

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.06.006

考虑路网耦合下的低温电动汽车充电站规划

杨锡运, 朱江, 赵泽宇, 张启亮

(华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206)

摘要:为提高电动汽车充电站在低温环境下的适应性,并缓解配电网和路网压力,文中提出一种针对低温地区的充电站规划模型。基于动力电池的衰减机理,建立低温下电动汽车电池容量和能耗模型,以更准确地模拟电动汽车行驶状态。结合电动汽车在低温下的行驶、充电及用户决策特性,采用蒙特卡洛抽样方法模拟不同类型车辆充电需求的时空分布。进一步,采用混合制排队论,考虑低温对充电效率的影响,引入均衡函数以实现社会成本最小化,从而确定充电站的最优选址和容量配置方案。仿真分析表明,所提模型能够基于低温地区特点,综合权衡路网、配电网和用户利益,合理规划低温地区电动汽车充电站布局,从而提高充电服务满意度,降低低温环境下整体成本,增强所提模型在实际应用的可行性。

关键词:电动汽车;充电站规划;低温容量衰减;路网;充电需求;蒙特卡洛模拟

中图分类号:TM910.6;U491.8

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2025)06-0062-11

0 引言

随着电动汽车和电池技术的发展,2023年中国新增充电基础设施338.6万台,同比增长30.6%;新能源汽车销量达到829.2万辆,同比增长33.5%,车桩比为1:2.4。其中,新增公共充电设施92.9万台,占比27.4%。然而,公共充电设施在不同地区的供需分布不均,尤其在高峰时段资源紧张^[1-4]。北方寒冷地区冬季白天气温可降至-20℃,低温显著影响电池容量和续航,增加了充电需求。因此,合理配置低温地区的充电设施成为关键问题。

在电动汽车充电负荷预测方面,文献[5]利用蒙特卡洛采样方法模拟不同续航焦虑下的充电需求,缓解用户焦虑并满足充电需求;文献[6]基于分层充电决策模型,结合模糊系统理论,通过模糊推理分析用户充电行为,估算区域充电需求;文献[7]采用Voronoi图划分服务区域,识别快充站潜在需求热点,刻画充电需求的时空分布特征。然而,上述研究未考虑低温条件下电池容量衰减对充电需求分布的影响。文献[8]基于路网和出行链理论建立了充电需求的时空模型,为充电站布局优化提供了理论支持。

充电站选址规划需要综合考虑负荷分布、交通路网和配电网等因素^[9-13]。文献[14]基于交通流量不确定性,采用随机截流选址模型(stochastic flow-capturing location model, SFCLM)进行加氢站选址;文献[15]构建多目标优化模型,以最小化高速公路

充电站的投资和等待时间为目标,采用快速非支配排序遗传算法(genetic algorithm, GA)优化选址;文献[16-19]进一步阐述路网和电网耦合建模方法。尽管已有研究引入了路网耦合机制,但大多未统筹考虑路网、电网与用户三方利益,且忽略了低温环境下充电需求变化对选址规划的影响。

在低温地区的充电站规划方面,影响电动汽车低温续航的关键因素包括车内加热需求^[20]和锂离子电池的低温敏感性^[21]。文献[22]通过调整充电次数模拟低温对充电需求的影响,但仅依赖参数设定,缺乏对低温机理的分析;文献[23]引入电池容量衰减机制,但未考虑电池内部耦合因素及低温耗电对续航的影响。其选址模型基于服务半径覆盖与Voronoi图划分充电集群,未体现用户偏好和移动特性。

针对上述问题,考虑低温地区的特殊充电需求,文中提出一种动态路网耦合的电动汽车充电站选址规划模型。综合考虑温度对固体电解质界面(solid electrolyte interphase, SEI)膜增厚、活性材料损失(loss of active materia, LAM)以及析锂反应等内部原理的耦合作用,构建低维电化学-半经验模型(reduced-order semi-empirical model, ROSEM),精确模拟低温下的电池容量;结合低温能耗模型,构建低温单体电动汽车模型。基于“车-路-网”耦合方法,研究低温下用户行为特性与交通流量的关系,采用蒙特卡洛抽样方法模拟快充负荷的分布。进一步引入混合制排队模型,将路网、电网和用户成本纳入考虑,通过均衡函数最小化社会成本,实现低温环境最优充电站选址。

收稿日期:2025-06-10;修回日期:2025-08-26

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(F2024502008)

1 低温地区路网耦合下的电动汽车充电负荷时空分布预测

准确预测电动汽车充电负荷是开展充电站规划研究的重要前提。电动汽车电池性能受到环境温度影响较大。故需要针对低温环境电池特点, 构建电动汽车单体模型、交通网络模型、路网耦合模型以及电动汽车时空转移模型, 预测低温地区充电负荷时空分布。

1.1 低温环境下电动汽车单体模型

低温环境下电动汽车动力电池容量衰减与空耗电是影响电动汽车电量的重要因素, 需要分析环境温度对电动汽车续航里程的影响。

1.1.1 动力电池低温容量衰减模型

在电动汽车充电负荷预测中, 电池容量对预测结果影响显著。基于锂离子电池的衰减机制, 文中构建了 ROSEM, 以更精确地反映电池容量在负荷预测中的作用。ROSEM 基于电池老化过程的第一性原理, 建立 3 个副反应子模型的耦合方程, 用于描述 SEI 膜增厚、LAM 和析锂反应的耦合关系, 随着 SEI 膜增厚, LAM 和析锂副反应电流也随之增加。其中, SEI 膜增厚副反应电流 i_{SEI} 、LAM 副反应电流 i_{LAM} 、析锂副反应电流 i_{Li} 的计算公式为:

$$\begin{cases} i_{SEI}(t) = nFk_{SEI}C_s(R_n, t)\exp\left(-\frac{0.5F}{RT}\eta_{SEI}\right) \\ i_{LAM}(t) = k_{LAM}\left(\frac{\sigma_{h,max} - \sigma_{h,min}}{\sigma_{yield}}\right)^{\frac{1}{m}} \\ \sigma_h = \frac{\sigma_r(R_n) + 2\sigma_t(R_n)}{3} \\ i_{Li}(t) = k_{Li}A\varepsilon_{s,n}\delta_n\Phi\left(\eta_m + U_n^{ref} + \frac{R_{SEI}R_nI_B}{3A\varepsilon_{s,n}\delta_n} - \varphi_{onset}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: F 为法拉第常数; R_n 为电子数 n 下的石墨粒子半径; R 为理想气体常数; T 为环境温度; k_{SEI} 为 SEI 膜增厚副反应常数; $C_s(R_n, t)$ 为 t 时刻负极表面反应物浓度; η_{SEI} 为 SEI 膜增厚副反应的过电位; k_{LAM} 为 LAM 副反应电流的指前因子; σ_h 为一次循环内应力值; $\sigma_{h,min}$ 、 $\sigma_{h,max}$ 分别为一次循环内最小、最大应力值; σ_{yield} 为最大屈服强度下应力; m 为 Basquin 公式斜率; $\sigma_r(R_n)$ 、 $\sigma_t(R_n)$ 分别为粒子在半径 R_n 处径向和切向应力; k_{Li} 为析锂副反应电流的指前因子; A 为负极颗粒表面积活性比; $\varepsilon_{s,n}$ 为电子数 n 下负极颗粒的固相体积分; δ_n 为电子数 n 下负极极片厚度; $\Phi(\cdot)$ 为析锂副反应电流密度与过电位的函数关系; η_m 为析锂副反应的过电位; U_n^{ref} 为电子

数 n 的负极平衡电位; I_B 为析锂副反应交换电流密度; R_{SEI} 为 SEI 膜阻抗; φ_{onset} 为析锂临界点电位。

t 时刻 SEI 膜增厚副反应衰减率 Q_{SEI} 、LAM 副反应衰减率 Q_{LAM} 、析锂副反应衰减率 Q_{Li} 的计算公式如下:

$$\begin{cases} Q_{SEI} = \int_0^t i_{SEI}(t) dt \\ Q_{LAM} = \int_0^t i_{LAM}(t) dt \\ Q_{Li} = \int_0^t i_{Li}(t) dt \end{cases} \quad (2)$$

电池容量衰减率可表示为:

$$Q_{loss} = Q_{SEI} + Q_{LAM} + Q_{Li} \quad (3)$$

基于电池低温容量衰减模型, 低温环境温度 T 下电动汽车电池容量 C_T 为:

$$C_T = C_b(1 - Q_{loss}) \quad (4)$$

式中: C_b 为电动汽车电池在 25 °C 时的初始容量。

在低温环境中, 经过 400 次循环充电后, 电池容量的衰减率低于 2%。在电动汽车充电过程中, 相较于环境温度对电池容量衰减的影响, 循环老化导致的电池容量衰减几乎可以忽略。将 5 °C 时的放电容量作为温度性能测试的参考值, 设该温度下的充电容量为 100%, 不同温度下电池的相对容量随着温度的变化情况如图 1 所示。

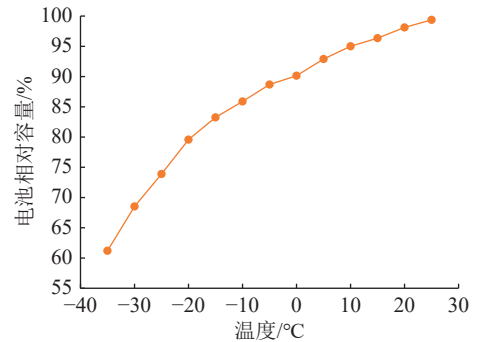


图 1 电池相对容量随环境温度的变化曲线

Fig.1 Variation curve of battery relative capacity with ambient temperature

由图 1 可知, 环境温度对电池容量的影响在低温环境下更加明显。在 -20 °C 时, 电池相对容量降为 79.99%。随着环境温度进一步降低, 电池容量下降速度加快。因此, 低温环境会影响电池容量, 从而导致电动汽车充电需求的变化。

1.1.2 低温环境电动汽车耗电量

电动汽车耗电量主要受到交通情况和环境温度的影响。交通拥堵不仅会导致车辆行驶速度降低, 还会引发频繁制动与启动, 从而额外增加耗电量。同时, 在低温环境下, 电动汽车通过电池开启空调加热的效率相对较低, 导致能耗进一步增加^[24]。

不同道路等级下单位里程耗电量计算公式^[25]如下:

$$P_{ij,\gamma} = \sum_{\gamma=1}^2 a_{\gamma} (V_{ij,\gamma})^{\gamma} \quad (5)$$

式中: $P_{ij,\gamma}$ 为不同道路等级下单位里程耗电量, 其中 ij 为支路 ij 的道路等级信息, γ 为路段车流量与道路通行能力的比值, 称为城市路段交通饱和度; a_{γ} 为不同道路等级下饱和度 γ 的单位里程耗电情况, 取值见文献^[25]; $V_{ij,\gamma}$ 为车辆在支路 ij 上饱和度 γ 下的通行速度。

不同温度下单位里程耗电量计算公式^[26]如下:

$$Q_T = \sum_{u=0}^5 b_{\gamma} (1.8T + 32)^u \quad (6)$$

式中: Q_T 为不同环境温度 T 下单位里程耗电量; b_{γ} 为不同温度等级情况下饱和度 γ 的单位里程耗电情况, 取值见文献^[26]。

以常温 25 °C 下耗电量为基准, 环境温度 T 下耗电量比 k_T 为:

$$k_T = \frac{Q_T}{Q_{25}} \quad (7)$$

在考虑道路等级和环境温度的单位里程耗电量 $\omega_{ij,\gamma,T}$ 为:

$$\omega_{ij,\gamma,T} = k_T P_{ij,\gamma} \quad (8)$$

1.1.3 低温环境下电动汽车续航里程

在低温环境中, 电动汽车的续航能力根据其电池容量与单位里程耗电量来确定。因此, 电动汽车在不同温度环境下的续航里程 D_T 为:

$$D_T = \frac{C_T}{\omega_{ij,\gamma,T}} \quad (9)$$

1.2 交通网络模型

交通网络的拓扑、道路阻抗和流量饱和度会影响电动汽车的行驶路径, 进而影响其充电负荷的时空分布。

$$W_{ij} = \begin{cases} T_{ij,L_1} + T_{i,o_1} & 0 < \gamma \leq 0.6 \\ T_{ij,L_1} + T_{i,o_2} & 0.6 < \gamma \leq 1.0 \\ T_{ij,L_2} + T_{i,o_2} & 1.0 < \gamma \leq 2.0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: W_{ij} 为支路 ij 的道路阻抗; T_{ij,L_1} 、 T_{ij,L_2} 分别为支路 ij 在交通情况 L_1 、 L_2 时的路段阻抗; T_{i,o_1} 、 T_{i,o_2} 分别为节点 i 在拥挤程度 o_1 、 o_2 时的阻抗。

1.3 路网耦合系统模型

交通节点可以分为耦合节点和普通路网节点。交通路网和配电网之间存在电气连接和物理连接关系。 V_{G_1} 、 V_{G_2} 分别为路网节点 G_1 、配电网节点 G_2 的节点集合; S_{G_1,G_2} 为 G_1 、 G_2 的耦合边。

$$W_{G_1,G_2} = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \dots & \delta_{1j} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \dots & \delta_{2j} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \delta_{i1} & \delta_{i2} & \dots & \delta_{ij} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & (V_{G_1}, V_{G_2}) \in S_{G_1,G_2} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式中: W_{G_1,G_2} 为 G_1 、 G_2 的层间连边矩阵; δ_{ij} 为两个网络节点之间的连接关系, 若节点 i 和节点 j 有交集关系则 $\delta_{ij}=1$, 若无交集关系则 $\delta_{ij}=0$ 。

1.4 电动汽车时空转移模型

电动汽车在交通行驶过程中的速度和状态变化会直接影响各个路段的车辆数量和车流密度, 从而影响充电负荷在时间和空间上的分布。文中在行程链-道路链模型的基础上, 采用固定步长法构建了动态车流下的电动汽车时空转移模型。

1.5 动态电动汽车充电负荷预测流程

为了进行精确的充电负荷分析, 文中将电动汽车分类为私家车、出租车和公务车 3 类^[27]。

根据 1.1.1 节可得不同温度下各类电动汽车的电池相对容量。私家车和公务车在 -25 °C 时为 38.42 kW·h, 在 25 °C 时为 51.68 kW·h; 出租车在 -25 °C 时为 60.59 kW·h, 在 25 °C 时为 81.49 kW·h。根据 1.1.2 节可得各类车辆的百公里耗电量。私家车和公务车在 -25 °C 时为 19.60 kW·h, 在 25 °C 时为 13.42 kW·h; 出租车在 -25 °C 为 24.73 kW·h, 在 25 °C 时为 20.06 kW·h。根据 1.1.3 节可得私家车和公务车在 -25 °C 下的续航为 196 km, 出租车为 245 km; 私家车和公务车在 25 °C 下的续航为 385.14 km, 出租车为 406.25 km。

基于 Dijkstra 算法的电动汽车充电负荷时空预测流程如图 2 所示。

2 低温地区电动汽车充电站规划模型

2.1 充电站定容规划框架

文中基于“车-路-网”耦合机制, 研究了低温环境下电动汽车充电负荷的时空分布。首先, 建立可实时更新交通信息的路网模型, 分析低温对电动汽车容量衰减、耗电量和续航的影响, 并构建基于功能区和车型的电动汽车及配电网模型。随后, 通过动态交通流时空转移模型实时更新车流状态, 分析不同时间和区域内充电负荷的变化趋势。最后, 将充电负荷的时间分布特征与各区域的总充电需求结合, 整合到充电桩定容规划模型中, 以全面反映各路段的充电负荷特征。规划框架结构如图 3 所示。

2.2 电动汽车混合排队论模型

为了合理规划充电站的容量, 应用了 M/M/

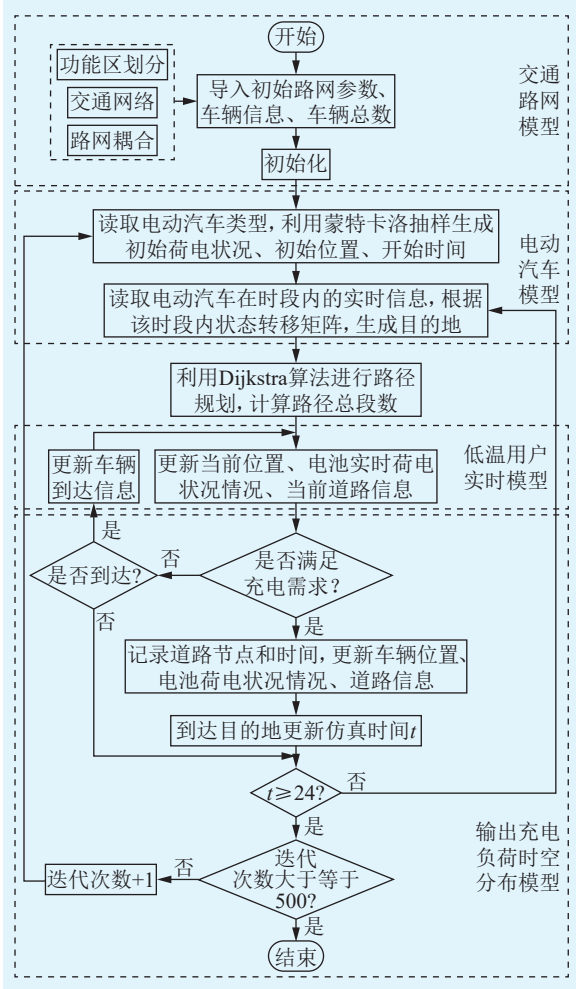


图2 电动汽车充电需求的时空预测流程

Fig.2 Spatio-temporal forecast process of electric vehicle charging demand

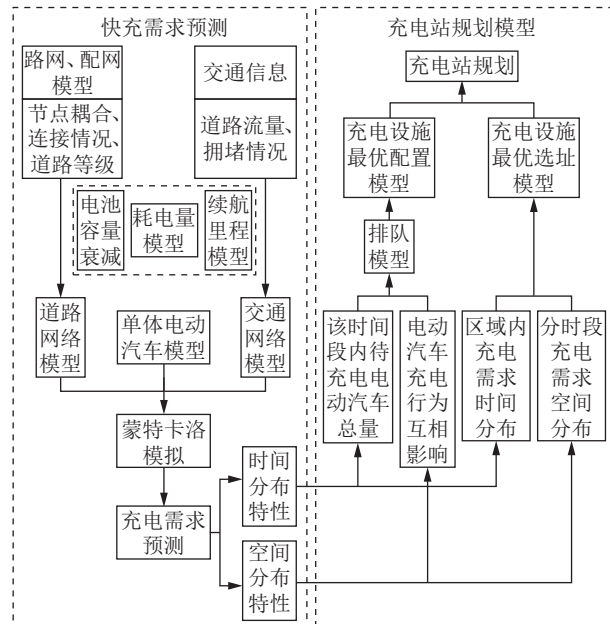


图3 充电站规划框架

Fig.3 Charging station planning framework

S/N 混合排队模型来合理配置充电站规模。充电站

c 的最大容量 N_c 为:

$$N_c = s_c + \frac{s_c}{\sigma} \quad (13)$$

式中: s_c 为安装在充电站 c 上充电设施数量; σ 为充电站 c 内充电设施数量与电动汽车最大排队长度之比。

充电站 c 的服务强度 ρ :

$$\rho = \lambda_c / \mu_c \quad (14)$$

$$\rho / s_c = \lambda_c / (\mu_c s_c) \quad (15)$$

式中: λ_c 为充电站 c 内电动汽车平均到达率; μ_c 为充电站 c 平均服务速率。

$$\mu_c = (X_c \theta) / C_b \quad (16)$$

式中: X_c 为充电站 c 的平均充电功率; θ 为充电设施的充电效率。基于文献[28-29], 可以得到有 q 台电动汽车在充电站 c 的有效排队长度 $L_{c,q}$ 和平均等待时间 $W_{c,q}$ 为:

$$L_{c,q} = \frac{\rho s_c + 1}{(s_c - 1)!(s_c - \rho)^2} [1 - (\rho / s_c)^{N_c - s_c + 1} - (N_c - s_c + 1)(1 - \rho / s_c)(\rho / s_c)^{N_c - s_c}] P_{c,0} \quad (17)$$

$$W_{c,q} = \frac{L_{c,q}}{\lambda_c \left(1 - \frac{\rho^{N_c - s_c + 1}}{s_c! s_c^{N_c - s_c}}\right)} \quad (18)$$

式中: $P_{c,0}$ 为无顾客到达充电站 c 充电的概率。

电动汽车的到达率根据充电站的规划部署进行计算。假设所有充电需求都在交通-电网耦合点完成充电。以 25 °C 为标准温度, 锂电池充电效率随环境温度的变化曲线, 如图 4 所示。

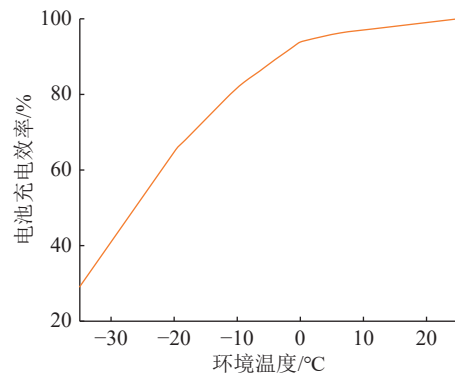


图4 电池充电效率随环境温度的变化曲线

Fig.4 Variation curve of battery charging efficiency with ambient temperature

由图 4 可知, 低温环境对电池充电容量影响极大。以 25 °C 为标准温度, 在 -25 °C 时, 电动汽车充电效率为 53%, 在 -15 °C 时, 电动汽车充电效率为 73.5%。

2.3 充电站定容规划模型

2.3.1 约束条件

(1) 有效服务强度约束。

充电站排队长度有限, 为了保证充电服务质量, 需要约束充电站的有效服务强度。

$$\frac{\lambda_c}{s_c \mu_c} \left[1 - \frac{1}{s_c! s_c^{N_c - s_c}} \left(\frac{\lambda_c}{\mu_c} \right)^{N_c} P_{c,0} \right] < 1 \quad c \in B \quad (19)$$

式中: B 为建设充电站的数目。

(2) 拒绝服务率约束。

为保证充电服务的正常运营, 拒绝服务率不应该超过 5%。

$$\frac{1}{s_c! s_c^{N_c - s_c}} \left(\frac{\lambda_c}{\mu_c} \right)^{N_c} P_{c,0} \leq 0.05 \quad c \in B \quad (20)$$

(3) 路网相关约束。

在任意时间段 t 内, 总车流量都应满足最大车流限制。

$$x_l \leq x_{l,\max} \quad (21)$$

式中: x_l 为路段 l 的车流量; $x_{l,\max}$ 为路段 l 的车流量最大值。

2.3.2 目标函数

为平衡路网、配电网和电动汽车用户三者的收益, 文中引入权衡系数, 考虑充电站的建设和运营成本、配电网与路网的运行成本以及用户在充电过程中产生的时间成本, 以实现社会综合成本最小化作为目标。目标函数为:

$$\min C_0 = \alpha(C_{JS} + C_O + C_{DN} + C_{TN}) + \beta C_{SJ} \quad (22)$$

式中: C_0 为年度全社会总成本; C_{JS} 为充电站年建设成本; C_O 为充电站年运营成本; C_{DN} 为配电网年运行成本; C_{TN} 为路网年运行成本; C_{SJ} 为电动汽车用户的时间成本; α 、 β 为成本均衡系数, $\alpha + \beta = 2$ 。

(1) 充电站建设成本。

$$C_{JS} = (M_s + \theta M_s + D_s) s_c \frac{r_0(1+r_0)^z}{(1+r_0)^z - 1} \quad (23)$$

式中: M_s 为单个充电设施购买成本; θ 为充电设施配套设备的等效费用系数; D_s 为安装充电设施的土建费用; r_0 为贴现率, 取值 0.08; z 为充电站的折旧年限。

(2) 充电站运营成本。

$$C_O = U(M_s)(M_s + \theta M_s + D_s) s_c \quad (24)$$

式中: $U(M_s)$ 为充电站年化运营成本。

(3) 配电网运行成本。

考虑配电网运行时包括网损成本 C_{loss} 和向上级电网购电成本 C_{buy} , 则配电网运行成本为:

$$C_{DN} = C_{loss} + C_{buy} \quad (25)$$

$$C_{loss} = 365 \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in u(i)} c_l I_{ij}^2 R_{ij} \Delta t \quad (26)$$

$$C_{buy} = 365 \sum_{t=1}^{24} c_{buy} P_{buy}(t) \quad (27)$$

式中: N 为配电网节点数量; $u(i)$ 为与节点 i 相连支路; c_l 为单位网损费用; I_{ij} 为支路 ij 在对应时间上流

过的电流; R_{ij} 为支路 ij 的电阻; Δt 为持续时间, $\Delta t = 1$; c_{buy} 为单位购电成本; $P_{buy}(t)$ 为 t 时刻的购电功率。

(4) 路网运行成本。

为反映整体交通系统的运行效率和道路的流畅度, 采用在道路 l 中各路段的车流 x_l 与行驶时间 τ_l 的乘积为指标。

$$C_{TN} = 365 \sum_{t=1}^{24} y(t) \sum_{l \in L} x_l \tau_l \quad (28)$$

式中: $y(t)$ 为 t 时刻路网时间成本系数。

(5) 电动汽车用户的时间成本。

电动汽车用户的时间成本包括从需求点到充电站的空驶时间以及在充电站的排队等待时间成本。

$$C_{SJ} = 365 \sum_{i=1}^N (W_{c,q} + 2d_c \xi / v_d) C_d N_{c,d} K_{c,d} / \varepsilon_c \quad (29)$$

式中: d_c 为充电需求点到充电站 c 的距离; ξ 为当前道路情况; v_d 为不同类型车辆 d 的行驶速度; C_d 为不同类型车辆 d 的单位时间成本; $N_{c,d}$ 为充电站 c 内特定充电需求点的不同类型车辆 d 的数量; $K_{c,d}$ 为充电站 c 内不同类型车辆 d 的充电次数; ε_c 为充电站 c 吸引电动汽车用户的能力。

2.3.3 求解算法

根据 1.5 节提出的方法, 模拟电动汽车的时空分布, 确定交通网络中的车辆行驶路径, 并利用模拟结果得到充电负荷的时空分布。采用 GA 求解低温地区充电站定容规划模型, 算法流程如图 5 所示。

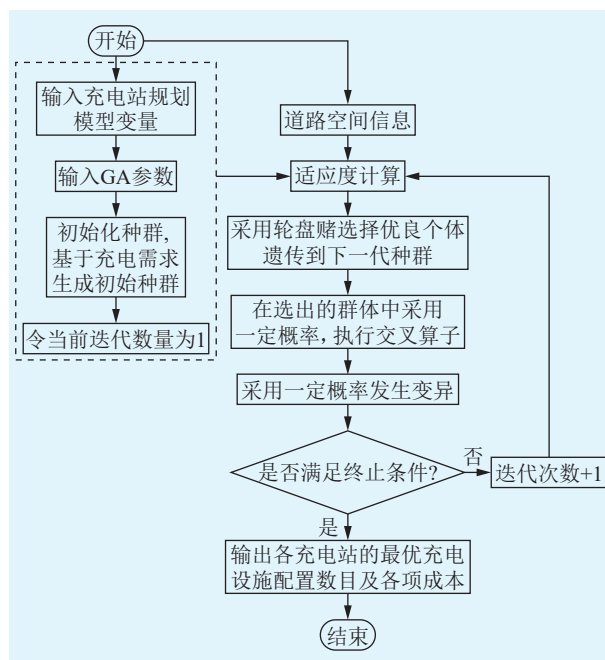


图 5 GA 求解充电站规划流程

Fig.5 GA to solve charging station planning process

3 算例分析

以美国 NHTS2009 为基础数据进行分析, 城市的区域拓扑如图 6 所示, 包括 29 个交通节点和 49 个路段。根据功能划分, 城区被分为办公区(包括节点 17—节点 20)、商业区(包括节点 21—节点 29)、住宅区(包括节点 1—节点 16)。相关道路流量、长度等参数详见文献[30]。

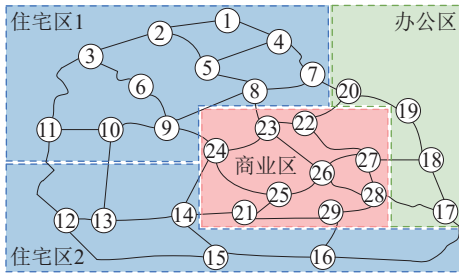


图 6 道路主干道网络拓扑

Fig.6 Road backbone network topology

3.1 相关参数设置

(1) 充电站规划模型的基本参数见表 1^[23]。

表 1 充电站规划参数取值

Table 1 Charging station planning parameter values

参数	数值
α, β	0.8, 1.2
$M_s/\text{万元}$	15
θ	0.1
$D_s/(\text{万元} \cdot \text{台}^{-1})$	1.0
z/a	20
$U(M_s)/(\text{万元} \cdot \text{a}^{-1})$	0.1
$c_{\text{buy}}/[\text{万元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	6.0×10^{-5}
$C_d/(\text{万元} \cdot \text{h}^{-1})$	2.5×10^{-3}
初始种群数目	500
初始交叉率	0.6
初始变异率	0.01
适应度迭代结束阈值	0.05
最大进化迭代数 H_{max}	1 000

(2) 假设城区内共有 13 000 辆电动汽车。其中, 私家车 10 000 辆起点分布在居民区内, 出租车 2 000 辆、公务车 1 000 辆起点分布在任意道路节点。

(3) 参考哈尔滨地区平均温度, 其冬季气温均值为 $-15\text{ }^\circ\text{C}$, 电池置于 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 电池温度最高可升至 $-13.75\text{ }^\circ\text{C}$ ^[23]。由此, 在 $-15\text{ }^\circ\text{C}$ 的环境下, 动力电池的实际运行温度为 $-10.24\text{ }^\circ\text{C}$, 此时电池容量衰减率为 13.12%。ROSEM 中参数设定如表 2。

表 2 ROSEM 中参数取值

Table 2 Parameter values in the ROSEM

参数	数值
F	96 487
A	1
$\delta_n/\mu\text{m}$	16.7
$\varepsilon_{s,n}$	0.59
$R_n/\mu\text{m}$	9
$k_{\text{SEI}}/\text{s}^{-1/2}$	15.55
k_{LAM}	1.61
k_{Li}	4.20
$\sigma_{\text{yield}}/\text{MPa}$	787.41
$\varphi_{\text{onset}}/\text{mV}$	-5.5

3.2 充电需求预测结果

根据第 1 章所提充电需求预测模型, 模拟得到该城区电动汽车充电需求的时空分布, 如图 7 所示。

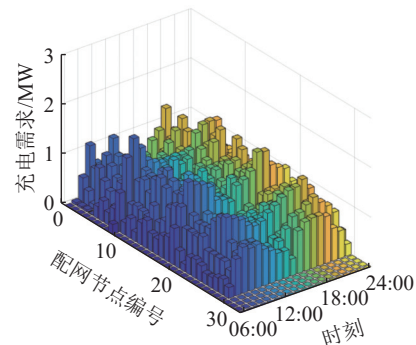


图 7 城区电动汽车充电需求时空分布

Fig.7 Spatio-temporal distribution of electric vehicle charging demand in urban areas

在 $-15\text{ }^\circ\text{C}$ 环境下, 仿真中需要充电车辆的总数为 2 742 辆, 其中私家车、出租车和公务车的需求量分别为 1 923 辆、684 辆和 135 辆。充电需求在 19:00—20:00 期间达到峰值的 308 辆, 主要集中在节点 8、节点 9、节点 14—节点 16、节点 22 和节点 29。这些节点主要与商业区和住宅区的交汇路网相连。充电需求呈现双峰趋势, 高峰出现在 09:00 和 20:00。各区域的充电需求与实际出行规律高度吻合, 验证了所提预测模型的准确性。

3.3 充电站选址定容结果

根据 3.2 节的仿真结果, 在该环境温度下, 一天内充电需求总计 2 742 辆, 充电峰值达到 308 辆。根据充电需求规模, 预计在城区内设置 7 座充电站。根据第 2 章提出的求解策略, 可以计算出各个充电站的规划成本。充电站布局如图 8 所示。

由图 8 可知, 商业区的充电站分布较为集中, 其他区域则呈现均衡布局。这种布局方案不仅经济实惠, 还能有效满足各地区的充电需求。充电站

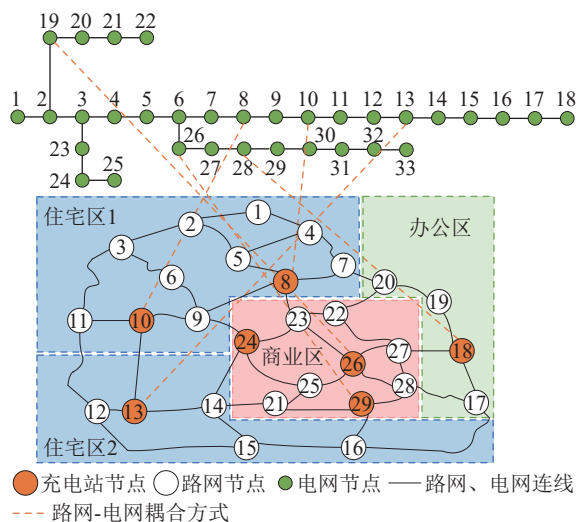


图8 充电站布局

Fig.8 Charging station layout

间距适中,确保了良好的服务覆盖范围和用户使用便利性。充电站的年度成本指标见表3。

表3 各充电站规划充电设施数量及成本

Table 3 Number and cost of planned charging facilities at each charging station

充电站编号	充电站建设的节点位置	充电设施数量	建设运营成本/万元	配电网成本/万元
1	24	18	162.150 4	151.326 3
2	10	16	144.430 8	134.859 6
3	29	14	134.751 4	125.180 7
4	8	20	183.032 2	167.042 0
5	13	13	127.114 5	119.857 6
6	26	22	193.917 4	178.441 0
7	18	11	110.482 3	101.346 0

充电站编号	路网成本/万元	时间成本/万元	全社会成本/万元
1	112.12	55.476 2	481.072 9
2	107.21	59.057 5	445.557 9
3	104.28	57.221 9	421.434 0
4	113.45	62.253 7	525.777 9
5	99.06	46.559 0	392.591 1
6	115.79	68.733 3	556.881 7
7	95.09	39.766 3	346.684 6

由表3可知,位于住宅和商业区域的充电站拥有较多的充电桩,这与实际需求相符。随着充电桩的数量逐渐增加,这也使得更多用户能够获得充电服务。

3.4 不同优化算法求解的充电站内规划结果对比

文中将GA与粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法、灰狼优化(grey wolf optimization, GWO)算法进行对比。3种智能优化算法的种群数

均为100,最大迭代次数均为100,最终结果取50次优化结果的平均值。环境温度为-15℃,根据3.2节充电负荷预测结果,在该区域内规划7个充电站,不同算法的优化过程如图9所示。

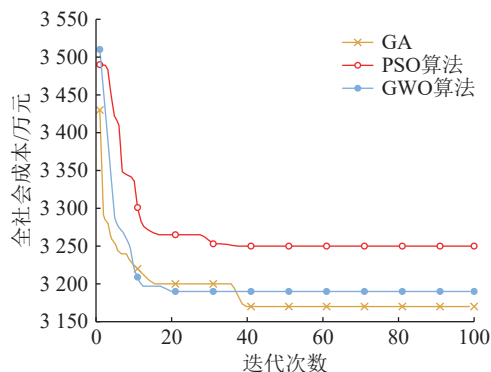


图9 不同算法迭代曲线

Fig.9 Iteration curves of different algorithms

由图9可知,3种算法均能收敛,其中GWO算法收敛速度最快,GA和PSO算法收敛速度相对较慢。PSO算法求解得到的全社会成本最高,而GA得到的全社会成本最低。各算法的优化结果如表4所示。

表4 不同算法下优化结果比较

Table 4 Comparison of optimization results under different algorithms

算法	充电设施数量	全社会成本/万元
GA	114	3 170.00
PSO	113	3 252.05
GWO	114	3 189.52

由表4可知,在GA下配置的充电桩数量高于PSO算法所得到的方案,但其所对应的全社会成本却低于PSO算法的结果。由此说明,采用GA并未因增加充电桩数量而牺牲用户利益,它平衡了各方的利益,以实现全社会成本的降低。此外,GWO算法在充电桩数量上与GA相同,均为114,但其全社会成本为3 189.52万元,高于GA的3 170.00万元,说明GA在成本优化方面略优于GWO算法,能实现同等规模下的最低社会总成本。

3.5 环境温度的影响

综合所有节点的总负荷,可以得到在-25℃、-15℃和25℃环境温度下的总充电负荷,如图10所示。各环境温度下的日总充电负荷及其峰值占标准温度负荷的比例如表5所示。

如图10所示,在不同环境温度下,日充电负荷峰值主要出现在09:00—10:00以及19:00—20:00。随着温度的变化,日总充电负荷的变化趋势保持一

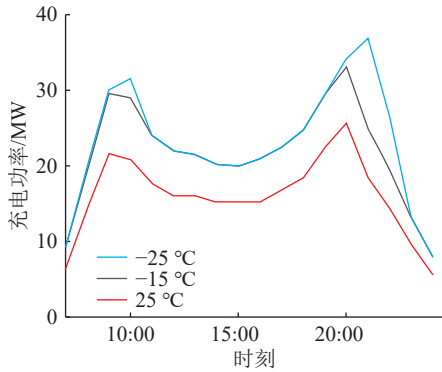


图 10 不同环境温度下日总充电负荷

Fig.10 Total daily charging load at different ambient temperatures

表 5 不同环境温度下日总负荷峰值变化

Table 5 Variation of peak total daily load at different ambient temperatures

温度/℃	总负荷/MW	总负荷/标准总负荷	峰值/MW	峰值变化
-25	402.461 9	138.97%	36.872	144.00%
-15	390.929 1	134.98%	33.099	129.26%
25	289.610 7	100%	25.607	100%

致。从表 5 可以看到, 不同温度条件下电动汽车的总负荷和峰值负荷存在明显差异。在 25 ℃ 时, 总负荷为 289.610 7 MW; 而在 -15 ℃ 时, 总负荷则增至 390.929 1 MW, 较 25 ℃ 增加了 34.98%。当温度降至 -25 ℃ 时, 总负荷进一步上升至 402.461 9 MW, 相较于 25 ℃ 增加了 38.97%。这表明, 低温环境显著提升了总充电负荷。然而, 当温度降到 0 ℃ 以下时, 在 -25 ℃ 下的总充电负荷相比于 -15 ℃ 仅增加了 2.95%, 说明在极低温度下, 充电负荷的增长幅度有限。同时, 负荷峰值随着温度的降低逐渐增加。

分析不同环境温度对充电站规划的影响, 文中在不同温度场景下进行选址仿真。结果表明, 所提出的规划方案在多种温度条件下均具有适用性。以表 3 中 1 号充电站为例, 其从室温到低温的等温差组别下的配置情况如表 6 所示。

由表 6 可见, 随着环境温度降低, 除路网成本外的所有指标均呈上升趋势。低温加速了电池容量衰减, 增加了电动汽车的充电需求, 从而需要配置更多的充电设施, 导致充电等待时间成本上升。温度越低, 全社会成本增长越快。在 -35 ℃ 环境下, 全社会成本较 25 ℃ 时增加了 63.20%。

在 -15 ℃ 和 -35 ℃ 环境下触发充电需求的电动汽车用户数量对比如图 11 所示。

与 -15 ℃ 相比, 在 -35 ℃ 条件下, 充电高峰时段的持续时间更长, 整体充电峰值达到 343 辆, 显著高于 -15 ℃ 的峰值。通过比较图 11 中不同颜色

表 6 不同环境温度下 1 号充电站规划对比

Table 6 Comparison of planning schemes for charging station 1 at different ambient temperatures

环境温度/℃	电池容量衰减率/%	充电设施数量	建设运营成本/万元	配电网成本/万元
25	0.62	16	137.215 2	128.428 1
15	3.65	17	151.402 1	132.108 9
5	7.10	17	154.060 4	137.830 9
-5	11.31	17	158.635 9	145.239 8
-15	16.74	18	162.150 4	151.326 3
-25	26.11	20	223.058 2	174.484 5
-35	38.81	22	283.684 5	210.821 5

环境温度/℃	路网成本/万元	时间成本/万元	全社会成本/万元
25	109.74	396 999	415.083 2
15	109.74	41.381 3	434.632 3
5	110.83	43.032 9	445.754 2
-5	110.33	47.060 5	461.266 2
-15	112.12	55.476 2	481.072 9
-25	109.99	59.542 6	567.075 3
-35	112.32	70.578 2	677.404 2

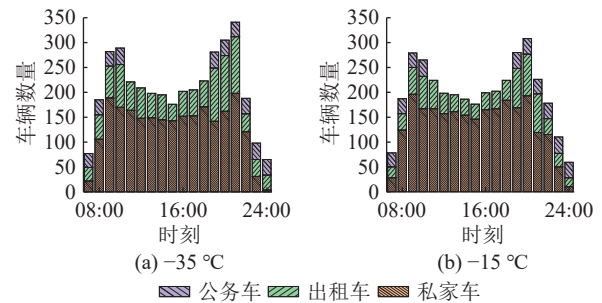


图 11 不同环境温度下触发充电需求电动汽车用户数量

Fig.11 Charging demand electric vehicle number of users at different ambient temperatures

类型的比例, 可以看出在更低温度下, 私家车的充电需求略微减少, 而出租车和公务车的充电需求则有所增加, 充电负荷增长主要是由出租车引起。-35 ℃ 环境下的充电站规划结果如表 7 所示。

由表 7 与表 3 对比可以发现, 在 -35 ℃ 环境下, 充电桩的整体配置数量会增加。主要原因是低温条件下电动汽车用户的电池容量较低, 导致同一时间段内需要充电的用户数量激增。私家车用户的出行时间随着温度下降而缩短, 从而减少出行量和充电需求。然而, 由于固定的出行里程限制, 出租车和公务车的耗电量随着温度降低而增加。因此, 在低温条件下充电负荷增加, 需要相应增加充电站的配置数量。这在一定程度上反映了用户出行规律对充电站布局规划的影响。

相比于常温环境下的充电站规划结果, 低温环

表 7 -35 °C 下充电站规划结果

Table 7 Results of charging station planning at -35 °C

充电站编号	充电站建设的节点位置	充电设施数量	建设运营成本/万元	配电网成本/万元
1	24	22	283.684 5	210.821 5
2	10	18	251.556 4	184.589 4
3	29	17	234.158 4	145.410 6
4	8	21	318.432 1	225.655 6
5	13	15	218.864 1	149.668 8
6	26	24	335.542 9	254.887 4
7	18	12	199.938 3	140.761 5

充电站编号	路网成本/万元	时间成本/万元	全社会成本/万元
1	112.32	70.578 2	677.404 2
2	108.21	78.154 1	622.509 9
3	103.11	77.331 4	560.010 4
4	101.54	68.154 7	713.782 4
5	95.13	66.766 2	530.429 1
6	98.15	80.154 7	768.735 0
7	101.15	50.314 0	492.163 8

境下的充电站位置通常更靠近商业区,并与充电负荷相对应。这主要是因为,在城郊地区功能相对单一,低温条件下出租车和商务车的出行频率会减少。与常温环境相比,低温环境中的城郊地区配置充电桩的数量通常较少。因此,在规划电动汽车充电站时,考虑低温环境对配置的影响至关重要。

4 结论

文中提出一种考虑路网耦合的电动汽车充电需求的时空预测方法,并根据时空预测结果,提出了低温地区电动汽车充电站规划方法。通过算例分析验证了模型的实用性。主要结论如下:

(1) 在“车-路-网”的耦合架构基础上,考虑低温环境下的电动汽车出行和充电决策特性,基于 Dijkstra 算法构建了考虑电动汽车行为变化的时空转移模型,可以准确预测低温地区电动汽车的充电需求的时空分布。

(2) 将低温环境下的排队模型引入充电站规划模型中,通过引入权衡系数兼顾配电网、路网和电动汽车用户的综合收益,并基于 GA,可以得到低温地区充电站的充电设施的最优配置数量和充电站的全社会成本最小化方案。

(3) 考虑实时道路信息调整车辆信息,可以提高充电需求时空分布的预测精度。仿真结果表明,低温环境对充电站规划结果和全社会成本具有显著的影响。合理配置充电设施数量可提高用户和

充电站之间的双方利益,有效减少全社会成本。

下一步研究将考虑引入天气因素,以进一步优化交通管理策略。同时,计划开发一个集成车辆、交通和电网信息的综合实时系统,分析模型在真实条件下的可行性,推动多领域数据协同与智能决策的实现。通过合理配置充电站,期望能够有效降低全社会的综合成本,同时提升整体交通系统的运行效率和可持续性发展水平。

参考文献:

[1] 吕红星. 多方参与、统一规划破解新能源汽车“找桩难”[N]. 中国经济时报, 2023-06-27(1).
LV Hongxing. Multistakeholder participation and unified planning to solve the difficulty of finding charging stations for new energy vehicles[N]. China Economic Times, 2023-06-27(1).

[2] 黄博, 胡博, 谢开贵, 等. 计及交通事故影响的电动汽车路径规划和充电导航策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(19): 47-59.
HUANG Bo, HU Bo, XIE Kaigui, et al. Electric vehicle path planning and charging navigation strategies considering the impact of traffic accidents[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(19): 47-59.

[3] 陈腾生, 杨汝泉, 隋坤明, 等. 考虑用户决策不确定性的电动汽车充电站用户参与度优化方法[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(4): 128-137.
CHEN Tengsheng, YANG Ruquan, SUI Kunming, et al. Optimization of user participation in electric vehicle charging stations considering uncertainty of user decision[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 128-137.

[4] 朱永胜, 常稳, 武东亚, 等. 考虑充放储一体站与电动汽车互动的主从博弈优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(7): 157-167.
ZHU Yongsheng, CHANG Wen, WU Dongya, et al. A Stackelberg game optimization scheduling strategy considering the interaction between a charging-discharging-storage integrated station and an electric vehicle[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(7): 157-167.

[5] GUO D, LIU R Y, LI M H, et al. An approach to optimizing the layout of charging stations considering differences in user range anxiety[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2024, 38: 101292.

[6] ZHANG C, SHEN H T, TAO P, et al. Electric vehicle charging pile capacity planning based on normal distribution Monte Carlo sampling model[J]. International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2024, 25(2): 189-196.

[7] WANG Y X, ZHAO Y Y, GAN S J, et al. Optimization of charging stations integrated with dynamic transportation systems in metropolises[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2023, 119: 103726.

[8] 沈筱琦, 方鑫, 谭林林, 等. 基于居民出行模拟的电动汽车负荷时空分布预测[J]. 电力工程技术, 2024, 43(3): 130-139.
SHEN Xiaqi, FANG Xin, TAN Linlin, et al. Prediction of

- spatio-temporal distribution of electric vehicle load based on residential travel simulation[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(3): 130-139.
- [9] 罗平, 杨泽喆, 张嘉昊, 等. 考虑多场景充电需求预测的电动汽车充电站规划[J]. *高电压技术*, 2025, 51(1): 368-378.
LUO Ping, YANG Zezhe, ZHANG Jiahao, et al. Electric vehicle charging station planning considering multi-scene charging demand forecasting[J]. *High Voltage Engineering*, 2025, 51(1): 368-378.
- [10] 陈卓旭, 宛玉健, 胡泽春, 等. 考虑随机用户均衡的区县级电动汽车快充站规划[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(15): 25-34.
CHEN Zhuoxu, WAN Yujian, HU Zechun, et al. Planning of electric vehicle fast charging station at district and county levels considering stochastic user equilibrium[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(15): 25-34.
- [11] 李鹏, 刘嘉彦, 李佳蔚, 等. 考虑光伏与电动汽车充电站协同的配电网电压控制方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2024, 39(6): 121-130.
LI Peng, LIU Jiayan, LI Jiawei, et al. A voltage control method for distribution networks considering photovoltaic and electric vehicle charging station coordination[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(6): 121-130.
- [12] 尚龙龙, 程俊杰, 王伟, 等. 计及交通拥堵的电动汽车充电站规划方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38(1): 66-76.
SHANG Longlong, CHENG Junjie, WANG Wei, et al. An electric vehicle charging station planning method considering traffic congestion[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(1): 66-76.
- [13] 程杉, 王豪杰, 徐其平, 等. 含超大功率充电的多类型充电设施两阶段选址定容方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(23): 33-44.
CHENG Shan, WANG Haojie, XU Qiping, et al. Two-stage siting and capacity determination method for multi-type charging facilities with ultra-high-power charging[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(23): 33-44.
- [14] 申炳杰, 李华, 曾鸣, 等. 考虑交通流量和用户行为不确定性的加氢站选址优化模型[J]. *运筹与管理*, 2024, 33(5): 22-27.
SHEN Weijie, LI Hua, ZENG Ming, et al. Optimal location model of hydrogen refueling station considering uncertainty of traffic flow and driver's behavior[J]. *Operations Research and Management Science*, 2024, 33(5): 22-27.
- [15] 范云松, 田俊山, 郑传钊, 等. 高速公路与电网耦合背景下的充电站布局规划[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2023, 35(9): 40-52.
FAN Yunsong, TIAN Junshan, ZHENG Chuanshao, et al. Layout and planning of electric vehicle charging stations under background of coupled expressway and power grid[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2023, 35(9): 40-52.
- [16] FERRO G, MINCIARDI R, PARODI L, et al. Optimal planning of charging stations in coupled transportation and power networks based on user equilibrium conditions[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2022, 19(1): 48-59.
- [17] 卢慧, 谢开贵, 胡博, 等. 混合交通流下计及储能型柔性开关影响的交通-配电网联合规划[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(22): 108-119.
LU Hui, XIE Kaigui, HU Bo, et al. Coordinated planning of transportation and distribution networks with mixed traffic flow and E-SOP[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(22): 108-119.
- [18] 崔岩, 胡泽春, 段小宇. 考虑充电需求空间灵活性的电动汽车运行优化研究综述[J]. *电网技术*, 2022, 46(3): 981-994.
CUI Yan, HU Zechun, DUAN Xiaoyu. Review on the electric vehicles operation optimization considering the spatial flexibility of electric vehicles charging demands[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(3): 981-994.
- [19] 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.
HU 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.
- [20] 周峰, 田旭文, 李红旗. 混合工质电动汽车空调全生命周期气候性能分析[J]. *汽车工程*, 2024, 46(9): 1707-1714.
ZHOU Feng, TIAN Xuwen, LI Hongqi. Life cycle climate performance analysis of air conditioning system in electric vehicle charged with mixed refrigerant[J]. *Automotive Engineering*, 2024, 46(9): 1707-1714.
- [21] 李惠, 张海军, 杨雪峰, 等. 纯电动车低温续航里程提升方法[J]. *汽车实用技术*, 2022, 47(21): 12-18.
LI Hui, ZHANG Haijun, YANG Xuefeng, et al. Low temperature range improvement method of pure electric vehicles[J]. *Automobile Applied Technology*, 2022, 47(21): 12-18.
- [22] 郑君, 武国良, 郭袅, 等. 寒冷地区电动汽车充电站规划方法研究[J]. *黑龙江电力*, 2018, 40(1): 76-81.
ZHENG Jun, WU Guoliang, GUO Niao, et al. Research on planning method of electric vehicle charging station in cold areas[J]. *Heilongjiang Electric Power*, 2018, 40(1): 76-81.
- [23] 胡晓伟, 宋帅, 邱振洋, 等. 寒区电动公交充电站选址及定容规划研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2024, 24(2): 281-292.
HU Xiaowei, SONG Shuai, QIU Zhenyang, et al. Location and capacity planning of electric bus charging station in cold regions[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2024, 24(2): 281-292.
- [24] 刘子仟, 黄莉, 陆婧泉, 等. 计及驾驶习惯影响的电动汽车碳减排量计算方法[J]. *电力需求侧管理*, 2024, 26(2): 62-69.
LIU Ziqian, HUANG Li, LU Xiaoquan, et al. Carbon emission reduction calculation method of electric vehicle energy substitution considering the influence of driving habits[J]. *Power Demand Side Management*, 2024, 26(2): 62-69.
- [25] YAO E J, YANG Z Q, SONG Y Y, et al. Comparison of electric vehicle's energy consumption factors for different road types[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2013,

2013(1): 328757.

[26] YUKSEL T, MICHALEK J J. Effects of regional temperature on electric vehicle efficiency, range, and emissions in the United States[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(6): 3974-3980.

[27] 魏金柱, 马志鹏. 基于蒙特卡洛算法的大规模电动汽车充电负荷预测[J]. 电工技术, 2024(3): 49-53.
WEI Jinzhu, MA Zhipeng. Monte-Carlo-algorithm-based load prediction of electric vehicles large-scale charging[J]. Electric Engineering, 2024(3): 49-53.

[28] 孙健, 宋茂星, 邱果, 等. 基于电动汽车大数据的多等级充电站选址与服务能力研究[J]. 中国公路学报, 2024, 37(4): 48-60.
SUN Jian, SONG Maoxing, QIU Guo, et al. Location and service capability of multilevel charging stations based on electric vehicle big data[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(4): 48-60.

[29] 张智禹, 王致杰, 杨皖昊, 等. 基于充电需求预测的电动汽车充电站选址规划研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(10): 39-49.
ZHANG Zhiyu, WANG Zhijie, YANG Wanhao, et al.

Research on location planning of electric vehicle charging station based on prediction of charging demand[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(10): 39-49.

[30] 邵尹池, 穆云飞, 余晓丹, 等. “车-路-网”模式下电动汽车充电负荷时空预测及其对配电网潮流的影响[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5207-5219, 5519.
SHAO Yinchu, MU Yunfei, YU Xiaodan, et al. A spatial-temporal charging load forecast and impact analysis method for distribution network using EVs-traffic-distribution model[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5207-5219, 5519.

作者简介:



杨锡运

杨锡运(1973),女,博士,教授,研究方向为新能源发电技术、综合能源及储能设备优化等(E-mail: yangxiyun916@sohu.com);

朱江(1999),男,硕士在读,研究方向为配电网经济调度;

赵泽宇(1998),男,博士在读,研究方向为新能源发电控制、深度学习等。

Low-temperature electric vehicle charging stations planning under the consideration of road network coupling

YANG Xiyun, ZHU Jiang, ZHAO Zeyu, ZHANG Qiliang

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: To enhance the adaptability of electric vehicle charging stations in low-temperature environments and alleviate pressure on distribution and road networks, a charging station planning model for low-temperature regions is proposed. A model for battery capacity and energy consumption under low temperatures is established based on the degradation mechanism of power batteries, allowing for more accurate simulation of driving conditions. By considering the driving, charging, and user decision characteristics of electric vehicles in low-temperature, a Monte Carlo sampling method is used to simulate the spatio-temporal distribution of charging demand for different vehicle types in low-temperature. A hybrid queuing theory is adopted to account for the impact of low-temperatures on charging efficiency, and a weighting function is introduced to minimize social costs, leading to optimal charging station location and capacity configurations. Simulation results demonstrate that the proposed model effectively balances the interests of road networks, distribution networks, and users based on the characteristics of low-temperature regions. It enables reasonable planning of electric vehicle charging stations in low-temperature regions, improving charging service satisfaction, reducing overall costs in cold environments, and enhancing the model's feasibility for practical application.

Keywords: electric vehicle; charging station planning; low-temperature capacity decay; road network; charging demand; Monte Carlo simulation

(编辑 吴昊)