

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

王守相, 刘 栋, 于 潞, 赵倩宇

(天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要:近年来,电动汽车快速增长带来了充电设施需求的增长,但当前普遍存在着充电设施数量与电动汽车规模不匹配、布局不合理等问题,原因在于充电设施的规划未考虑规划时序和交通网的需求。为此,提出一种考虑交通网与配电网耦合的电动汽车充电设施多阶段规划方法。首先,基于用户均衡配流原则,构建交通网与配电网的耦合模型,采用蒙特卡罗抽样方法生成多场景下的车流量分布情况;然后,将规划周期分为多个阶段,以用户充电满意度、经济性和电压波动性为优化目标,建立基于数据包络分析方法的多阶段规划模型;最后,以IEEE 33节点配电网与12节点交通网组成的耦合网络作为算例,采用改进的自由搜索算法进行求解,得到各阶段的优化配置方案。仿真结果表明,所提方法得到的规划方法能够使充电设施的规模更好地匹配电动汽车数量的增长。

关键词:电动汽车;充电设施;交通网;配电网;耦合网络;用户均衡配流;数据包络分析;多阶段规划

中图分类号:U 469.72

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202204010

0 引言

随着环境问题的日益严峻,实现碳达峰和碳中和成为我国当前的首要任务。电动汽车EV(Electric Vehicle)作为新一代的交通工具,在节能减排、柔性储荷等方面具有传统化石燃料汽车不可比拟的优势^[1],但我国目前存在着充电设施数量不足、规划布局不合理等问题^[2]。因此,如何规划EV的充电设施以满足EV规模的发展需求,成为一个需要研究的重要问题。

已有大量学者在EV充电设施规划方面进行了相关的研究。其中,在交通网与配电网耦合建模方面,文献[3]提出了一种“车-路-网”耦合系统的充电设施协同服务规划方法;文献[4]考虑交通网和配电网的相互依存关系,建立了整体网络的平衡模型。在EV出行场景构建以及交通流量仿真方面,文献[5]提出了一种考虑人口特征和社会特征的EV出行概况模拟方法;文献[6]采用双向波动态模型描述交通流随时间和空间的演变过程;文献[7]采用蒙特卡罗抽样方法模拟大规模EV一周的出行活动及充电过程。在规划目标和规划策略方面,文献[8]以规划成本最小、配电网电压水平最优、交通网满意度最佳为基础,提出了一种多目标规划模型;文献[9]从经

济效益和负荷波动角度出发,构建了多目标加权模糊规划模型;文献[10]充分考虑充电设施的容量、位置与服务范围间的关系,提出了一种基于免疫克隆选择算法的充电设施选址定容模型;文献[11]考虑场景发展不确定性对充电设施规划的影响,提出了一种以服务容量最大、电压偏移和网损最小为优化目标的多阶段规划策略。

综上所述,基于“车-路-网”耦合系统的EV充电设施规划研究已有较多的基础,但EV的出行情况与时段、节假日等因素直接相关,目前还欠缺综合考虑多场景的规划策略。在规划目标方面,反映用户实际充电需求的满意度指标还具有一定的改进空间。同时,已有的规划策略大多是单阶段静态规划,容易出现前期设备冗余而后后期设备不足的情况,难以满足快速增长的EV充电需求。因此,迫切需要研究一种考虑交通网与配电网耦合和用户实际充电需求的充电设施多阶段规划模型。

为此,本文首先基于用户均衡配流NUE(Nesterov User Equilibrium)原则构建交通网与配电网的耦合模型,采用蒙特卡罗抽样方法^[12]生成多场景下的车流量分布情况;然后,提出一种考虑充电设施覆盖率、用户充电等待时间以及用户损失率的充电满意度评估函数,并在此基础上引入经济性和电压波动性指标,建立多目标规划体系;最后,以数据包络分析DEA(Data Envelopment Analysis)作为各阶段充电设施规划成效的评估策略,建立多阶段规划模型,采用改进的自由搜索算法FSA(Free Search Algorithm)进行求解,并基于IEEE 33节点配电网与12节点交通网组成的耦合网络算例对模型进行验证。

收稿日期:2021-12-07;修回日期:2022-02-17

在线出版日期:2022-03-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077149);国家电网有限公司总部科技项目(5400-202199280A-0-0-00)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52077149) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5400-202199280A-0-0-00)

1 电气化交通网建模

1.1 交通网建模

在定义交通网整体拓扑的过程中,定义网络中的节点为路口,节点间的弧为路段。使用零流费时 t_a^0 与载流能力 C_a 表征路段的长度、宽度等基本信息。其中,零流费时 t_a^0 为路段 a 的车流量为0时,通过该路段所需时间;载流能力 C_a 为路段 a 在不拥堵的情况下所允许通过的最大车流量。交通网中存在很多的起讫点 O-D (Origin-Destination) 对, O-D 对间车流量表示具有相同起始节点和目的地节点的路径上的总车流量。每条行驶路径由不同路段连接而成,每条路径的车流量都会累积在所经过的路段上,故路段的车流量可表示为:

$$x_a = \sum_{rs} \sum_k f_k^{rs} \sigma_{a,k}^{rs} \quad \forall k \in T^{rs}, \forall a \in A \quad (1)$$

式中: x_a 为路段 a 的车流量值; f_k^{rs} 为在 O-D 对 rs (r 为起点、 s 为终点)下路径 k 的车流量; T^{rs} 为 O-D 对 rs 的全部连通路径集合; $\sigma_{a,k}^{rs}$ 为一个二进制数,若 O-D 对 rs 下路径 k 经过路段 a 则 $\sigma_{a,k}^{rs}=1$,否则 $\sigma_{a,k}^{rs}=0$; A 为交通网的路段集合。

用距离来衡量通行时间的方法没有考虑因道路拥堵引起的通行时间变长的问题。为此,本文采用美国公路局 BPR (Bureau of Public Roads) 的统计函数,借助时变的通行时间来描述车辆通过某路段的实际成本,如式(2)所示。

$$t_a = t_a^0 [1 + \alpha (x_a / C_a)^\beta] \quad (2)$$

式中: t_a 为路段 a 的实际通行时间; α 、 β 为模型的校正参数,在一般的城市交通网中有 $\alpha=0.15$ 、 $\beta=4.0$ 。

1.2 NUE 原则

在路径选择问题中,可以采用 Dijkstra、 A^* 等最短路径算法实现某个 O-D 对的最短路径搜寻,但在道路产生拥堵现象后,不同路段的实际通行时间会随着车流量的不同而发生显著变化,距离上最短的路径的通行时间可能会大于其他路径的通行时间。针对上述问题,文献[13]提出了一种基于 Wardrop 平衡态的 NUE 原则计算实际车流量分布情况的方法。

基于 Wardrop 平衡态的 NUE 原则可描述如下:在某个 O-D 对之间所有可供选择的路径中,用户通过各条可选路径的时间相等,且不大于未被选择的路径的通行时间。其数学描述如下:

$$\begin{cases} u_{rs} - c_k^{rs} = 0 & f_k^{rs} > 0 \\ u_{rs} - c_k^{rs} \leq 0 & f_k^{rs} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: u_{rs} 为在平衡态下 O-D 对 rs 的通行时间; c_k^{rs} 为 O-D 对 rs 下路径 k 的通行时间。

在该平衡态下,任意 O-D 对可选路径的通行时间均相等,即交通网中全部 EV 在出行时都选择耗时最短的路径,这符合实际生活中 EV 的出行原则,可

见基于 NUE 原则能够较好地模拟交通网中 EV 的整体分布情况。

1.3 交通网与配电网拓扑建模

EV 大规模接入交通网,给交通网与配电网的耦合关系带来了较大的变革。传统的交通网与配电网之间的交集主要包括路灯、信号灯等稳定性负荷,但 EV 作为一种充电间歇性强、出行随机性大的用电负荷,其大规模接入使得研究双网耦合建模具有必要性。在交通网中侧重于研究 EV 的出行特性,配电网中侧重于其充电特性,可以建立交通网与配电网的耦合规划拓扑如附录 A 图 A1 所示,其抽象化表述为:

$$\Delta = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \cdots & \delta_{1A'} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \cdots & \delta_{2A'} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \delta_{R'1} & \delta_{R'2} & \cdots & \delta_{R'A'} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$E_{\text{set}} = [e_1 \ e_2 \ \cdots \ e_N] \quad (5)$$

式中: Δ 为交通网节点路段的关联矩阵,若节点 r ($r=1, 2, \dots, R'$, R' 为交通网的节点总数)在路段 a ($a=1, 2, \dots, A'$, A' 为交通网的路段总数)的首端则其元素 $\delta_{ra}=1$,若节点 r 在路段 a 的末端则其元素 $\delta_{ra}=-1$,否则 $\delta_{ra}=0$; E_{set} 为配电网侧充电设施待建节点矩阵,若配电网节点 i 与路段存在交集则其元素 $e_i=1$,否则 $e_i=0$; N 为配电网侧充电设施待建节点总数。

2 充电设施规划目标与约束

2.1 用户充电满意度指标

EV 充电设施规划是一个典型的选址定容问题,当用户有充电需求时,必然期望能够就近、无需排队地完成充电。因此,本文基于最大覆盖率理论^[10]和排队理论^[12]建立用户充电满意度指标 f_1 如下:

$$\max f_1 = -\omega_1 M_1 + \omega_2 M_2 \quad (6)$$

式中: ω_1 、 ω_2 为折中权重,本文中取值均为0.5; M_1 为充电设施规划的最大覆盖率模型; M_2 为 EV 充电所用的最短排队时间评估函数。

1) 最大覆盖率模型的目的是使充电设施能够最大限度地截获交通网中的车流量,如式(7)所示。

$$M_1 = \sum_i \kappa_i \sum_{rs} f_k^{rs} \sigma_i^{rs} \quad (7)$$

式中: f_k^{rs} 为 O-D 对 rs 之间的总车流量; σ_i^{rs} 为二进制决策变量,若 O-D 对 rs 的车流量通过节点 i 则 $\sigma_i^{rs}=1$,否则 $\sigma_i^{rs}=0$; κ_i 为充电设施待建节点 i 处地源位置的权重系数。

2) 从排队系统服务规则的角度而言, EV 接受充电服务属于先到型服务,其到达时间和接受服务的时间服从负指数分布,排队模型为 M/M/S/K, 如式(8)~(13)所示^[14]。

当节点 i 处充电设施的数量 $s_i=1$ 时,有:

$$\lambda_i = p_{\text{probability},g} x_i \quad (8)$$

$$p_0^i = \left(1 + \sum_{n=1}^{\lambda_i} \rho_i^n \right)^{-1} \quad (9)$$

$$L_s^i = p_0^i \rho_i \sum_{n=1}^{K_i} n \rho_i^{n-1} \quad (10)$$

当节点*i*处的充电设施数量 $s_i > 1$ 时,有:

$$p_0^i = \left\{ \sum_{n=0}^{s_i-1} \frac{\rho_i^n}{n!} + \frac{\rho_i^{s_i} [1 - (\rho_i/s_i)^{K_i-s_i+1}]}{(1-\rho_i/s_i)s_i!} \right\}^{-1} \quad (11)$$

$$P_c^i = \begin{cases} \rho_i^c p_0^i / c! & 0 \leq c < s_i \\ \frac{\rho_i^c p_0^i}{s_i! s_i^{c-s_i}} & s_i \leq c < K_i \end{cases} \quad (12)$$

$$L_s^i = \sum_{c=s_i}^{K_i} (c-s_i) P_c^i + s_i + p_0^i \sum_{n=0}^{s_i-1} \frac{(n-s_i) \rho_i^n}{n!} \quad (13)$$

式中: λ_i 为节点*i*处待充电EV数量; $p_{\text{probability},g}$ 为阶段*g*该路段EV的充电概率; x_i 为节点*i*所处路段的EV总数量; p_0^i 为节点*i*处充电设施的空闲概率; $\rho_i = \lambda_i / \mu_i$ 为节点*i*的充电服务强度, μ_i 为节点*i*的充电桩服务效率; K_i 为节点*i*处最大允许等待EV数量; P_c^i 为节点*i*处EV_c的充电概率; L_s^i 为节点*i*的平均等待队长。

当到达的EV数量大于充电设施的服务数量上限时,该节点处将会损失部分EV用户,可以通过Erlang损失公式来评估该部分用户的损失率,如式(14)所示。

$$p_s^i = \frac{\rho_i^{s_i}}{s_i!} \left(\sum_{n=0}^{s_i} \frac{\rho_i^n}{n!} \right)^{-1} \quad (14)$$

式中: p_s^i 为节点*i*处充电用户损失率。

综上,EV充电所用的最短排队时间评估函数可以表示为:

$$M_2 = \sum_{i=1}^N (L_s^i + p_s^i) \quad (15)$$

2.2 经济性指标

从充电设施运营商盈利的角度出发,以投资建设和运行维护成本为基础建立经济性指标 f_2 ,如式(16)所示。

$$\min f_2 = \sum_{i=1}^N (C_{1i} + C_{2i}) \quad (16)$$

$$C_{1i} = \left(\chi_i \sum_{\zeta} M_{i\zeta} A_{\zeta} \right) \frac{r_0(1+r_0)^Z}{(1+r_0)^Z - 1} \quad (17)$$

$$C_{2i} = \sum_{\zeta} M_{i\zeta} W_{\zeta} + \left(\chi_i \sum_{\zeta} M_{i\zeta} A_{\zeta} \right) \eta \quad (18)$$

式中: C_{1i} 为节点*i*处充电设施的年投资建设成本; C_{2i} 为节点*i*的年运行维护成本,主要包括充电桩的设备检修费用、折旧费用等; χ_i 为节点*i*处地源位置的投资建设成本系数; $M_{i\zeta}$ 为节点*i*处第 ζ 类充电桩的数量; A_{ζ} 为第 ζ 类充电桩单价; r_0 为贴现率; Z 为充电设施预计投入使用的年数; W_{ζ} 为第 ζ 类充电桩的年检

修维护费用; η 为折旧比例。

2.3 电压波动性指标

EV是一种充电随机性强的用电负荷,其大规模接入必然会导致配电网电压波动性增强。故本文选取电压波动性作为配电网侧的评估指标 f_3 ,如式(19)所示。

$$\min f_3 = \sum_{i=1}^N |V_i - V_N| / V_N \quad (19)$$

式中: V_i 为节点*i*的电压幅值; V_N 为标准电压幅值。

2.4 规划约束

1) 系统潮流约束。

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (20)$$

式中: P_i 、 Q_i 分别为节点*i*的有功功率、无功功率; θ_{ij} 为节点*i*与节点*j*之间的电压相角差; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵中第*i*行第*j*列元素的实部、虚部。

2) 节点电压约束。

$$V_{i,\min} \leq V_i \leq V_{i,\max} \quad (21)$$

式中: $V_{i,\min}$ 、 $V_{i,\max}$ 分别为节点*i*处允许的电压幅值最小值、最大值。

3) 馈线电流约束。

$$|I_{ij}| \leq I_{ij,\max} \quad (22)$$

式中: I_{ij} 、 $I_{ij,\max}$ 分别为节点*i*与节点*j*之间馈线的实际电流与馈线允许通过的最大电流。

4) 充电设施位置与容量约束。

$$P_{EV,\min} \leq P_{EV,i} \leq P_{EV,\max} \quad i \in \Omega_{EV} \quad (23)$$

式中: $P_{EV,i}$ 为节点*i*处计划建设的充电桩数量; $P_{EV,\min}$ 、 $P_{EV,\max}$ 分别为根据地区实际情况确定的充电桩数量的最小值、最大值; Ω_{EV} 为允许建设充电桩的节点位置集合。

3 多场景多阶段充电设施规划方法

3.1 EV出行多场景划分

基于电气化交通网的拓扑模型,城市功能区场景可划分为商业区(B)、工业区(I)和居住区(R),见附录A图A1。本文以电动私家车作为规划的主要对象,其在节假日、工作日不同时段出行概率以及目的地/始发地的选择方面存在显著的差异。文献[15]详细统计了城市区域内EV的出行情况,本文以此作为参考,分析得到规划区域内工作日、节假日电动私家车的车流量分布,分别见附录A表A1和表A2。由表可知,受上班等活动的影响,工作日电动私家车的出车率高于节假日,且工作日电动私家车的出行目的也不同于节假日,进而导致交通网中的车流量分布不同的场景下存在较大的差异。因此,考虑不同的电动私家车出行场景对于充电设施

规划具有实际的应用价值。

3.2 基于 DEA 的多阶段规划方法

EV 充电设施规划应密切结合 EV 规模的发展进程,考虑建设时序的多阶段规划方法能够满足不同时期的用户充电需求,其示意图如图 1 所示。图中,规划周期被分为 J 个阶段。

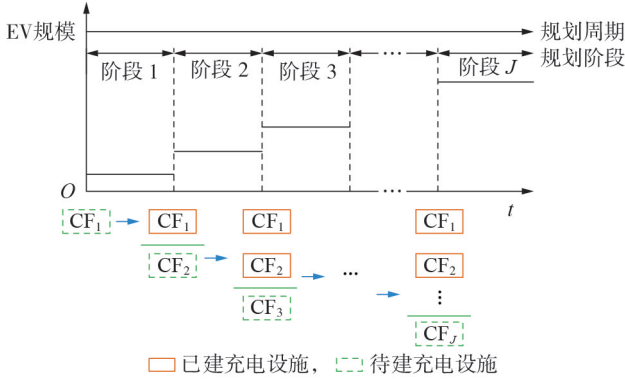


图 1 考虑建设时序的多阶段规划示意图

Fig.1 Schematic diagram of multi-stage planning considering construction time sequence

DEA 方法是一种包含多输入和多输出变量的多维评估方法^[16],其评估流程如图 2 所示。图中: Y_1 为阶段 1 的规划方案数量; Y_2 为阶段 2 在阶段 1 中规划方案 1 的基础上衍生的规划方案数量; Y_3 为阶段 3 在阶段 2 中规划方案 1-1 的基础上衍生的规划方案数量。

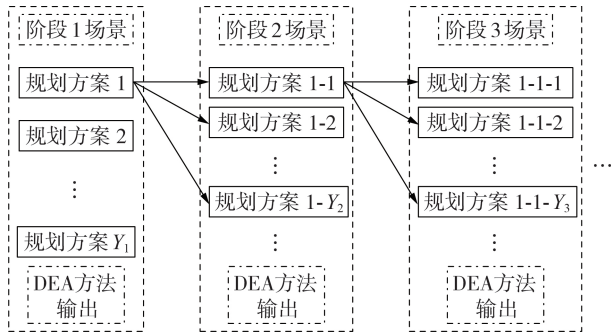


图 2 DEA 方法的评估流程

Fig.2 Evaluation process of DEA method

面向多输入和多输出的 DEA 方法能够解决多阶段规划问题中各阶段的方案优选问题。同时为了提高评估的准确性,首先需对规划的目标函数进行归一化处理,然后通过超效率的 DEA 方法进行各阶段的评估,其数学模型如式(24)~(26)所示。

$$\min E_y = \sum_{x=1}^S u_x F_{xy} / \sum_{i=1}^m v_i X_{iy} \quad (24)$$

$$F_{xy} = (f_{xy} - f_{x,\min}) / (f_{x,\max} - f_{x,\min}) \quad (25)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^m v_i X_{iy} = 1 \\ \sum_{x=1}^S u_x F_{xy} - \sum_{i=1}^m v_i X_{iy} \leq 0 \end{cases} \quad (26)$$

式中: E_y 为规划方案 y 的 DEA 评估值; S 为输出变量个数,在本文的规划问题中指输出目标函数值的个数; m 为输入变量个数,即规划中充电设施的待建节点数量; X_{iy} 为规划方案 y 的第 i 个输入变量; f_{xy} 、 F_{xy} 分别为规划方案 y 第 x 个输出变量的实际值、归一化数值; $f_{x,\min}$ 、 $f_{x,\max}$ 分别为第 x 个输出变量的最小值、最大值; v_i 、 u_x 为相关系数,可根据具体的问题确定得到。

3.3 改进的自由搜索算法

自由搜索算法是一种较新的群智能算法,体现了“以不确定的搜索方式应对不确定性问题”的思想^[17],具有个体记忆能力强、搜索不受限制和群体能够遍历整个搜索空间等优势。但搜索半径 R 和搜索步数 T 的设置会直接影响算法的性能,特别是对于复杂多目标非线性规划问题, R 和 T 的取值需随着搜索的进行不断调整,以此提高寻优速度和精度。因此本文采用一种改进的自适应邻域空间和搜索步长的自由搜索 ANSFS (Adapted Neighbourhood and Step Free Search) 算法,并按照式(27)~(29)设置搜索半径和搜索步数。

$$R_z(t+1) = R_z(t) e^{\frac{-tS_z}{wT}} \quad (27)$$

$$T_z(t+1) = \text{INT} \left(T_{0z} e^{\frac{wtS_z}{T}} \right) \quad (28)$$

$$S_z = (f_z - f_{\min}) / (f_{\max} - f_{\min}) \quad (29)$$

式中: t 为当前搜索步数; $R_z(t)$ 为个体 z 在第 t 步的搜索邻域范围; w 为调整因子,一般取值为 5; $T_z(t+1)$ 为个体 z 在第 $t+1$ 步的搜索步数; T_{0z} 为个体 z 的初始搜索步数; S_z 为个体 z 适应度的比例因子; f_z 和 $f_{\min}$ 、 $f_{\max}$ 分别为个体 z 的目标函数值及其最小值、最大值;INT($\cdot$) 为取整函数。

4 算例分析

4.1 算例情形设定

依据我国《新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)》和《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》,假设规划周期为 15 a,同时根据 EV 规模的发展速度将规划周期划分为 3 个阶段,各阶段的参数如表 1 所示。

表 1 各阶段的参数

Table 1 Parameters of each stage

阶段	开始时间	规划区域车辆规模 / 辆	EV 数量占比 / %
1	第一年	5000	10
2	第五年	5600	25
3	第十年	7000	50

算例选取 IEEE 33 节点配电网与 12 节点交通网组成的耦合网络,根据 EV 规模的发展速度,从经济性、用户充电满意度和电压波动性 3 个角度出发,对

充电设施的选址定容进行多阶段优化规划,整体规划流程图如图3所示。

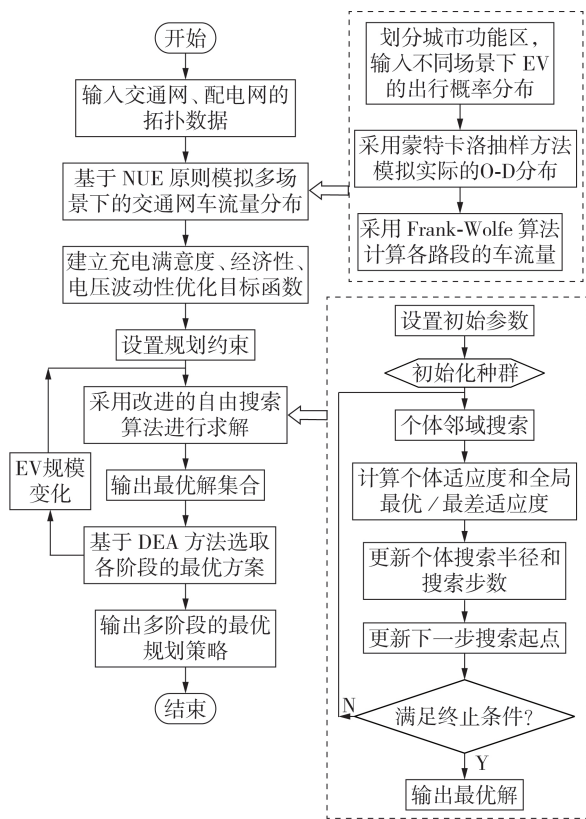


图3 整体规划流程图

Fig.3 Flowchart of overall planning

选取EV充电设施待建节点为配电网节点3、5、6、19—21、25—27、31,充电设施类型选取为7 kW的慢充电桩。其他参数设置如下:充电桩服务效率 $\mu_i=4$;充电桩单价 $A_c=600$ \$/台;充电桩的年检维护费用 $W_c=5\%$ A_c ;折旧系数 $\eta=0.2$;设备使用年限为20 a;贴现率 $r_0=0.1$;初始种群个数为100;搜索步数 $T=100$;个体的初始搜索步数为20;初始邻域搜索范围为1。

4.2 基于蒙特卡罗抽样方法的车流量模拟

EV出行具有极强的随机性、不确定性,不同场景下城市功能区EV的车流量分布结果见附录A表A1和表A2。基于上述结果,本文采用蒙特卡罗抽样方法模拟得到规划区域EV出行的整体分布情况。

交通网的拓扑数据见附录A表A3。在蒙特卡罗抽样的基础上,基于NUE原则计算整体车流量分布,见附录A图A2和图A3。由图可知:路段7、10、11、14等中心路段的车流量较大;在不同的时段,路段的车流量分布存在显著的不同,符合交通网的实际分布情况。可见,基于蒙特卡罗抽样方法模拟所得实际车流量分布能作为EV充电设施规划的参考数据。

4.3 结果分析

在阶段1的规划中,规划区域的车辆规模为5 000辆,其中EV数量占比为10%,待建节点的充电设施数量上限为5台。将初始值代入规划流程,根据DEA方法得到阶段1的规划结果如表2所示。表中,方案1侧重于用户充电满意度,方案2侧重于经济性指标,方案3侧重于电压波动性指标。在实际规划过程中,可以根据不同地区的实际需求,改变各目标的权重值,使决策者能够灵活选择规划方案。

在阶段2的规划中,规划区域车辆规模增加至5 600辆,其中EV数量占比为25%,待建节点的充电设施数量上限为7台。以阶段1的规划结果作为阶段2规划的初始值,根据DEA方法得到阶段2的规划结果如表3所示。在阶段2的规划中同样选取3个侧重于不同目标的方案作为最优选集合,由表3所示结果可知阶段2规划中侧重于用户充电满意度的方案是在阶段1以用户充电满意度最高的方案基础上发展而来的,其他方案也具有类似的特性,可见各阶段规划在侧重目标上具有关联性。

在阶段3的规划中,规划区域车辆规模达到7 000辆,其中EV数量占比为50%,待建节点的充电设施数量上限为10台,根据DEA方法得到阶段3的规划结果如表4所示。

表2 阶段1的规划结果

Table 2 Planning results of Stage 1

方案	充电设施配置数量/台										f_1	$f_2/\$$	$f_3/\%$	E_y
	节点3	节点5	节点6	节点19	节点20	节点21	节点25	节点26	节点27	节点31				
1	1	0	2	1	5	1	3	4	2	3	412	20328	1.3892	0.1511
2	0	1	2	3	3	1	1	3	0	2	801	16873	1.3853	0.1472
3	0	0	2	2	4	2	1	3	1	2	769	18948	1.3825	0.1454

表3 阶段2的规划结果

Table 3 Planning results of Stage 2

方案	充电设施配置数量/台										f_1	$f_2/\$$	$f_3/\%$	E_y
	节点3	节点5	节点6	节点19	节点20	节点21	节点25	节点26	节点27	节点31				
1	2	0	3	1	7	1	3	7	3	6	457	36972	1.4032	0.1795
2	1	1	3	3	5	1	2	4	1	3	639	27547	1.3989	0.1702
3	0	1	2	2	6	5	2	5	2	4	594	32186	1.3913	0.1679

表 4 阶段 3 的规划结果

Table 4 Planning results of Stage 3

方案	充电设施配置数量 / 台										f_1	$f_2 / \$$	$f_3 / \%$	E_y
	节点 3	节点 5	节点 6	节点 19	节点 20	节点 21	节点 25	节点 26	节点 27	节点 31				
1	4	2	6	4	9	8	6	10	2	8	658	52 140	1.4370	0.2017
2	2	1	3	3	7	3	5	6	3	5	943	38 228	1.4012	0.1813
3	0	2	3	2	8	5	3	7	4	6	828	42 547	1.3951	0.1768

综合 3 个阶段的规划结果可以发现, EV 规模的快速增长导致对充电设施的需求不断增加, 基于 DEA 的多阶段规划方法可以根据决策者的喜好和不同阶段的实际需求, 给出不同的规划方案, 能够有效避免单阶段规划中前期设备冗余、超前投资而后期设备不足、服务质量下降等诸多问题。

分析各阶段的规划结果可知, 用户充电满意度、经济性指标和电压波动性指标之间存在负相关性, 在单阶段的决策中难以很好地权衡各目标的权重。基于 DEA 的多阶段规划方法能使决策者根据实际的发展需求在各规划阶段的初期确定不同目标的权重, 避免多目标规划中的方案选择难题。

5 结论

本文首先基于交通网与配电网的耦合模型, 以 NUE 原则模拟实际车流量, 采用蒙特卡罗抽样方法模拟城市交通网的不同出行场景, 然后基于 DEA 方法建立多阶段规划模型, 并通过算例进行验证, 所得结论如下:

1) NUE 原则和蒙特卡罗抽样方法能够比较真实地还原实际交通网中 EV 的出行分布概况;

2) 基于最大覆盖率理论和排队理论的用户充电满意度指标能够较好地反映 EV 用户寻找充电设施和排队等待的过程;

3) 基于 DEA 的多阶段规划方法能够使决策者根据喜好和各阶段的实际情况确定规划方案, 可以满足 EV 规模发展的要求, 避免单阶段规划中前期设备冗余而后期设备不足的问题。

附录见本刊网络版 (<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 詹祥澎, 杨军, 韩思宁, 等. 考虑电动汽车可调度潜力的充电站两阶段市场投标策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10): 86-96.
ZHAN Xiangpeng, YANG Jun, HAN Sining, et al. Two-stage market bidding strategy of charging station considering schedulable potential capacity of electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(10): 86-96.
- [2] 郭磊, 王克文, 文福拴, 等. 电动汽车充电设施规划研究综述与展望[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3): 56-70.
GUO Lei, WANG Kewen, WEN Fushuan, et al. Review and prospect of charging facility planning of electric vehicles[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 56-70.

- [3] 孟锦鹏, 向月, 顾承红, 等. 面向可靠性提升的电动汽车充电基础设施协同优化规划[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 36-50.
MENG Jinpeng, XIANG Yue, GU Chenghong, et al. Collaborative optimization planning of electric vehicle charging infrastructure for reliability improvement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 36-50.
- [4] WEI W, WU L, WANG J H, et al. Network equilibrium of coupled transportation and power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6764-6779.
- [5] ZHANG J, YAN J, LIU Y Q, et al. Daily electric vehicle charging load profiles considering demographics of vehicle users[J]. Applied Energy, 2020, 274: 115063.
- [6] 谢仕伟, 胡志坚, 王珏莹. 考虑时-空耦合的城市电力-交通网络动态流量均衡[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(24): 8408-8424.
XIE Shiwei, HU Zhijian, WANG Jueying. Dynamic flow equilibrium of urban power and transportation networks considering the coupling in time and space[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8408-8424.
- [7] 陈静鹏, 艾芊, 肖斐. 基于用户出行需求的电动汽车充电站规划[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 34-39.
CHEN Jingpeng, AI Qian, XIAO Fei. EV charging station planning based on travel demand[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 34-39.
- [8] 孔顺飞, 胡志坚, 谢仕伟, 等. 考虑分布式储能与电动汽车充电网络的配电网多目标规划[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(1): 106-116.
KONG Shunfei, HU Zhijian, XIE Shiwei, et al. Multi-objective planning of distribution network considering distributed energy storage and electric vehicle charging network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1): 106-116.
- [9] 彭巧, 王秀丽, 邵成成, 等. 计及信息间隙决策理论的含电动汽车充电负荷的微电网多目标规划[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(1): 128-134, 158.
PENG Qiao, WANG Xiuli, SHAO Chengcheng, et al. Multi-objective planning of microgrid with electric vehicle charging load based on information gap decision theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 128-134, 158.
- [10] 吴雨, 王育飞, 张宇, 等. 基于改进免疫克隆选择算法的电动汽车充电站选址定容方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(7): 95-103.
WU Yu, WANG Yufei, ZHANG Yu, et al. Siting and sizing method of electric vehicle charging station based on improved immune clonal selection algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(7): 95-103.
- [11] 韩伟强, 王贵斌, 文福拴. 电动汽车充电设施多阶段最优规划[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2014, 41(5): 23-30.
HAN Weiqiang, WANG Guibin, WEN Fushuan. Multi-stage optimal planning of electric vehicle charging facilities[J]. Journal of North China Electric Power University, 2014, 41(5): 23-30.
- [12] 陈立兴, 韩晓新, 季振亚, 等. 高速公路充电网络充电设施运行状态时空预测建模[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8): 118-124.
CHEN Lixing, HAN Xiaoxin, JI Zhenya, et al. Spatio-temporal forecasting modeling for running status of charging facilities

in highway charging network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8): 118-124.

- [13] 四兵锋, 高自友. 交通运输网络流量分析与优化建模[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013: 56-79.
- [14] 韩中庚. 实用运筹学模型、方法与计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 195-223.
- [15] 北京交通发展中心. 2020年北京市交通发展年度报告[R]. 北京: 北京交通发展中心, 2020.
- [16] CHARNES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. European Journal of Operational Research, 1978, 2(6): 429-444.
- [17] PENEV K, LITTLEFAIR G. Free search-a comparative analysis[J]. Information Sciences, 2005, 172(1/2): 173-193.

作者简介:



王守相

2017234211@tju.edu.cn。

王守相(1973—),男,教授,博士研究生导师,主要研究方向为智能配电系统分析、分布式发电系统分析与仿真(E-mail: sxwang@tju.edu.cn);

刘 栋(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车充电设施优化规划(E-mail: liudong_1996@tju.edu.cn);

于 潞(1994—),男,博士研究生,主要研究方向为电动汽车负荷预测(E-mail:

(编辑 陆丹)

DEA-based multi-stage planning method of electric vehicle charging facilities considering coupling of transportation network and distribution network

WANG Shouxiang, LIU Dong, YU Lu, ZHAO Qianyu

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In recent years, the rapid growth of electric vehicles has brought about an increase in the demand for charging facilities. However, currently there are widespread problems such as the mismatch between the number of charging facilities and the scale of electric vehicles, the unreasonable layout, and so on. The reason is that the planning of charging facilities does not take into account the planning time sequence and the demand of transportation network. Therefore, a multi-stage planning method of electric vehicle charging facilities considering the coupling of transportation network and distribution network is proposed. Firstly, based on the principle of Nesterov user equilibrium, a coupling model of transportation network and distribution network is built, and Monte Carlo sampling method is used to generate traffic flow distribution in multiple scenarios. Then, the planning cycle is divided into several stages and the data envelopment analysis method-based multi-stage planning model is established with the optimization objectives of user charging satisfaction degree, economy and voltage fluctuation. Finally, taking the coupling network composed of IEEE 33-bus distribution network and 12-node transportation network as an example, the improved free search algorithm is used to solve the model to obtain the optimal configuration scheme of each stage. Simulative results show that the proposed planning method can make the scale of charging facilities better match the increase of the number of electric vehicles.

Key words: electric vehicles; charging facilities; transportation network; distribution network; coupling network; Nesterov user equilibrium; data envelopment analysis; multi-stage planning

附录 A

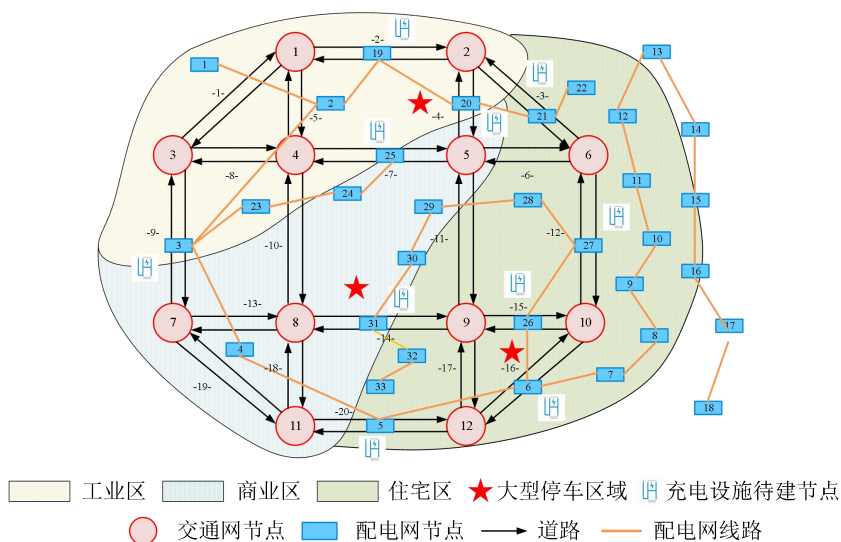


图 A1 交通网与配电网的耦合规划拓扑

Fig.A1 Coupling planning topology of transportation network and distribution network

表 A1 工作日的车流量分布
Table A1 Traffic flow distribution on weekday

场景	车流量/%			
	早高峰	白天	晚高峰	夜间
占全天比例	39.6	20.6	33.6	7.2
工业区到商业区	3	8	14	9
工业区到居民区	2	7	46	28
商业区到工业区	4	13	1	5
商业区到居民区	6	16	22	24
居民区到商业区	22	19	6	6
居民区到工业区	49	7	1	12
工业区内部分行	7	13	5	12
商业区内部分行	3	12	3	3
居民区内部分行	4	5	2	1

表 A2 节假日的车流量分布
Table A2 Traffic flow distribution on holiday

场景	车流量/%			
	早高峰	白天	晚高峰	夜间
占全天比例	15.2	45.1	21.4	18.3
工业区到商业区	17	9	13	6
工业区到居民区	9	5	13	13
商业区到工业区	8	3	2	3
商业区到居民区	8	19	18	31
居民区到商业区	24	27	31	23
居民区到工业区	19	3	2	2
工业区内部分行	2	6	3	3
商业区内部分行	3	17	11	13
居民区内部分行	10	11	7	6

表 A3 交通网拓扑数据
Table A3 Topology data of transportation network

路段号	C_a / p.u.	t_a^0 / min	路段号	C_a / p.u.	t_a^0 / min
T1(1-3)	18	6	T11(5-9)	13.8	12.5
T2(1-2)	20	10	T12(6-70)	20	10.5
T3(2-6)	17	6.5	T13(7-8)	8.9	5.8
T4(2-5)	9.8	5	T14(8-9)	13.2	11
T5(1-4)	7.9	5.5	T15(9-10)	9.15	5.9
T6(5-6)	8.5	6	T16(10-12)	17.5	6.3
T7(4-5)	13.5	12	T17(9-12)	9.76	5.7
T8(3-4)	8.2	6.5	T18(8-11)	8.97	5.8
T9(3-7)	19	10.2	T19(7-11)	18.2	6.1
T10(4-8)	14	11.5	T20(11-12)	20	9.8

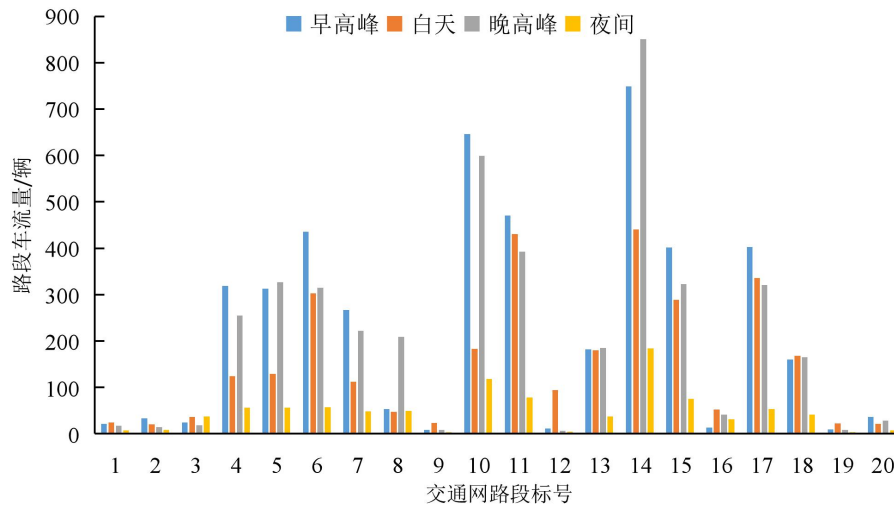


图 A2 工作日的路段车流量分布
Fig.A2 Traffic flow distribution of sections on weekday

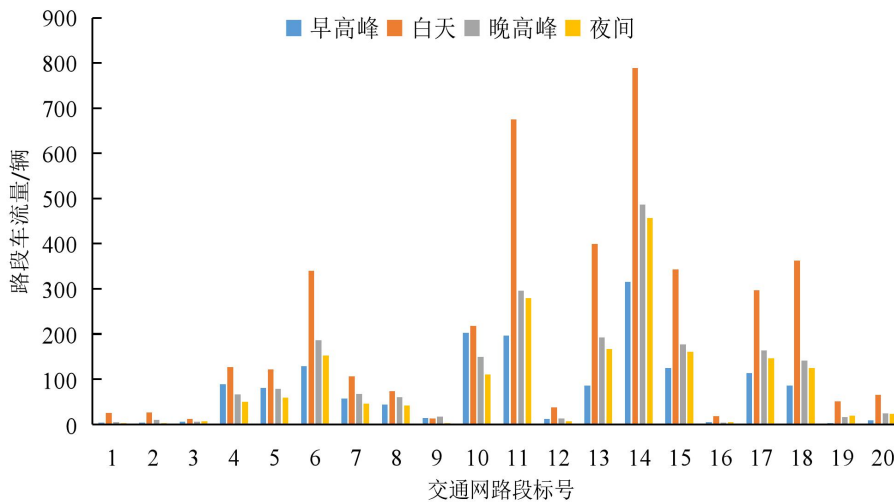


图 A3 节假日的路段车流量分布
Fig.A3 Traffic flow distribution of sections on holiday