DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.3.162 **中图分类号**：TM732 **文献标志码**：A

基于等值映射理论的有序充电提升配电网电压质量控制策略研究

宁志毫[1](中国电源学会会员)，王小源[1]，朱吉然[1]，肖 辉[2]，曾林俊[2,3]
(1.国网湖南省电力有限公司电力科学研究院，长沙 410007；2.电网防灾减灾全国重点实验室(长沙理工大学)，长沙 410114；3.长沙理工大学能源与动力工程学院，长沙 410114)

摘要：规模化电动汽车的普及显著加速了交通电气化转型，给配电网带来“峰上加峰”、电能质量劣化等挑战，加之电力和交通系统隶属于2个不同的运营主体，集中式优化实施困难。为此，提出1种基于等值映射的电力-交通非迭代协同优化方法。首先，构建含充电站功率的电力-交通解耦框架，将配电网最优运行模型转化为边界充电站功率的分段成本函数和所对应的等效约束集，从而使得电力-交通系统解耦单系统优化问题。其次，利用边界成本函数与节点电价的内在联系，提出含价格信号的电动汽车优化充电策略，缓解配电网重过载。最后，通过算例验证所提方法的有效性，表明有序充电策略可有效引导电动汽车充电行为，改善电压质量。

关键词：电动汽车；交通网；配电网；有序充电；电压质量

Control Strategy for Enhancing Voltage Quality in Distribution Network by Orderly Charging Based on Equivalent Mapping Theory

NING Zhihao[1], *Member*, *CPSS*, WANG Xiaoyuan[1], ZHU Jiran[1], XIAO Hui[2], ZENG Linjun[2,3]
(1. Electric Power Research Institute, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410007, China;
2. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Reduction for Power Grid (Changsha University of Science & Technology), Changsha 410114, China; 3. College of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The widespread adoption of electric vehicles (EVs) has significantly accelerated the electrical transition of transportation, which brings challenges to distribution network such as “peak-on-peak” demand and deterioration of power quality. Moreover, the power and traffic systems belong to two different operators, so it is difficult to perform centralized optimization. To address these issues, a novel non-iterative coordinated optimization method for power-traffic based on the equivalent mapping theory is proposed. First, a decoupled framework for power-traffic incorporating the power at charging stations is established, and the optimal operation model of distribution network is transformed into a piecewise cost function with boundary charging station power and the corresponding equivalent constraint sets, thereby achieving the decoupled and coordinated optimization of power-traffic systems. Second, by exploiting the intrinsic relationship between boundary cost functions and nodal electricity prices, an optimized charging strategy for EVs which incorporates price signals is put forward, so as to alleviate the overload issues in distribution network. Finally, the effectiveness of the proposed method is validated through a case study, and results also demonstrate that the orderly charging strategy can effectively guide the EV charging behavior and improve the voltage quality.

Keywords: Electric vehicle (EV); traffic network; distribution network; orderly charging; voltage quality

收稿日期：2024-12-03；**修回日期**：2025-01-09，2025-03-13；
录用日期：2025-03-26；**网络首发日期**：2025-04-23
基金项目：国网湖南省电力有限公司科技项目(重大专项)(5216A5240006)
This work is supported by State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd. Science and Technology Project (Major Project) under the grant 5216A5240006

国际能源署数据表明[1-2]，2024 年全球电动汽车 EV(electric vehicle)达到约 1 700 万辆，占全球汽车销量的 1/5 以上。预计到 2030 年，全球上路的电动汽车数量将达到当前的 10 倍左右，使得电力网络和交通网络联系越来越紧密[3-4]。电动汽车的出行会受到各种路况的影响，重塑交通流的时空分布；充电价格等因素会影响电动汽车对充电站的偏好，从而改变电力负荷的分布。伴随着电动汽车渗透率的提高，将对配电系统的电压质量和可靠性带来巨大的影响[5-9]。

目前，已有学者致力于分析电动汽车充电负荷对电力系统的运行和影响[10-13]。大多数研究立足于探究电动汽车对配电系统的影响，并未考虑电动汽车的交通属性。文献[13-19]开始考虑电动汽车的路网信息对电力系统的影响，对电力-交通联合建模优化及解耦，并采用不同的加速技术进行计算。但是，当前的研究利用传统的分布式算法，例如拉格朗日松弛和 Benders 分解，可能会出现收敛速度慢甚至无法收敛；为了满足耦合系统的平衡要求，信息交换频率的提高将进一步加重通信的负担；此外，随着配电系统和交通系统规模的不断增加，迭代次数将急剧增加。也有学者考虑利用价格信号对电动汽车用户的引导。为确定充电站的位置和车辆规模，文献[20]考虑分时电价和电动公交车的行为，搭建优化模型，确保公共交通网络的安全运行；为了满足电动汽车用户的充电需求并提高充电效率，文献[21]提出了 1 种电动汽车调度模型，利用价格引导来减轻充电站的服务压力；Jarvis 等[22]考虑风力发电的不确定性，优化电动公交车的充电行为，有效利用可再生能源资源，并减少非清洁能源的消耗；为了协调配电网中的经济调度和交通网的交通分配，Qiao 等[23]提出 1 个分散式框架来设计最优充电价格，考虑到合作充电网络运营商、移动电动汽车和电力系统之间的互动。

现有电压质量改善方法多依赖电网侧信息调度，未充分挖掘电动汽车交通行为的时空特性，且受限于电力和交通系统的“信息壁垒”。针对此问题，本文提出 1 种电力-交通解耦协同的配电网电压优化新框架。首先，分析电动汽车时空行为和耦合联系，基于用户均衡理论构建交通路网动态模型；然后，基于等值映射理论，将配电网最优运行模型等值为由“含边界信息(充电功率)的分段线性函数和等效约束集”，使得在有限数据条件下实现电力-交通等值解耦；最后，利用节点电价，引导电动汽车用户行为，避免集中充电，改善配电网的电压质量。

1　考虑电动汽车用户出行行为的电力-交通耦合模型

1.1　车辆行驶特性的交通网模型

1.1.1　考虑各类汽车的道路拥堵情况分析

交通网络的拓扑结构由路段和节点组成。路段代表车道，节点代表起点、目的地和交叉路口。为了模拟电动汽车的行驶行为，交通网中的路段被分为 3 个等效路段，包括充电路段、常规路段和旁路路段[6]，如图 1 所示。

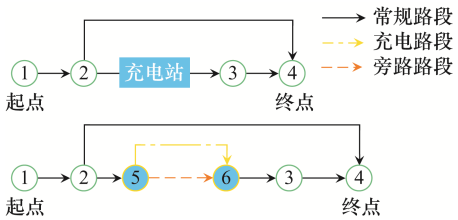


图 1　路段改造示意

Fig. 1 Schematic of modifying road links

充电路段、常规路段和旁路路段可分别表示为

$$t_a^{\mathrm{c}}(x_a)=t_a^{\mathrm{FCS}}\left[1+J\left(\frac{x_a}{c_a^{\mathrm{FCS}}-x_a}\right)\right]\quad \forall a\in T^{\mathrm{C}}(A) \tag{1}$$

$$t_a(x_a)=t_a^0\left[1+0.15\left(\frac{x_a}{c_a}\right)^4\right]\quad \forall a\in T^{\mathrm{R}}(A) \tag{2}$$

$$t_a(x_a)=0\qquad a\in T^{\mathrm{B}}(A) \tag{3}$$

式中：$t_a^{\mathrm{c}}(x_a)$ 为电动汽车在充电时段的通行时间；x_a 为路段的交通流量；t_a^{FCS} 为电动汽车的充电时间；c_a^{FCS} 为充电路段的通行能力，辆/h；J 为控制充电路段阻抗函数的曲率参数；$t_a(x_a)$ 为车辆的通行时间；t_a^0 为电动汽车在自由通行状态下行驶的时

间；c_a 为路段的通行能力；$T^{\mathrm{C}}(A)$ 为充电路段集合；$T^{\mathrm{R}}(A)$ 为交通网常规路段的集合；$T^{\mathrm{B}}(A)$ 为交通网中旁路路段的集合。

1.1.2 不同汽车行为的出行成本模型

充电汽车的出行成本包括其在常规路段通行的时间成本和快充站排队充电的时间成本，其出行时间和出行成本可分别表示为

$$t_k^{od}=\sum_{a\in T^{\mathrm{C}}(A)}t_a^{\mathrm{c}}(x_a)\delta_{a,k}^{od}+\sum_{a\in T^{\mathrm{R}}(A)}t_a^{\mathrm{c}}(x_a)\delta_{a,k}^{od}\qquad\forall k\in K_{od}^{\mathrm{C}},\forall(o,d)\tag{4}$$

$$c_k^{od}=\omega t_k^{od}+\sum_{a\in T^{\mathrm{C}}(A)}(\lambda_a^j P_{\mathrm{FCS}}t_a^{\mathrm{FCS}})\delta_{a,k}^{od}\qquad\forall k\in K_{od}^{\mathrm{C}},\forall(o,d)\tag{5}$$

常规汽车的出行成本仅需考虑其在常规路段行驶的时间成本，其出行时间和出行成本可分别表示为

$$t_k^{od}=\sum_{a\in T^{\mathrm{R}}(A)}t_a(x_a)\delta_{a,k}^{od}\qquad\forall k\in K_{od}^{\mathrm{R}},\forall(o,d)\tag{6}$$

$$c_k^{od}=\omega t_k^{od}\qquad\forall k\in K_{od}^{\mathrm{R}},\forall(o,d)\tag{7}$$

式中：t_k^{od} 和 c_k^{od} 分别为起讫点(o—d)的可行路径 k 的出行时间和出行成本；ω 为单位出行成本系数；λ_a^j 为位于路段 a 且充电设施由配电网节点 j 供电的充电电价；P_{FCS} 为电动汽车充电功率；K_{od}^{C} 和 K_{od}^{R} 分别为电动汽车可行路径集合和常规车辆可行路径集合。

1.1.3 基于用户均衡理论的交通网模型

电动汽车用户因充电需求改变路径选择，影响交通流量分布，可能使非充电汽车用户避开与充电汽车用户重叠的路径，转而选择其他路线。在此基础上，利用电动汽车充电均衡模型[6]来表征交通网中的均衡状态，即

$$\min\sum_{t\in T(T)}\left(\sum_{a\in T^{\mathrm{R}}(A)}\int_0^{x_a}\omega t_a^{\mathrm{R}}(\theta)\mathrm{d}\theta+\sum_{a\in T^{\mathrm{C}}(A)}\int_0^{x_a}\omega t_a^{\mathrm{c}}(\theta)\mathrm{d}\theta\right)\tag{8}$$

$$f_{k,t}^{od}\geqslant 0\tag{9}$$

$$\sum_{k\in K_{od}^{\mathrm{C}}}f_{k,t}^{od}=\mu q_{od,t}^{\mathrm{mod}}\tag{10}$$

$$\sum_{k\in K_{od}^{\mathrm{R}}}f_{k,t}^{od}=(1-\mu)q_{od,t}^{\mathrm{mod}}\tag{11}$$

$$x_{a,t}=\sum_{o\in O}\sum_{d\in D}\sum_{k\in K_{od}}f_{k,t}^{od}\delta_{a,k}^{od}\tag{12}$$

式中：$t_a^{\mathrm{R}}(\theta)$ 和 $t_a^{\mathrm{c}}(\theta)$ 分别为常规路段下的车辆通行时间、充电路段下的车辆通行时间，θ 为积分变量；$f_{k,t}^{od}$ 为 O-D(O 和 D 分别为车辆的起始点和终点)对在 t 时间第 k 条路径上的流量；$q_{od,t}^{\mathrm{mod}}$ 为在时段 t 下 O-D 对之间的总出行需求；$\delta_{a,k}^{od}$ 表示路段 a 与可行路径 k 的关联关系，当路段 a 包含在路径 k 中时，$\delta_{a,k}^{od}=0$；μ 为充电的电动汽车数量与总交通需求的比率；$x_{a,t}$ 为车辆在路段 a、时段 t 下的交通流；K_{od} 为 O-D 对的可行路径集合。

1.2 考虑最优潮流的配电网模型

配电网的供电可分为常规负荷和电动汽车充电负荷。配电网以运行成本最小化为目标，其目标函数表示为

$$\min F_{\mathrm{PDN}}=\sum_{i\in N^+}(a_j(P_{\mathrm{DG},j})^2+b_jP_{\mathrm{DG},j})+\lambda_{\mathrm{MAIN}}\sum_{j\in\Omega(1)}P_{1j}\tag{13}$$

式中：a_j、b_j 为接入配网节点 j 的可控分布式能源成本系数；$P_{\mathrm{DG},j}$ 为节点 j 处的可控分布式能源有功出力；λ_{MAIN} 为向主网购电的电价；P_{1j} 为上级电网通过馈线 j 注入的功率；N^+为可控分布式能源数量；$\Omega(1)$ 为变电站的馈线集合；等式右边第 1 部分为可控分布式能源的发电成本，等式右边第 2 部分为配电网从主网购电的购电成本。

配电网的有功功率平衡可表示为

$$\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{g}}}P_{\mathrm{Gi},t}-\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{e}}}P_{\mathrm{EVCS},j}=P_{\mathrm{loss},j}+P_{\mathrm{L},j}\qquad\forall t\in T\tag{14}$$

配电网的潮流平衡可表示为

$$P_{i,t}\approx\sum_{j=1}^{n}\frac{V_{j,t}}{r_{ij}}-\sum_{j=1}^{n}\frac{\delta_{j,t}}{x_{ij}}\qquad\forall t\in T\tag{15}$$

$$Q_{i,t}\approx-\sum_{j=1}^{n}\frac{V_{j,t}}{x_{ij}}-\sum_{j=1}^{n}\frac{\delta_{j,t}}{r_{ij}}\qquad\forall t\in T\tag{16}$$

支路有功、无功功率传输限值可表示为

$$\bar{P}_{ij,t}P_{ij,t}+\bar{Q}_{ij,t}Q_{ij,t}\leqslant(S_{ij,t}^{\max})^2\qquad\forall t\in T\tag{17}$$

$$\bar{P}_{ij,t}=\cos\left[\left(p-\frac{E+4}{4}\right)\frac{2\pi}{E}\right]$$
$$\forall p\in\left[1,2,\cdots,\frac{E}{2}\right],\forall t\in T \tag{18}$$

$$\bar{Q}_{ij,t}=\sin\left[\left(p-\frac{E+4}{4}\right)\frac{2\pi}{E}\right]$$
$$\forall p\in\left[1,2,\cdots,\frac{E}{2}\right],\forall t\in T \tag{19}$$

配电网中的可控发电容量可表示为

$$0\leqslant P_{\mathrm{DG},jt}\leqslant P_{\mathrm{DG},j}^{\max}\qquad \forall j\in N^{+},\ \forall t\in T \tag{20}$$

$$0\leqslant Q_{\mathrm{DG},jt}\leqslant Q_{\mathrm{DG},j}^{\max}\qquad \forall j\in N^{+},\ \forall t\in T \tag{21}$$

节点电压幅值可表示为

$$V_{\min}\leqslant V_{j,t}\leqslant V_{\max}\qquad \forall j\in N^{+},\ \forall t\in T \tag{22}$$

充电站的容量极限可表示为

$$P_{\mathrm{EVCS}}^{\min}\leqslant P_{\mathrm{EVCS},j}\leqslant P_{\mathrm{EVCS}}^{\max}\qquad \forall t\in T \tag{23}$$

式中：$P_{\mathrm{Gi},t}$ 为机组 Gi 在时刻 t 的发电功率；$P_{\mathrm{EVCS},j}$ 为位于节点 j 的充电站的充电负荷；N_{g}、N_{e} 分别为机组的数量和充电站数量；$P_{\mathrm{L},j}$ 和 $P_{\mathrm{loss},j}$ 分别为节点 j 处的常规负荷和损耗功率；T 为调度周期；P_i 和 Q_i 分别为节点 i 处的注入有功功率和无功功率；V_j 为节点 j 处的电压幅度；δ_j 为节点 j 处的电压相位角；r_{ij} 和 x_{ij} 分别为支路(i,j)的等效电阻和电抗；P_{ij} 和 Q_{ij} 分别为支路(i,j)中传输的有功功率和无功功率；$\bar{P}_{ij,t}$ 和 $\bar{Q}_{ij,t}$ 分别为有功和无功功率线性化系数；$S_{ij,t}^{\max}$ 为线路 ij 的最大视在功率限值；p 为边的索引；E 为功率圆所近似的多边形边数；$Q_{\mathrm{DG},j}$ 为节点 j 处可控发电机的无功功率输出；$P_{\mathrm{DG},j}^{\max}$ 和 $Q_{\mathrm{DG},j}^{\max}$ 分别为分布式能源有功和无功功率输出的上限；$V_{\max}$ 和 $V_{\min}$ 分别为节点电压幅度的上限和下限；$P_{\mathrm{EVCS}}^{\max}$ 和 $P_{\mathrm{EVCS}}^{\min}$ 分别为充电站中的有功功率上限和下限。

1.3 考虑不同汽车用户出行行为的电力-交通耦合模型

电力-交通耦合系统中的交互是由于电动汽车驶入连接到配电网的充电路段以补充电能而发生的。因此，在电力-交通系统中，交通网的边界信息是指电动汽车进入充电站的流量，而配电网的边界信息对应的是充电站的充电负荷。电力-交通中节点 j 连接的负荷与交通网中的耦合关系表示为

$$P_{\mathrm{FCS},j}=P_{\mathrm{FCS}}\sum_{o\in\mathrm{O}}\sum_{d\in\mathrm{D}}\sum_{k\in K_{od}^{\mathrm{C}}}f_k^{od}\delta_{a,k}^{od}$$
$$\forall a\in T^{\mathrm{C}}(A),\ j\in N_{\mathrm{FCS}} \tag{24}$$

电力-交通中的协调调度以社会成本最小为目标，即

$$\min\sum_{a\in T^{\mathrm{R}}(A)}\int_0^{x_a}\omega t_a^{\mathrm{R}}(\theta)\mathrm{d}\theta+\sum_{a\in T^{\mathrm{C}}(A)}\int_0^{x_a}\omega t_a^{\mathrm{c}}(\theta)\mathrm{d}\theta+$$
$$\sum_{t\in T}\left(\sum_{i\in N^{+}}(a_j(P_{\mathrm{DG},jt})^2+b_jP_{\mathrm{DG},jt})+\lambda_{\mathrm{MAIN}}\sum_{j\in\Phi(1)}P_{1j,t}\right) \tag{25}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}(9)-(12)\\(14)-(23)\\(24)\end{cases} \tag{26}$$

式中：P_{FCS} 为电动汽车的充电功率；N_{FCS} 为配电网中充电站接入的节点集合；$\Phi(1)$ 为节点 1 的子节点(下游节点)集合；$P_{1j,t}$ 为向主网购电功率。

2 考虑电力系统可行空间域下的解耦模型

2.1 电力-交通解耦建模

从配电网的角度看，充电站被视为可变负荷，因为它们从电网获取电能。从交通网络的角度看，这些站点可以被视为为车辆提供电能。通过引入充电功率作为辅助决策变量，可表示为

$$\begin{cases}\min C_{\mathrm{PDN}}(\boldsymbol{y}_{\mathrm{PDN}})+C_{\mathrm{UTN}}(\boldsymbol{y}_{\mathrm{UTN}}^{a})\\ \text{s.t.}\begin{cases}h_{\mathrm{PDN}}^{\mathrm{eq}}(\boldsymbol{y}_{\mathrm{PDN}},u,P^{\mathrm{EVC}})=0\\ h_{\mathrm{PDN}}^{\mathrm{ineq}}(\boldsymbol{y}_{\mathrm{PDN}},u,P^{\mathrm{EVC}})\leqslant 0\\ g_{\mathrm{UTN}}(\boldsymbol{y}_{\mathrm{UTN}}^{a},f_k^{od})\leqslant 0\end{cases}\\ \boldsymbol{A}_{\mathrm{PDN}}\boldsymbol{y}_{\mathrm{PDN}}+\boldsymbol{D}_{\mathrm{PDN}}P_k^{\mathrm{EVC}}=\boldsymbol{c}_{\mathrm{PDN}}\\ \boldsymbol{B}_{\mathrm{UTN}}\boldsymbol{y}_{\mathrm{UTN}}^{a}+\boldsymbol{D}_{\mathrm{UTN}}P_k^{\mathrm{EVC}}=\boldsymbol{c}_{\mathrm{UTN}}\end{cases} \tag{27}$$

式中：$C_{\mathrm{PDN}}(\boldsymbol{y}_{\mathrm{PDN}})$ 为配电网成本函数；$C_{\mathrm{UTN}}(\boldsymbol{y}_{\mathrm{UTN}}^{a})$ 为交通网出行成本目标函数；$h_{\mathrm{PDN}}^{\mathrm{eq}}(\,)$ 为配电网运行的等式约束；$h_{\mathrm{PDN}}^{\mathrm{ineq}}(\,)$ 为配电网运行的不等式约束；$g_{\mathrm{UTN}}(\,)$ 为交通网运行的约束；$\boldsymbol{y}_{\mathrm{PDN}}$ 为配电网的状态变量，包括节点电压、相角等；$\boldsymbol{y}_{\mathrm{UTN}}^{a}$ 为交通网的状态变量，包括路段流量、通行时间、充电站排队

时间等；u 为配电网机组的状态变量；P^{EVC} 为充电站集合的功率；$\boldsymbol{A}_{\mathrm{PDN}}$、$\boldsymbol{D}_{\mathrm{PDN}}$、$\boldsymbol{B}_{\mathrm{UTN}}$、$\boldsymbol{D}_{\mathrm{UTN}}$ 分别为配电网状态变量的系数矩阵、配电网约束中充电功率的系数矩阵、交通网状态变量的系数矩阵、交通网约束中充电功率的系数矩阵；P_k^{EVC} 为第 k 个充电站的功率；$\boldsymbol{c}_{\mathrm{PDN}}$、$\boldsymbol{c}_{\mathrm{UTN}}$ 分别为配电网约束的常数项向量、交通网约束的常数项向量。

在 t 时刻下的配电网模型被表述并表示为

$$\begin{cases} f_{\mathrm{PDN}}(P_k^{\mathrm{EVC}}) = \min C_{\mathrm{PDN}}(\boldsymbol{y}_{\mathrm{PDN}}) \\ \text{s.t.}\begin{cases} h_{\mathrm{PDN}}^{\mathrm{eq}}(\boldsymbol{y}_{\mathrm{PDN}}, u, P^{\mathrm{EVC}}) = 0 \\ h_{\mathrm{PDN}}^{\mathrm{ineq}}(\boldsymbol{y}_{\mathrm{PDN}}, u, P^{\mathrm{EVC}}) \leqslant 0 \\ \boldsymbol{A}_{\mathrm{PDN}}\boldsymbol{y}_{\mathrm{PDN}} + \boldsymbol{D}_{\mathrm{PDN}}P_k^{\mathrm{EVC}} = \boldsymbol{c}_{\mathrm{PDN}} \end{cases} \end{cases} \tag{28}$$

式中：$f_{\mathrm{PDN}}(P_k^{\mathrm{EVC}})$ 为配电网在给定充电功率下的最优运行成本函数。

从模型中可知联合优化公式(27)与重构问题公式(29)之间存在相同的最优性，即

$$\begin{cases} \min(f_{\mathrm{PDN}}(P_k^{\mathrm{EVC}}) + C_{\mathrm{UTN}}(\boldsymbol{y}_{\mathrm{UTN}}^{a})) \\ \text{s.t.}\begin{cases} g_{\mathrm{UTN}}(\boldsymbol{y}_{\mathrm{UTN}}^{a}, f_k^{od}) \leqslant 0 \\ \boldsymbol{B}_{\mathrm{UTN}}\boldsymbol{y}_{\mathrm{UTN}}^{a} + \boldsymbol{D}_{\mathrm{UTN}}P_k^{\mathrm{EVC}} = \boldsymbol{c}_{\mathrm{UTN}} \end{cases} \end{cases} \tag{29}$$

配电网中目标函数的形式为二次型，转换后表示为

$$F_{\mathrm{PDN}}(\boldsymbol{P}_{\mathrm{DG}}) = \frac{1}{2}\boldsymbol{P}_{\mathrm{DG}}\boldsymbol{A}_{\mathrm{Re}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{DG}} + \boldsymbol{B}_{\mathrm{Re}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{DG}} + \lambda_{\mathrm{MAIN}}P_{\mathrm{I}} \tag{30}$$

式中：F_{PDN} 为配电网的总运行成本函数；$\boldsymbol{P}_{\mathrm{DG}}$ 为所有分布式电源的有功出力向量；$\boldsymbol{A}_{\mathrm{Re}}^{\mathrm{T}}$ 为二次项成本系数矩阵；$\boldsymbol{B}_{\mathrm{Re}}^{\mathrm{T}}$ 为一次项成本系数向量；$\boldsymbol{P}_{\mathrm{I}}$ 为主网通过变电站馈线注入配电网的总有功功率。

在给定充电功率的情况下，计算式(28)中的最优目标，其解对应于最优值，其中约束分为有效约束和无效约束，即

$$(\boldsymbol{A}_{\mathrm{PDN}})_{\mathrm{a}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{DG}} + (\boldsymbol{D}_{\mathrm{PDN}})_{\mathrm{a}}P^{\mathrm{EVC}} = (\boldsymbol{c}_{\mathrm{PDN}})_{\mathrm{a}} \tag{31}$$

$$(\boldsymbol{A}_{\mathrm{PDN}})_{\mathrm{ina}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{DG}} + (\boldsymbol{D}_{\mathrm{PDN}})_{\mathrm{ina}}P^{\mathrm{EVC}} \leqslant (\boldsymbol{c}_{\mathrm{PDN}})_{\mathrm{ina}} \tag{32}$$

式中，下标 a 表示有效约束，下标 ina 表示无效约束。

从优化理论的角度看，模型的最优解不受无效约束的影响。因此，对式(28)进行等价修改，即

$$\begin{cases} \min F_{\mathrm{PDN}}(\boldsymbol{P}_{\mathrm{DG}}) \\ \text{s.t.}(\boldsymbol{A}_{\mathrm{PDN}})_{\mathrm{a}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{DG}} + (\boldsymbol{D}_{\mathrm{PDN}})_{\mathrm{a}}P^{\mathrm{EVC}} = (\boldsymbol{c}_{\mathrm{PDN}})_{\mathrm{a}} \end{cases} \tag{33}$$

拉格朗日函数表示为

$$L(\boldsymbol{P}_{\mathrm{DG}}, \mu) = \frac{1}{2}\boldsymbol{P}_{\mathrm{DG}}\boldsymbol{A}_{\mathrm{Re}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{DG}} + \boldsymbol{B}_{\mathrm{Re}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{DG}} + \lambda_{\mathrm{MAIN}}P_{\mathrm{I}} + \eta^{\mathrm{T}}((\boldsymbol{A}_{\mathrm{PDN}})_{\mathrm{a}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{DG}} + (\boldsymbol{D}_{\mathrm{PDN}})_{\mathrm{a}}P^{\mathrm{EVC}} - (\boldsymbol{c}_{\mathrm{PDN}})_{\mathrm{a}}) \tag{34}$$

依据 KKT(Karush-Kuhn-Tucker)条件中的互补松弛性质，可知

$$\frac{\partial L(\boldsymbol{P}_{\mathrm{DG}}, \mu)}{\partial \boldsymbol{P}_{\mathrm{DG}}} = \boldsymbol{A}_{\mathrm{Re}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{DG}} + \boldsymbol{B}_{\mathrm{Re}}^{\mathrm{T}} + (\boldsymbol{A}_{\mathrm{PDN}})_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}}\mu = 0 \tag{35}$$

结合式(31)和式(35)，可得

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{A}_{\mathrm{Re}}^{\mathrm{T}} & (\boldsymbol{A}_{\mathrm{PDN}})_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}} \\ (\boldsymbol{A}_{\mathrm{PDN}})_{\mathrm{a}} & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \boldsymbol{P}_{\mathrm{DG}} \\ \eta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\boldsymbol{B}_{\mathrm{Re}}^{\mathrm{T}} \\ (\boldsymbol{c}_{\mathrm{PDN}})_{\mathrm{a}} - (\boldsymbol{D}_{\mathrm{PDN}})_{\mathrm{a}}P^{\mathrm{EVC}} \end{pmatrix} \tag{36}$$

通过求解式(36)，可得

$$\begin{cases} \boldsymbol{P}_{\mathrm{DG}} = (\boldsymbol{A}_{\mathrm{PDN}})_{\mathrm{a}}^{-1}((\boldsymbol{c}_{\mathrm{PDN}})_{\mathrm{a}} - (\boldsymbol{D}_{\mathrm{PDN}})_{\mathrm{a}}P_k^{\mathrm{EVC}}) \\ \eta = -\boldsymbol{A}_{\mathrm{Re}}^{\mathrm{T}}((\boldsymbol{A}_{\mathrm{PDN}})_{\mathrm{a}}(\boldsymbol{A}_{\mathrm{PDN}})_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}})^{-1}((\boldsymbol{c}_{\mathrm{PDN}})_{\mathrm{a}} - \\ \quad (\boldsymbol{D}_{\mathrm{PDN}})_{\mathrm{a}}P^{\mathrm{EVC}}) - ((\boldsymbol{A}_{\mathrm{PDN}})_{\mathrm{a}}^{\mathrm{T}})^{-1}\boldsymbol{B}_{\mathrm{Re}}^{\mathrm{T}} \end{cases} \tag{37}$$

条件 1：拉格朗日乘数保持非负，保证问题公式(29)的不等式约束得到满足，即

$$\eta \geqslant 0 \tag{38}$$

条件 2：为了保证式(37)的可行性，式(29)的解必须满足无效约束式(32)。

为了获得可行域下配电网的最优成本函数，基于式(29)设定的约束条件，充电功率的上下界表示为

$$\begin{cases} \begin{cases} \underline{P}^{\mathrm{EVC}} = \min P^{\mathrm{EVC}} \\ \overline{P}^{\mathrm{EVC}} = \max P^{\mathrm{EVC}} \end{cases} \\ \text{s.t.}\begin{cases} h_{\mathrm{PDN}}^{\mathrm{eq}}(\boldsymbol{y}_{\mathrm{PDN}}, u, P^{\mathrm{EVC}}) = 0 \\ h_{\mathrm{PDN}}^{\mathrm{ineq}}(\boldsymbol{y}_{\mathrm{PDN}}, u, P^{\mathrm{EVC}}) \leqslant 0 \\ \boldsymbol{A}_{\mathrm{PDN}}\boldsymbol{y}_{\mathrm{PDN}} + \boldsymbol{D}_{\mathrm{PDN}}P^{\mathrm{EVC}} = \boldsymbol{c}_{\mathrm{PDN}} \end{cases} \end{cases} \tag{39}$$

式中，$\underline{P}^{\mathrm{EVC}}$ 和 $\overline{P}^{\mathrm{EVC}}$ 分别为充电功率的上限和下限。

经过上述分析可知，推导只能在可行区域区间内有效。可行区域区间被分为多个子区间，每个子区间由条件 1 和条件 2 确定。基于有效和无效约束

确定区间宽度的一个显著优点是能够枚举所有子区间，它满足以下约束，即

$$d_{\mathrm{PDN}}^{m-1} \leqslant d_{\mathrm{PDN}}^{m} \tag{40}$$

式中，d_{PDN}^{m} 为第 m 个上限，第 m 个子区间表示为 $[d_{\mathrm{PDN}}^{m-1}, d_{\mathrm{PDN}}^{m}]$。

随着子区间探索的继续，子区间的右端点等于可行区域的上界，表示探索过程结束。配电网的最优成本表示为

$$f_{\mathrm{PDN}}(P^{\mathrm{EVC}}) = \sum_{m \in M} f_{\mathrm{PDN}}^{m}(d_{\mathrm{PDN}}^{m}) \tag{41}$$

式中：M 为子区间的总数；$f_{\mathrm{PDN}}^{m}(d_{\mathrm{PDN}}^{m})$ 表示配电网中第 m 个子间隔的最优成本。

根据节点电价的定义，其对应充电价格可表示为

$$P_{\mathrm{LM}} = \frac{\partial f_{\mathrm{PDN}}(P^{\mathrm{EVC}})}{\partial P^{\mathrm{EVC}}} \tag{42}$$

图 2 为电力-交通耦合系统的协调运行等效映射过程。

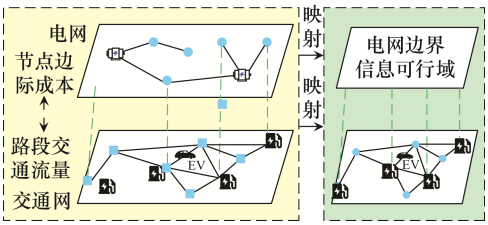


图 2　电力-交通耦合系统运行过程

Fig. 2 Operation of power-traffic coupled system

3　考虑路网信息的电动汽车有序充电配电网电压改善策略

由于电动汽车数量的大规模增长，配电网和交通网系统之间紧密耦合。充电站等充电设施作为桥梁实现电力流与交通流之间的互动，图 3 展示了电动汽车在考虑路网信息的前提下改善配电网低电压、重过载情况的策略。

在交通系统中，电动汽车根据道路实时拥堵情况和各充电站的电价信号规划出行路径，进而影响车辆的充电选择。通过对各充电站电动汽车流量的分析，计算出各充电站在不同时间段内的充电负荷分布，揭示电动汽车充电行为的时空特性。基于交通流与电价信号的出行决策，可提高充电行为的有序性，合理的充电路径规划则有助于将负荷分散到不同充电站，缓解局部电网压力，提升整体电压质量。

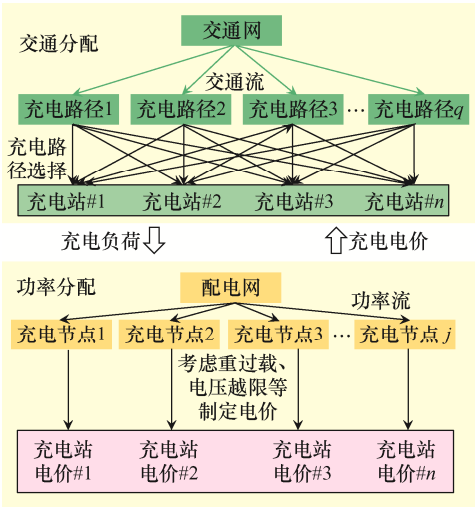


图 3　考虑路网信息的电动汽车配电网电压改善框架

Fig. 3 Framework for improving voltage in distribution network by EVs considering road network information

在电力系统中，依据各充电站的电力需求，采用考虑安全运行的配电网模型计算出各节点的电价，并通过动态电价信号有序引导电动汽车充电行为，从而实现充电负荷的合理分配。优化调度过程中，通过调整电价机制，使得在重过载的区域，电动汽车主动选择其他充电站，从而达到缓解局部电压的目的。结合交通系统中电动汽车的充电行为与电网电压响应之间的耦合关系，考虑电动汽车路网信息的有序充电调度不仅可以优化充电站间的负荷分布，还能改善配电网节点电压质量，增强电网的韧性和运行安全性。

4　算例分析

4.1　算例设置

本节构建 1 个电力-交通耦合系统进行仿真分析，交通网拓扑如图 4 所示。外环线和内环线共有 6 个充电站和 4 种类型的道路。每个 O-D 对的出行需求、自由出行时间和通行能力已知，详细参数设置见表 1 和表 2，电动汽车平均充电功率为 7 kW。修改后的 IEEE 33 节点系统的拓扑如图 5 所示。节

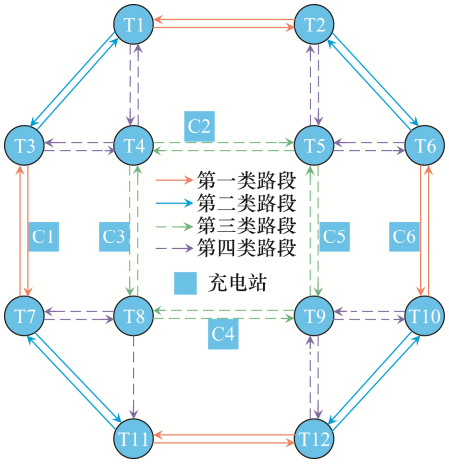


图 4 交通网拓扑

Fig. 4 Topology of traffic network

表 1 12 节点交通网线路参数

Tab. 1 Road parameters of 12-node traffic network

路段	容量(p.u.)	出行时间/min
第一类路段	100	5
第二类路段	100	8
第三类路段	80	5
第四类路段	60	7
充电站	15	20

表 2 t=1 下的 O-D 对和车辆比

Tab. 2 O-D pairs and trip rates at t=1 (in p.u.)

O-D 对	燃油车	电动汽车
T1-T6	9	1
T1-T10	36	4
T1-T11	18	2
T1-T12	27	3
T2-T6	9	1
T2-T10	27	3
T2-T11	18	2
T2-T12	27	3

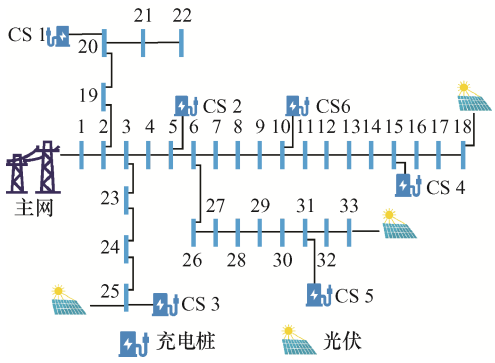


图 5 配电网拓扑

Fig. 5 Topology of distribution network

点 1 接入主电网进行购电，节点 8、15 和 31 连接充电站，节点 18、25 和 33 连接分布式光伏。采用 3 种方式验证所提方法的有效性，M1 和 M2 分别表示电力-交通系统的独立和协调调度运行，M3 表示基于等值映射方法的电力-交通耦合协调运行。

4.2 仿真分析

不同渗透率下的电力-交通总成本如图 6 所示，可以看出，电力-交通耦合系统的总成本低于电网和交通网络单独运行的成本。而且，随着电动汽车渗透率的不断提高，电力交通网络中耦合系统的总成本与 M1 解决的单独运行之间的差值越来越大。结果表明，与独立调度相比，耦合系统调度可以更有效地降低运营成本。如图 7 所示，采用 M2 的电

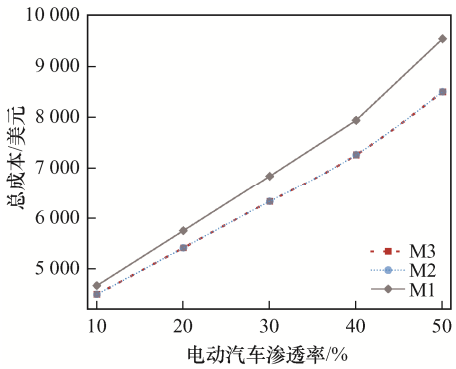


图 6 不同渗透率下的电力-交通总成本

Fig. 6 Total costs of power-traffic at different penetration levels

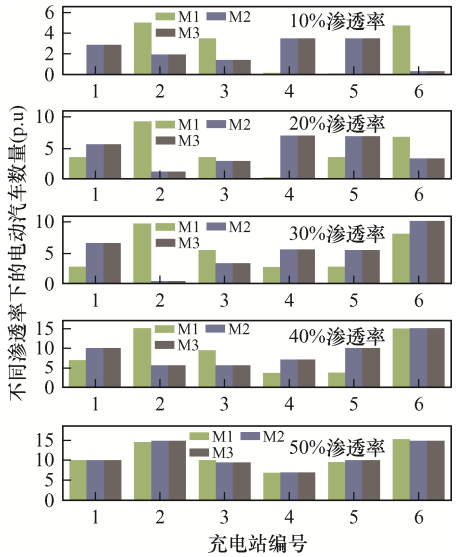


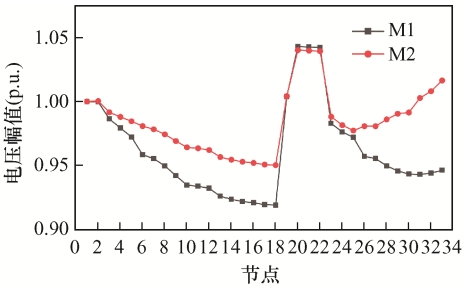
图 7 不同渗透率下的电动汽车分布

Fig. 7 Distribution of EVs at different penetration levels

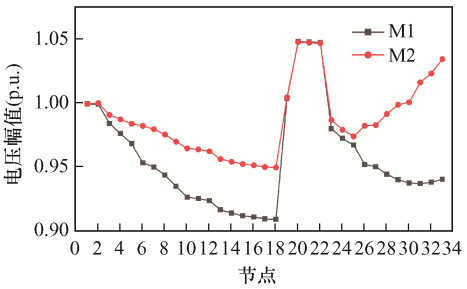
力流量耦合网络的总成本与 M3 计算的总成本相当，表明利用配电网的成本函数可以准确地对齐电力-交通耦合系统中的成本耦合。

图 7 为高峰时段(t=10)不同渗透率下电动汽车在各充电站的充电分布情况，从负荷均衡性和优化调度效果 2 个维度进行分析。首先，在相同渗透率下，M1 方式调度导致充电需求主要集中在充电站 2 和 6，占比高达 75%，而充电站 1、4、5 利用率较低，充电资源分配失衡，引发局部过载或资源浪费。相比之下，M2 方式通过电力-交通协同优化，使得充电站利用率更加均衡，提升整体调度效果。进一步对比不同渗透率下的充电负荷变化趋势，M1方式下充电站 2 始终承受较高负荷，而充电站 4 和 5 利用率偏低，可能影响电网稳定性。从仿真结果看，M2 与 M3 方式通过电力-交通耦合协调动态优化充电负荷，在各渗透率水平下均能保持较均衡的充电站利用率，在各渗透率水平下的优化效果相近，验证等值映射方法(M3)在非完全信息条件下仍可逼近信息完全可观(M2)时的最优调度效果。

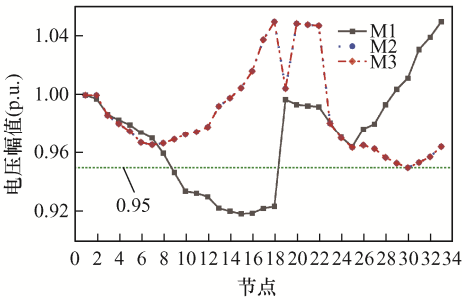
图 8 为不同渗透率下的配电网电压幅值变化，揭示电力-交通协同优化对电压稳定性的影响。首先，如图 8(a)和(b)所示，在 30%和 40%渗透率下，M2 优化方案能够有效提升各节点电压水平，避免因电动汽车充电导致的低电压问题。然而，如图 8(c)所示，当渗透率上升至 50%时，尽管 M2 与 M3 优化方案可在整体上改善电压质量，但部分节点仍面临低电压风险。具体而言，结合图 7 与图 8(c)分析可知，高渗透率下电动汽车充电需求主要集中在充电站 1 和 4，导致配电网节点 15 和 16 的电压幅值下降至 0.918 6 和 0.919 0，进一步加剧低电压问题。相比之下，M2 和 M3 方案通过电力-交通协同调度，优化充电站分布，引导电动汽车充电行为，使得节点 18 的电压得到明显改善，并在整体上维持较优的电压分布。值得注意的是，该优化策略利用配电网的充电价格，引导电动汽车合理分布至各充电站，不仅能有效缓解局部交通拥堵，同时显著改善配电网低电压问题，为大规模电动汽车接入配电网提供可行的优化调度方案。



(a) 30%渗透率



(b) 40%渗透率



(c) 50%渗透率

图 8　不同渗透率下的配电网电压幅值

Fig. 8 Voltage magnitudes of distribution network at different penetration levels

为进一步分析，交通网高峰时段(t=10)的交通流量如图 9 所示，可以观察到协调方式中路径 T4—T5 的流量为 10.01 p.u，与独立运行相比减少了 20%。协调调度方法考虑了配电网的安全运行。通过调整充电价格，可以缓解配电区域的低电压。此外，M3 获得的流量与电力-交通耦合系统的集中优化相同(即由 M2 求解)，这表明利用边界信息映射和成本函数可以有效地利用 M3 替代原来的电网模型。使用所提方法求解电力-交通耦合系统可以确保优化结果的准确性，并进一步保护系统敏感信息的私密性。

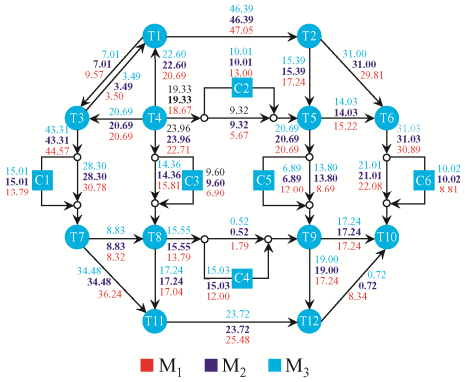


图 9 50%渗透率的交通网流量

Fig. 9 Traffic network flow at penetration level of 50%

4.3 方法有效性验证

为验证所提方法的有效性和可视化，选取 3 个充电站分别连接在节点 6、11、22 上；3 台分布式可控机组分别处于节点 18、25、33，修改后的 IEEE 33 节点系统的拓扑结构如图 10 所示。理论上 M4 方法所取的采样点越多，所刻画的空间越贴近于模型的运行约束集，故以蒙特卡洛法(Monte-Carlo method)作为参考。

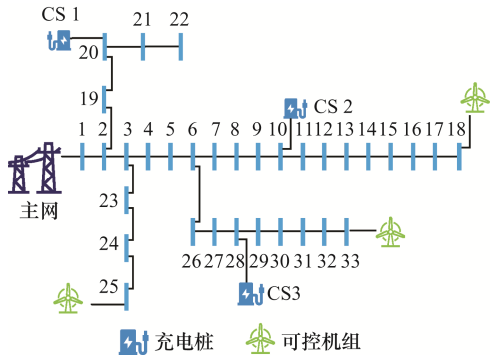
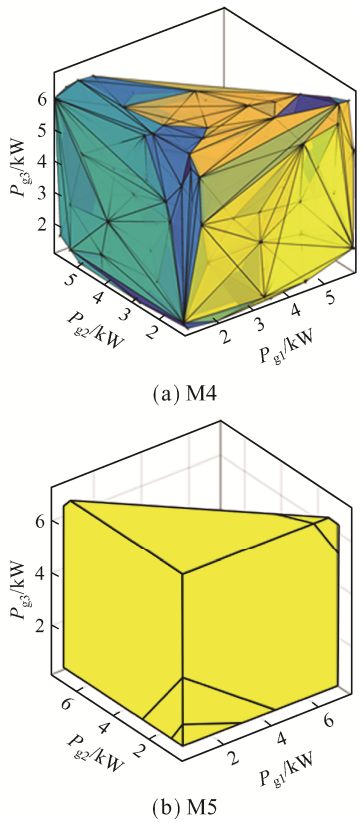


图 10 修改后的 IEEE 33 节点系统

Fig. 10 Modified IEEE 33-bus system

图 11 为所提方法 M5 与蒙特卡洛法 M4 对于配电网约束集的比较。可以看出，所提方法 M5 获取等效约束集构成的空间与 M4 随机采样得到的域基本一致。表 3 表明了配电网不同运行子区域下的最优运行成本与充电站功率的映射关系，配电网的最优运行模型被划分为不同的子区域和其对应的成本函数，其中不同子区域的最优成本可由充电站内



(a) M4

(b) M5

图 11 配电网等效约束集所构成的空间(t=18)

Fig. 11 Space formed by equivalent constraint set of distribution network (t=18)

表 3 M5 所获得的函数表达式

Tab. 3 Expressions of functions obtained by M5

子区域编号	变量	函数映射
1	最优成本 Z_1	Z_1=13.25P_{FCS1}+12.75P_{FCS2}+11.98P_{FCS3}+845.93
	可控机组 P_{g1}	P_{g1}=0.014 MW
	可控机组 P_{g2}	P_{g2}=0.015 MW
	可控机组 P_{g3}	P_{g3}=0.007P_{FCS1}+0.013P_{FCS2}+0.01P_{FCS3}+0.001 24 MW
2	最优成本 Z_2	Z_2=12.4P_{FCS1}+12.34P_{FCS2}+12.38P_{FCS3}+681.56
	可控机组 P_{g1}	P_{g1}=0.002 4P_{FCS1}−0.006 1P_{FCS2}+0.014 4 MW
	可控机组 P_{g2}	P_{g2}=0.014 2 MW
	可控机组 P_{g3}	P_{g3}=0.006 4P_{FCS1}+0.014 4P_{FCS2}+0.012P_{FCS3}+0.001 04 MW
⋮	⋮	⋮

的功率映射表示，这意味着通过获得所有的等效约束子集和所对应的最优函数，实现对配电网的等效。

5　结语

为了克服传统协调优化方法反复迭代的弊端，提出 1 种基于边界信息映射的电力−交通协调调度方法，并建立电力−交通耦合系统非迭代框架。通过该方法，将配电网的最优运行转换为数学表达式和具有少量数据信息的可行空间域，从而实现配电网的外部等效性，避免耦合系统之间的迭代求解。在保证最优性一致性的同时，满足系统的数据保密要求。在 12 节点交通网络和 IEEE 33 节点系统的耦合系统上进行算例分析，结果表明，提出的可行域映射方法可以有效等效电网的运行约束，实现电力−交通网络的协调调度；与两网独立调度相比，电力−交通的协调调度可以优化电动汽车车流量和充电负荷在电网和交通网络中的分配，改善配电网的电压质量，促进电力−交通耦合系统的安全高效运行。

参考文献：

[1] Lopes J A P, Soares F J, Almeida P M R. Integration of electric vehicles in the electric power system [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 168-183.

[2] Global EV Outlook 2024 [EB/OL]. (2024-04-26)[2024-12-03]. https://origin.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024

[3] 康童, 朱吉然, 唐海国, 等. 采用改进共生生物搜索算法的大规模电动汽车接入微电网协调优化研究[J]. 湖南电力, 2023, 43(5): 144-150.
Kang Tong, Zhu Jiran, Tang Haiguo, et al. Research on coordination and optimization of large scale electric vehicles connected to microgrid using improved symbiotic organisms search algorithm [J]. Hunan Electric Power, 2023, 43(5): 144-150. (in Chinese)

[4] Wei Wei, Wu Lei, Wang Jianhui, et al. Network equilibrium of coupled transportation and power distribution systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9 (6): 6764-6779.

[5] 房宇轩, 胡俊杰, 马文帅. 计及用户意愿的电动汽车聚合商主从博弈优化调度策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 5091-5103.
Fang Yuxuan, Hu Junjie, Ma Wenshuai. Optimal dispatch strategy for electric vehicle aggregators based on stackelberg game theory considering user intention [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16): 5091-5103. (in Chinese)

[6] Qian Tao, Shao Chengcheng, Li Xuliang, et al. Enhanced coordinated operations of electric power and transportation networks via EV charging services [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 3019-3030.

[7] 李马炎，张希. 电动汽车无线电能传输系统建模与电磁安全评估[J]. 电源学报, 2023, 21(4): 177-185.
Li Mayan, Zhang Xi. Modelling and electromagnetic safety evaluation of wireless power transfer system for electric vehicles [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21 (4): 177-185. (in Chinese)

[8] Dai Wei, Wang Cheng, Goh H H, et al. Hosting capacity evaluation method for power distribution networks integrated with electric vehicles [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(5): 1564-1575.

[9] 张帝, 朱吉然, 唐海国, 等. 基于配电网统一信息模型的全网一张图建设[J]. 湖南电力, 2020, 40(2): 54-58.
Zhang Di, Zhu Jiran, Tang Haiguo, et al. Construction of one map for the whole network based on unified information model of distribution network [J]. Hunan Electric Power, 2020, 40(2): 54-58. (in Chinese)

[10] Zhou Ze, Liu Zhitao, Su Hongye, et al. Integrated pricing strategy for coordinating load levels in coupled power and transportation networks [J]. Applied Energy, 2022, 307: 118100.

[11] Shao Chengcheng, Li Ke, Qian Tao, et al. Generalized user equilibrium for coordination of coupled power-transportation network [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(3): 2140-2151.

[12] 李长云, 徐敏灵, 蔡淑媛. 计及电动汽车违约不确定性的微电网两段式优化调度策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(7): 1838-1851.
Li Changyun, Xu Minling, Cai Shuyuan. Two-stage optimal scheduling strategy for micro-grid considering

EV default uncertainty [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(7): 1838-1851. (in Chinese)

[13] 何文轩, 耿磊, 姚芳. 电动汽车动力锂离子电池可靠性关键技术综述[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 183-196.
He Wenxuan, Geng Lei, Yao Fang. Overview of key reliability technologies for power lithium-ion batteries used in electric vehicles [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 183-196. (in Chinese)

[14] Xie Shiwei, Xu Yan, Zheng Xiaodong. On dynamic network equilibrium of a coupled power and transportation network [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13 (2): 1398-1411.

[15] Xie Shiwei, Wu Qiuwei, Hatziargyriou N D, et al. Collaborative pricing in a power-transportation coupled network: A variational inequality approach [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(1): 783-795.

[16] 王玉梅, 王露露. 基于多类需求响应的配电网优化调度[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 273-282.
Wang Yumei, Wang Lulu. Optimal dispatching of distribution network based on multi-type demand response [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 273-282. (in Chinese)

[17] Benders J F. Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems [J]. Numerische Mathematik, 1962, 4(1): 238-252.

[18] Dai Wei, Wang Cheng, Goh H H, et al. Hosting capacity evaluation method for power distribution networks integrated with electric vehicles [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(5): 1564-1575.

[19] Tan Zhenfei, Yan Zheng, Zhong Haiwang, et al. Non-iterative solution for coordinated optimal dispatch via equivalent projection: Part II: Method and applications [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 899-908.

[20] An Kun. Battery electric bus infrastructure planning under demand uncertainty [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 111: 572-587.

[21] An Yisheng, Gao Yuxin, Wu Naiqi, et al. Optimal scheduling of electric vehicle charging operations considering real-time traffic condition and travel distance [J]. Expert Systems with Applications, 2023, 213: 118941.

[22] Jarvis P, Climent L, Arbelaez A. Smart and sustainable scheduling of charging events for electric buses [M]// EU Cohesion Policy Implementation - Evaluation Challenges and Opportunities. Cham: Springer Nature Switzerland, 2022: 121-129.

[23] Qiao Wenjie, Han Yinghua, Zhao Qiang, et al. A distributed coordination method for coupled traffic-power network equilibrium incorporating behavioral theory [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(12): 12588-12601.



宁志毫

作者简介：

宁志毫(1983—)，男，中国电源学会会员，博士，正高级工程师。研究方向：电能质量分析与控制，新能源并网测试与评估。E-mail：923173960@qq.com。

王小源(1991—)，男，硕士，工程师。研究方向：电力系统及其自动化。E-mail：15676211816@163.com。

朱吉然(1986—)，男，博士，高级工程师。研究方向：配电自动化技术。E-mail：582913350@qq.com。

肖辉(1975—)，女，博士，教授。研究方向：电动汽车，车网互动。E-mail：15521423189@163.com。

曾林俊(1993—)，男，通信作者，博士，讲师。研究方向：综合能源系统。E-mail：zenglj23@csust.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)