们提出了一个统一数学建模框架，用于刻画出行者和司机的分散式决策过程，并通过均衡定价平衡网络的需求与供给。该模型可用于分析分散式决策对多模式出行效率的影响。所提出的建模方法还可进一步凸化，从而高效计算网约车均衡价格。我们针对不同的交通网络设置开展数值实验，以获得政策启示。我们发现，出行者对价格越敏感，就越倾向于选择网约车和多模式交通，而非自驾。我们还发现，当网络中的公交枢纽较少，或网约车司机对价格过于敏感时，可能需要通过补贴鼓励出行者使用多模式交通。然而，我们发现，网络中公交枢纽增多会延长总调度时间，从而增加网约车司机的空驶车辆行驶里程。政策制定者和平台运营商可利用所提出的模型设计定价与补贴方案，使个体决策与系统层面的效率相协调，并评估多模式交通网络中可达性与环境影响之间的权衡。

关键词：多模式交通、网约车、空间定价、公共交通、多智能体优化

引言

多模式交通（MT）系统整合汽车、公交车、网约车、火车、共享单车和步行等多种交通方式，以完成单次出行。多模式交通有望满足多样化的出行需求，包括无法驾驶、不应驾驶或不愿驾驶的出行者的需求。例如，人们可能因经济条件受限、身体状况不允许或安全方面的顾虑而选择不开车。多式联运系统还可以通过提高车辆载客率并减少汽车保有量，缓解交通拥堵和环境污染。2019年，美国私人车辆的载客率仅为每辆车1.5名出行者（*1*），这是造成城市地区交通拥堵和污染的重要因素（*2*）。此外，*1*指出，2017年有24%的美国家庭拥有三辆或更多车辆，而汽车和轻型卡车合计占美国交通运输排放的58%，占美国总排放量的16%。通过提供经济上可行的出行替代方案，并鼓励人们搭乘公共交通或拼车共享出行，多式联运系统有助于减少汽车保有量、降低出行成本并减少排放，从而推动建设更加公平、便捷且可持续的交通未来。

网约车服务为多式联运系统增添了灵活性与便利性，尤其有助于弥补首末公里缺口，这对提升公共交通客流量至关重要（*3*）。这些服务可高效连接出行者的起点或目的地与公共交通站点，从而提升整个系统的可达性。以往研究表明，网约车服务通常与公共交通互为补充。例如，（*4*）指出，尽管网约车与公共交通在某些出行上存在竞争，网约车仍可补充公共交通服务；而（*5*）报告称，共享出行使用率与公共交通使用量增长呈正相关。（*6*）的一份报告显示，21% 的 Lyft 用户表示，由于可靠的首末公里接驳服务，他们更频繁地使用公共交通。因此，许多公共交通机构已开始与网约车公司合作，以提升用户可达性并提供更优质的多模式解决方案（*7*）。这些观察结果凸显了研究将网约车与公共交通均作为重要出行方式纳入其中的多模式系统的重要性。

已有多项研究探讨了多式联运和网约车服务在改善出行方面的价值。例如，(*8*) 提出了一种决策支持工具，用于选址多模式出行枢纽，以提升前往工作场所和兴趣点的多式联运可达性。(*9*) 将多式联运系统（包括公共交通和网约车）中的订单派发建模为大规模序贯决策问题，并提出了强化学习方法和整数线性规划（ILP）模型，以优化空闲司机的派单，并为乘客提供组合出行方式建议。类似地，(*10*) 将贝叶斯优化框架应用于确定多式联运系统中按需出行（MoD）运营的最优供给侧参数，其中出行需求取决于服务水平（LOS）。此外，(*11*) 使用联合显示偏好/陈述偏好模型，表明能够提供便捷最后一英里接驳的网约车服务可以提升公共交通客流量。这些研究主要着眼于提升多式联运系统的效率以及不同出行方式之间的协调机制。

然而，在实践中，网约车服务提供商以利润为导向，旨在最大化自身目标，而非仅仅使多式联运系统受益。这导致网约车与公共交通服务之间产生竞争，引发了人们对网约车最终是补充还是替代公共交通的担忧（*7*）。此外，由于存在多个自利主体，在多模式环境中协调不同的交通服务和道路使用者本身就极具挑战性。系统中的每个实体都自主行动，通常优先考虑个体利益，而非系统整体性能。据我们所知，已有研究尚未从非合作多智能体视角考察由网约车、自驾和公共交通构成的多模式系统，也未探讨设计能够平衡这些模式间出行流量的空间定价机制。

据我们所知，已有研究尚未从非合作多智能体视角考察由网约车、自驾和公共交通构成的多模式系统，也未探讨设计能够平衡这些模式间出行流量的空间定价机制。

为弥补这些空白，我们提出了一个统一数学建模框架，用于分析非合作多模式服务。该框架刻画了出行者、网约车司机和其他出行方式之间的相互作用，并揭示了如何影响市场竞争以促进可持续交通选择。具体而言，我们开发了一个多智能体优化框架来建模多模式出行系统，并提出了一种新颖的网约车服务定价策略，以平衡位置供需。

本研究的主要贡献如下：
1. 我们开发了一个多智能体优化框架，用于建模多式联运系统，并刻画多式联运系统背景下出行者和司机的非合作行为。该框架刻画了多模式系统中的网约车行为，以及其与自驾和公共交通方式之间的相互作用。2. 我们提出了多智能体问题的精确凸重构，其解不仅满足出行者和司机的目标，还能平衡多式联运系统中的司机流量和旅客流量。3. 我们确定了出行服务的空间定价，以平衡不同位置、不同出行方式的供需。

方法论

本节通过构建多智能体优化框架，对多模式系统进行建模。首先，我们建立数学模型，以刻画出行者和网约车司机的选择。然后，我们引入均衡条件，以平衡多式联运系统中各交通方式特定的供需。司机与出行者决策之间的相互作用，将决定单一模式和多模式系统中的网约车服务均衡定价。

问题描述

我们考虑一个交通系统，其中出行者有三种可选交通方式：自驾、网约车和多模式交通（网约车与公共交通的整合方式）。该系统涉及的主要利益相关方包括出行者、网约车司机、交通网络公司（TNC）和公共交通服务提供商。我们假设公共交通服务提供商采用固定的公交线路、排班和定价策略；交通网络公司旨在平衡不同位置的服务供需；出行者和司机则旨在优化各自的目标。这个多智能体系统中的每个利益相关方都根据自身目标独立作出决策。尽管各利益相关方的决策彼此独立，但任何一方的决策都会影响其他各方。他们相互作用，直至决策达到均衡，即没有任何利益相关方能够通过单方面改变行动来提高自身收益。我们的目标是刻画出行者与网约车司机之间复杂的相互作用，并求得能够平衡这一复杂系统的、按位置划分的网约车价格均衡。

考虑一个包含 $\mathscr{M}$ 个区域的城市。这些区域由交通网络连接，可表示为有向图 $\mathscr{G} = (\mathscr{N}, \mathscr{A})$，其中 $\mathscr{N}$ 表示交通节点或区域的集合， $\mathscr{A}$ 表示节点之间连接的集合。 $\mathscr{R}$ 是以 r 为索引的起点集合， $\mathscr{S}$ 是以 s 为索引的目的地集合， $\mathscr{H}$ 是网络中所有公交枢纽的集合

以$h(r, s)$为索引。所有目的地 $\mathscr{S}$ 和公交枢纽 $\mathscr{H}$都可以视为网约车的下车点。因此，我们将网约车下车点记为 $\mathscr{S}' = \{\mathscr{S} \cup \{h(r, s)\ \forall r \in \mathscr{R},\ \forall s \in \mathscr{S}\}\}$或 $\mathscr{S}' = \{\mathscr{S} \cup \mathscr{H}\}$，以$s'$为索引。

因此，旅客起讫点（OD）集合为：$\mathscr{RS} = \{(r, s) \mid r \in \mathscr{R},\ s \in \mathscr{S},\ r \neq s\}$；网约车司机起讫点集合为：$\mathscr{RS} = \{(r, s') \mid r \in \mathscr{R},\ s' \in \mathscr{S} \cup \overline{\{h(r, s)\ \forall s \in \mathscr{S}\}}\}$。

我们为任意起讫点集合（r，s）$\in \mathscr{RS}$指定一个特定的交通枢纽 $h(r,s) \in \mathscr{H}$。也就是说，使用多模式服务的出行者若从$r \in \mathscr{R}$ 出发，目的地为$s \in \mathscr{S}$，则会在交通枢纽$h(r,s) \in \mathscr{H}$下车。请注意，多个起讫点集合也可以指定同一个交通枢纽，这不会改变我们提出的模型框架。

每次行程都由一名出行者发起，该出行者请求在起始区域r接客。收到请求后，如果同一区域内有空闲司机，则将该出行者与其匹配；否则，将其与来自其他区域的司机匹配。司机与乘客匹配后，司机接载乘客，并选择从r到s （若乘客选择网约车）或从r 到$h(r, s)$（若乘客选择多模式服务）出行时间最短的路径。行程结束后，司机可以选择留在目的地区域、重新定位到其他区域接载乘客，或退出系统。

旅客出行方式选择模型

考虑出行者从r 前往s的出行方式选择选项集合，记为 $\mathscr{K}$。在本研究中，出行者在从起点r 前往目的地s时，可从三种出行方式中进行选择：$\mathscr{K} = \{1$：自驾（D）、2：网约车R、3：多模式（M）$\}$。此处，多模式交通是指网约车与公共交通服务的整合，其中网约车提供从起点r 到交通枢纽$h(r,s)$的首公里接驳。到达枢纽$h(r,s)$后，出行者将乘坐公共交通前往目的地s。我们采用多项Logit模型来描述出行者的出行方式选择行为，其一般效用函数如公式（1a）所示。

$$V_{rsk}^T = U_{rsk}^T + \varepsilon_{rsk}^T, \quad \forall (r,s) \in \mathscr{RS}, k \in \mathscr{K} \tag{1a}$$

出行者的效用函数V_{Trsk}表示其选择出行方式k从起点r前往目的地s的效用。该函数由确定性部分U_{Trsk}和随机项ε_{rsk}^T组成，假设随机项服从Gumbel分布。U_{rsk}^T取决于出行方式k的吸引力、出行时间以及与出行方式k相关的费用，可表示为公式（2）。

$$U_{rs1}^T = \beta_{0,1}^T - \beta_{11}^T (t_{rs} + t_s^P) - \beta_2^T (c_{rs}^C + c_s^P), \quad \forall (r,s) \in \mathscr{RS} \tag{2a}$$

$$U_{rs2}^T = \beta_{0,}^{T2} - \beta_{T12} t_{rs} - \beta_{T2}\, \eta_{rs}^R, \quad \forall (r,s) \in \mathscr{RS} \tag{2b}$$

$$U_{rs3}^T = \beta_{T0,\ 2} - \beta_{T13} (t^{rh(r,s)} + t_{h(r,s)s}^B) - \beta T_1{}'' w_{h(r,s)s}^B - \beta T2 (\eta_{rh(r,s)}^R + \rho_{h(r,s)s}^B), \quad \forall (r,s) \in \mathscr{RS} \tag{2c}$$

对于驾车效用，t_{rs} 是从 r 到 s 的驾车时间，t_s^p是目的地 s 的停车时间。c_{rs}^c 是从 r 自驾前往 s 的相关费用，c_s^p 是在目的地 s 停车的费用。对于网约车，t_{rs} 是从 r 到 s 的出行时间，与驾车时间相同。 η_{rs}^R 是出行者从 r 到 s 乘坐网约车服务所需支付的金额。对于从 r 到 s 的多模式交通，$t^{rh(r,s)}$ 是从 r 到交通枢纽 h 的出行时间。$t^{h(r,s)s}$是从交通枢纽 h(r, s) 到目的地 s 的公共交通出行时间，$w_{h(r,s)s}^T$ 是出行者在交通枢纽 h(r, s) 等待公共交通车辆前往目的地 s 的等待时间。 $\eta_{rh(r,s)}^R$是

出行者乘坐网约车服务从 r 前往交通枢纽 h所需支付的金额。 $\rho^{B}_{h(r,s)s}$是从 h到 s的公交票价。

$\beta^{T}_{0,1}$、β_{T12}、$\beta^{T}_{0,2}$ 和 β_{T13} 是分别表示出行者对自驾、合乘和多模式出行方式吸引力的系数。其余 β 系数表示相应参数/变量的敏感度。需要注意的是，由于不同出行方式的出行时间可能不同（例如，相比亲自驾驶，乘客可以更好地利用乘车时间），因此出行时间系数 β_{1k} 因方式k 而异。

选择三种可用出行方式中任一种的概率可表示如下:

$$P^{T}_{rsk} = \frac{e^{U^{T}_{rsk}}}{\sum_{k\in\mathcal{K}} e^{U^{T}_{rsk}}}$$

这里，P^{T}_{rsk} 是出行者使用方式k从r 到s的概率。因此，使用方式 k 从r 到 s 的交通流量可写为公式（3），其中，d^{T}_{rs} 是出行者从r 到s 的总出行需求，q^{T}_{rsk} 是使用方式 k从r 到s的出行者流量。

$$q^{T}_{rsk} = d^{T}_{rs} P^{T}_{rsk} \tag{3}$$

作为构建多式联运系统统一模型的起点，我们提出了一个用于求解旅客出行方式选择模型（公式（3））的等价凸优化模型。乘客出行方式选择决策的等价模型可表述如下:

最小化$q^{T}\geq 0$
$$\sum_{(r,s)\in\mathcal{RS},k\in\mathcal{K}} q^{T}_{rsk}(\ln q^{T}_{rsk} - 1 - U^{T}_{rsk}) \tag{4a}$$

约束条件为
$$\sum_{k\in\mathcal{K}} q^{T}_{rsk} = d^{T}_{rs} \quad \forall (r,s)\in\mathcal{RS} \tag{4b}$$

在优化模型的目标函数中，$q^{T}_{rsk}\ln q^{T}_{rsk}$ 这一项对应出行分布的熵。尽管目标函数的其余部分没有直观的物理解释，但其数学构造使得拉格朗日函数对决策变量q^{T}_{rsk} 的一阶导数，恰好等于旅客模型中的出行者流量。利用 (4)，我们可以确定三种方式之间的方式划分。约束条件 (4b) 表示从r 到s通过所有可用方式产生的总出行需求平衡。

我们可以将旅客优化模型 (4) 中与方程 (2) 里各个k 对应的效用函数展开如下，其中所有符号的含义均与前文定义相同。

最小化$q^{T}\geq 0$
$$\begin{aligned}\sum_{(r,s)\in\mathcal{RS}} \{ & q^{T}_{rs1}[\ln q^{T}_{rs1} - 1 - \beta^{T}_{0,1} + \beta^{T}_{11}(t_{rs} + t^{P}_{s}) + \beta^{T}_{2}(c^{C}_{rs} + c^{P}_{s})] \\ & + q^{T}_{rs2}[\ln q^{T}_{rs2} - 1 - \beta^{T}_{0,2} + \beta^{T}_{12}(t_{rs}) + \beta^{T}_{2}(\eta^{R}_{rs})] \\ & + q^{T}_{rs3}[\ln q^{T}_{rs3} - 1 - \beta^{T}_{0,3} + \beta^{T}_{13}(t_{rh(r,s)} + t^{B}_{h(r,s)s}) + \beta^{T''}_{1}(w^{B}_{h(r,s)s}) + \beta^{T}_{2}(\eta^{R}_{rh(r,s)} + \rho^{B}_{h(r,s)s})]\}\end{aligned} \tag{5a}$$

subject to
$$\sum_{k\in\mathcal{K}} q^{T}_{rsk} = d^{T}_{rs} \quad \forall (r,s)\in\mathcal{RS} \tag{5b}$$

引理1。 问题(4) 的最优解 (q^T) 是在给定网约车价格 ηRrs 和 $\eta^R_{rh(r,s)}$ 时，采用多项*Logit*模型(3)的出行者出行方式选择的均衡解。

证明。见（*12*） □

引理1指出，优化模型（5）与出行方式选择模型（3）在数学上等价，且二者生成相同的解。然而，由于出行者支付的网约车费用η_{Rrs}和 $\eta^R_{rh(r,s)}$会随空间位置变化，具体取决于司机的区位供给和出行者的需求，因此我们事先并不知道这些价格。因此，无法孤立地直接求解优化模型（5），因为出行方式选择概率及由此产生的流量都是系统的内生变量。

司机选择模型

网约车司机会根据预期工资和调度时间，决定是否以及在何处提供网约车服务。预期工资通常是司机从出行者处获得的区位网约车价格的函数。一般而言，司机可能留在当前区域，也可能根据效用重新定位到其他区域接载乘客。如果预期效用低于某个阈值（例如最低工资），司机也可以随时从当前区域退出系统。司机的选择效用函数可写为 6

$$V^D_{nrs'} = U^D_{nrs'} + \varepsilon^D_{nrs'} = \beta^D_{0,r} - \beta^D_1 t_{nr} + \beta^D_3 \rho^R_{rs'} + \varepsilon^D_{nrs'}, \quad \forall n \in \mathscr{N}, (r,s') \in \overline{\mathscr{R}\mathscr{S}} \tag{6a}$$

$$V^D_{nH} = U^D_{nH} + \varepsilon^D_{nH} = \beta^D_{0,H} + \varepsilon^D_{nH}, \quad \forall n \in \mathscr{N} \tag{6b}$$

其中，$V^D_{nrs'}$ 表示当前位于n、前往r 接载出行者并在s'下客的司机的效用。当$n=r$时，司机不会重新定位，而是在当前位置接载出行者。$V^D_{nrs'}$ 表示司机退出系统的效用。t_{nr} 表示司机从位置n 前往出行者起点r的调度时间。如果某个区域的调度时间较长，司机从当前区域前往该区域的效用就会降低。 $\rho^R_{rs'}$ 表示司机因提供从r 到s 或h的网约车服务而从出行者处获得的网约车定价。如果司机选择留在当前区域接载出行者，则$t_{nr}=0$。如果司机选择退出系统，效用函数的确定性部分将变为$U^D_{nH}=\beta_D 0_{,H}$。 $\beta_D 0_{,r}$是表示位置r对司机吸引力的系数，而$\beta^D_{0,H}$表示退出系统的吸引力。其余的 β表示相应参数/变量的敏感度。$\varepsilon^D_{nrs'}$ 和 ε^D_{nH} 是随机项，假设其服从Gumbel分布。

司机选择概率可表示如下，

$$P^D_{nrs'} = \frac{e^{U_{nrs'}}}{\sum_{(i,j)\in\overline{\mathscr{R}\mathscr{S}}} e^{U_{nij}} + e^{U_{nH}}}, \quad \forall n \in \mathscr{N}, (r,s') \in \overline{\mathscr{R}\mathscr{S}} \tag{7a}$$

$$P^D_{nH} = \frac{e^{U_{nH}}}{\sum_{(i,j)\in\overline{\mathscr{R}\mathscr{S}}} e^{U_{nij}} + e^{U_{nH}}}, \quad \forall n \in \mathscr{N}, (r,s') \in \overline{\mathscr{R}\mathscr{S}} \tag{7b}$$

其中，$P^D_{nrs'}$ 表示当前位于n 的司机为接送出行者而重新定位至r 的概率，并在s'处将他们送下。

因此，从位置 n 重新定位到r 以接载出行者并在s' 下客的司机流量（记为$q^D_{nrs'}$），以及从位置 n 退出的司机退出率（记为q^D_{nH}），可分别由式（8a）和（8b）计算，其中Q_n 是可用司机总数

位置n。

$$q^D_{nrs'} = P^D_{nrs'} \cdot Q_n \quad \forall n \in \mathscr{N}, (r,s') \in \overline{\mathscr{R}\mathscr{S}} \tag{8a}$$

$$q^D_{nH} = P^D_{nH} \cdot Q_n \quad \forall n \in \mathscr{N}, (r,s') \in \overline{\mathscr{R}\mathscr{S}} \tag{8b}$$

为开发一个统一的多式联运系统模型，我们提出如下司机选择模型的等价凸优化模型

最小化 $_{q^D,\ Q_n \geq 0}$

$$\sum_{n\in\mathscr{N}} [\sum_{(r,s')\in\overline{\mathscr{R}\mathscr{S}}} q^D_{nrs'}(\ln q^D_{nrs'} - 1 - \beta^D_{0,r} + \beta^{'D}_1 t_{nr} - \beta^D_3 \rho^R_{rs'}) + q^D_{nH}(\ln q^D_{nH} - 1 - \beta^D_{0,H})] - \sum_{n\in\mathscr{N}} \lambda_n (Q_n - \Delta Q^D_n) \tag{9a}$$

约束条件为

$$\sum_{(r,s')\in\overline{\mathscr{R}\mathscr{S}}} q^D_{nrs'} + q^D_{nH} = Q_n \quad \forall n \in \mathscr{N} \tag{9b}$$

这里的决策变量是 q^D 和 Q_n。模型 (9) 的构造方式使得拉格朗日函数分别对决策变量 $q^D_{nrs'}$、q^D_{nH} 和 Q_n 求一阶导数后，所得结果与司机的 Logit 选择模型相同。ΔQ^D_n 是位置 n 新司机注册的流率，为外生参数。 λ_n 是位置 n 额外司机的价值/惩罚。关于 λ_n 的更多见解将在后续章节中讨论。约束 (9b) 表示司机流量平衡，即位置 n 可用的司机数量应等于从n调度至 r 的司机流量与从n注销的司机流量之和。

引理2。 问题(9) 的最优解 (q^D, Q_n) 是在给定网约车司机价格 $\rho^R_{rs'}$ 的情况下，采用多项 *Logit*模型(8a) 和(8b) 的司机选择决策的均衡解。

证明。见（*12*） □

引理2表明，优化模型 (9) 与司机选择模型 (8a) 和 (8b) 在数学上等价，并且会得到相同的解。与旅客模型类似，我们事先并不知道网约车价格 $\rho^R_{rs'}$，因为它取决于位置供需。因此，网约车司机优化模型 (9) 不能单独用于确定司机在各区域间的流量。

均衡条件

要使多模式系统处于稳态，必须满足某些市场出清流量平衡条件。我们提出以下均衡条件，以平衡多式联运系统。

$$(\rho^R_{rs}) \qquad \sum_{n\in\mathscr{N}} q^D_{nrs} = q^T_{rs2} \quad \forall (r,s) \in \mathscr{R}\mathscr{S} \tag{10a}$$

$$(\rho^R_{rh(r,s)}) \qquad \sum_{n\in\mathscr{N}} q^D_{nrh(r,s)} = q^T_{rs3} \quad \forall (r,s) \in \mathscr{R}\mathscr{S} \tag{10b}$$

$$(\lambda_n) \qquad Q_n = \sum_{r\in\mathscr{R}} q^T_{rn2} + \Delta Q^D_n \quad \forall n \in \mathscr{S} \tag{10c}$$

$$(\lambda_n) \qquad Q_n = \sum_{(r,s)\in\mathscr{R}\mathscr{S}(n)} q^T_{rs3} + \Delta Q^D_n \quad \forall n \in \mathscr{H} \tag{10d}$$

$$(\lambda_n) \qquad Q_n = \Delta Q^D_n \quad \forall n \in \mathscr{N} \setminus (\mathscr{S} \cup \mathscr{H}) \tag{10e}$$

从 n 前往 r 以接载出行者，并在 s 和 h(r, s) 处送达出行者的司机流量，应分别等于从 r 前往 s、分别采用网约车和多模式出行方式的出行者流量。这些条件分别通过约束条件 (10a) 和 (10b) 得以满足。网约车价格 ρ^R_{rs} 和 $\rho^R_{rh(r,s)}$ 可分别解释为均衡约束 (10a) 和 (10b) 的对偶变量。此处，ρ^R_{rs} 是司机为直接采用网约车从 r 前往 s 的出行者提供网约车服务所获得的支付。$\rho^R_{rh(r,s)}$ 是司机为采用多模式选项从 r 前往 s 的出行者提供网约车服务所获得的支付。约束条件 (10c) 表示，目的地 s 处可用的司机数量等于从所有起点 r 通过网约车服务抵达 s 的出行者流量之和，加上在 s 处新登录系统的新司机数量。该约束的对偶变量 λ_s、$\forall s \in \mathscr{S}$。$\lambda_s$ 可解释为在位置 s 增加一名额外司机所产生的惩罚或价值。类似地，约束条件 (10d) 表示，交通枢纽 h(r, s) 处可用的司机数量等于通过多模式交通从 r 前往 s 的出行者流量，加上在交通枢纽 h(r, s) 处新登录系统的新司机数量。该约束的对偶变量为 $\lambda_{h(r,s)}$、$\forall h \in \mathscr{H}$。$\lambda_{h(r,s)}$ 可解释为在交通枢纽 h(r, s) 增加一名额外司机所产生的惩罚或价值。约束条件 (10e) 表示，既不是出行者目的地也不是交通枢纽的位置 n 处可用的司机数量，仅等于在该位置 n 新登录系统的新司机数量。由于没有出行者前往并非目的地或枢纽的位置，因此不会有司机最终到达该位置。该约束对应的对偶变量$\lambda_n \forall n \in \mathscr{N} \setminus (\mathscr{S} \cup \mathscr{H})$ 可解释为在任意既不是出行者目的地也不是交通枢纽的位置 n 增加一名额外司机所产生的惩罚或价值。

求解方法

在多智能体系统中，一个参与者的决策过程取决于其他参与者的决策（*13*）。因此，多模式系统中的网约车价格也由所有可用参与者的集体行动决定；在本研究中，这些参与者包括出行者和司机。这些互动由均衡条件（10）描述。由于出行者模型和司机模型都是凸优化问题，可以将这两个问题分别重构为充要互补问题（CP），并同时求解这两个 CP（例如，*14*）。但是，直接求解 CP 可能会带来非凸性和高维性问题。为解决这一问题，我们构建了如下单一凸优化模型，该模型将产生相同的定价决策，以平衡不同地点的网约车供需。本研究的计算贡献在于，为出行者和司机的问题提出了一种精确凸重构，并在定理1中正式阐述。

定理1。 由于旅客模型和驾驶员模型均为凸的，完全竞争市场中参与者间相互作用的均衡状态，即 (5)、(9) 以及均衡条件 (10)，等价于求解一个单层凸优化问题，其表述形式为 (11)。

$$
\begin{aligned}
\underset{q^T, q^D, Q_n \geq 0}{minimize} \quad & \frac{1}{\beta_2^T} \sum_{(r,s)\in\mathscr{R},\mathscr{S}} \{ q^T_{rs1}[\ln q^T_{rs1} - 1 - \beta^T_{0,1} + \beta^T_{11}(t_{rs} + t^P_s) + \beta^T_2 (c^C_{rs} + c^P_s)] \\
& + q^T_{rs2}[\ln q^T_{rs2} - 1 - \beta^T_{0,2} + \beta^T_{12}(t_{rs})] \\
& + q^T_{rs3}[\ln q^T_{rs3} - 1 - \beta^T_{0,3} + \beta^T_{13}(t_{rh(r,s)} + t^B_{h(r,s)s}) + \beta^{T''}_1 (w^B_{h(r,s)s}) + \beta^T_2 (\rho^B_{h(r,s)s})] \}
\end{aligned}
$$

$$+\frac{1}{\beta_3^D}\sum_{n\in\mathscr{N}}\Big[\sum_{(r,s')\in\overline{\mathscr{R}\mathscr{S}}} q_{nrs'}^D(\ln q_{nrs'}^D-1-\beta_{0,r}^D+\beta_1^D t_{nr})+q_{nH}^D(\ln q_{nH}^D-1-\beta_{0,H}^D)\Big] \quad (11a)$$

subject to

$$\sum_{k\in\mathscr{K}} q_{rsk}^T = d_{rs}^T \quad \forall (r,s)\in\mathscr{R}\mathscr{S} \quad (11b)$$

$$\sum_{(r,s')\in\overline{\mathscr{R}\mathscr{S}}} q_{nrs'}^D + q_{nH}^D = Q_n \quad \forall n\in\mathscr{N} \quad (11c)$$

$$(\rho_{rs}^R) \qquad \sum_{n\in\mathscr{N}} q_{nrs}^D = q_{rs2}^T \quad \forall (r,s)\in\mathscr{R}S \quad (11d)$$

$$(\rho_{rh(r,s)}^R) \qquad \sum_{n\in\mathscr{N}} q_{nrh(r,s)}^D = q_{rs3}^T \quad \forall (r,s)\in\mathscr{R}S \quad (11e)$$

$$(\lambda_n) \qquad Q_n = \sum_{r\in\mathscr{R}} q_{rn2}^T + \Delta Q_n^D \quad \forall n\in\mathscr{S} \quad (11f)$$

$$(\lambda_n) \qquad Q_n = \sum_{(r,s)\in\mathscr{R}\mathscr{S}(n)} q_{rs3}^T + \Delta Q_n^D \quad \forall n\in\mathscr{H} \quad (11g)$$

$$(\lambda_n) \qquad Q_n = \Delta Q_n^D \quad \forall n\in\mathscr{N}\setminus(\mathscr{S}\cup\mathscr{H}) \quad (11h)$$

证明。见（*12*） □

利用定理1，我们可以同时求解出行者和司机的优化模型，并确定网约车均衡价格。定理1背后的核心思路是拉格朗日松弛的逆向过程：将旅客模型中的$q_{rs2}^T(\rho_{rs}^R+\lambda_s)$,$q_{rs3}^T(\rho_{rh(r,s)}^R+\lambda_{h(r,s)})$项，以及驾驶员模型中的$q_{nrs'}^D\rho_{rs'}^R,\lambda_n(Q_n-\Delta Q_n^D)$项，从目标函数移至约束条件。因此，此处的目标函数是旅客模型和驾驶员模型中经缩放的目标函数之和，但不包括旅客模型中的$q_{rs2}^T(\rho_{rs}^R+\lambda_s)$、$q_{rs3}^T(\rho_{rh(r,s)}^R+\lambda_{h(r,s)})$项，以及驾驶员模型中的$q_{nrs'}^D\rho_{rs'}^R$, $\lambda_n(Q_n-\Delta Q_n^D)$项。缩放的目的是将旅客模型和驾驶员模型的目标函数都转换为货币单位，使二者可以相加，并使我们能够将出行的价格部分（ρ_{rs}^R，λ_s或$\rho_{rh(r,s)}^R$，$\lambda_{h(r,s)}$）恢复为均衡约束的对偶变量。通过求解单层精确凸重构问题(11)，我们将得到不同区域内的旅客流量、驾驶员流量和驾驶员可用总量，以及多式联运系统中的网约车价格。

推论1. 若满足以下条件，重构模型 (11) 可分解为旅客优化模型 (5)和司机优化模型 (9) 。

$$\eta_{rs}^R = \rho_{rs}^R + \lambda_s \quad \forall (r,s)\in\mathscr{R}\mathscr{S} \quad (12a)$$

$$\eta_{rh(r,s)}^R = \rho_{rh(r,s)}^R + \lambda_{h(r,s)} \quad \forall (r,s)\in\mathscr{R}\mathscr{S} \quad (12b)$$

证明。见（*12*） □

推论2. 由于旅客优化模型 (5)和司机优化模型 (9)均为严格凸函数，因此系统均衡存在且唯一。

证明。见（*12*） □

推论1表明，对于任意起讫点（r，s），出行者通过网约车出行所支付的价格，等于该起讫点（r，s）对应的驾驶员网约车收入，加上在目的地s增加一名司机所对应的价值/惩罚。此外，出行者通过多模式

交通出行对于任意起讫点（r，s）所支付的价格，等于通过网约车服务提供多模式出行方式的司机针对起讫点（r，$h(r, s)$）所收取的司机价格，加上在交通枢纽$h(r, s)$增加一名额外司机所对应的价值/惩罚。

数值示例

在本节中，我们使用五节点测试网络（图1）和苏福尔斯网络（图8）测试模型及求解方法，以深入了解模型。我们使用 Python 优化建模对象 Pyomo v6.7.1 (*15*)，(*16*) 实现模型。求解数值问题时，我们使用 IPOPT 3.14.16 (*17*) 求解器。所有测试均在配备 16 GB 内存的 2.80 GHz 第 11 代英特尔酷睿 i7 处理器上，使用 64 位 Windows 11 操作系统运行。

五节点测试网络

该网络（图1）由 5 个节点组成，$\mathscr{N} = [1,2,3,4,5]$。有 10 条可用链路连接这些节点，即 $\mathscr{A} = [(1, 2), (2, 1), (1, 3), (3, 2), (2, 4), (4, 1), (3, 1), (4, 2), (5, 1), (5, 2)]$。出行者有两个起点节点 $\mathscr{R} = [1,2]$和两个目的地节点 $\mathscr{S} = [2,1]$。出行者的起讫点对为 $\mathscr{RS} = [(1, 2), (2, 1)]$。节点 3 和 4 将分别作为起讫点对 (1,2) 和 (2,1) 出行者的交通枢纽。因此，换乘枢纽集合为 $\mathscr{H} = [3,4]$，其中 $h(1, 2) = 3$ 和 $h(2, 1) = 4$。请注意，多个起讫点对也可以使用同一个交通枢纽，这不会改变我们的建模结构。网络中的节点 5 既不是出行者的起点/目的地，也不是交通枢纽。司机可以在任意节点 $\mathscr{N}$登录系统。他们将根据每种选择对应的效用，决定留在当前节点、重新定位到出行者的任一起点节点，或退出系统。如果司机选择留下或重新定位，就会在起点节点接载出行者，并将其送至目的地或交通枢纽。因此，司机从起点节点出发的起讫点对为 $\mathscr{RS} = [(1, 2), (2, 1), (1, 3), (2, 4)]$。公共交通线路沿着链路 (3,2) 和 (4,1) 设置。

一些初始模型参数如图1所示。我们假设出行者的起讫点对 (1,2) 和 (2,1) 的出行需求均为 100。在所研究的时间范围内，假设有 20 名司机登录交通网络中的每个节点。在我们的模型中，每条链路的出行时间均视为外生变量。对于链路 (3,2) 和 (4,1)，公共交通出行时间将长于自驾时间（公共交通为 40 分钟，自驾为 20 分钟）。请注意，这个包含 5 个节点的测试实例最初特意保持对称，以便更好地理解模型行为。之后，我们只需改变一个参数/系数的初始值，就能使网络变为非对称，从而评估模型在不同参数/系数取值范围内的性能。敏感性系数的初始值为 $\beta_0^T{}_{,1} = 4.0, \beta_{T0,2} = 2.0$, $\beta_{T0,3} = 1.0$, $\beta_{D0,H} = 2.0$, $\beta_{D0,r} = 0.0$, $\beta_{T_{11}} = 0.3$, $\beta_{T_{12}} = 0.2$, $\beta_{T_{13}} = 0.1$, $\beta_{T_2} = 1.0$, $\beta_{T_1''} = 0.2$, $\beta_{D_2} = 0.2$, $\beta_1^D = 0.3$, $\beta_{D_3} = 1.0$.

求解凸重构模型 (11) 后，我们得到旅客流量 (q^T)、司机流量 (q^D)、可用司机数量 (Q_n)，以及与网约车和多模式交通对应的旅客和司机网约车价格。前文提到的方法仅用 0.10 秒便高效求解了该模型。利用估算得到的网约车价格，通过旅客凸优化模型 (5) 和旅客多项Logit模型 (3) 验证了该模型所得的旅客流量。这些模型所得的流量精确到小数点后十二位均相同。类似地，使用司机凸优化模型 (9) 和司机多项Logit选择模型验证了司机流量 (q^D) 与可用司机数量 (Q_n)

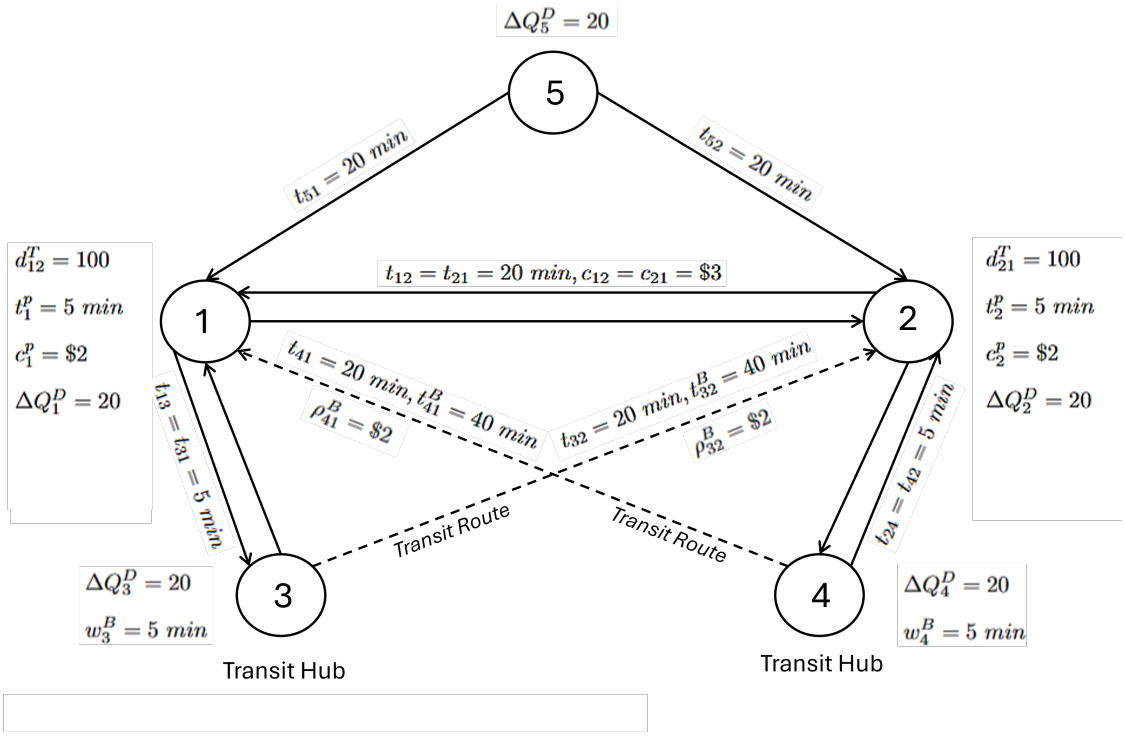


图1：五节点测试网络

在基于重构模型 (11) 估算出的司机网约车价格 $\rho_{rs'}$ 下，司机流量和可用司机数量在上述所有模型中精确到小数点后十二位均相同，这证明我们的重构是正确的，且所得解唯一且精确。

在图2中，由于交通网络具有对称性，起讫点 (1,2) 和 (2,1) 的旅客流量相同（q^T）。图2显示，大多数出行者选择网约车，其次是自驾和多模式交通。尽管自驾的方式吸引力更高，但在我们的案例中，自驾的旅客流量低于网约车流。这可以通过比较图5a中的旅客网约车价格与自驾成本来解释。由于自驾和网约车的出行时间相同，费用便成为出行方式选择的决定因素。对于特定起讫点，均衡时自驾总费用高于网约车费用。尽管如图5a所示，多模式交通价格较低，但由于交通枢纽处的出行时间和等待时间较长，出行者较少选择这种方式。此外，人们对等待时间更为敏感，因此交通枢纽处的等待时间会使总感知出行时间高于另外两种方式。此外，从图3可以看出，愿意服务于多模式出行方式的司机很少。由于司机供给较少，为了平衡系统并达到均衡，多模式服务的需求也会相应降低。

图3显示，位于出行者起点节点的司机倾向于留在原地接载出行者，而不是重新定位。例如，司机流量$q^D[1,(1,2)]$和$q^D[2,(2,1)]$高于调度流量。其中一个原因是司机对调度时间和网约车价格较为敏感。某个位置的调度时间越长、价格越低，司机重新定位的可能性就越小。此外，服务于多模式服务的司机流量低于服务于直达网约车的司机流量。通常，公交枢纽靠近出行者的起点，为司机提供较低的网约车价格（即较低的工资）。因此，服务于多模式服务的司机较少，这不利于

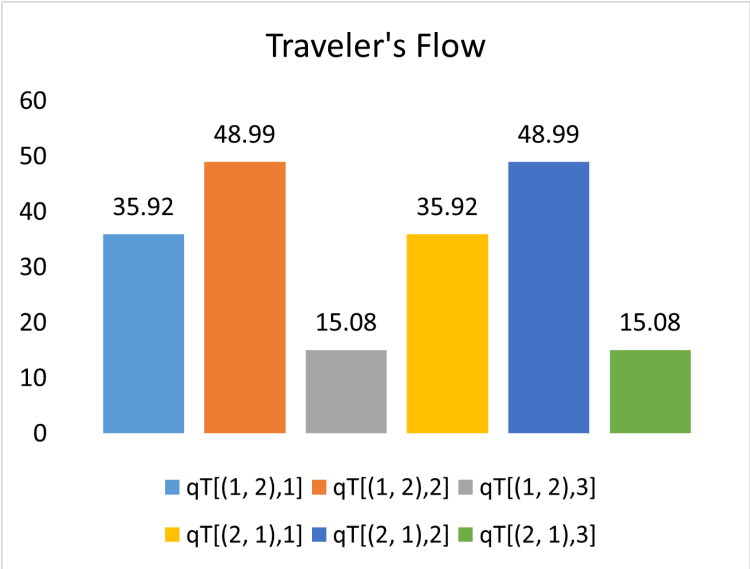


图2：旅客流量

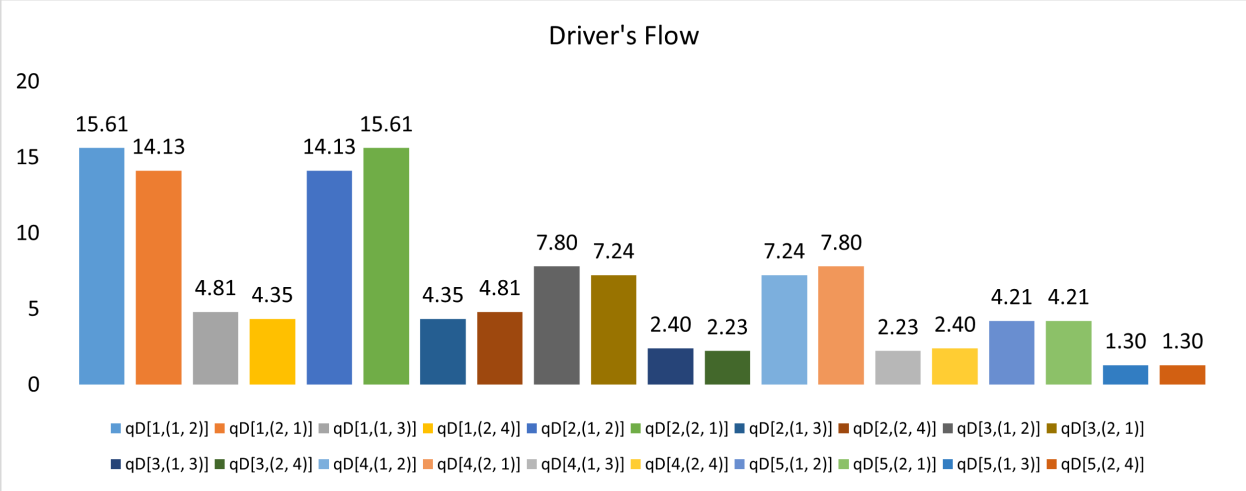
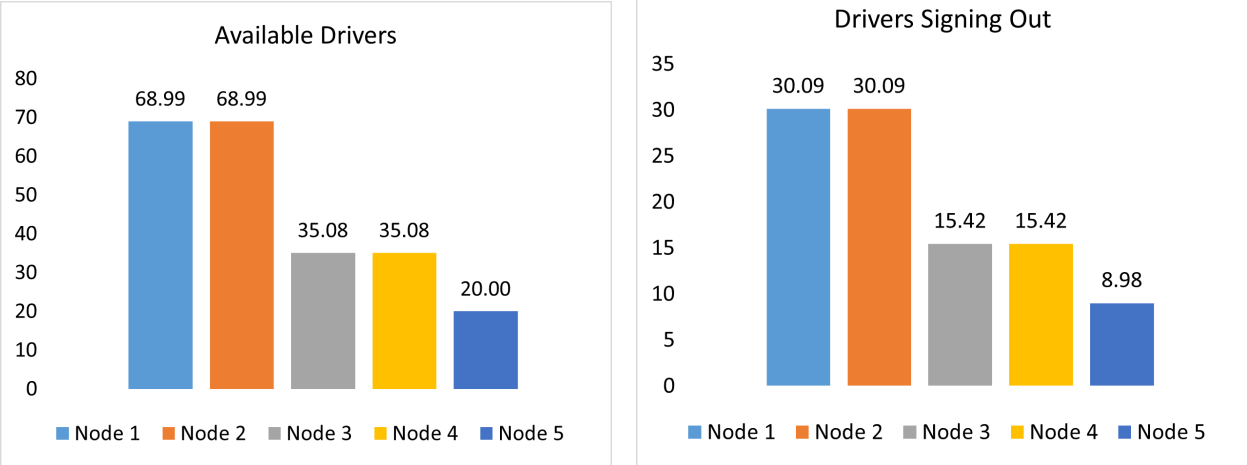


图3：司机流量

正如图2所示，出行者会决定是否选择该服务。出行者的网约车流量和多模式流量与司机流量相互影响，直至达到满足条件（10）的均衡。

调度时间也解释了图4a中起点节点1和2的可用司机数量为何较多。起点节点的司机数量几乎是交通枢纽处的两倍。这是因为出行者在交通枢纽处只换乘公共交通，因此没有从交通枢纽前往目的地的网约车需求。因此，枢纽处的可用司机要么重新定位到节点1和2，要么退出。如果网约车被用作最后一公里接驳，司机可能会留在枢纽处，可用司机数量也会更高。均衡时，节点5有20名可用司机，与在节点5上线的司机数量相同，因为节点5既不是出行者的目的地，也不是交通枢纽。

从图4b可以看出，可用司机数量较多的位置（即节点1和2）也有较高的司机退出率。如果司机将网约车服务的机会成本考虑在内，各节点的司机退出模式可能会有所不同。例如，司机退出系统去做其他事情，可获得20美元。在这种情况下，退出率可能高于当前值，而且由于各节点网约车服务的机会成本不同，司机的退出模式也可能有所不同。我们可以将这一机会成本纳入驾驶员模型（9）和重构模型（11），而不改变整体建模结构。

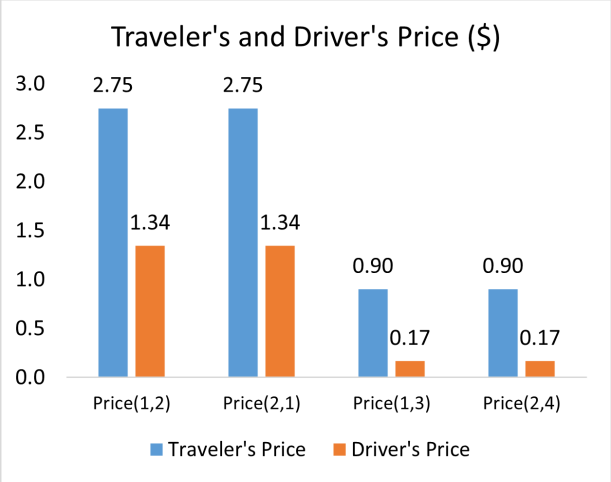


(a) 可用司机　　(b) 司机退出

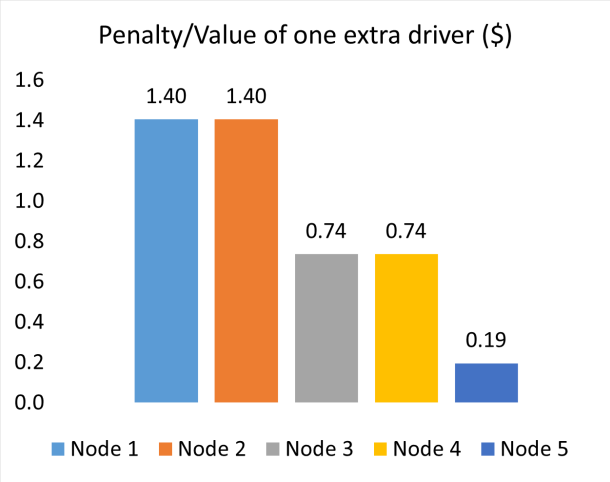
图4：均衡时可用司机数量与退出的司机数量

该框架的另一个关键输出是出行者和司机的网约车价格，如图5a所示，这些价格由出行者与司机的决策互动决定。出行者和司机的流量相互影响，并满足均衡约束（10）；价格则是模型（11）中约束（11d）和（11e）的对偶变量。这些价格是相对于自驾和公共交通成本设定的。在均衡状态下，多模式价格低于网约车价格，因此较少的司机流量会被吸引至交通枢纽。由于多模式服务需求较低，且前往枢纽的出行时间较短，旅客价格也呈现相同的规律。

图5b展示了在出行者的目的地或交通枢纽增加一名司机所带来的惩罚或价值。我们的模型估算价格，使其能够平衡起点节点的供需，并



(a) 旅客与司机价格



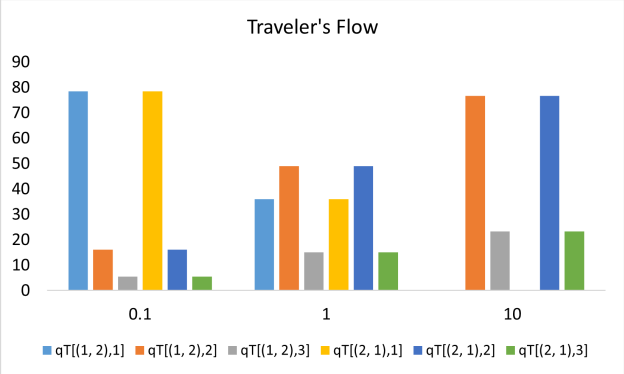
(b) 增加一名司机的价值

图5：旅客与司机价格及增加一名额外司机的价值

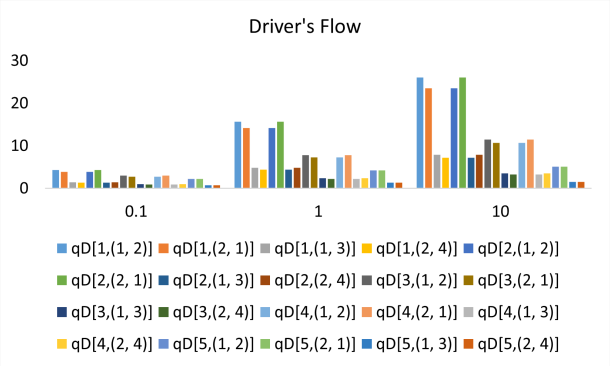
体现额外司机供给的边际价值。根据推论1，起讫点 (1,2) 的网约车价格等于起讫点 (1,2) 对应约束 (11d) 的对偶变量与节点2对应约束 (11f) 的对偶变量之和。同样，起讫点 (1,2) 的多模式网约车价格等于起讫点 (1,2) 对应约束 (11e) 的对偶变量与节点3（该起讫点对应的交通枢纽）对应约束 (11g) 的对偶变量之和。换言之，旅客价格包含网约车服务的费用，以及将额外司机送至目的地或交通枢纽所产生的惩罚／价值。例如，如果出行者要求网约车前往返程行程有限的偏远地区，他们可能需要支付更高的价格，以补偿其出行带来的影响。根据该价值为正（或负），均衡旅客价格可能高于（或低于）相应的司机价格。

我们改变出行者的价格敏感度，以考察其对均衡价格的影响。图6(a)显示，当敏感度较低（0.1）时，大多数出行者会选择价格较高的自驾模式。随着敏感度增加（1.0），大多数出行者选择网约车，其次是自驾和多模式出行方式。敏感度进一步提高（10）后，大多数出行者会选择网约车，其次是多模式出行方式，几乎没有出行者选择自驾。这是因为与自驾相比，网约车和多模式出行方式的价格较低（图7(a)）；自驾成本则包括自驾成本和停车成本。即使敏感度较高，网约车和多模式出行方式的费用仍低于自驾成本，因此出行者更倾向于选择这些价格较低的出行方式。随着敏感度升高，选择网约车和多模式交通的出行者增多，图6(b)显示司机流量也随之增加。

请注意，当出行者的价格敏感度很低时，为多模式选项提供服务的司机价格为负（图7(b)）。这是因为出行者的多模式需求非常低，导致提供多模式交通服务的司机流量较小。由于出行者支付的费用非常低，为了平衡低需求并使系统达到均衡状态，提供多模式交通服务的司机价格会为负。请注意，负价格既不意味着现实中司机会获得负支付，也不表示存在任何建模缺陷。相反，这说明出行者的价格敏感度不能过低，否则会以不切实际的方式使整个系统达到平衡。同样，由于司机供给数量较少，任何位置（包括交通枢纽）增加一名额外司机所带来的惩罚或价值可能会上升



旅客价格敏感度 (β_2^T)
(a) 旅客流量



旅客价格敏感度 (β_2^T)
(b) 司机流量

图6：旅客价格敏感度变化对旅客流量和司机流量的影响

这一点从图7(c)中可以明显看出。随着价格敏感度提高，司机流量（即供给）增加，各个位置增加一名额外司机所带来的惩罚或价值也会降低。当某个位置的司机流量或可用司机数量过高时，在该处增加一名额外司机的价值也可能为负，这意味着出行者可能需要支付更多费用，才能让一名额外司机前往该位置。价格敏感度较高时的节点5就是一个例子。由于节点5既不是旅客目的地，也不是交通枢纽，司机唯一的选择是重新定位到有出行需求的区域。没有出行者流量来平衡司机数量过多的问题，因此在该位置增加任何司机的价值都为负。

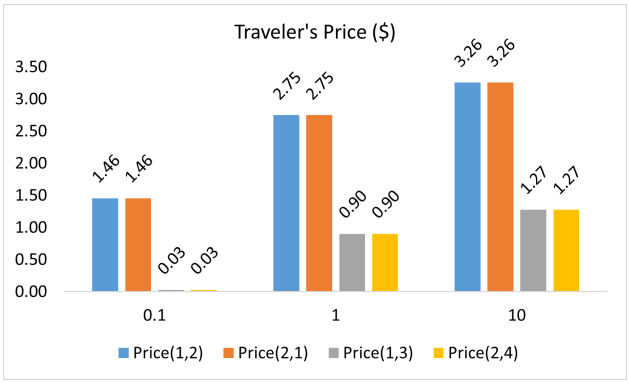
苏福尔斯网络

苏福尔斯测试网络有 24 个节点和 76 条链路。为了获得政策方面的启示，我们为出行者考虑了 7 个起点（$\mathscr{R} = [1,4,5,6,7,19,23]$）和 7 个目的地（$\mathscr{S} = [13,24,22,21,20,5,9]$）。因此，网络中的旅客起讫点对为：

$\mathscr{RS} = \{(1，13)、(4，24)、(5，22)、(6，21)、(7，20)、(19，5)、(23，9)\}$

网约车司机可能位于网络中的任何节点，并且可能（也可能不会）重新定位到起点节点，以服务出行者。

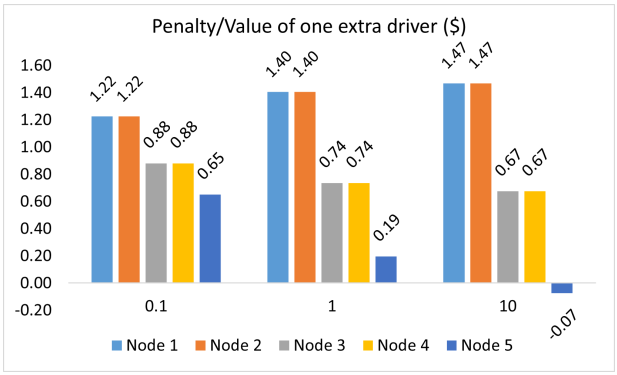
我们开展了一项案例研究，以了解网络中公交枢纽的数量可能如何影响多式联运系统。我们考虑了三种情景，在每种情景中改变网络中的公交枢纽数量，以检验其对多式联运系统的影响。三种情景分别为：(1) 2 个公交枢纽，$\mathscr{H} = [10,15]$；(2) 3 个公交枢纽，$\mathscr{H} = [11,16,15]$；以及 (3) 7 个公交枢纽，$\mathscr{H} = [12,11,10,16,18,15,22]$(表1)。请注意，在情景 (1) 和 (2) 中，多个起讫点对共用公交枢纽。每个公交枢纽与出行者起讫点的对应关系见表1。司机起讫点集合 $\mathscr{RS}$ 不仅包括出行者的网约车起讫点 $\mathscr{RS}$，还包括连接出行者起点与相应公交枢纽的起讫点。所有情景中的公交线路均视为固定线路，如图8所示。各情景中公交枢纽的位置也如图8所示。敏感性参数与“五节点测试网络”中的参数相同。各起讫点的出行时间和调度时间根据最短路径上各路段的自由流行程时间推导得出（见（*18*））。所有情景下起讫点对的出行需求为：$\mathscr{RS}[1,13] = 500$, $\mathscr{RS}[4,24] = 200$, $\mathscr{RS}[5,22] = 200$,$\mathscr{RS}[6,21] = 100$, $\mathscr{RS}[7,20] = 500$, $\mathscr{RS}[19,5] = 100$, $\mathscr{RS}[23,9] = 500$Stabler（*18*）。出行



旅客价格敏感度（β_2^T）
（a）旅客价格



旅客价格敏感度（β_2^T）
（b）司机价格



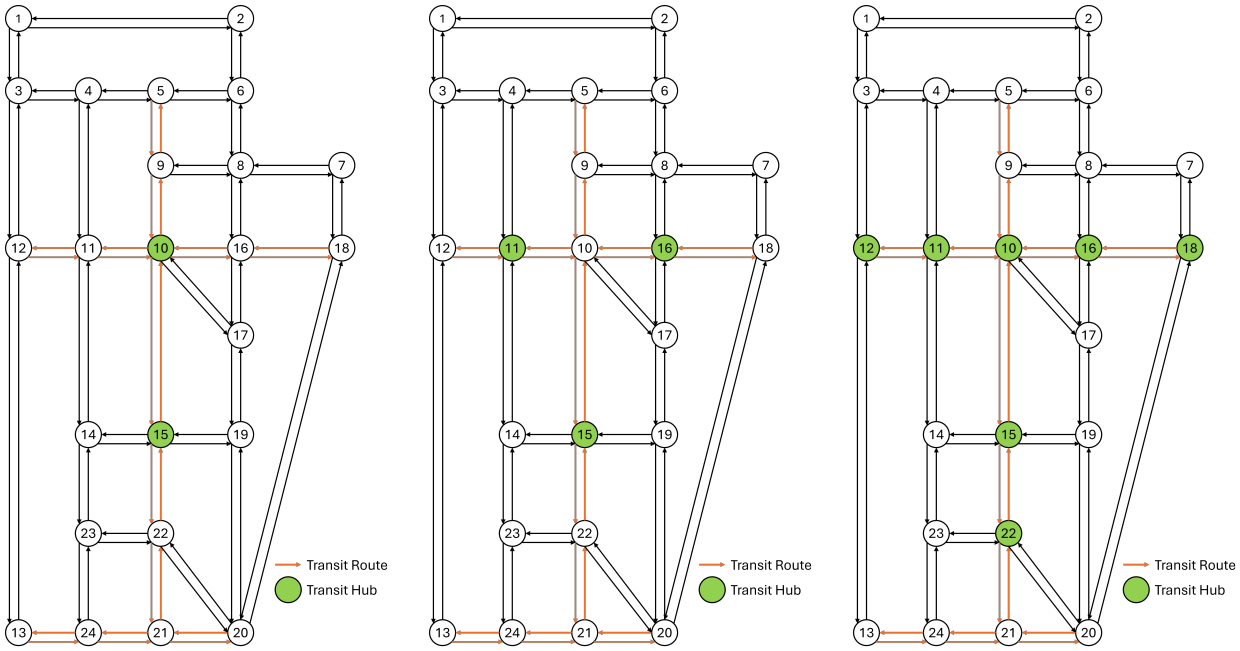
旅客价格敏感度（β_2^T）
(c) 增加一名额外司机的惩罚／价值

图7：随着旅客价格敏感度变化，旅客和司机均衡价格以及增加一名额外司机的惩罚／价值的变化

经公共交通的时间按公共交通线路自由流行程时间的两倍计算。

图9(a)显示，网络中的公交枢纽数量越多，旅客自驾出行的流量就越少。对于大多数起讫点，随着公交枢纽数量增加，旅客网约车流量也会减少（图9(b)）。但图9(c)显示，多模式流量会随着公交枢纽数量增加而增加。这表明，如果网络中设置更多公交枢纽，出行者会更倾向于选择多式联运，而非其他现有出行方式。更多公交枢纽将提升从任意位置使用公共交通服务的可达性，因此，旅客可以通过首段网约车服务，更快地抵达公共交通站点。

如图10(a)所示，网约车服务多式联运时的旅客价格没有一致的规律。尽管首公里网约车的出行时间会随着交通枢纽数量的增加而减少，但交通枢纽位置的不同配置可能会对旅客价格产生额外影响。尽管未发现明显规律，我们发现，如果交通枢纽较少，大多数起讫点的旅客价格可能变为负值；换言之，出行者可能需要交通网络公司或社会提供补贴，才能使用多式联运。由于交通网络公司在实践中会对网约车司机进行管理，如果交通网络中的交通枢纽较少，交通网络公司希望服务多式联运时，其利润可能会减少。这表明，尽管交通网络公司和公共交通机构各自追求自身利益，二者仍有必要进行协调，尽管双方



(a) 场景（1）：2个公交枢纽　　(b) 场景（2）：3个公交枢纽　　(c) 场景（3）：7个公交枢纽

图8：苏福尔斯测试网络

各自追求自身利益。公共交通机构若希望缓解首公里接驳问题并提高公共交通客流量，可能需要通过与交通网络公司协调来规划交通枢纽的位置。

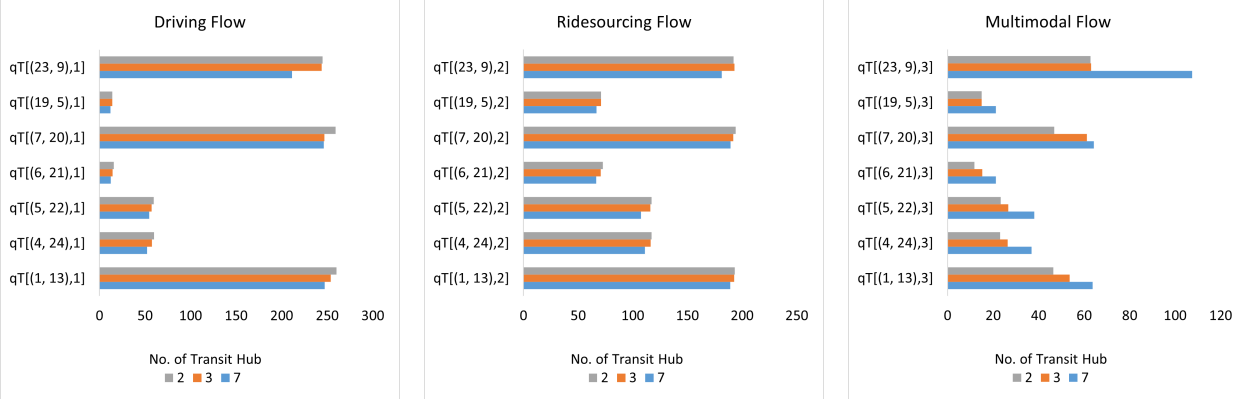
尽管增加公交枢纽的数量可能会提高网络中的多式联运客流量，但也可能影响网约车司机在提供直达网约车和多式联运服务时的总调度时间。图10(b)显示，随着公交枢纽数量增加，司机在网络中的总调度时间也会增加。由于网络中未考虑交通拥堵，且司机从任意节点前往出行者起点的调度时间固定，因此，多式联运需求增加可能是导致司机调度时间延长的唯一原因。当多式联运需求较大时，需要更多网约车司机流量来满足较高的需求，这最终会增加他们在网络中的总调度时间。请注意，调度时间也与网约车司机的空驶里程（车辆行驶里程）有关（*19, 20*）。调度时间增加也会增加司机的空驶车辆行驶里程，从而降低所提多式联运系统的效率。空驶车辆行驶里程增加还会导致交通运输部门的排放增加，并有悖于多式联运系统的可持续发展目标（*19*）。如果存在从公交枢纽前往任意位置的网约车需求，司机可能就无需重新定位以提供服务。这最终会减少空驶车辆行驶里程，使多式联运系统更具可持续性。

结论

本研究利用多智能体优化，开发了一套统一的建模框架，用于刻画多模式系统中出行者与司机之间的非合作行为。我们还开发了有效的计算策略，以求解多模式系统的多智能体优化问题。我们证明，该问题等价于求解一个单一的重新

表1：起讫点与交通枢纽的映射

场景1	**场景2**	**场景3**
交通枢纽数量 = 2 $\mathscr{H} = [10, 15]$ 起讫点与枢纽的映射： 小时(1，13) = 10 时(4，24) = 10 高(5、22) = 10 $h(6,21) = 10$ $h(7,20) = 10$ 高(19,5) = 15 $h(23,9) = 15$	交通枢纽数量 = 3 $\mathscr{H} = [11, 16, 15]$ 起讫点与枢纽的映射： 小时(1，13) = 11 小时(4,24) = 11 小时(5，22) = 11 $h(6,21) = 16$ $h(7,20) = 16$ 小时(19，5) = 15 $h(23,9) = 15$	交通枢纽数量 = 7 $\mathscr{H} = [12, 11, 10, 16, 18, 15, 22]$ 起讫点与枢纽的映射： 时(1,13) = 12 小时(4，24) = 11 $h(5,22) = 10$ $h(6,21) = 16$ $h(7,20) = 18$ $h(19,5) = 15$ $h(23,9) = 22$

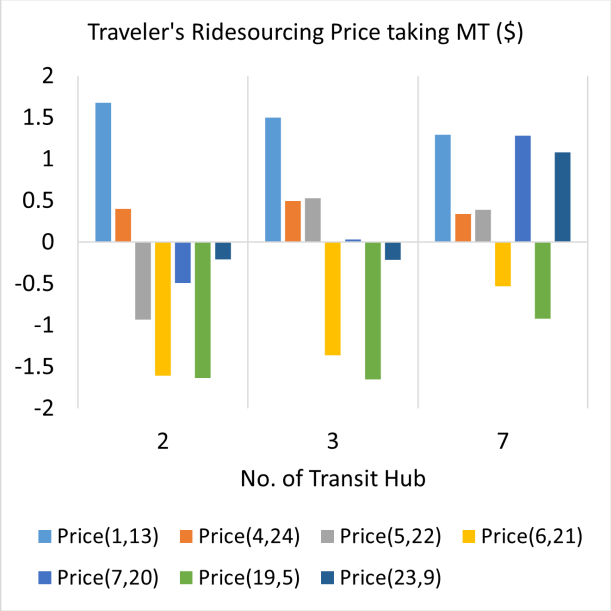


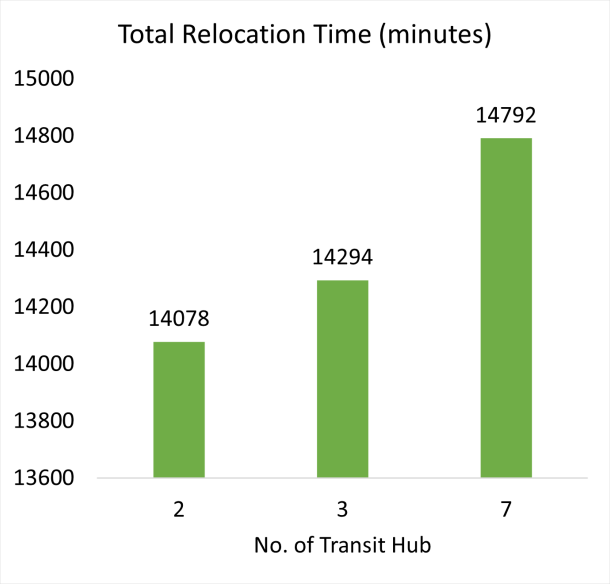
(a) 驾车流　　(b) 网约车流　　(c) 多模式流量

图9：交通枢纽数量变化时旅客流量的变化

表述的凸优化问题，该问题可借助商业非线性求解器高效求得全局最优解。我们还证明了此类问题的解存在且唯一。

我们确定了交通网络中各区域内达到均衡的出行者流量和司机流量，以及均衡状态下某一位置的可用司机数量。我们的模型能够输出使各交通方式达到均衡的位置均衡价格。这些均衡价格不仅反映单一模式和多模式交通中网约车服务的价格，也体现了每个节点新增一名可用司机所带来的价值/惩罚。这些信息有助于指导定量激励设计，从而更好地促进可持续交通。我们发现：（1）如果出行者对价格更加敏感，他们相比自驾更倾向于选择网约车和多模式交通。因此，需要更多网约车司机，网约车均衡价格也会随之上涨，以平衡增加的需求。（2）如果网约车司机对价格过于敏感，交通网络公司或社会可能需要向出行者提供补贴，使其使用





（a）服务于多式联运的旅客网约车价格　　（b）司机的总调度时间

图10：服务于多式联运的旅客网约车价格和司机的总调度时间

多模式服务。（3）对于既非任何出行者目的地、也非交通枢纽的位置，新增一名司机所带来的价值/惩罚小于在出行者目的地或交通枢纽新增一名司机所带来的价值/惩罚。（4）如果网络中的交通枢纽数量较少，出行者使用多模式交通可能需要获得补贴。（5）网络中增加交通枢纽可能会提升多模式交通的需求，但也会通过延长总调度时间，增加网约车司机的空驶车辆行驶里程总量。

我们的研究可以从多个方向进行拓展。首先，我们忽略了网约车等待时间对出行者和网约车司机决策过程的影响。当等待时间在参与者的决策过程中并非重要因素时，这类模型是适用的。例如，对于大型网络中的长期交通规划问题，出行者的出行时间和司机的调度时间可能显著超过等待时间，因此在决策过程中可以忽略等待时间。此外，打算使用网约车服务的出行者可能会早于其计划的行程开始时间请求乘车服务，这最终会抵消等待时间对出行者出行方式选择决策过程的影响（*21*）。然而，所提出的建模框架可以通过在出行者和司机的决策过程中加入相应的等待时间效用项，来纳入等待时间的影响。其次，我们的模型未考虑交通拥堵。通过将交通用户均衡与离散选择模型结合起来，我们可以将模型扩展至拥堵交通网络。此外，我们的研究仅捕捉了多模式交通系统中出行者与提供网约车服务的司机之间的互动。还可以进一步将交通网络公司和公共交通机构作为额外的参与者纳入建模框架。

致谢

本研究由美国国家科学基金会（NSF）资助，资助编号为 2041446。

参考文献

1. 密歇根大学可持续系统中心，个人交通情况说明书。报告 CSS01-07，密歇根大学，2023 年，查阅日期：2024-07-24。 2. Gu, Q.-P. 和 J. L. Liang，个人车辆拼车的多模式交通，2021 年。 3. Brown, A.、M. Manville 和 A. Weber，按需出行能否弥补首末公里交通缺口？洛杉矶试点项目的公平性影响。《交通研究跨学科视角》，第 10 卷，2021 年，第 100396 页。 4. Rayle, L.、D. Dai、N. Chan、R. Cervero 和 S. Shaheen，是否只是更好的出租车？旧金山出租车、公共交通和网约车服务的调查比较。《交通政策》，第 45 卷，2016 年，第 168–178 页。 5. Feigon, S. 和 C. Murphy，共享出行与公共交通的转型。TCRP 报告项目 J-11，任务 21，交通研究委员会，2016 年。 6. Lyft，*Lyft 2018* 年经济影响报告。https://legislature.vermont.gov/Documents/2018/WorkGroups/Hous%20Commerce/Bills/H.143/H.143%7EFunsho% 20Owolabi%7EEconomic%20Impact%20Report%202018%7E3-14-2018.pdf，2018 年，查阅日期：2024-04-03。 7. Zhang, Y. 和 A. Khani，将公共交通系统与网约车服务整合：对系统用户随机均衡问题的研究。《交通研究*A*辑：政策与实践》，第 150 卷，2021 年，第 95–123 页。 8. Frank, L.、N. Dirks 和 G. Walther，通过选址建设多模式出行枢纽提升农村可达性。《交通地理学杂志》，第 94 卷，2021 年，第 103111 页。 9. Feng, S.、P. Duan、J. Ke 和 H. Yang，采用强化学习方法协调网约车与公共交通服务。《交通研究*C*辑：新兴技术》，第 138 卷，2022 年，第 103611 页。 10. Liu, Y.、P. Bansal、R. Daziano 和 S. Samaranayake，在按需出行系统设计中整合出行方式选择的框架。《交通研究*C*辑：新兴技术》，第 105 卷，2019 年，第 648–665 页。 11. Yan, X.、J. Levine 和 X. Zhao，将网约车服务与公共交通整合：结合显示偏好数据和陈述偏好数据评估出行者响应。《交通研究*C*辑：新兴技术》，第 105 卷，2019 年，第 683–696 页。 12. Rafi, M. N. F. 和 Z. Guo，《论文〈非合作多模态出行系统的多智能体优化〉的证明》。https://github.com/nfrafi/Multimodal-Network-Optimization/blob/main/Proofs_TRB.pdf，2025 年，查阅日期：2025-08-01。 13. Guo, Z.、F. Afifah、J. Qi 和 S. Baghali，相互依赖的交通与电力系统分析的随机多智能体优化框架。《*IEEE*交通电气化汇刊》，第 7 卷，第 3 期，2021 年，第 1088–1098 页。 14. Guo, Z. 和 Y. Fan，寡头市场不确定性下能源基础设施规划的随机多智能体优化模型。《网络与空间经济学》，第 17 卷，第 2 期，2017 年，第 581–609 页。 15. Bynum, M. L.、G. A. Hackebeil、W. E. Hart、C. D. Laird、B. L. Nicholson、J. D. Siirola、J.-P. Watson 和 D. L. Woodruff，*Pyomo——Python* 优化建模。Springer，第 3 版，2021 年。

16. Hart, W. E., J.-P. Watson, 和 D. L. Woodruff, 《Pyomo：使用 Python 对数学规划问题进行建模与求解》。《数学规划计算》，第 3 卷，第 3 期，2011 年，第 219–260 页。17. Wächter, A. 和 L. T. Biegler, 《大型非线性规划的内点滤波线搜索算法的实现》。《数学规划》，第 106 卷，第 1 期，2006 年，第 25–57 页。18. Stabler, B., 交通网络——苏福尔斯，2021 年，访问日期：2024-07-26。19. Jia, W., T. Donna Chen, 和 W. Zhang, 《重新定位意愿：考察私人拥有的自动驾驶汽车停车位置重新定位的偏好》。《交通研究*D*辑：交通与环境》，第 108 卷，2022 年，第 103318 页。20. Fakhrmoosavi, F., K. M. Gurumurthy, K. M. Kockelman, C. B. Hunter, 和 M. D. Dean, 《共享自动驾驶汽车车队运营的停车策略与结果》。《交通工程杂志*A*辑：系统》，第 150 卷，第 4 期，2024 年，第 04024009 页。21. Afifah, F. 和 Z. Guo, 《拥堵交通网络中网约车服务的空间定价》。《交通研究*C*辑：新兴技术》，第 142 卷，2022 年，第 103777 页。