

考虑建设时序和动态需求的城际公路充电设施优化布局

杨 扬¹, 张天雨¹, 朱宇婷², 姚恩建¹

(1. 北京交通大学 综合交通运输大数据应用技术交通运输行业重点实验室, 北京 100044; 2. 北京工商大学 电商与物流学院, 北京 100048)

摘 要: 该文围绕城市群内或城际间公路网络充电设施布局规划问题, 提出一个考虑动态充电需求和建设时序的双层优化模型。首先, 下层模型基于动态交通流分配模型, 在多用户行驶及充电行为仿真的基础上得到均衡状态下的充电需求时空分布; 其次, 上层模型以投资运营商的总成本最小为目标, 考虑建设时序和服务水平的约束, 对充电设施位置及容量进行优化; 最后, 选取山东半岛城市群中济南与青岛的城际公路网络作为研究实例。结果表明: 所设计的模型通过对用户充电偏好、路网交通状态和设施施工之间的信息进行动态交互, 能够有效估计充电系统的动态服务水平, 进而获得满意的公路网充电设施布局方案。此外, 分别从正向和逆向建设时序对布局优化方案进行讨论, 结果表明: 在同一服务水平约束下, 长期的网络布局应考虑城市群内的未来年能耗需求, 宜采用逆向建设时序进行合理规划。

关键词: 交通工程; 充电设施; 双层布局优化; 电动汽车; 动态交通分配; 建设时序

中图分类号: U491.1+2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0054(2022)07-1163-15

DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2022.26.017

Optimizing the deployment of charging systems on an expressway network considering the construction time sequence and the dynamic charging demand

YANG Yang¹, ZHANG Tianyu¹, ZHU Yuting², YAO Enjian¹

(1. Key Laboratory of Transport Industry of Big Data Application Technologies for Comprehensive Transport, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. School of E-business and Logistics, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: A bi-level optimization model was developed for planning charging facility deployment on an intercity highway network. The model balances the variable charging demand and the construction time sequence. The lower model is based on a dynamic traffic assignment model. The spatial-temporal distribution of the charging demand at equilibrium was obtained from simulations of multi-user

driving and charging behavior. The upper model optimizes the charging station's locations and capacities using construction time sequence and level of service (LOS) constraints to minimize the operator investment. The model is then used to analyze the intercity highway network between Jinan and Qingdao in the Shandong Peninsula urban agglomeration. The model provides reliable estimates of the real-time charging system LOS and a satisfactory layout based on the user charging preferences, network traffic conditions, and facility conditions. The layout was then analysed using forward and reverse construction time sequences. The results show that for the same LOS constraint, long-term deployment should consider future energy demands and the planners should use the reverse construction time sequence method.

Key words: traffic engineering; charging infrastructure; bi-level optimal deployment; electric vehicles; dynamic traffic assignment; construction time sequence

随着国家交通节能减排的引领、电池技术的不断突破和社会认可度的不断提高, 以电动汽车为主的新能源汽车保有量日益增加。截至 2021 年 10 月, 全国新能源汽车保有量达 891 万辆^[1]。随着城市群交通一体化进程推进, 城市群内城市间可达性逐步提升, 电动汽车用户对城际间长距离出行的需求日益增长。截至 2021 年 9 月, 配置充电桩高速公路服务区数为 2 318 个^[2], 各站平均配有 4 个充电桩。现有城际公路充电设施配置与日益增长的电动汽车城际出行需求存在较大差距^[3]。合理的城际公路充电设施布局将有利于提高电动汽车可达性, 推进城市群交通系统低碳发展。

作为充电设施布局的关键输入, 电动汽车充电

收稿日期: 2021-10-29

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目(2020YJS093);

国家自然科学基金资助项目(71801012, 71931003)

作者简介: 张天雨(1997—), 男, 博士研究生。

通信作者: 杨扬, 副教授, E-mail: y_yang@bjtu.edu.cn

需求预测一直是研究的热点。文[4-7]从宏观的角度出发,考虑土地性质、电动汽车保有量和停车行为等,将充电需求视为点需求进行估计;文[8]从微观层面研究电动汽车混入下的交通网络特征,将充电需求的研究从点需求转向流需求。综合电动汽车行驶能耗和充电行为,文[9-10]利用静态交通流分配模型得到网络均衡状态下的充电需求分布。相比于静态需求,动态交通流模型从时空维度来捕捉微观的交通现象,郇宁等^[11]构建随机动态交通流分配模型捕捉实时路网流量分布、车辆状态及充电站运行状态等信息,张美霞等^[12]应用出行链理论和模糊推理提出一种考虑用户差异性的分层充电决策模型。但现有研究缺乏对城际间电动汽车用户行驶特征与充电行为的合理建模,导致相关研究难以应用于城际公路充电设施的优化布局。

相比于单一城市内充电基础设施布局优化,城市群内城际公路充电网络布局研究仍处于起步阶段。考虑高速公路出入口距离和电动汽车续驶里程因素,贾龙等^[13]提出一种两阶段法高速公路充电设施选址模型。以高速公路充电设施正向建设为时序,Xie等^[14]构建了一种基于流量的多阶段布局模型。考虑途中充电行为和排放约束,李浩等^[15]构建了混合交通流均衡模型。当前研究中多将电动汽车城市内出行与城际间出行的行为差异模糊化。

同时,考虑建设时序的设施布局规划对节约能源、避免超前投资具有重要意义^[16]。考虑区域内能耗增长、需求结构以及外部资源布局,程林等^[17]对区域内综合能源子系统建设时序进行研究。以全生命周期成本最小为目标,陈昌铭等^[18]构建了双层模型对园区综合能源系统的建设时序和资源配置进行优化。然而,当前充电设施布局优化研究中方案之间相对独立,尚未考虑建设时序所带来的规划约束。

因此,本文将围绕优化城市群内城际公路网络的充电设施布局,基于出行行为建模、排队论、混合交通流动态分配理论以及建设时序理论,从用户出行和充电设施资源动态配置的角度,对城市群尺度下的多用户行驶及充电行为分析、充电需求时空分布估计、城际公路网络中充电设施位置及容量优化问题展开研究。选取山东半岛城市群中济南与青岛的城际高速公路网络作为实际案例进行模型的实际应用。

1 问题描述

1.1 符号定义

以混合交通流(燃油汽车和电动汽车)下建设有充电设施的城际公路为背景,定义网络 $G(N, A)$ 。其中: $N = \{R, S\}$ 为节点集合,包括流入/流出节点和分流/合流节点, $n \in N$; R 、 S 分别为网络中起讫点集合, $r \in R, s \in S$, (r, s) 定义为 OD (origin and destination) 对; A 为网络中路段集合, $a \in A$ 。 $M = \{m | e, g\}$ 为车辆类型集合,包含电动汽车 e 和燃油汽车 g 。考虑城际公路网络特性,充电站备选集为 ϕ 。 $m^* = \{g^* = g_{rs, k}^*, e^* = e_{rs, k}^*\}$ 指在 t 时刻出发,选择路径 k 通过 (r, s) 的燃油车和电动车。

考虑时变的出行需求和车辆路径选择行为,本研究将仿真时段 T 等分为 S' 个子时段,步长 $\Delta t = T/S'$,采用基于动态交通流分配的动态仿真得到充电需求的时空分布。定义 ϕ 为高速服务区集合; W 为建设时序集合, $w \in \{1, 2, \dots, w^*\}$; Y^w 为 w 阶段下,充电站建设集合; y 为充电站规划布局方案; K_{rs} 表示 OD 对 (r, s) 间的全体路径; K_{rs}^m 为 m 类车辆有效路径集合。以上一/下一阶段下的充电设施布局为约束,对当前阶段下充电站位置和容量进行优化。

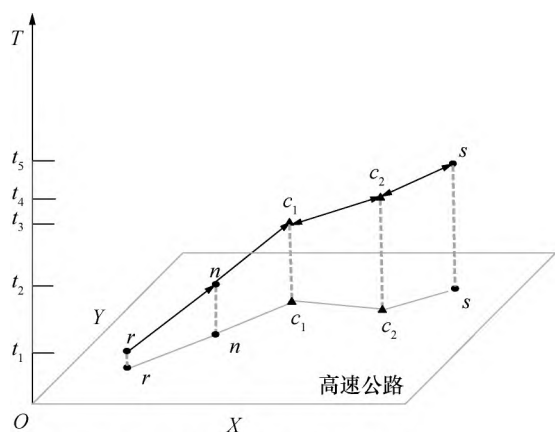
1.2 时空拓展网络

在时变的交通网络状态和充电设施工况下,为阐明考虑充电需求的车辆动态出行过程,对交通网络进行时空拓展。考虑电动汽车充电需求,驾驶员需根据充电设施和路径能耗联合确定出行路径。针对城际公路充电设施布局,分别构建燃油汽车交通子网络 G_1 和电动汽车交通子网络 G_2 。

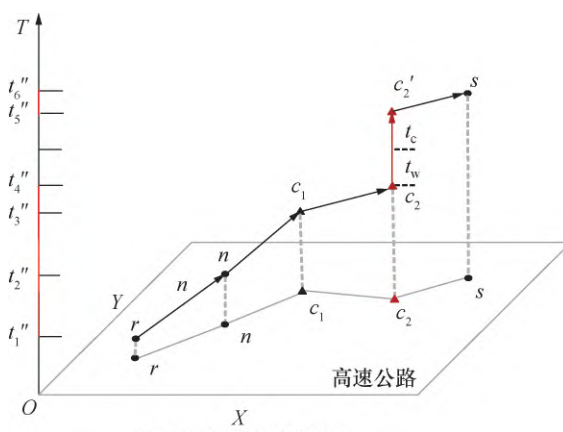
图 1a 为燃油汽车和无充电需求的电动汽车出行路径。在原始出行路径 $r \rightarrow n \rightarrow c_1 \rightarrow c_2 \rightarrow s$ 中, r 、 s 分别为起讫点, n 为途中节点, c_1 、 c_2 为途中充电站点。图 1b 和 1c 为有充电需求的电动汽车出行路径,分别在 c_1 和 c_2 处充电。以图 1b 中路径 $r \rightarrow n \rightarrow c_1 \rightarrow c'_1 \rightarrow c_2 \rightarrow s$ 为例, $c_1 \rightarrow c'_1$ 表示车辆在充电站 c_1 处接受充电服务的过程,通过虚拟路段(红色箭头),路段行驶时间等于车辆排队 t_w 和充电 t_c 时间之和。

2 充电设施布局优化模型构建

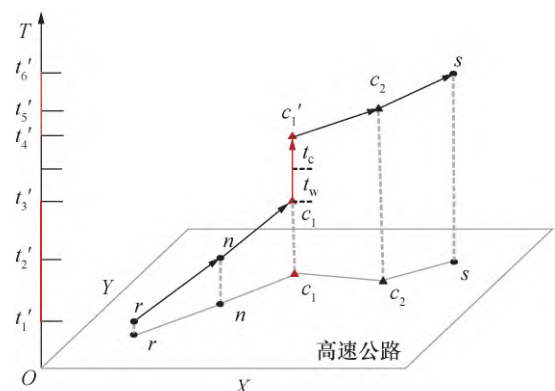
针对不同建设阶段下城际公路网络充电设施资源动态配置的问题,构建考虑建设时序的双层优化模型,如图 2 所示。



(a) 燃油车路径和电动汽车非充电路径



(c) 电动汽车充电路径2



(b) 电动汽车充电路径1

图1 交通子网络时空拓展图

以上一/下一阶段的设施布局、高速公路网络结构以及充电需求分布为输入,上层构建考虑建设时序的布局优化模型,优化城际公路网络中充电站位置及充电桩数量。下层构建基于链路传输的动态交通流分配模型。以实时混合交通流 OD 分布和城际公路充电网络为输入,通过对多用户的路径选择、充电和传输过程进行仿真,最终网络达到均衡,并将电动汽车能耗需求分布输出至上层。

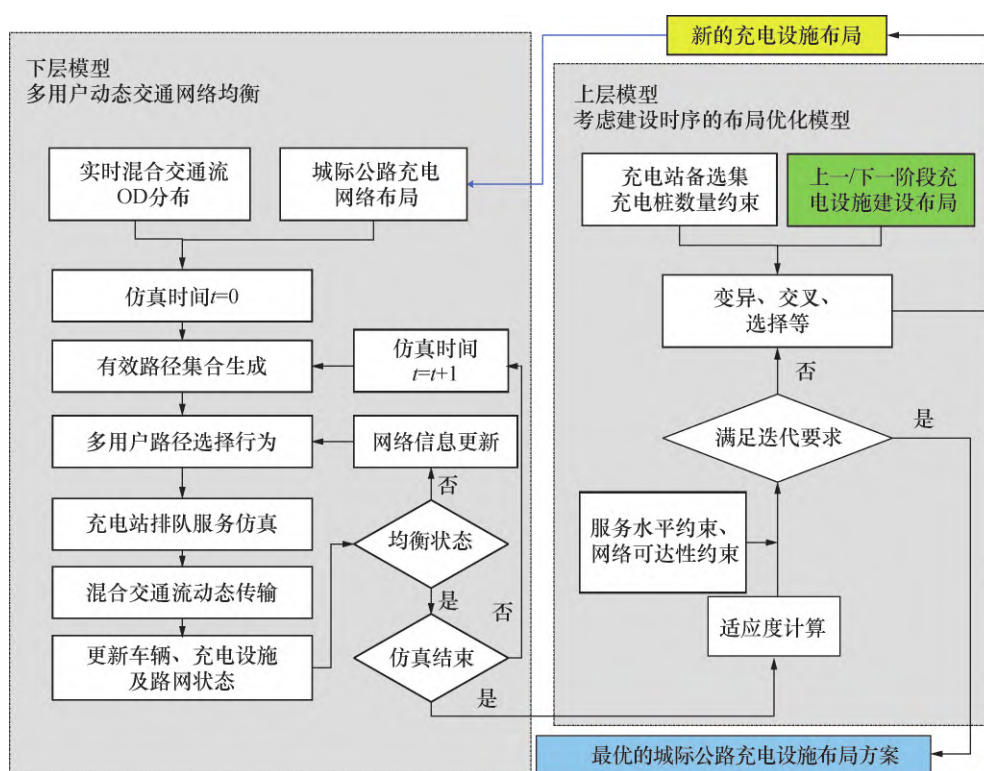


图2 双层优化模型框架

2.1 下层模型的构建

1) 有效路径集合。

结合 Dijkstra 算法和深度优先算法构建各 OD 对间的所有有效路径集合, 筛选得到全体路径, 即燃油汽车的有效路径

$$l_{rs,k} \leq \Omega \cdot l_{rs}^* \quad (1)$$

其中: $l_{rs,k}$ 为 OD 对 (r, s) 间路径 k 的长度; l_{rs}^* 为 OD 对 (r, s) 间最短路径长度; Ω 为放大系数, 取值为 2。

考虑驾驶员里程焦虑和离开城际公路网络后的 2 次出行需求, 分别对电动汽车行驶途中和离开路网时的 SOC (status of charge) 提出阈值约束, 表示如下:

$$S_{c_i}^{e*} = S_r^{e*} - 100 H_{r,c_i}^{e,t} / (U \cdot Q); \quad (2)$$

$$S_s^{e*} = S_{c_i}^{e*} - 100 H_{c_i,s}^{e,t} / (U \cdot Q); \quad (3)$$

$$r_{c_i}^{e*} = \begin{cases} 1, & S_{c_i}^{e*} > S_1, S_s^{e*} > S_2; \\ 0, & \text{其他}; \\ c_i \in \{c_1, c_2, \dots, c_n\}. \end{cases} \quad (4)$$

其中: S_r^{e*} 、 $S_{c_i}^{e*}$ 、 S_s^{e*} 分别为电动汽车 e^* 在起点 r 、充电站 c_i 和终点 s 时车辆的 SOC; $H_{r,c_i}^{e,t}$ 和 $H_{c_i,s}^{e,t}$ 分别为 t 时刻出发电动汽车从起点 r 到站点 c_i 和从站点 c_i 到终点 s 的能耗; U 和 Q 分别为电池电压 (380 V) 和电池总容量 (60 kW · h); $r_{c_i}^{e*}$ 为判断路径 k 中选择充电站 c_i 是否可行的 0-1 变量, 当路径 k 选择 c_i 充电可行时, $r_{c_i}^{e*} = 1$, 否则 $r_{c_i}^{e*} = 0$; S_1 和 S_2 分别为电动汽车行驶途中车辆 SOC 下限 (30%) 和离开路网时车辆所需 SOC 下限 (50%)。

式 (2) 和 (3) 分别计算车辆从起点到达充电站和从充电站到达终点的 SOC。基于式 (4), 得到满足能耗约束的电动汽车有效路径集合。

2) 多用户路径选择行为建模。

考虑用户间的感知差异和 IIA (the independence of irrelevant alternatives) 特性的影响, 采用 PSL (path size logit) 离散选择模型构建瞬时型出行阻抗函数。实现多用户路径选择行为与路网状态的信息动态交互过程。考虑充电需求、时间价值和能耗价值的不同, 电动汽车和燃油车广义出行费用分别计算如下:

$$C_{e*} = \sum_{a \in A_k} (\alpha^{rs,e} \cdot \tau_a^{e,t} + \beta^{rs,e} \cdot H_a^{e,t}) \cdot \delta_{rs,k}^a + \sum_{c_i \in C_k} (t_{wc_i}^{e*} + t_{cc_i}^{e*}) \cdot \gamma^{rs,e} \cdot \rho_{rs,k}^{c_i} \cdot r_{c_i}^{e*}, \quad (5)$$

$$C_{g*} = \sum_{a \in A_k} (\alpha^{rs,g} \cdot \tau_a^{g,t} + \beta^{rs,g} \cdot H_a^{g,t}) \cdot \delta_{rs,k}^a. \quad (6)$$

其中: C_{e*} 和 C_{g*} 分别为 m^* 时刻燃油汽车 e^* 和电动汽车 g^* 的广义出行费用; $\tau_a^{g,t}$ 和 $\tau_a^{e,t}$ 分别为 a_x 时刻燃油汽车和电动汽车通过路段 a 的行驶时间; $H_a^{g,t}$ 和 $H_a^{e,t}$ 分别为 a_x 时刻出发燃油汽车和电动汽车通过路段 a 的能耗; $t_{wc_i}^{e*}$ 、 $t_{cc_i}^{e*}$ 分别为电动汽车 e^* 在充电站 c_i 的排队时间和充电时间; $\delta_{rs,k}^a$ 为判断路段 a 是否在 OD 对 (r, s) 间路径 k 上的 0-1 变量, 当路段 a 在路径 k 时, $\delta_{rs,k}^a = 1$, 否则 $\delta_{rs,k}^a = 0$; $\rho_{rs,k}^{c_i}$ 为判断充电站 c_i 是否在 OD 对 (r, s) 间路径 k 上的 0-1 变量, 当充电站 c_i 在路径 k 时, $\rho_{rs,k}^{c_i} = 1$, 否则 $\rho_{rs,k}^{c_i} = 0$; $\alpha^{rs,g}$ 和 $\beta^{rs,g}$ 分别为燃油汽车通过 OD 对 (r, s) 的行驶的时间价值 (34 元/h) 和能耗价值 (1.0 元/km); $\alpha^{rs,e}$ 、 $\beta^{rs,e}$ 和 $\gamma^{rs,e}$ 分别表示电动汽车通过 OD 对 (r, s) 的行驶的时间价值 (34 元/h)、能耗价值 (0.488 元/km) 和充电服务的时间价值 (34 元/h)。

车辆能耗计算如下:

$$H_a^{m,t} = h^m(\dot{v}_{a,t}) \cdot l_a. \quad (7)$$

其中: $\dot{v}_{a,t}$ 为 t 时刻车辆通过路段 a 的平均速度; l_a 为路段 a 的长度; $h^m(\dot{v}_{a,t})$ 为平均速度 $\dot{v}_{a,t}$ 下 m 类车辆的能耗因子。

电动汽车和燃油车基于平均速度的能耗因子分别计算如下^[19]:

$$h^e(\dot{v}_{a,t}) = 1.359/\dot{v}_{a,t} - 0.003\dot{v}_{a,t} + 2.981 \times 10^{-5}\dot{v}_{a,t}^2 + 0.218, \quad (8)$$

$$h^g(\dot{v}_{a,t}) = 125.015/\dot{v}_{a,t} - 0.097\dot{v}_{a,t} + 9.220 \times 10^{-4}\dot{v}_{a,t}^2 + 7.056. \quad (9)$$

3) 充电服务仿真。

基于排队论, 对有充电需求的电动汽车在充电站内的充电服务过程进行仿真。根据动态交通流随机用户分配模型, 得到各时段均衡状态下充电需求的分布, 并以此作为排队系统的输入。排队系统采用等待制, 同时遵循先入先出的规则。

本研究假设充电桩均为快充桩。服务时间指电池从当前剩余电量充至满电状态所需的时间。基于电池充电可接受电流定律, 充电时间计算如下:

$$t_{cc_i}^{e*} = 50 \ln [(1 - S_{c_i}^{e*}) / 0.9371 + 1]. \quad (10)$$

4) 多用户动态交通网络均衡分配模型。

构建基于链路传输的动态交通网络均衡分配以捕捉混合交通流时空分布规律。从驾驶员的角度出发, 目标函数为最小化的用户出行成本, 计算如下:

$$\min \sum_{rs} \sum_{k \in K_{rs}} \sum_{t \in T} (C_{g*} + C_{e*}). \quad (11)$$

在任意时刻路网中各路段流量变化守恒,考虑到电动汽车充电行为发生在服务区内,对路网交通状态不造成影响,表示如下:

$$X_a^t = X_a^{e,t} + X_a^{g,t}; \quad (12)$$

$$X_a^{g,t} = X_a^{g,t-1} + (u_a^{g,t} - v_a^{g,t})T/S'; \quad (13)$$

$$X_a^{e,t} = \begin{cases} X_a^{e,t-1} + (u_a^{e,t} - v_a^{e,t})T/S', & a \notin A_c; \\ X_a^{e,t-1} + (u_a^{e,t} - v_a^{e,t})T/S' + d_a^{t-1} - d_a^t, & a \in A_c. \end{cases} \quad (14)$$

其中: X_a^t 为 t 时刻路段 a 上车辆数; $X_a^{g,t}$ 和 $X_a^{e,t}$ 分别为 t 时刻路段 a 上燃油汽车和电动汽车的数量; $u_a^{g,t}$ 和 $u_a^{e,t}$ 分别为 t 时刻路段 a 上燃油汽车和电动汽车的流出率; $v_a^{g,t}$ 和 $v_a^{e,t}$ 分别为 t 时刻路段 a 上燃油汽车和电动汽车的流入率; A_c 表示充电设施所在路段的集合; d_a^t 为 t 时刻路段 a 上接受充电服务的车辆数,包括排队车辆和充电车辆。

节点流量守恒约束表示如下:

$$\sum_{a \in EE(n)} v_a^{m,t} = \sum_{s \in S} \sum_k f_{ns,k}^{m,t} + \sum_{a \in ES(n)} u_a^{m,t}. \quad (15)$$

其中: $EE(n)$ 和 $ES(n)$ 分别为以节点 n 为终点和起点的路段集合; $f_{ns,k}^{m,t}$ 为 t 时刻从起点 n 出发,选择路径 k 的 m 类型车辆新增流量; $u_a^{m,t}$ 和 $v_a^{m,t}$ 分别为 t 时刻路段 a 上 m 类型车辆的流出率和流入率。

流量传播约束计算如下:

$$\sum_{m \in M} v_a^{m,t+\tau_a^{m,t}} = \frac{\sum_{m \in M} u_a^{m,t}}{1 + (\tau_a^{m,t} - \tau_a^{m,t-1})/(T \cdot S^{-1})}; \quad (16)$$

$$\sum_{m \in M} v_a^{m,t+\tau_a^{m,t}} = \begin{cases} C_a, & \tau_a^{m,t} > t_a^m; \\ \sum_{m \in M} u_a^{m,t}, & \tau_a^{m,t} \leq t_a^m. \end{cases} \quad (17)$$

其中: $v_a^{m,t+\tau_a^{m,t}}$ 为 $t+\tau_a^{m,t}$ 时刻路段 a 上 m 类型车辆的流入率; $\tau_a^{m,t}$ 为 t 时刻 m 类型车辆行驶时间; C_a 为路段 a 的通行能力; t_a^m 为 t 时刻 m 类型车辆的通行能力。此外,还存在其他一般约束,初始化约束

$$X_a^{m,t} = 0. \quad (18)$$

路段流量守恒约束表示如下:

$$u_a^{m,t} = \sum_{rs} \sum_{k \in K_{rs}} u_{rs,k}^{m,t} \cdot \delta_{rs,k}^a, \quad (19)$$

$$v_a^{m,t} = \sum_{rs} \sum_{k \in K_{rs}} v_{rs,k}^{m,t} \cdot \delta_{rs,k}^a, \quad (20)$$

$$\sum_{k \in K_{rs}^m} u_{rs,k}^{m,t} = q_{rs}^{m,t}. \quad (21)$$

其中: $u_{rs,k}^{m,t}$ 和 $v_{rs,k}^{m,t}$ 分别为 t 时刻 OD 对 (r,s) 中选择

路径 k 的 m 类型车辆流出率和流入率; $q_{rs}^{m,t}$ 为 t 时刻 OD 对 (r,s) 中新增 m 类型流量。

非零约束表示如下:

$$u_a^{m,t} \geq 0, v_a^{m,t} \geq 0, \tau_a^{m,t} \geq 0. \quad (22)$$

2.2 上层模型

从投资运营商的角度出发,选址模型的优化目标为最小化的年平均充电设施建设成本 $c_{EVCS}^w(y)$ 、接电网成本 $c_{S2G}^w(y)$ 和运营维护成本 $c_{OPER}^w(y)$ 。同时,提出网络可达性和设施服务水平约束以保证用户的出行满意度。

1) 目标函数。

(1) 建设成本。充电设施建设成本 $c_{EVCS}^w(y)$ 由 2 部分组成:与建站数量有关的固定成本 $c_{fix}^w(y)$,由是否建站 $y_i^w(y)$ 决定;与设施容量有关的可变成本 $c_{var}^w(y)$,由充电桩数量和配电设备负荷共同决定。充电设施建设成本计算如下:

$$c_{EVCS}^w(y) = c_{fix}^w(y) + c_{var}^w(y) = \sum_{i \in \varphi} y_i^w(y) \cdot c_{cs} + \sum_{i \in \varphi} (p_i^w(y) \cdot c_{ch} + S_i^{ET,w}(y) \cdot c_{tr}), \quad (23)$$

$$S_i^{ET,w}(y) = \frac{p_i^w(y) \cdot K_{ch} \cdot P_{ch}}{L_{max} \cdot \alpha_{cs} \cdot \eta_{ch} \cdot \cos \varphi_{ch}}. \quad (24)$$

其中: $y_i^w(y)$ 为 w 阶段中判断服务区 i 在 y 方案下是否建站的 0-1 变量,若建站,则 $y_i^w(y)=1$,否则 $y_i^w(y)=0$; $p_i^w(y)$ 为 w 阶段中服务区 i 在 y 方案下充电桩的建设数量; $S_i^{ET,w}(y)$ 为 w 阶段中充电站 i 的变压器容量; c_{cs} 、 c_{ch} 、 c_{tr} 分别为单位充电设施建设费用(200 万元/个)、单位充电桩建设费用(5 万元/台)、单位容量配电设备成本(357.29 元/(kV·A)); K_{ch} 为充电同时率,0.7; P_{ch} 为快充桩额定输出功率,30 kW; L_{max} 为充电站日最大负载率,0.8; α_{cs} 为充电站内充电负荷与总负荷之比,0.85; η_{ch} 为充电桩工作效率,90%; $\cos \varphi_{ch}$ 为充电桩功率因数,0.95。

(2) 接电网成本。通过变电站接电网输送电能至城际公路网充电站,从而满足充电站的用能需求。根据充电站建设情况 $y_i^w(y)$ 和充电站与变电站距离 d_i 等因素,充电设施接电网成本表示如下:

$$c_{S2G}^w(y) = \sum_{i \in \varphi} y_i^w(y) \cdot c_{con} \cdot d_i \cdot K_{line}. \quad (25)$$

其中: c_{con} 为 10 kV 架空线路每 km 工程造价,20.01 万元/km; d_i 为站点 i 距离变电站的距离,1 km; K_{line} 为避免线路冗余投资的路线调整系数,0.2。

(3) 运营维护成本。充电站年运营维护成本 $c_{OPER}^w(y)$ 包括:用电成本 $c_{cs}^w(y)$,由充电设施平均工

作负荷 P_{cs}^{av} 和年总工作时间 $T_{cs,i}^{av,w}(y)$ 所决定,通过下层模型得到各站内年服务车辆的充电时间,如式(10);人力工作成本 $c_{hr}^w(y)$,与站点充电桩数量相关;设施维护管理成本 $c_m^w(y)$,与配电设备容量相关。充电站年运营维护成本计算如下:

$$c_{OPER}^w(y) = c_{cs}^w(y) + c_{hr}^w(y) + c_m^w(y) = c_p^* \cdot \sum_{i \in \varphi} y_i^w(y) \cdot P_{cs}^{av} \cdot T_{cs,i}^{av,w}(y) + \sum_{i \in \varphi} p_i^w(y) \cdot c_{hr}^0 + \sum_{i \in \varphi} S_i^{ET,w}(y) \cdot c_m^0, \quad (26)$$

$$T_{cs,i}^{av,w}(y) = \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K_{rs}^e(y)} f_{rs,k}^{e*,w}(y) \cdot t_{\alpha_i}^{e*,w}(y) \cdot \rho^{av}. \quad (27)$$

其中: c_p^* 为用电电价, 0.76 元/(kW·h); P_{cs}^{av} 为充电站配电设备平均负荷, 15 kW; $T_{cs,i}^{av,w}(y)$ 为 w 阶段中充电站 i 内年工作总时间; c_{hr}^0 为单位充电桩年平均人力成本, 1.2 万元; c_m^0 为单位变压器容量的年平均管理成本, 59.2 元/(kV·A); $f_{rs,k}^{e*,w}(y)$ 和 $t_{\alpha_i}^{e*,w}(y)$ 分别为 w 阶段 y 方案下电动汽车流量分配结果和车辆 e^* 充电时间; ρ^{av} 为日工作时间转换为年工作系数, 365 d。

综上, 设施选址模型的优化函数和资本回收系数分别表示如下:

$$\min_y [\varepsilon \cdot (c_{EVCS}^w(y) + c_{S2G}^w(y)) + c_{OPER}^w(y)], \quad (28)$$

$$\varepsilon = \frac{\mu \cdot (1 + \mu)^s}{(1 + \mu)^s - 1}. \quad (29)$$

其中: ε 为资本回收系数; μ 为利率, 6.8%; s 为资本回收期限, 10 a。

2) 约束条件。

(1) 在正向建设时序中, 充电设施的布局需建立在上一阶段城际公路充电网络规划之上; 上一阶段建设的充电站仍需保留; 同时, 对应的充电桩数不得低于上一阶段数量。正向建设时序约束表示如下:

$$y_i^w \in \begin{cases} \{0, 1\}, & \forall i \in \varphi, w = 1; \\ \{1\}, & \forall i \in Y^{w-1}, w \in \{2, 3, \dots, w^*\}; \\ \{0, 1\}, & \forall i \in C_\varphi Y^{w-1}, w \in \{2, 3, \dots, w^*\}. \end{cases} \quad (30)$$

$$p_i^w = \begin{cases} y_i^w \cdot p_{\min} \leq p_i^w \leq y_i^w \cdot p_{\max}, & \forall i \in \varphi, w = 1; \\ y_i^w \cdot p_i^{w-1} \leq p_i^w \leq y_i^w \cdot p_{\max}, & \forall i \in Y^{w-1}, w \in \{2, 3, \dots, w^*\}; \\ y_i^w \cdot p_{\min} \leq p_i^w \leq y_i^w \cdot p_{\max}, & \forall i \in C_\varphi Y^{w-1}, w \in \{2, 3, \dots, w^*\}. \end{cases} \quad (31)$$

其中: y_i^w 为在 w 阶段判断服务区是否建站的 0-1 变量, 若建站, 则 $y_i^w = 1$, 否则 $y_i^w = 0$; p_i^w 为 w 阶段服务区 i 内充电桩的建设数量; p_{\min} 和 p_{\max} 分别为充电桩的最小建设数量(4 个)和最大建设数量(15 个)。

(2) 在逆向建设时序中, 充电设施的布局需满足下一阶段的充电网络规划的约束; 当前阶段下, 充电站备选集为下一阶段的充电站建设集合; 同时, 对应的充电桩数不得高于下一阶段数量。逆向建设时序约束表示如下:

$$y_i^w \in \begin{cases} \{0, 1\}, & \forall i \in \varphi, w = w^*; \\ \{0, 1\}, & \forall i \in Y^{w+1}, w \in \{1, 2, \dots, w^* - 1\}. \end{cases} \quad (32)$$

$$p_i^w = \begin{cases} y_i^w \cdot p_{\min} \leq p_i^w \leq y_i^w \cdot p_{\max}, & \forall i \in \varphi, w = w^*; \\ y_i^w \cdot p_{\min} \leq p_i^w \leq y_i^w \cdot p_i^{w+1}, & \forall i \in Y^{w+1}, w \in \{1, 2, \dots, w^* - 1\}. \end{cases} \quad (33)$$

(3) 为保障电动汽车用户出行满意度和设施服务水平, 对各站内充电车辆的平均等待时间进行约束。设施服务水平约束表示如下:

$$t_{c_i, wait}^w(y) \leq T_{wait}^w, \quad \forall c_i \in \{c_1, c_2, \dots, c_n\}, w \in \{1, 2, \dots, w^*\}. \quad (34)$$

其中: $t_{c_i, wait}^w$ 为 w 阶段充电站 c_i 内车辆平均等待时间; T_{wait}^w 为站内车辆等待时间阈值, 5 min。

(4) 为保证充电站网络布局的合理性, 提出电动汽车城际出行可达性约束。在极端的情况下(车辆 SOC 为 0), 要求任意 OD 对(r, s)间电动汽车可选择全体路径 K_{rs}^g 中的任意路径 k 完成出行。网络可达性约束表示如下:

$$\psi_{c_i}^{e*} = \begin{cases} 1, & S_{c_i}^{e*} > 0, S_s^{e*} > 0; \\ 0, & \text{其他}; \end{cases} \quad c_i \in \{c_1, c_2, \dots, c_n\}. \quad (35)$$

$$\sum_{c_i \in \{c_1, c_2, \dots, c_n\}} \psi_{c_i}^{e*} \geq 1, \quad \forall r \in O, s \in D, k \in K_{rs}^g. \quad (36)$$

其中: $\psi_{c_i}^{e*}$ 为判断路径 k 中选择充电站 c_i 是否可达的 0-1 变量, 当路径 k 选择 c_i 充电可达时, $\psi_{c_i}^{e*} = 1$, 否则 $\psi_{c_i}^{e*} = 0$ 。

2.3 求解算法

1) 动态交通网络分配。

为快速收敛得到随机用户均衡条件下的充电需

求分布,研究设计了基于迭代加权法的动态交通仿真算法(见图3)。通过预先给定的最大迭代次数和误差限值,连续调整网络流量分配,网络最终达到随机用户均衡状态^[20]。

步骤1 构建多用户有效路径集合,循环: $t \in T$ 。

步骤2 根据上一时刻 $t-1$ 的路网和充电设施状态更新各路径广义出行费用和选择概率,并对交通流进行动态推演,依次为新增流量分配、流量传输、排队充电,设置迭代次数 $n=1$ 。

步骤3 根据上一次迭代后的流量分布 $\{X_a^{t,n}\}$ 、网络中充电施工况、路段负荷以及车辆状态,重新计算燃油车和电动汽车的各路径广义出行费用和选择概率。

步骤4 交通流进行动态推演,最终得到附加流量分布结果 $\{Y_a^{t,n}\}$ 。

步骤5 采用迭代加权方法计算本次迭代后的路网流量分布 $\{X_a^{t,n+1}\}$,计算如下:

$$X_a^{t,n+1} = X_a^{t,n} + \lambda^n \cdot (Y_a^{t,n} - X_a^{t,n}), \quad (37)$$

$$\lambda^n = n / (1 + 2 + 3 + \dots + n). \quad (38)$$

步骤6 收敛检验,首先计算 $X_a^{t,n+1}$ 和 $X_a^{t,n}$ 的差值,若gap小于预设误差限值 ϵ ,则得到当前时刻的均衡解;否则,令 $n=n+1$,返回步骤2。gap计算如下:

$$\text{gap} = \sqrt{\sum_{a \in A} (X_a^{t,n+1} - X_a^{t,n})^2 / (\sum_{a \in A} (X_a^{t,n}))}. \quad (39)$$

图3 基于迭代加权法的动态交通仿真算法

2) 遗传算法。

本研究所提出的双层布局优化模型是一个 NP-hard 问题。作为启发式算法之一,基于进化论的遗传算法可以有效找到近似的全局最优解。因此,为满足建设时序约束、设施服务水平约束和网络可达性约束,本研究对传统遗传算法进行改进,具体见图4。

染色体为二维矩阵,包含2个决策变量:一是建站;哑元变量,1表示该服务区建设充电站,否则为0;二是充电桩数量,若建站,则该站内充电桩数在 $[p_{\min}, p_{\max}]$ 内选择,算法如图5所示。

步骤1 生成初始种群。基于上一/下一阶段的建设布局 and 高速公路服务区分布情况,分别生成满足正向建设时序和逆向建设时序的初始种群。

步骤2 种群适应度计算。判断种群是否满足服务水平约束和网络可达性约束,作为表征个体优劣程度的指标,若满足,适应度函数选取为目标函数的倒数,否则为无限大惩罚值 M 的倒数。

步骤3 选择过程。采用轮盘赌算法进行种群选择。

步骤4 交叉过程。采用单点交叉进行染色体交叉,从而保证解的可行性。

步骤5 变异过程。针对正向建设时序和逆向建设时序,分别提出采用满足建设时序约束的单点变异规则。

图4 考虑建设时序约束的遗传算法

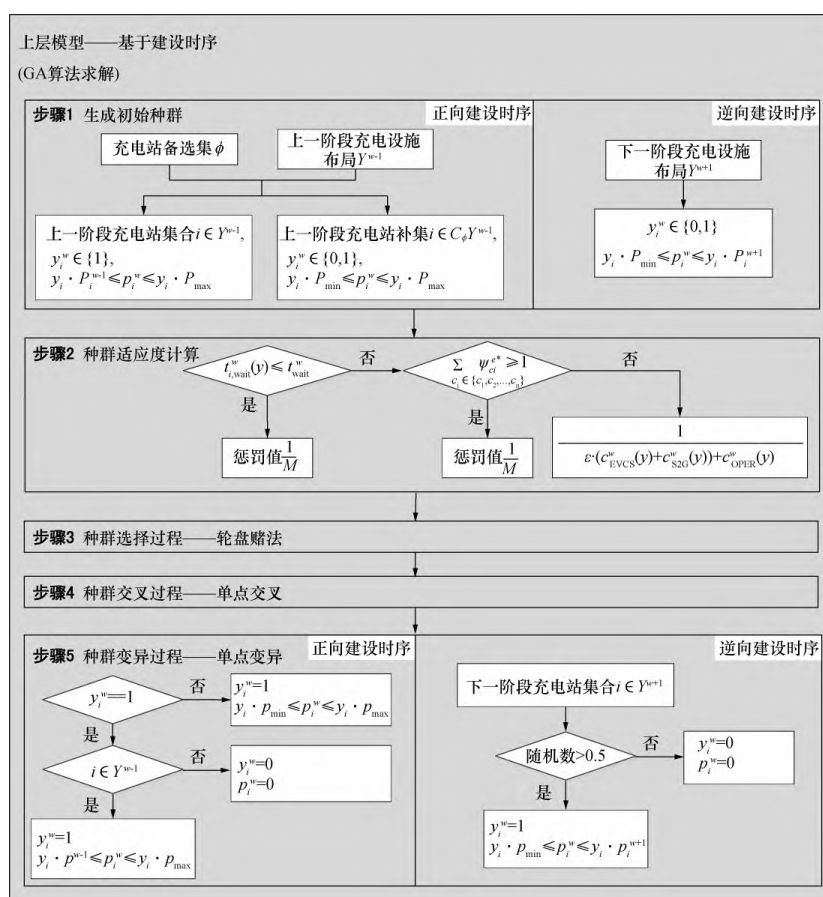


图5 遗传算法

3 算例分析

3.1 算例介绍

选取济南到青岛的高速路网作为研究实例,如图6所示,网络全长1137 km,包含66个节

点、69个路段、864个OD对和23个服务区。以15 min为仿真步长,选取2012年10月19日全天的交通流量为研究对象,OD总量为91 057 pcu,pcu代表标准车当量数。

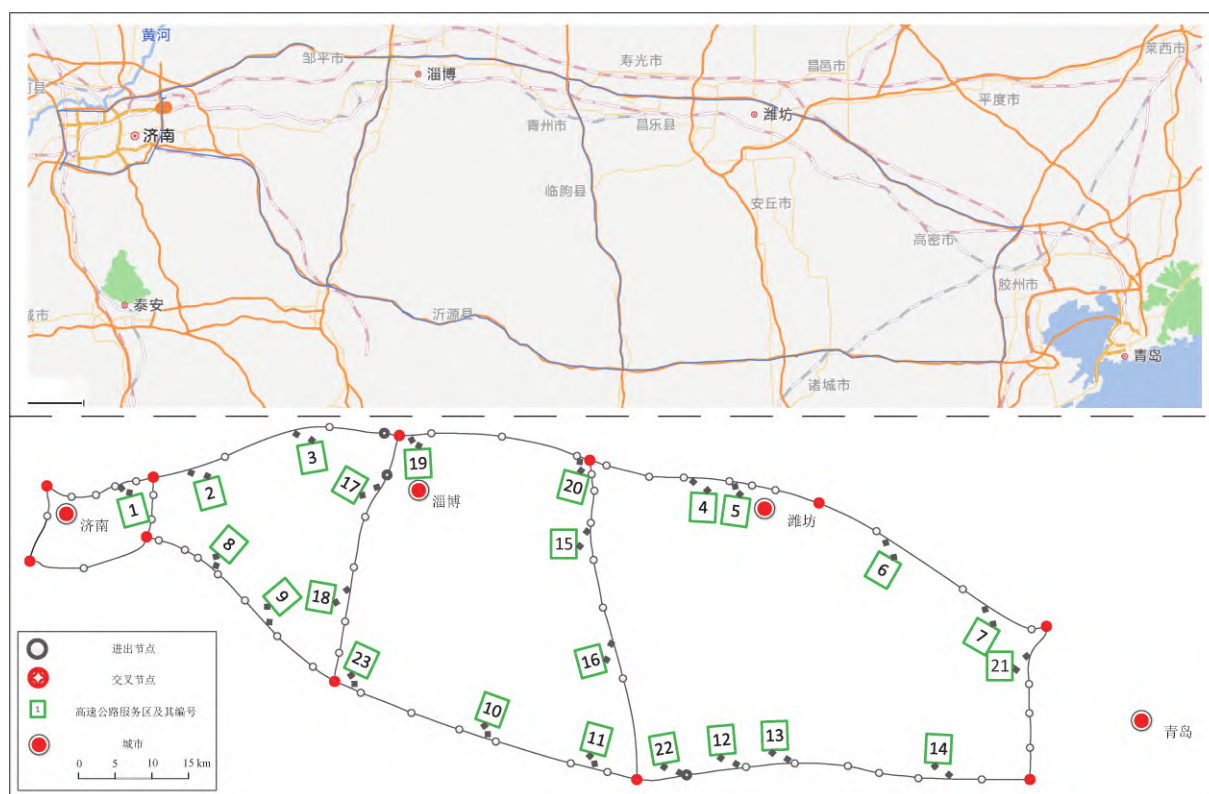


图6 山东省局域路网

以2020年为基准年,对规划年内私家车保有量以及电动汽车占有率进行估计,设计2025、2030和2035年3个规划年场景,具体如表1所示。

表1 2020—2035年规划场景

年份	私家车 增长率/ (%·a ⁻¹)	私家车保 有量/万辆	EV保有 量/万辆	EV占有 率/%
基准年 2020	—	24 285*	492*	2
规划年 1 2025	7***	34 212	2 500**	7
规划年 2 2030	5***	43 664	8 000**	18
规划年 3 2035	3***	50 619	16 000**	32

注: * 统计数据,源自国家统计局;

** 官方规划年的预测数据;

*** 根据近10年私家车增长率变化规律进行预测的数据。

3.2 2035年布局预测

以逆向建设时序下2035年充电网络布局为例,

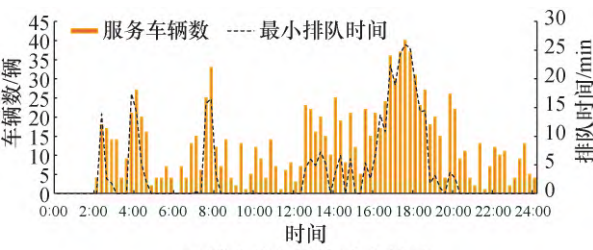
对网络服务水平及运行状态进行监测和评价,网络空间分布如图7所示,具体建设情况如表2所示,共建设7个充电站和64个充电桩。

1) 能耗时空特征分析。

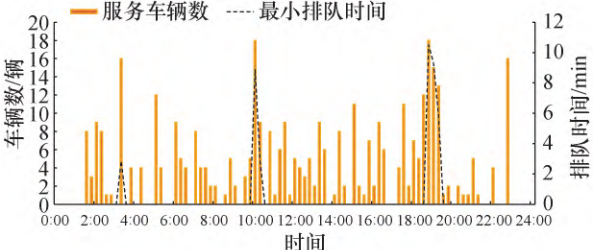
充电车辆到达和系统内服务车辆变化如图8a和8b所示。充电需求高峰时段为12:00—20:00,其中,16:15—19:15时段充电系统内产生一定程度的排队拥堵现象,充电和排队的车辆数超过64辆,超过了充电桩的建设数量。电动汽车离开路网时的SOC以及具有充电需求的电动汽车充电时SOC分布如图8c和8d所示。为缓解长距离出行带来的里程焦虑,75%的电动汽车离开路网时SOC高于70%。具有充电需求的电动汽车用户在车辆SOC大于40%时选择充电,其中77%的用户选择在SOC为50%~70%时进行充电。

表 2 充电设施网络状态评价体系

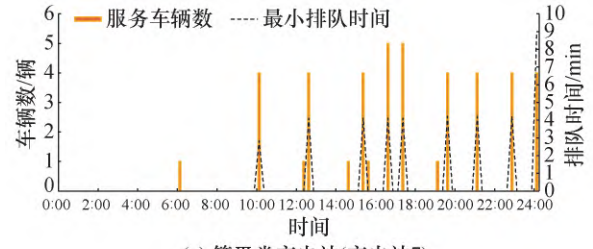
指标		充电站编号							系统整体
		Ⅰ类		Ⅱ类		Ⅲ类		Ⅳ类	
		10	16	3	18	7	9	21	
建设情况	充电桩数量/个	15	14	13	6	4	4	8	64
需求侧	服务车辆数/pcu	797	629	443	168	43	52	93	2 225
	能耗需求量/(kW·h)	30 758	27 029	12 529	6 411	1 417	1 644	3 209	82 997
供给侧	平均充电时间/min	16.66	18.23	12.72	16.49	14.56	14.07	15.15	16.14
	平均等待时间/min	4.79	5.00	1.06	1.32	0.56	0.33	2.91	3.58
	队长/pcu	12.45	10.54	3.95	1.97	0.45	0.54	1.14	31.03
	利用率/%	61	57	30	32	11	13	12	39



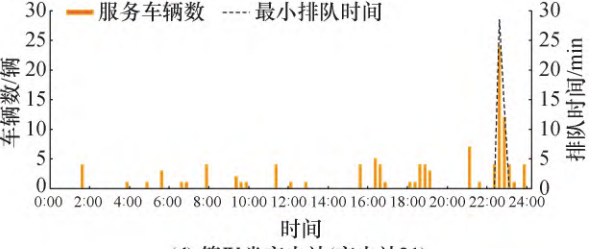
(a) 第Ⅰ类充电站(充电站10)



(b) 第Ⅱ类充电站(充电站3)



(c) 第Ⅲ类充电站(充电站7)



(d) 第Ⅳ类充电站(充电站21)

图 9 充电站实时运行状态

站点用电高峰时段,系统连续处于满负荷工作状态,最长等待时间达到 25.97 min,服务水平相对较低。

第Ⅱ类为中服务能力-中负荷-高服务水平的充电站。如图 9b 所示,这类充电站位于网络中较为关键的路段,服务能力较高。站 3 设有 13 个充电桩,共服务 443 辆电动汽车,设施利用率为 3%,平均等待时间为 1.06 min,表明系统在提供较高服务能力和服务水平的同时,系统处于合理的工作负荷下。这类站点能耗需求不如第Ⅰ类站点,但服务水平和工作负荷更为合理。通过提升该类充电站的服务能力,可以分担第Ⅰ类充电站的充电需求,同时提升充电网络的整体利用率。

第Ⅲ类为低服务能力-低负荷-高服务水平的充电站。如图 9c 所示,这类充电站多为初建充电站,服务能力较低,服务车辆数和系统利用率较低,服

务水平高。通过建设该类型充电站,可以有效提升电动汽车用户的出行范围。

第Ⅳ类为中服务能力-低负荷-低服务水平的充电站。如图 9d 所示,该类充电站特点为工作负荷与服务水平不匹配。尽管设有 8 个充电桩,但由于充电需求分布不均匀导致该站点工作负荷集中在晚上 21:00—24:00,全天仅充电 93 辆电动汽车的情况下,用户平均充电时间达到 2.91 min,服务水平较低。需通过政策引导来调整充电需求时空分布,从而提升该类站点的服务水平,提高设施利用率。

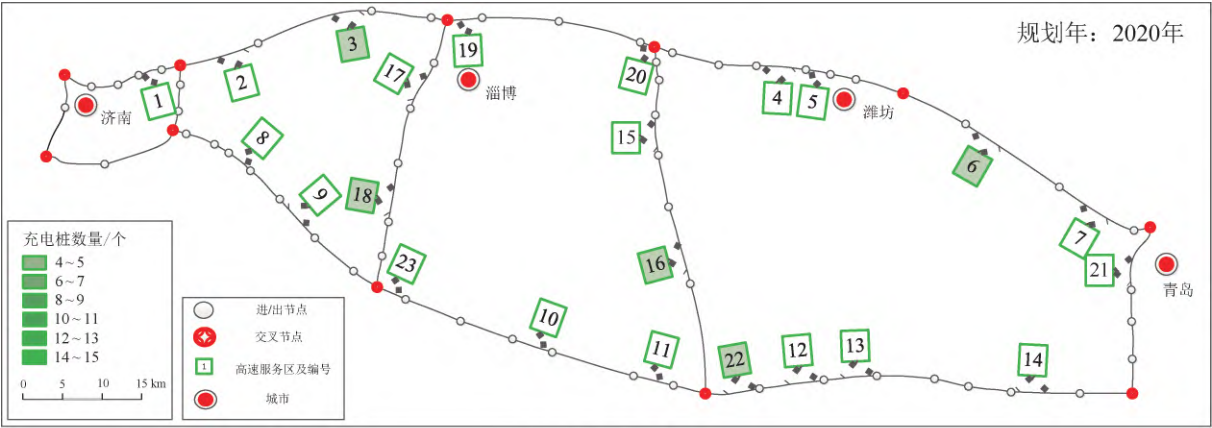
3.3 设施动态布局研究

1) 建设规模与投资成本。

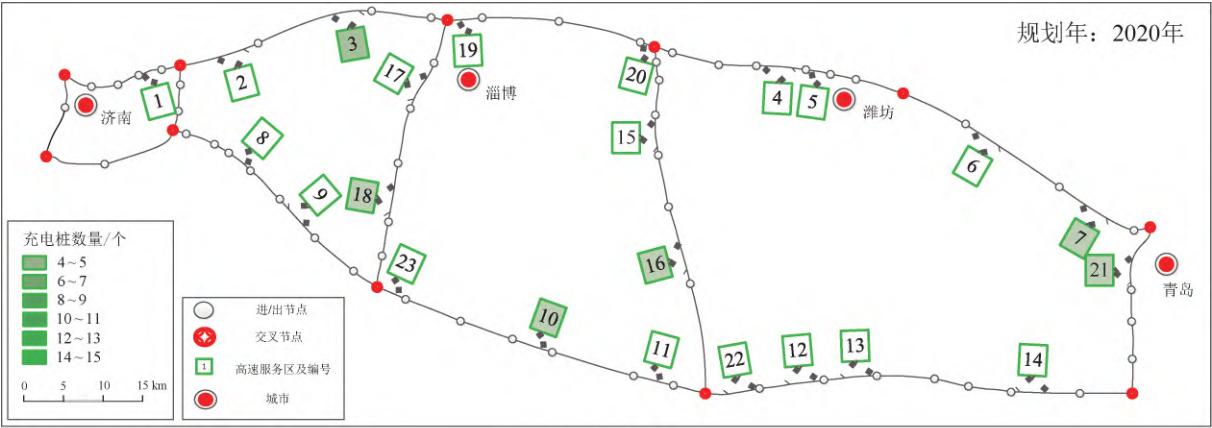
分别从正向和逆向建设时序对高速充电网络布局进行优化,建设规模如表 3 和图 10 所示,投资成本如图 11 所示。

表 3 不同建设时序下高速充电网络建设情况

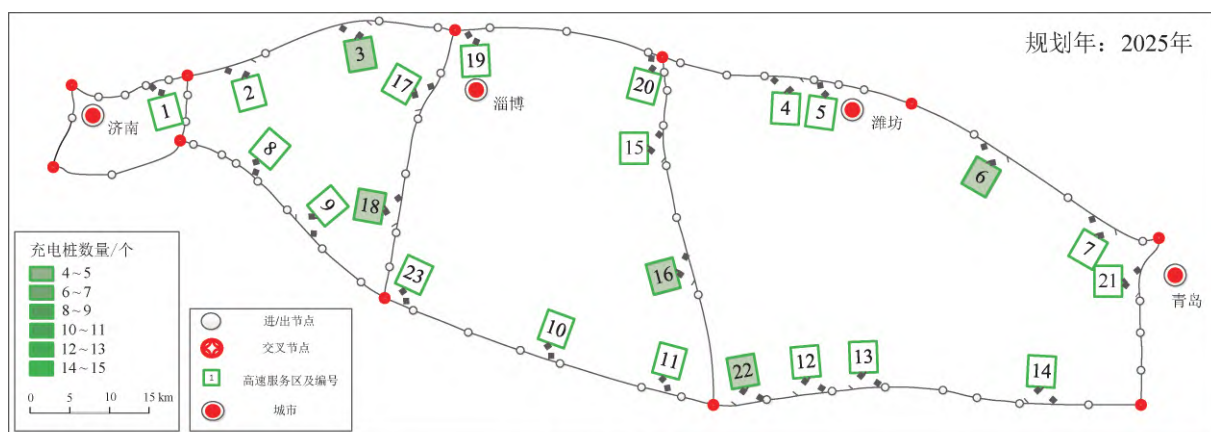
规划年	服务区编号																							充电站 总数/个	充电桩 总数/个
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23		
正向建设时序																									
2020	—	—	4	—	—	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	—	4	—	—	—	4	—	5	20
2025	—	—	4	—	—	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	—	4	—	—	—	4	—	5	20
2030	—	—	6	—	—	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7	—	4	—	—	—	8	9	6	39
2035	—	—	10	—	—	10	—	—	6	15	—	—	—	—	—	7	—	12	—	—	—	15	12	8	87
逆向建设时序																									
2020	—	—	4	—	—	—	4	—	—	4	—	—	—	—	—	4	—	4	—	—	4	—	—	6	24
2025	—	—	4	—	—	—	4	—	—	4	—	—	—	—	—	4	—	4	—	—	4	—	—	6	24
2030	—	—	7	—	—	—	4	—	—	8	—	—	—	—	—	10	—	4	—	—	4	—	—	6	37
2035	—	—	13	—	—	—	4	—	4	15	—	—	—	—	—	14	—	6	—	—	8	—	—	7	64



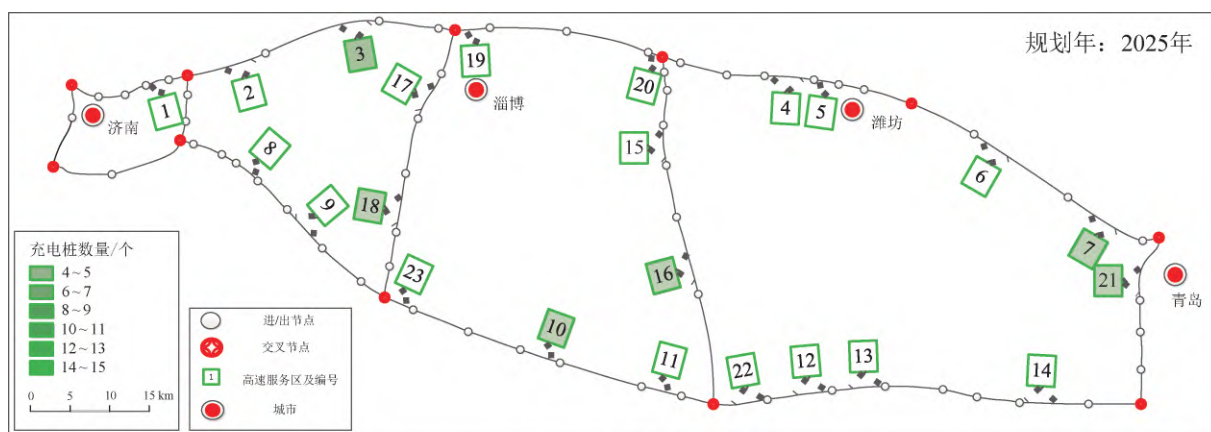
(a) 2020年正向布局



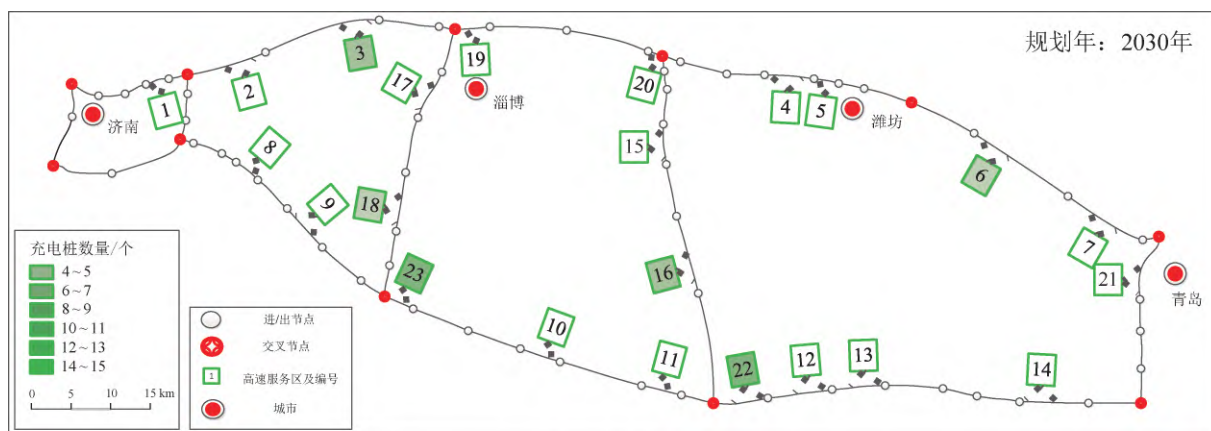
(b) 2020年逆向布局



(c) 2025年正向布局



(d) 2025年逆向布局



(e) 2030年正向布局

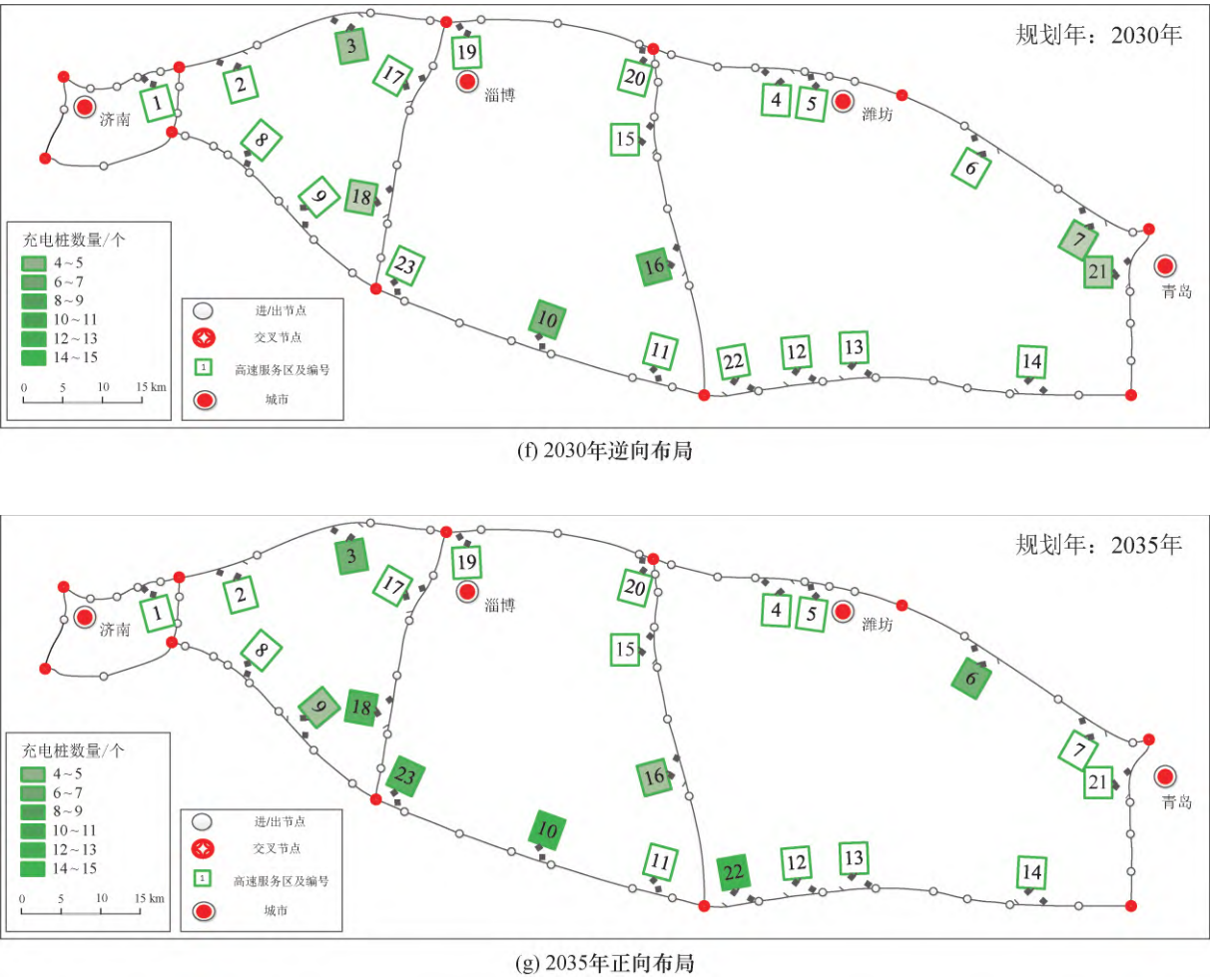


图 10 不同建设时序下高速充电网络布局

在规划初期(2020—2025 年),高速充电网络建设布局保持不变,且正向布局规模和投资成本均小于逆向布局。随着电动汽车保有量的进一步增加,网络布局规模和投资成本不断增加。到 2035 年,正向布局中建设有 8 个充电站和 87 个充电桩,大于逆向布局规模(7 个充电站,64 个充电桩),且正向布局投资成本超过逆向布局,其中运行维护成本占投资成本的比重达到 98%。在 2035 年,无论正向或逆向建设时序,节点 3、9、10、16、18 均建设有充电站,表明建设时序的改变对充电网络中的关键节点的远期建设影响相对较小。

整体来看,在同一服务水平约束下,长期的网络布局应考虑未来年能耗需求,采用逆向建设时序进行合理规划。

2) 网络服务水平。

进一步,对比分析各充电网络下系统服务水

平,如表 4 所示。在规划初期(2020—2025 年),系统内服务车辆数远小于服务能力,平均排队时间小于 0.5 min,服务水平高,设施利用率低,设施布局规模不变,设施分布较为分散,注重于电动汽车用户出行活动范围的覆盖。而随着充电需求的增加,网络规模不断增加,系统服务能力和利用率均提升,服务水平保持在较高水平。2035 年,配置更大的充电网络规模,正向布局下系统服务车辆数达 3 517 辆,能耗达到 124 434 kW·h,远高于逆向布局。对于电动汽车高速公路出行,应鼓励用户在起讫点进行慢充,减少在高速途中充电的需求。综上,对于不同建设时段下高速公路充电网络布局规划,应从逆向建设时序出发,在满足电动汽车用户远距离出行需求的基础上,合理引导电动汽车进行途中快充和起讫点慢充。

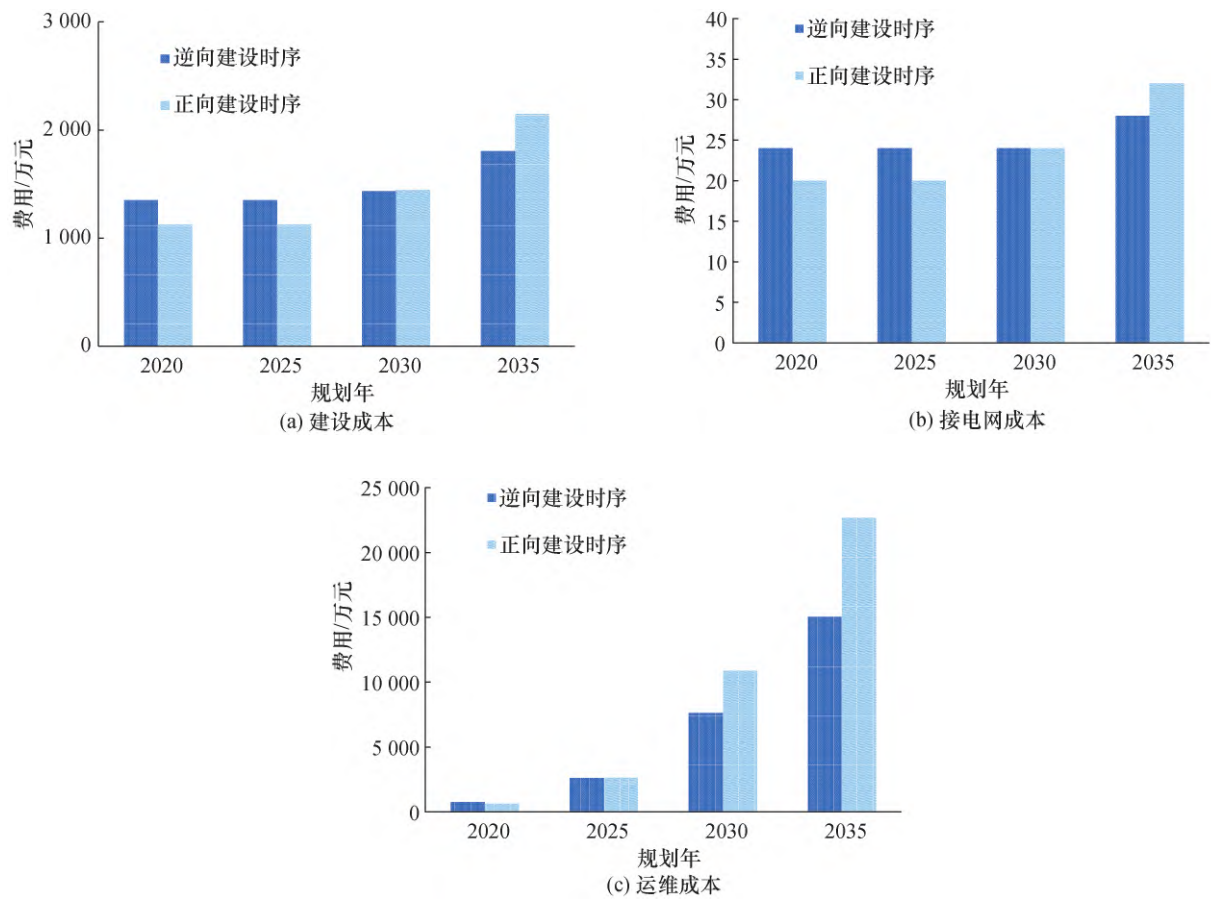


图 11 投资成本变化图

表 4 不同建设时序下高速充电网络服务水平

指标		逆向建设时序				正向建设时序			
		2020 年	2025 年	2030 年	2035 年	2020 年	2025 年	2030 年	2035 年
需求侧	服务车辆数/pcu	105	390	1 139	2 225	91	385	1 704	3 517
	充电需求量/(kW·h)	3 958	14 352	41 955	82 996	3 309	14 591	59 830	124 434
	平均充电时间/min	16.26	15.94	15.96	16.14	15.77	16.34	15.29	15.41
供给侧	平均等待时间/min	0.00	0.45	2.31	3.58	0.00	0.28	3.41	3.06
	队长/pcu	1.16	4.59	8.47	31.03	1.07	4.51	22.27	43.96
	利用率/%	5	18	38	39	5	22	46	43

4 结 论

通过剖析电动汽车在城际路网的途中充电需求,基于动态交通流均衡模型对多用户的路径选择、充电服务和流量传输过程进行仿真,实现用户充电偏好、路网拥堵状态和设施工况之间的信息动态交互,从而准确估计城市群尺度下的电动汽车能耗时空分布。

考虑动态的充电需求和建设时序,提出一种面向城市群内城际公路充电基础设施布局的双层优化

模型,分别对正向和逆向建设时序下充电站位置和充电桩数量进行动态布局规划。以电动汽车网络可达性和设施服务水平约束,在上层构建以设施投资建设和运维成本最小为目标的充电设施布局模型;下层构建基于仿真的动态交通流分配模型,得到随机动态用户均衡条件下的实时充电需求和设施工况。

选取山东半岛城市群中济南与青岛的高速公路网络作为实际案例,讨论 2020—2035 年城际公路服务区充电设施资源配置方案,为城市群内城

际公路中电动汽车充电需求时空估计和充电设施配置优化提供理论支撑。结果表明,针对高速公路充电网络布局长期动态规划,应采用逆向建设时序,合理引导电动汽车途中快充和起讫点慢充需求分布。

下一步将考虑多维度下的优化目标,如运营商、政府、驾驶员多主体之间的目标博弈等;将电网安全性等约束纳入下层交通流分配模型中,开展电网与交通网下的多网络耦合研究。

参考文献 (References)

- [1] China Daily. China's vehicles in numbers [EB/OL]. (2021-04-11)[2022-05-10]. <https://global.chinadaily.com.cn/a/202204/11/WS6253ce1b1a310fd2b29e56419.html>.
- [2] Min News. Embarrassment; Charge for one hour, queue for four hours [EB/OL]. (2022-04-13)[2022-05-10]. <https://min.news/en/digital/279f868e061b1445de96b00113d54ce1.html>.
- [3] China Daily. EV drivers queue to recharge during holiday [EB/OL]. (2021-10-11)[2022-05-10]. <https://global.chinadaily.com.cn/a/202110/11/WS61639f31a310cdd39bc6e0b7.html>.
- [4] 郭创新, 刘洞宇, 朱承治, 等. 电动汽车居民区充电负荷建模分析 [J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 1-9.
GUO C X, LIU D Y, ZHU C Z, et al. Modeling and analysis of electric vehicle charging load in residential area [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 1-9. (in Chinese)
- [5] HU D D, ZHANG J S, ZHANG Q. Optimization design of electric vehicle charging stations based on the forecasting data with service balance consideration [J]. Applied Soft Computing, 2019, 75: 215-226.
- [6] ZENG M, PAN Y F, ZHANG D Y, et al. Data-driven location selection for battery swapping stations [J]. IEEE Access, 2019, 7: 133760-133771.
- [7] LI S Y, HUANG Y X, MASON S J. A multi-period optimization model for the deployment of public electric vehicle charging stations on network [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 65: 128-143.
- [8] 曹小曙, 胡培婷, 刘丹. 电动汽车充电站选址研究进展 [J]. 地理科学进展, 2019, 38(1): 139-152.
CAO X S, HU P T, LIU D. Progress of research on electric vehicle charging stations [J]. Progress in Geography, 2019, 38(1): 139-152. (in Chinese)
- [9] LIU Z C, SONG Z Q. Network user equilibrium of battery electric vehicles considering flow-dependent electricity consumption [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 95: 516-544.
- [10] HE J, YANG H, TANG T Q, et al. An optimal charging station location model with the consideration of electric vehicle's driving range [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 86: 641-654.
- [11] 邹宁, 姚恩建, 杨扬, 等. 电动汽车混入条件下随机动态用户均衡分配模型 [J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(5): 150-161.
HUAN N, YAO E J, YANG Y, et al. Stochastic dynamic user equilibrium assignment model considering penetration of electric vehicles [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(5): 150-161. (in Chinese)
- [12] 张美霞, 蔡雅慧, 杨秀, 等. 考虑用户充电差异性的家用电动汽车充电需求分布分析方法 [J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 154-161.
ZHANG M X, CAI Y H, YANG X, et al. Charging demand distribution analysis method of household electric vehicles considering users' charging difference [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 154-161. (in Chinese)
- [13] 贾龙, 胡泽春, 宋永华. 考虑不同类型充电需求的城市内电动汽车充电设施综合规划 [J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2579-2587.
JIA L, HU Z C, SONG Y H. An integrated planning of electric vehicle charging facilities for urban area considering different types of charging demands [J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2579-2587. (in Chinese)
- [14] XIE F, LIU C Z, LI S Y, et al. Long-term strategic planning of inter-city fast charging infrastructure for battery electric vehicles [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2018, 109: 261-276.
- [15] 李浩, 陈浩, 陆续, 等. 考虑排放约束的电动汽车混行交通路网均衡模型 [J]. 交通运输工程与信息学报, 2021, 19(4): 24-35, 117.
LI H, CHEN H, LU X, et al. Mixed traffic network equilibrium with battery electric vehicles considering emission constraints [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2021, 19(4): 24-35, 117. (in Chinese)
- [16] 袁胜强, 曾小清, 张伟略, 等. 城市快速路建设时机的决策模型与准则 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(9): 1294-1301.
YUAN S Q, ZENG X Q, ZHANG W L, et al. Decision model and criteria of urban expressway construction timing [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(9): 1294-1301. (in Chinese)

(下转第 1219 页)

- ZHANG Z H, SHEN L Y, SCOTT D. Promoting urbanization towards sustainable development [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2000, 40(S1): 1-6. (in Chinese)
- [6] 张强,周晓津. 我国大城市人口规模估算与调控路径选择 [J]. 西部论坛, 2014, 24(2): 1-16.
- ZHANG Q, ZHOU X J. Population size estimation and regulation path for China's big cities [J]. West Forum, 2014, 24(2): 1-16. (in Chinese)
- [7] 童玉芬. 中国特大城市的人口调控: 理论分析与思考 [J]. 人口研究, 2018, 42(4): 3-13.
- TONG Y F. Population control in China's mega cities: Theoretical analysis and reflection [J]. Population Research, 2018, 42(4): 3-13. (in Chinese)
- [8] 王若丞,蔡林,陈卫. 北京市人口调控的模拟分析 [J]. 人口学刊, 2018, 40(5): 28-37.
- WANG R C, CAI L, CHEN W. Assessment of population control policy in Beijing: A simulation analysis [J]. Population Journal, 2018, 40(5): 28-37. (in Chinese)
- [9] 冯永恒,赵鹏军,伍毅敏,等. 基于手机信令数据的大城市功能疏解的人口流动影响: 以北京动物园批发市场为例 [J]. 城市发展研究, 2020, 27(12): 38-44.
- FENG Y H, ZHAO P J, WU Y M, et al. Assessing the impact of function dispersion in big cities on population relocation using mobile phone data: A case study of the Zoo Wholesale Market in Beijing [J]. Urban Development Studies, 2020, 27(12): 38-44. (in Chinese)
- [10] ANAS A, RHEE H J. Curbing excess sprawl with congestion tolls and urban boundaries [J]. Regional Science and Urban Economics, 2006, 36(4): 510-541.
- [11] OGURA L M. Urban growth controls and intercity commuting [J]. Journal of Urban Economics, 2005, 57(3): 371-390.
- [12] BORCK R, WREDE M. Subsidies for intracity and intercity commuting [J]. Journal of Urban Economics, 2009, 66(1): 25-32.
- [13] MURATA Y, THISSE J F. A simple model of economic geography à la Helpman-Tabuchi [J]. Journal of Urban Economics, 2005, 58(1): 137-155.
- [14] LI Z C, MA J C. Investing in inter-city and/or intra-city rail lines? A general equilibrium analysis for a two-city system [J]. Transport Policy, 2021, 108: 59-82.
- [15] XU S X, LIU T L, HUANG H J, et al. Mode choice and railway subsidy in a congested monocentric city with endogenous population distribution [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2018, 116: 413-433.

(责任编辑 金延秋)

(上接第 1177 页)

- [17] 程林,张靖,黄仁乐,等. 基于多能互补的综合能源系统多场景规划案例分析 [J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 282-287.
- CHENG L, ZHANG J, HUANG R L, et al. Case analysis of multi-scenario planning based on multi-energy complementation for integrated energy system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 282-287. (in Chinese)
- [18] 陈昌铭,张群,黄亦昕,等. 考虑最优建设时序和云储能的园区综合能源系统优化配置方法 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(2): 24-32.
- CHEN C M, ZHANG Q, HUANG Y X, et al. Optimal configuration method of park-level integrated energy system considering optimal construction time sequence and cloud energy storage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(2): 24-32. (in Chinese)
- [19] 杨扬,姚恩建,王梅英,等. 电动汽车混入条件下的随机用户均衡分配模型 [J]. 中国公路学报, 2015, 28(9): 91-97.
- YANG Y, YAO E J, WANG M Y, et al. Stochastic user equilibrium assignment model for electric vehicle under hybrid traffic condition [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(9): 91-97. (in Chinese)
- [20] 叶露,郭倩芸,倪舒晨,等. 混合交通网络充电站选址模型 [J]. 交通运输工程与信息学报, 2019, 17(4): 97-104.
- YE L, GUO Q Y, NI S C, et al. Charging station location model for mixed traffic network [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2019, 17(4): 97-104. (in Chinese)

(责任编辑 金延秋)