

[文章编号] 1003-4684(2023)05-0058-09

计及混合交通均衡的电力-交通耦合网络扩展规划

朱理文, 何俊, 黄文涛

(湖北工业大学太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068)

[摘要] 为了降低大规模电动汽车出行造成的交通瘫痪风险和电网安全运行风险,在建立配电网和交通网耦合模型基础上,提出计及混合交通均衡的电力-交通耦合网络双层规划模型。上层模型是以道路通行时间、道路扩容、新建充电桩、变电站扩容和新建配电网线路的成本之和最小为目标,建立的投资规划模型。下层模型是基于用户均衡理论,考虑道路扩容和充电桩拥堵效应,建立的混合交通均衡模型。然后,上层模型通过混合粒子群算法进行求解,下层模型结合构建的车主最优出行路径模型,通过 IPOPT 求解器进行求解。以 Nguyen 交通网和 14 节点的配电网构建耦合网络进行仿真分析,结果得出电动汽车出行需求在增加 0、25%、50%、75% 和 100% 5 个场景下的最优扩展规划策略,验证了所提规划方法的有效性。

[关键词] 耦合网络; 道路扩容; 交通均衡; 扩展规划; 配电网

[中图分类号] TM715 **[文献标识码]** A

电动汽车(electric vehicle, EV)因其低功耗和无污染的特点,符合低碳出行理念,近年来逐渐受到人们追捧,保有量正在快速增加^[1]。而大规模 EV 出行所产生的交通负荷和充电负荷进一步加强了交通网和电网之间的耦合。一方面,大规模的充电需求聚集会增加交通道路拥堵甚至瘫痪风险^[2];另一方面,如果对这些充电负荷不加以控制,会造成城市电网负荷峰上加峰^[3],电压越限^[4-5]等。因此,确保交通网和配电网安全运行下能够满足更多 EV 的出行需求,研究电力-交通耦合网络(coupled electric-traffic networks, CETN)的扩展规划建设具有重要意义。

EV 保有量的增加意味着需要投入更多的充电设施来满足它的充电需求,充电设施的规划通常会考虑配电网经济和安全运行约束,来降低电力系统升级带来的投资成本。文献[6]针对电动汽车充电站接入配电网后构建了线路的可用裕度模型,为今后更多充电站接入下的线路扩展建设留有余地。为防止配电网电压越限,文献[7]建立了充换电站对用户捕获程度最大、配电系统网络损耗最小和配电系统电压偏移最小的多目标规划模型。文献[8]则以充电网服务质量和配电网电压稳定性指标建立目标函数对充电站位置进行优化。文献[6-8]考虑了配电网经济和安全运行约束,但却忽略了交通网特性。

对此,文献[9]提出了一种计及充放电管理的充电站规划模型,该模型加入了基于用户均衡(user equilibrium, UE)原理的交通分配模型,以捕获交通网中的交通流分布。但却没有考虑 EV 车主在出行路径上的道路扩展规划。

电动汽车出行同样会对交通网的运行产生影响,一些学者对规划模型的研究考虑了交通网特性。文献[10]提出了一个多周期充电站扩展规划模型,该模型结合了交通网的拓扑结构和电动汽车有限的行程范围。文献[11]使用真实个人出行调查数据来模拟交通流分布,从而更准确地估计电动汽车充电需求,为充电站的规划提供参考。随着 EV 的数量增加,其相应的出行需求也会增加,仅依靠交通流分配不足以解决道路拥堵问题。文献[12]提出一种通用的离散网络设计问题公式,用以确定最佳新建道路及其最优容量。电动汽车的加入将使交通网和配电网之间的耦合作用越来越显著,为了在 CETN 安全运行下能够满足更多电动汽车在交通网中的出行,电力-交通系统的协调规划也越发重要。

针对以上问题,本文提出计及混合交通均衡的电力-交通耦合网络扩展规划方法。首先,在构建配电网和交通网耦合网络的基础上提出了电力-交通耦合网络双层规划模型,上层模型是以道路通行时间、道路扩容、新建充电桩、变电站扩容和新建配

[收稿日期] 2022-05-26

[基金项目] 太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室开放基金项目(HBSEES202008)

[第一作者] 朱理文(1997-),男,江西赣州人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为能源互联网规划。

[通信作者] 何俊(1987-),男,湖北武汉人,工学博士,湖北工业大学高级工程师,研究方向为能源互联网规划,电力系统安全稳定分析。

电网线路的成本之和最小为优化目标建立的规划模型,下层模型是考虑了充电站拥堵效应和道路扩容,基于用户均衡原理建立的混合交通流分配模型。上层和下层模型充分考虑了电力-交通耦合网络安全运行约束,通过混合粒子群和 IPOPT 求解器进行求解。算例分析表明,文中所提模型能够在 EV 不同出行需求下给出最优的扩展规划策略。

1 电力-交通耦合网络构建

1.1 交通网建模

一个复杂的交通网络由若干个路网节点和道路组成,本文用 $G_T=(T_N,T_A)$ 来表示一个交通网络。其中 T_N 代表交通网的节点集合, T_A 代表交通网的道路集合。用 $a \in T_A$ 表示交通网中的某条道路, c_a 为道路 a 的通行容量上限(通行容量上限指不造成拥堵的情况下通过该道路车辆的最大数量), t_a^0 为道路 a 的自由通行时间(自由通行时间指的是车辆在当前道路车流量不大于通行容量上限时通过的时间)。交通网中所有的出行需求可以由 OD 对集合 W 表示,假设 w 为其中一个 OD 对,由起始节点和目的地节点构成,每个点对可以由多条路径组成,每条路径又由若干个道路连接而成。本文考虑当前道路上行驶的车辆主要有电动汽车和普通汽车(normal vehicles,NV)两种,道路 a 上的车流量 x_a 可看作为两种类型汽车车流量的叠加。将不同初始电量和里程焦虑的 EV 分为 $k \in K$ 类,有充电需求的 EV 的可用路径为 \hat{P}_k^w ;NV 和无充电需求的 EV 的可用路径为 \hat{Q}^w ,则交通网具体模型如下。

1)道路 a 上的流量与路径流量守恒

$$x_a = \sum_{w \in W} \sum_{k \in K} \sum_{p \in \hat{P}_k^w} f_{p,k}^w \delta_{a,p,k}^w + \sum_{w \in W} \sum_{q \in \hat{Q}^w} f_q^w \delta_{a,q}^w, \quad \forall a \in T_A \tag{1}$$

式中: $f_{p,k}^w$ 和 f_q^w 分别为路径 p 上第 k 类 EV 和路径 q 上 NV 的车流量; $\delta_{a,p,k}^w$ 和 $\delta_{a,q}^w$ 是路径与道路关联的二进制变量,当路径 p 上第 k 类 EV 和路径 q 上 NV 经过道路 a 时, $\delta_{a,p,k}^w = 1$ 和 $\delta_{a,q}^w = 1$;否则为 0;

2)每个 OD 对上出行流量守恒

$$\sum_{k \in K} \sum_{p \in \hat{P}_k^w} f_{p,k}^w = g^w, \sum_{q \in \hat{Q}^w} f_q^w = h^w, f_{p,k}^w, f_q^w \geq 0, \quad \forall w \in W \tag{2}$$

式中: g^w 和 h^w 分别为 EV 和 NV 在 OD 对 w 上的出行需求。

3)道路通行时间

道路通行时间是反应交通网拥堵状况的重要指标,根据美国联邦公路局函数^[13],其大小与道路容量和车流量有关。当道路通行容量一定时,通行时间会随着车流量的增大而快速增加,这会给车主的

出行带来很多不便。可以通过改变道路通行容量 c_a 来对其进行扩容^[14],则考虑道路扩容后的通行时间

$$t_a = t_a^0 \left[1 + 0.15 \left(\frac{x_a}{c_a + \Delta c \cdot \sigma_a} \right)^4 \right], \forall a \in T_A \tag{3}$$

式中: t_a 表示车辆通过道路 a 的时间; σ_a 表示道路 a 的扩建数量, $\sigma_a \geq 0$; Δc 表示扩建一条道路所能增加的通行容量。

4)充电站拥堵效应

充电站为 EV 提供电能会吸引充电需求。当站内充电桩的数量不能满足充电需求时会产生拥堵效应^[15],即 EV 将面临充电排队时间。排队时间的大小与充电站的服务能力和前往充电的 EV 车流量有关。假设 s 为充电站所在节点,仿照 BPR 函数,则考虑充电站扩容后的充电排队时间

$$t_s = t_s^0 \left[\frac{x_s}{(c_s + h_s) \cdot \Delta s} \right]^4 \tag{4}$$

式中: t_s^0 为充电站平均排队等待时间; x_s 为 EV 前往充电站 s 充电车流量; c_s 为充电站原有的充电桩数量; Δs 为单个充电桩的服务能力; h_s 为扩建充电桩的数量。

1.2 电力-交通耦合网络拓扑

交通网中有充电需求的 EV 通过充电站大规模接入电网后,会对电网安全运行造成影响,这也进一步加强了两个网络之间的耦合关系。在交通网中 EV 的出行具有很强的随机性,且在配电网中又作为一种间歇性强的用电负荷^[16],因此,在 EV 大规模接入下对电力-交通耦合网络建模具有必要性。则建立耦合网络的拓扑可以抽象表示为

$$\Delta = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1A_m} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2A_m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{N_m 1} & y_{N_m 2} & \cdots & y_{N_m A_m} \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$S = [s_1 \quad s_2 \quad \cdots \quad s_n] \tag{6}$$

式中: Δ 为节点道路关联矩阵;当交通网节点 $i(i = 1, 2, \dots, N_m, N_m$ 代表交通网节点总数)在道路 $a(a = 1, 2, \dots, A_m, A_m$ 代表道路总数)的首端时 $y_{ia} = 1$;当节点 i 在道路 a 尾端时 $y_{ia} = -1$,否则为 0; S 为配电网与交通网的耦合节点矩阵,也是充电站建设节点矩阵; n 为耦合节点上建设的充电站总数。

2 考虑混合交通均衡的双层扩展规划模型

在本文所提双层规划模型中,上层规划模型需要合理考虑设备扩展建设的数量,使投资建设成本最小;下层的 EV 和 NV 用户则根据上层的规划及交通道路拥堵状况决定自己的出行路径,使自身的

出行成本最小。下层的优化结果返回至上层,在电力-交通耦合网络安全运行条件下,根据下层结果调整规划方案,直至上下层在约束下都达到最优结果。

2.1 上层电力-交通耦合网络扩展规划模型

2.1.1 目标函数 上层的规划模型是以电力-交通耦合网络扩展规划成本之和最小为优化目标,其中交通网扩展规划成本包括道路扩容、充电站内新增充电桩和交通网通行时间成本;配电网扩展规划成本包括新建线路以及变电站的扩容成本。具体的数学模型为

$$\min F^u = C_{TN} + C_{PDN} \quad (7)$$

$$C_{TN} = \sum_{a \in TA} (\kappa c_1 \sigma_a + \omega t_a x_a) + \sum_{s \in S} \kappa c_2 h_s \quad (8)$$

$$C_{PDN} = \sum_{(i,j) \in DN} \kappa c_3 n_{ij} + \sum_{k \in C(i)} \kappa c_4 P_k^{sub} \quad (9)$$

$$\kappa = \frac{r(1+r)^y}{(1+r)^y - 1} \quad (10)$$

$$P_k^{sub} = \max\{0, P_{k,e} - P_{k,0}^{sub}\} \quad (11)$$

式中: F^u 为上层扩展规划的总成本; C_{TN} 为交通网扩展规划成本; C_{PDN} 为配电网扩展规划成本; c_1 为道路扩容的单位成本; c_2 为新增充电桩的单位成本; h_s 为充电站 s 上新增充电桩的数量; κ 为贴现系数; r 为贴现率; y 为折旧年限; c_3 为新建线路单位成本; n_{ij} 为节点 i 和 j 之间新建线路的数量; $C(i)$ 表示配电网节点 i 服务的充电站集合; c_4 为变电站扩容单位成本; P_k^{sub} 为变电站的扩容容量; $P_{k,e}$ 为变电站 k 服务充电站内新增充电桩的功率,即 $P_{k,e} = h_s P_{ch}$, P_{ch} 为单个充电桩的额定充电功率; $P_{k,0}^{sub}$ 为变电站 k 的剩余容量。

2.1.2 约束条件

1) 设备扩展建设数量约束

$$0 \leq \sigma_a \leq \sigma_{a,\max} \quad (12)$$

$$0 \leq h_s \leq h_{s,\max} \quad (13)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq n_{ij,\max} \quad (14)$$

式中: $\sigma_{a,\max}$ 为道路 a 扩容数量上限; $h_{s,\max}$ 为新增充电桩数量上限; $n_{ij,\max}$ 为新建配电网线路数量上限。

2) 充电站服务能力约束

为了避免充电桩数量不足给 EV 车主带来长时间充电排队时间,充电站服务能力应不小于充电车流量,则

$$x_s \leq (c_s + h_s) \cdot \Delta s \quad (15)$$

3) 道路通行能力约束

道路上的车流量不能超过其通行能力上限,则

$$x_a \leq c_a + \Delta c \cdot \sigma_a \quad (16)$$

4) 配电网安全运行约束

为了提高计算速度,配电网潮流和电压分布采

用简化的 Distflow 形式^[17],则简化后的节点电压幅值上下限约束、线路有功功率容量约束、节点电压降关系约束和支路有功和无功潮流约束可以如下所示:

$$\begin{cases} \underline{v}_i \leq v_i \leq \bar{v}_i \\ 0 \leq p_{ij} \leq (1 + n_{ij}) \bar{p}_{ij} \\ v_j = v_i - (r_{ij} p_{ij} + x_{ij} q_{ij}) / v_1 (1 + n_{ij}) \\ \sum_{m \in \pi(j)} p_{jm} = p_{ij} - P_j \\ \sum_{m \in \pi(j)} q_{jm} = q_{ij} - Q_j \\ \forall i, j \in D_N, (i, j) \in D_A \end{cases} \quad (17)$$

式中: v_i 和 v_j 分别为配电网节点 i 和节点 j 的电压幅值; \underline{v}_i 和 \bar{v}_i 分别为节点 i 的电压幅值上限和下限; p_{ij} 和 q_{ij} 分别为从节点 i 流向节点 j 的有功和无功功率; \bar{p}_{ij} 为线路 (i, j) 最大有功功率容量; r_{ij} 和 x_{ij} 分别为线路上的电阻和电抗; v_1 为平衡节点; $\pi(j)$ 为从节点 j 流出的支路线路集合; p_{jm} 和 q_{jm} 分别为支路 (j, m) 上的有功和无功功率; P_j 和 Q_j 分别为节点 j 上的有功和无功功率需求。

5) 耦合节点功率约束

对于电力-交通耦合网络,假设配电网节点上有常规负荷以及电动汽车出行路径上产生的充电负荷,则在耦合节点上的功率需求可以表示为

$$P_i = p_i^d + \sum_{s \in C(i)} x_s P_{ch}, \forall i \in D_N \quad (18)$$

式中: P_i 和 p_i^d 分别为配电网节点 i 上总有功功率需求和常规负荷有功功率需求。

6) 投资预算约束

折算至每年的道路扩容、新增充电桩、新建配电网线路和变电站扩容成本之和应在投资预算范围内,即

$$\kappa(c_1 + c_2 + c_3 + c_4) \leq c_{tz} \quad (19)$$

式中: c_{tz} 为年投资预算的最大额度。

2.2 下层混合交通均衡模型

2.2.1 目标函数 根据 Wardrop 用户均衡理论^[18],车主在交通网中的出行路径一般会选出行时间最小的那一条,而车主的路径选择行为会产生交互影响,导致交通网中各条道路上的车流量发生变化,并最终达到均衡状态。均衡状态下每位车主的出行时间都不能通过改变自身的路径选择而减少,且车主在 OD 对上各条路径的通行时间相同且最小。因此,本文所提下层模型实际上是交通流量分配问题, EV 和 NV 车主根据上层规划决策,选择出行时间成本最小的路径。则基于 UE 理论,具体的混合交通均衡为

$$\min F^l = \omega \sum_{a \in TA} \int_0^{x_a} t_a(\epsilon) d\epsilon + \omega \sum_{s \in S} \int_0^{x_s} t_s(\partial) d\partial +$$

$$\omega \sum_{w \in W} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P_k^w} f_{p,k}^w E_{p,k}^w / P_{ch} \quad (20)$$

$$s.t. \text{式(1) - (2)} \quad (21)$$

$$x_s = \sum_{w \in W} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P_k^w} f_{p,k}^w \gamma_{s,p,k}^w, s \in S \quad (22)$$

式中: ω 为出行单位时间成本; $E_{p,k}^w$ 为 OD 对 w 上第 k 类 EV 在 p 路径上的充电电量; P_{ch} 为充电桩的额定功率; $\gamma_{s,p,k}^w$ 表示在 OD 对 w 上, 当 p 路径上第 k 类 EV 选择在充电站 s 充电时, $\gamma_{s,p,k}^w = 1$, 否则为 0; 约束式(1)和(2)分别为道路与路径流量约束和 OD 对出行需求守恒约束, 并且确保每条路径的车流量不小于 0; 式(22)为充电站的充电车流量与路径流量关系约束。

2.2.2 最优出行路径模型 求解混合交通均衡模型需要构建路径集 \hat{P}_k^w 和 \hat{Q}^w , 由于 EV 的出行路径受到行驶里程限制和充电站选择的影响, 若采用枚举法进行路径规划的工作量是巨大的。因此, 本文采用文献[19-20]的方法获取路径集, 与不同的是本文考虑的是包含道路通行时间成本、充电排队时间成本和充电时间成本之和最小的车主最优出行路径。假设当前道路 a 上的交通流为 \tilde{x}_a 和充电站 s 的充电车流量为 \tilde{x}_s , EV 车主最优出行路径规划可以表示为

$$\min c_k^p = \omega \sum_{a \in TA} t_a(\tilde{x}_a) \delta_{a,p,k}^w +$$

$$\omega \sum_{s \in S} (t_s(\tilde{x}_s) \gamma_{s,p,k}^w + E_{p,k}^w / P_{ch}) \quad (23)$$

$$s.t. \Delta \delta_{p,k}^w = D^w \quad (24)$$

$$(L_{j,k}^w - L_{i,k}^w + d_a \bar{\omega} - E_{j,k}^w) \delta_{a,p,k}^w = 0, \forall (i,j) =$$

$$a \in T_A, j \in S, \forall k \in K, \forall p \in \hat{P}_k^w \quad (25)$$

$$(L_{j,k}^w - L_{i,k}^w + d_a \bar{\omega}) \delta_{a,p,k}^w = 0, \forall (i,j) =$$

$$a \in T_A, j \notin S, \forall k \in K, \forall p \in \hat{P}_k^w \quad (26)$$

$$(L_{i,k}^w - d_a \bar{\omega} - m_k) \delta_{a,p,k}^w \geq 0,$$

$$\forall (i,j) = a \in A, \forall k \in K, \forall p \in \hat{P}_k^w \quad (27)$$

$$E_{p,k}^w = \max\{0, \sum_{a \in TA} d_a \bar{\omega} \delta_{a,p,k}^w + m_k^w - L_{0,k}^w\} \quad (28)$$

$$m_k^w \leq L_{s,k}^w \leq L_m \gamma_{s,p,k}^w + (1 - \gamma_{s,p,k}^w) L_m,$$

$$\forall s \in S, \forall k \in K, \forall p \in \hat{P}_k^w \quad (29)$$

$$L_{o(w),k}^w = L_{0,k}^w \quad (30)$$

式中: $L_{i,k}^w$ 和 $L_{j,k}^w$ 表示第 k 类 EV 经过道路 a 的起点 i 和终点 j 时的电量; d_a 表示道路 a 的长度; $\bar{\omega}$ 为每 km 耗电量; m_k 表示第 k 类车主由于“里程焦虑”产生的电池最低荷电状态; $L_{s,k}^w$ 表示第 k 类 EV 离开充电站 s 的电量; L_m 为电池额定容量; $L_{o(w),k}^w$ 表示第 k 类 EV 在 OD 对 w 起点的电量; $L_{0,k}^w$ 为第 k 类 EV 的初始电量。式(24)表示 EV 选择路径与出行需求约束; 式(25)和(26)为道路 a 终点 j 有充电站和没有充电站时, 第 k 类 EV 经过道路 a 的电量守恒约束; 式(27)为第 k 类 EV 离开道路 a 的电量

不低于最低电量阈值约束; 式(28)为第 k 类 EV 有充电需求时产生的充电电量约束; 式(29)为充电电量的上下限约束; 式(30)为 OD 对起点初始电量约束。

NV 的最优出行路径仅需考虑道路通行时间成本, 则

$$\min c_q^w = \omega \sum_{a \in TA} t_a(\tilde{x}_a) \delta_{a,q}^w \quad (31)$$

$$s.t. \Delta \delta_q^w = D^w \quad (32)$$

3 电力-交通耦合网络扩展规划求解流程及算法

本文所提考虑混合交通均衡的电力-交通耦合网络扩展规划模型中, 上层和下层模型都是一个多变量和非线性的优化问题, 随着网络规模的变大, 求解难度也将增加。因此, 本文在上层扩展规划模型中借助混合粒子群算法进行求解, 算法参数可以参考文献[21-22]。下层混合交通均衡模型可以借助 IPOPT 等求解器进行求解, 具体的扩展规划求解流程见图 1。

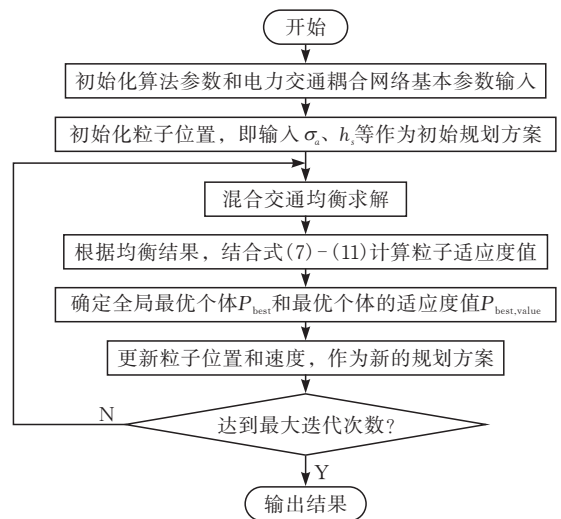


图 1 电力-交通耦合网络扩展规划流程

步骤 1: 初始化算法参数和基本参数输入。基本参数包括交通网道路参数、配电网节点线路参数、投资成本参数、充电站参数、耦合节点信息以及 EV 和 NV 出行需求等。

步骤 2: 初始粒子位置。在约束范围内, 生成初始粒子位置并将其作为初始的上层规划方案, 传递至下层模型。

步骤 3: 混合交通均衡模型求解。1) 根据上层的规划决策, 对于 NV 和第 k 类 EV, 在每个 OD 对 w 上首先使 $(\dots, \tilde{x}_a, \dots) = (\dots, 0, \dots)$, 通过求解式(23)获得初始出行路径集 \hat{P}_k^w 和 \hat{Q}^w 。2) 在 \hat{P}_k^w 和 \hat{Q}^w 下求解式(20), 得到均衡状态下各道路当前车流量为 $(\dots, \tilde{x}_a, \dots)$ 和充电车流量 $(\dots, \tilde{x}_s, \dots)$, 以及

第 k 类 EV 和 NV 在路径上的出行成本 $u_{EV,k}^w$ 和 u_{NV}^w 。3)在道路流量为 $(\cdots, \tilde{x}_a, \cdots)$ 和充电车流量为 $(\cdots, \tilde{x}_s, \cdots)$ 时,求解式(23),若在每个 OD 对 w 上 NV 和第 k 类型 EV 最优出行路径成本 c_q^w 和 $c_{p,k}^w$ 满足 $c_q^w \leq u_{NV}^w$ 和 $c_{p,k}^w \leq u_{EV,k}^w$, 将路径 p 和 q 加入路径集 \tilde{P}_k^w 和 \tilde{Q}^w 。迭代终止条件为所有 OD 对均不满足上述条件;否则返回第 2)步。

步骤 4:计算粒子适应度值。在获得最终交通均衡状态后,将道路流量分配结果和各充电站充电车流量结果返回至上层,根据式(7)–(11)计算适应度值,对于不满足约束条件的粒子设置惩罚值,最终的适应度值为式(7)加上惩罚值。

步骤 5:确定全局的最优个体 P_{best} 和最优个体的适应度值 $P_{best, value}$ 。

步骤 6:更新粒子的位置和速度并将其作为新的规划方案。

步骤 7:终止条件。检测是否达到最大迭代次数,若达到最大迭代次数则输出最优的扩展规划结果;否则,返回步骤 3。

步骤 8:输出最优规划结果并进行统计。

4 算例分析

4.1 基本参数

本文考虑用 Nguyen-Dupuis 交通网和 14 节点的配电网^[23]构建耦合网络来对所提规划方法进行仿真分析(图 2)。Nguyen-Dupuis 交通网包含了 4 个 OD 对,19 个路段,道路的基本参数如附录 A 表 A1 所示。规划年限 $y=10$ 年;贴现率 $r=0.08$;年最大投资预算额度 $c_{tz}=1000$ 万元。高峰时段电动汽车和普通汽车的出行需求如附录 A 表 A2 所示。充电站的基本参数如附录 A 表 A3 所示,平均充电排队等待 t_s^0 为 5 min,充电桩的最大扩建数量 $h_{s, \max}=30$,单位时间充电桩的服务能力 $\Delta s=1$;假设每个充电站通过变压器与配电网节点相连。电力-交通网耦合节点信息如附录 A 表 A4 所示。

交通网中道路扩容成本 $c_1=1.5 \times 10^6$ 元/条;充电桩的单位成本 $c_2=3 \times 10^4$ 元/台;道路通行单位时间成本 $\omega=20$ 元/h。单条道路扩容最大数量 $\sigma_{a, \max}=3$,新建道路与原有道路容量相同。文中所用电动汽车电池容量为 55 kWh,耗电量为 0.18 kWh/km,假设各 OD 对上 EV 电池初始状态 $L_{0,k}^w$ 分为最大电池容量的 35%、45%、55%和 65%,对应的最低电量阈值 m_k^w 分为最大容量的 20%、15%、20%和 25%,OD 对上各类 EV 数量相等。

配电网中节点电压幅值上限 $\bar{v}_i=1.05$ 和下限

$\underline{v}_i=0.95$;配电网新建线路成本 $c_3=3 \times 10^6$ 元,节点间最大新建线路数量 $n_{ij, \max}=3$;线路的有功功率容量设置为 16 MW;变电站扩容成本 $c_4=500$ 元/kVA, $P_{k,0}^{sub}$ 为不新增充电桩时恒定负荷需求。

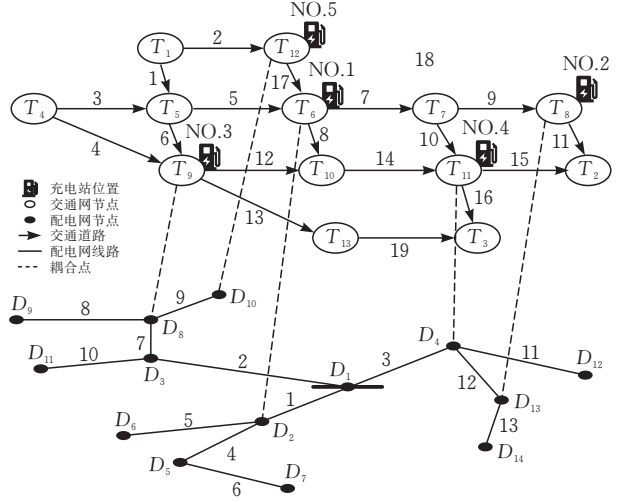


图 2 交通网和配电网耦合拓扑结构

4.2 仿真结果和分析

为了验证文中所提的扩展规划模型,考虑了交通均衡下 5 种不同的交通出行场景,即在 OD 对间普通汽车出行需求不变的情况下,电动汽车的出行需求分别增长 0、25%、50%、75%和 100%,来模拟电力-交通耦合网络下电动汽车在不同出行渗透率下的扩展规划策略。扩展规划模型的投资成本结果如图 3 所示,相应的道路扩容、新增充电桩和新建配电网线路数量如图 4 所示。

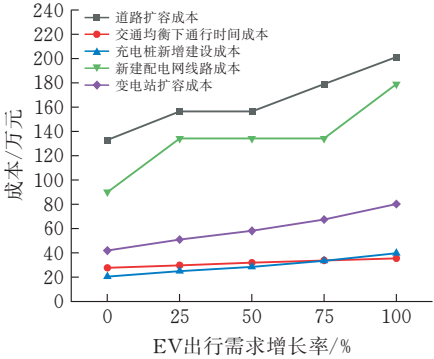


图 3 不同场景下扩展规划成本

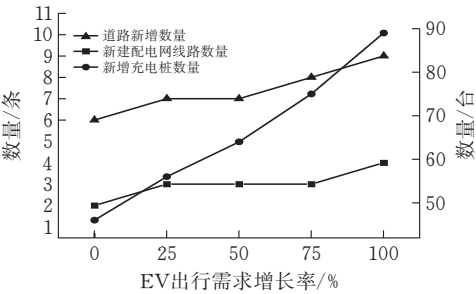


图 4 不同场景下扩展规划数量

在图 3 和图 4 中,随着 EV 出行需求的增加,扩展规划模型中各设施的投资成本和规划数量都呈现出增长趋势。其中,道路扩容成本和配电网新建线路成本在整个投资成本中占主要部分,说明扩展规划策略需要加大对这两个方面的投资来满足 EV 出行需求增长而带来的交通负荷和充电负荷的增长。

4.2.1 道路扩容分析 交通道路在 EV 不同出行场景下最优扩容的具体位置和数量见表 1。

表 1 道路扩展规划策略

道路编号	EV 出行需求增长率/%				
	0	25	50	75	100
1	1	1	1	1	1
2	0	0	0	0	1
3	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1
6	0	0	0	0	0
7	0	1	1	1	1
8	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0
11	1	1	1	1	1
12	0	0	0	1	1
13	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0
16	1	1	1	1	1
17	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0

从表 1 中可以看出,每条需要扩容的道路在扩建 1 倍后都可以满足 EV 出行需求增加的 5 种场景,而不需要继续扩容。并且,交通网中道路的扩容倍数并不会随着 EV 出行交通量的增加而增加,如在 EV 出行需求增加 25% 和 50% 的场景,这两个场景下的规划策略相同。因为当道路扩容后,原有的道路容量增加了,但在交通均衡状态下通过道路的车流量并不会大幅增加使其超过扩容后的道路容量。

图 5 和图 6 给出了 EV 出行需求增加 0 和 100% 场景下各道路的实际车流量。

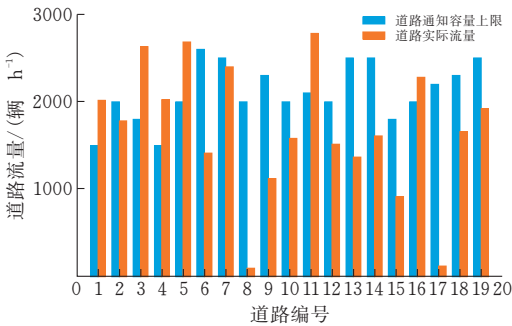


图 5 EV 出行需求增加 0 时各道路车流量

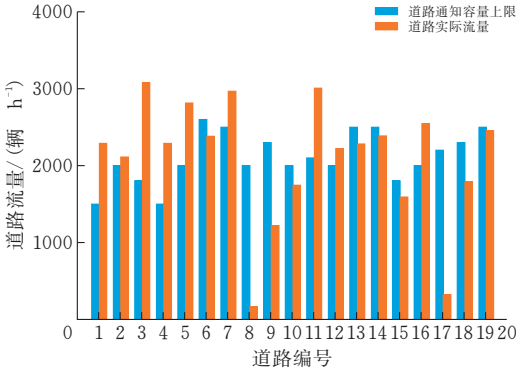


图 6 EV 出行需求增加 100% 时各道路车流量

从图 5 和图 6 中可以看出,随着 EV 出行需求的增加,将导致一些路段的车流量增加,使道路的实际车流量超过通行容量上限。在图 6 中,不进行扩容的道路 3 和 4 在交通均衡下的实际车流量分别为 3082 和 2292,分别超过了其容量上限的 71.1% 和 52.8%,其通行时间也会大幅增加。因此,扩展规划策略需要对这些道路进行扩容,在 EV 出行增加 0 场景下有 6 条道路需要扩容,而在 EV 出行增加 100% 场景下有 9 条道路需要扩容。两个场景下道路扩容前后的通行时间如图 7 和图 8 所示。

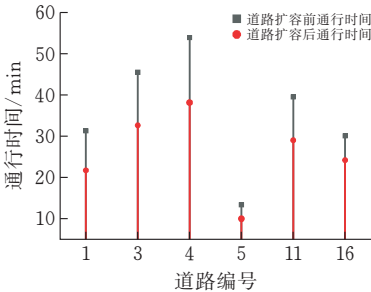


图 7 EV 出行需求增加 0 时扩容道路通行时间

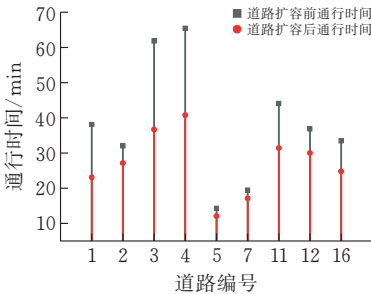


图 8 EV 出行需求增加 100% 时扩容道路通行时间

在图 7 和图 8 中,交通均衡下道路不进行扩容的通行时间会随着 EV 出行需求的增加而增加,如道路 3 在 EV 出行增加 0% 时通行时间为 53.8 min,在 EV 出行需求增加 100% 时通行时间达到了 61.8 min。而两个场景下道路的通行时间在经过道路扩容后都降低了,提高了车主出行的便捷性,说明在扩展规划模型中道路扩容的有效性。

4.2.2 新增充电桩扩展规划分析 5 种场景下,各充电站内新增充电桩的数量如表 2 所示。

表2 充电桩扩展规划策略

充电站编号	EV 出行需求增长率/%				
	0	25	50	75	100
NO.1	10	13	17	25	28
NO.2	10	11	11	15	17
NO.3	14	15	18	21	21
NO.4	0	1	2	0	3
NO.5	12	16	16	14	20

从表2中可以看出,随着EV出行需求的增加,各充电站内新增充电桩的数量都呈现增加趋势,而充电站NO.1新增充电桩数量最多,因为它所在的交通网节点有多条路径经过,会带来更多充电需求。图9给出了它在不同场景下充电桩新增前后的充电排队时间。充电站NO.4原有的充电桩数量能够满足增长的充电需求,因此它新增的数量不多。

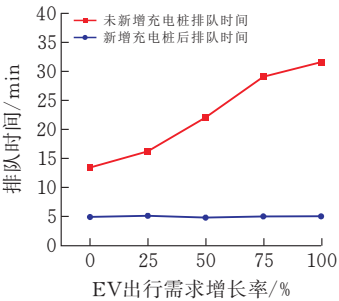


图9 充电站 NO.1 在不同场景下的充电排队时间

图9中,在充电站NO.1新增充电桩前,各场景下都有较长的充电排队时间。在进行扩建后,车主的充电排队时间都有较大减少,说明扩建充电桩能够有效改善车主充电体验,提高充电的便捷性。

4.2.3 耦合网络下配电网扩展规划分析 不同场景下配电网新建线路的具体位置和数量见表3。

表3 配电网线路扩展规划策略

配电网线路	EV 出行需求增长率/%				
	0	25	50	75	100
D ₁ -D ₂	1	1	1	1	1
D ₁ -D ₃	0	1	1	1	1
D ₁ -D ₄	0	0	0	0	1
D ₃ -D ₈	1	1	1	1	1

在表3中可以看出,EV出行需求增加25%场景下的规划策略能够满足出行需求增加50%和75%两个场景。耦合网络下,充电需求给电力节点带来新的负荷,随着EV出行需求增加100%,产生大量的充电负荷,此时线路传输的有功功率将超过其容量限制。因此,需要对线路D₁-D₂、D₁-D₃、D₁-D₄和D₃-D₈进行扩建,以确保电力能够持续输送到充电站。

4.2.4 敏感性分析 考虑车主在最短路径方式下出行和在交通均衡下出行,将两种模式进行对比。则在电动汽车的出行需求增加100%场景下的通行

时间成本如表4所示。

表4 不同出行方式通行时间成本对比

出行方式	交通网总通行时间成本/元
交通均衡	356589
最短路径	1011738

通过对比表4中的通行时间成本,车主在交通均衡下通行时间成本比最短路径下小,因为当车主都选择最短路径出行时会导致交通拥堵,其通行时间反而会大幅增加。而交通均衡下路径上的通行时间都达到了均衡状态,其通行时间成本也会更小。

5 总结

本文提出了计及混合交通均衡的电力-交通耦合网络扩展规划方法,建立了以投资建设成本最小的上层规划模型和混合动力汽车和普通汽车的下层交通流分配模型,通过混合粒子群算法和IPOPT求解器进行求解,确定了电动汽车在不同出行场景下的最优扩展方案,研究结论如下:

- 1)OD对出行需求的增加会导致一些道路通行容量超过其限制,进而导致通行时间大幅增加。考虑道路扩容方案能够有效改善通行时间,为车主出行带来便利,这也验证了本文扩展规划模型解决道路拥塞问题的有效性。
- 2)道路上的充电需求会给耦合网络下的配电网节点引入新的负荷,规模化充电负荷接入会导致一些配电网线路的有功功率超过其容量限制,需要对线路进行扩展建设来保证电力的传输。
- 3)相较于最短路径出行,采用交通均衡模型更能反映实际道路通行状况和车辆间的交互影响,改善交通网系统的运行和车主出行时间。

[参考文献]

[1] 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(03):981-994.

[2] 张书玮,冯桂璇,樊月珍,等.基于信息交互的大规模电动汽车充电路径规划[J].清华大学学报(自然科学版),2018,58(03):279-285.

[3] 崔金栋,罗文达,周念成.基于多视角的电动汽车有序充放电定价模型与策略研究[J].中国电机工程学报,2018,38(15):4438-4450.

[4] 张谦,唐飞,刘涤尘,等.计及电动汽车充电和负荷波动极限的电力系统静态电压稳定性评估方案[J].电网技术,2017,41(06):1888-1895.

[5] 贾龙,胡泽春,宋永华,等.储能和电动汽车充电站与配电网的联合规划研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1):73-84.

[6] 李宏仲, 张伟, 高宇男, 等. 考虑用户出行特性和配电网线路可用裕度的充电站规划[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(23): 48-56.

[7] 栗然, 臧向迪, 张文昕, 等. 共享电动汽车混合充换电站选址优化[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 67-74.

[8] 程杉, 吴思源, 孙伟斌. 考虑电压稳定性和充电服务质量的电动汽车充电站规划[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(07): 12-21.

[9] 张林垚, 郑洁云, 胡志坚, 等. 基于混合用户均衡理论和充放电管理的快/慢充电站规划[J]. 电力建设, 2021, 42(08): 99-109.

[10] LI S, HUANG Y, 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: 128-43.

[11] SHAHRAKI N, CAI H, TURKAY M, et al. Optimal locations of electric public charging stations using real world vehicle travel patterns[J]. Transport Res D-Tr E, 2015, 41: 165-76.

[12] WANG D Z W, LIU H, SZETO W Y. A novel discrete network design problem formulation and its global optimization solution algorithm[J]. Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review, 2015, 79: 213-30.

[13] WEI W, MEI S, WU L, et al. Robust Operation of Distribution Networks Coupled With Urban Transportation Infrastructures[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 2118.

[14] 孔顺飞, 胡志坚, 谢仕炜, 等. 基于电气化交通网络扩展模型的主动配电网规划方法[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 4160-4171.

[15] 邵成成, 李徐亮, 钱涛, 等. 基于交通均衡的电动汽车快速充电负荷模拟[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(04): 1368-1376.

[16] 王守相, 刘栋, 于璐, 等. 考虑交通网与配电网耦合基于数据包络分析的电动汽车充电设施多阶段规划方法[J]. 电力自动化设备, 2022(10): 42.

[17] WEI W, WU L, WANG J, et al. Expansion planning of urban electrified transportation networks: a mixed-integer convex programming approach [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2017, 3(1): 210-240.

[18] HE J, YANG H, TANG T-Q, et al. Optimal deployment of wireless charging lanes considering their adverse effect on road capacity [J]. Transportation Research Part C-Emerging Technologies, 2020, 111: 171-184.

[19] LIU K, LUO S, ZHOU J. En-route battery management and a mixed network equilibrium problem based on electric vehicle drivers' en-route recharging behaviors[J]. Energies, 2020, 13: 16.

[20] 杨洪明, 李明, 文福拴, 等. 利用实时交通信息感知的电动汽车路径选择和充电导航策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 106-113.

[21] 文娟, 谭阳红, 雷可君. 基于量子粒子群算法多目标优化的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 73-78.

[22] 张良, 孙成龙, 蔡国伟, 等. 基于 PSO 算法的电动汽车有序充放电两阶段优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(05): 1837-1852.

[23] ZHANG H, MOURA S J, HU Z, et al. PEV fast-charging station siting and sizing on coupled transportation and power networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 2595-605.

Expansion Planning of Electric Traffic Coupling Network Considering Mixed Traffic Equilibrium

ZHU Liwen, HE Jun, HUANG Wentao

(Hubei Collaborative Innovation Center for High Efficiency Utilization of Solar Energy, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

Abstract: In order to reduce the risk of traffic paralysis caused by large-scale electric vehicle travel and the risk of safe operation of the power grid, based on the establishment of the coupled model of the distribution network and the transportation network, a two-layer planning model of the power-traffic coupled network considering the equilibrium of mixed traffic is proposed. The upper model is an investment planning model established to minimize the sum of the costs of road travel time, road expansion, new charging piles, substation expansion, and new distribution network lines. The lower model is a mixed traffic equilibrium model established based on the user equilibrium theory, considering road capacity expansion and charging station congestion effects. Then, the upper model is solved by the hybrid particle swarm algorithm, and the lower model is solved by the IPOPT solver combined with the optimal travel path model of the vehicle owner. The Nguyen transportation network and the 14-node distribution network are used to build a coupled network for simulation analysis. The results show that the optimal expansion plan for elec-

tric vehicle travel demand increases by 0%, 25%, 50%, 75%, and 100%, which verifies the effectiveness of the proposed planning method.

Keywords: coupling network; road expansion; traffic equilibrium; expansion plan; power distribution network

附录

表 A1 Nguyen-Dupuis 交通网基本参数

道路 编号	连接 节点	道路通行 容量(vch/h)	距离/ km	自由通行 时间/min
1	T ₁ -T ₅	1500	30	21
2	T ₁ -T ₁₂	2000	36	27
3	T ₄ -T ₅	1800	39	27
4	T ₄ -T ₉	1500	48	36
5	T ₅ -T ₆	2000	15	9
6	T ₅ -T ₉	2600	36	27
7	T ₆ -T ₇	2500	24	15
8	T ₆ -T ₁₀	2000	45	39
9	T ₇ -T ₈	2300	18	15
10	T ₇ -T ₁₁	2000	36	27
11	T ₈ -T ₂	2100	36	27
12	T ₉ -T ₁₀	2000	36	30
13	T ₉ -T ₁₃	2500	30	27
14	T ₁₀ -T ₁₁	2500	24	18
15	T ₁₁ -T ₂	1800	36	27
16	T ₁₁ -T ₃	2000	27	24
17	T ₁₂ -T ₆	2200	21	21
18	T ₁₂ -T ₈	2300	48	42
19	T ₁₃ -T ₃	2500	39	33

表 A2 各 OD 对上的出行需求

OD 对	NV 出行需求	EV 出行需求
(1,2)	1600	200
(1,3)	1600	400
(4,2)	1500	500
(4,3)	1800	400

表 A3 充电站的基本参数

编号	所在路网节点	充电桩数量/台	充电桩功率/kW
NO.1	6	20	120
NO.2	8	15	120
NO.3	9	15	120
NO.4	11	20	120
NO.5	12	10	120

表 A4 耦合节点信息

交通网节点	对应配电网节点
T ₆	D ₂
T ₈	D ₁₃
T ₉	D ₈
T ₁₁	D ₄
T ₁₂	D ₁₀

[责任编辑：张岩芳]

(上接第 4 页)

Autonomous Following Positioning Method on Slope Road Based on Multi-sensor

CHEN Changle¹, JING Jiabao¹, LIU Yongcheng², XIE Yuqing², HE Tao^{1,2}

(1 School of Mechanical Engineering, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China;

2 School of Detroit Greed Tech. Institute, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

Abstract: Aiming at the problem of inaccurate or impossible positioning due to the slope of the road when the following robot locates the moving target, a positioning method based on multi-sensor information fusion is proposed. The method first uses the triangulation method to calculate the spatial coordinates of each signal source. Then, by means of multi-sensor information fusion, the spatial coordinates of any three known signal sources are calculated, and the center coordinates of multiple moving targets are obtained. Finally, the least squares approximation is used to calculate the exact center coordinates and real-time motion pose of the moving target. The experimental results show that the method has a positioning accuracy of $\pm 41\text{mm}$ for the moving target on the slope road, which meets the requirements of the positioning system.

Keywords: robot; multi-sensor information fusion; multiple source; autonomous follow and positioning

[责任编辑：张 众]