·新能源汽车充电技术专题·

基于动态分时电价的充电实时调度控制策略

梁士福　姜瑞　李金洺　孟祥怡　刘芷彤　荆海信　赵一鸣

（中国第一汽车股份有限公司研发总院，长春 130013）

【欢迎引用】梁士福，姜瑞，李金洺，等．基于动态分时电价的充电实时调度控制策略[J]．汽车文摘，2026(3)：23-31.

【Cite this paper】LIANG S F, JIANG R, LI J M, et al. Real-Time Scheduling and Control Strategy for Electric Vehicle Charging Based on Dynamic Time-of-Use Pricing[J]. Automotive Digest (Chinese), 2026(3): 23-31.

【摘要】为缓解电动汽车集中充电对电网的冲击，提出了一种动态电价驱动的电动汽车优化调度策略，以降低用户综合充电成本并实现电网削峰填谷。首先，构建基于朴素贝叶斯的行程链模型，利用用户出行数据生成目标区域用户未来行程信息。然后，将用户行程信息与能耗模型、充电决策模型结合，得到区域充电负荷的时空分布。随后，建立动态电价模型，描述电价与电网负荷的关系，并以最小化充电成本和电池老化成本为目标，采用遗传算法求解并实时更新电动汽车全天充放电策略。仿真结果表明，所提出模型生成的行程链数据具有可靠性，其优化策略能够有效降低用户成本、实现电网削峰填谷，为电动汽车与电网高效协调提供了理论基础和控制方法。

关键词：电动汽车；车网互动；行程链；动态分时电价；实时优化；充放电控制

中图分类号：TM734　　文献标志码：A　　DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20250003

Real-Time Scheduling and Control Strategy for Electric Vehicle Charging Based on Dynamic Time-of-Use Pricing

Liang Shifu, Jiang Rui, Li Jinming, Meng Xiangyi, Liu Zhitong, Jing Haixin, Zhao Yiming

(Global R&D Center, China FAW Corporation Limited, Changchun 130013)

【Abstract】To mitigate the impact of centralized Electric Vehicle (EV) charging on the power grid, this study proposes an optimal EV scheduling strategy driven by dynamic electricity pricing, aiming to reduce users' comprehensive charging costs and achieve peak shaving and valley filling of the grid. First, a travel chain model based on naive Bayes is constructed to generate detailed information on future trips of users in the target area using historical travel data. Then, user trip information is combined with an established energy consumption model and a charging decision model to obtain the spatiotemporal distribution of regional charging load. Later, a dynamic electricity pricing model is established to describe the relationship between electricity prices and grid load. Subsequently, with the objective of minimizing charging costs and battery aging costs, a genetic algorithm is adopted to solve and update the EV charging and discharging strategies in real time throughout the day. Simulation results show that the travel chain data generated Its optimization strategy can effectively reduce user costs, achivev grid peak shaving and valley filling and provide a theoretical basis and control method for efficient coordination between electric vehicles and the power grid.

Key words: Electric Vehicle (EV), Vehicle to Grid (V2G), Journey chains, Dynamic time-of-use pricing, Real-time optimization, Charge and discharge control

0　引言

近年来，电动汽车在缓解能源危机、助力环境保护方面发挥积极作用，其智能化与经济效益也受广大消费者欢迎[1]。然而，随着电动汽车保有量快速增长，其对电网负荷的影响也显著增加，对电网安全与经济运行构成潜在威胁。由于用户生活与驾驶习惯的相似性，电动汽车无序充电行为可能趋于集中，给电网造成不容忽视的峰值压力。

车网互动（Vehicle-to-Grid, V2G）技术使电动汽

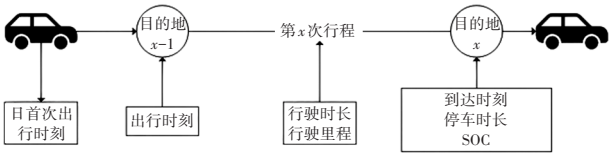
车可作为移动储能单元参与电网调节，展现出显著的负荷调控潜力。该技术有助于提升电网运行的鲁棒性与灵活性，对缓解电网峰谷矛盾具有重要意义[2]。通过设计合理的分时电价机制[3]，可引导电动汽车在电网负荷低谷时充电。处于静置状态的车辆能根据电网需求通过V2G终端向电网放电，在获得经济收益的同时优化发电厂的运行效率，实现电动汽车用户与电网的互利共赢[4]。欧名勇等[5]以平抑电网峰谷差为目标，设计了一种电动汽车有序充电模型，并采用遗传算法求解最优充电策略。该策略的实施需预先获取全天电网负荷曲线以及电动汽车的充电需求，这不仅增加了计算的复杂性，也降低了调度策略的灵活性和鲁棒性，在实际应用中面临较大的挑战。在车网互动协同调度方面，刘红等[6]提出了将车辆-充电设施-电网联合调度架构，以配电网负荷波动最小化、充电站收益最大化及用户充电成本最低化为优化目标。陈丽娟等[7]通过分析动力电池损耗成本，提出一种用于电动公交车多时间尺度优化调度策略，降低了公交公司运营成本和电池损耗。陈凯炎等[8]通过动态实时电价机制最小化综合成本，但未引入高精度的电动汽车能耗预测模型。陈明强等[9]利用行程链模型预估行驶能耗并实施模糊控制策略管理充电过程，但未考虑V2G放电场景。

综上所述，现有V2G优化调度研究仍存在若干挑战：充电模式较为单一[10]、对预测数据依赖性强[11]、能耗模型精度不足[12]，以及用户行为建模过于简化[13]。为解决上述问题，本文提出一种基于朴素贝叶斯构建行程链的新方法，利用全国家庭出行调查（National Household Travel Survey, NHTS）数据验证其可靠性，为能耗预测和充电调度提供数据支持。在此基础上，融合用户行程信息、高精度能耗模型与充电决策模型，生成区域电动汽车充电负荷的时空分布。同时，建立动态分时电价模型，根据电网负荷实时调整电价，引导电动汽车用户合理安排充电时间，选择在电网高峰、电价较高时参与放电以获取收益；在电网低谷、电价较低时段进行充电，从而降低用户的充电成本，协助电网实现削峰填谷。最后，本文以用户充电成本与电池损耗成本最小化为优化目标，采用遗传算法求解最优充放电策略，旨在平衡电网负荷并降低用户成本，实现电网与电动汽车用户的双赢，对推动电动汽车与电网互动调度优化具有重要意义。

1 电动汽车充电负荷

1.1 行程链模型

电动汽车单次从起点到终点的直接移动构成一次行程，其在一天内依序完成的全部行程则构成一条行程链。行程链详细记录了每次行程的开始时间、结束时间、行驶距离、起点位置和终点位置，以及全天行程次数与停车时段等信息，如图1所示。本文采用行程链描述车辆从家出发、经过若干次行驶与停车活动后最终返回家中的完整出行过程。



注：SOC为电池荷电状态（State of Charge）。

图1 车辆行程链示意

每辆电动汽车的行程链可由以下5个特征参数序列描述：

首先假设第j次行程的特征向量为$\boldsymbol{X}_j$：

$$\boldsymbol{X}_j = \left(t_j^s, t_j^e, d_j, l_j^s, l_j^e\right) \tag{1}$$

式中：t_j^s为第j次行程开始时间，t_j^e为第j次行程的结束时间，d_j为第j次行程的距离，l_j^s为第j次行程的开始位置，l_j^e为第j次行程的终点位置。

$$(\boldsymbol{X}_1, \boldsymbol{X}_2, \cdots, \boldsymbol{X}_J) = (t_1^s, t_1^e, d_1, l_1^s, l_1^e; t_2^s, t_2^e, d_2, l_2^s, l_2^e; \cdots t_J^s, t_J^e, d_J, l_J^s, l_J^e) \tag{2}$$

式中：J为行程链中涉及的总行程次数。

根据实际驾驶行为的连续性，下一次行程的起点位置等于上一次行程的结束位置：

$$l_{j+1}^s = l_j^e \tag{3}$$

每辆电动汽车的行程模式通常具有日间随机波动性，本文假设该变化具有随机性，且每一种可能的模式都以一定的概率发生。基于历史车辆行驶数据集，可以统计得到不同行程模式的发生概率，并以式(2)所示行程链模式进行整理。根据条件概率公式，完整行程链的概率可分解为各次行程的联合条件概率：

$$P(\boldsymbol{X}_1, \boldsymbol{X}_2, \cdots, \boldsymbol{X}_J) = P(\boldsymbol{X}_1) \times \prod_{j=2}^{J} P\left(\boldsymbol{X}_j | \boldsymbol{X}_1, \boldsymbol{X}_2, \cdots, \boldsymbol{X}_{j-1}\right) \tag{4}$$

式中：$P(\boldsymbol{X}_1)$表示第1段行程发生的概率，当j=3时，$P(\boldsymbol{X}_3 | \boldsymbol{X}_1, \boldsymbol{X}_2)$表示的是在第1段和第2段行程发生的情况下，第3段行程也发生的概率。

1.2 车辆行驶能耗计算

基于建立的能量预测模块，可计算第i次行程的电能消耗E_i，并更新车辆到达目的地时的SOC[14]，其计

算公式为：

$$SOC_j^e = SOC_j^s - \left(\frac{E_j}{Q_{pack}} \times 100\%\right) \tag{5}$$

式中：SOC_j^e为第j次行程结束时的SOC，SOC_j^s为第j次行程开始时的SOC，Q_{pack}为电池容量，E_j为第j次行程消耗的电量。

其中，E_j的计算公式为：

$$\begin{cases} E_j = k_T \cdot ECR_v \cdot d_j \\ k_T = 0.000\,1 \cdot (T - 11)^2 + 1.189\,4 \end{cases} \tag{6}$$

式中：ECR_v为车辆典型能耗水平，T为环境温度，k_T为环境温度影响下的能耗修正系数，d_j为第j次行程的行驶距离。

1.3 充电负荷预测

1.3.1 充电决策模型

本文采用确定性规则对用户的充电决策进行建模，决策内容包括是否在目的地充电以及充电方式（快充/慢充）的选择。

1.3.2 充电需求决策

用户在第j次行程结束后产生充电需求的条件为：

$$\begin{cases} SOC_j^e < SOC_{low_limit} \\ SOC_j^e - \left(\frac{E_{j+1}}{Q_{pack}}\right) \times 100\% < 0 \end{cases} \tag{7}$$

即当前行程结束后的SOC_j^e低于用户SOC接受下限SOC_{low_limit}，或当前SOC_j^e无法满足下一行程能耗需求时，用户将执行充电。充电结束时的目标荷电状态为：

$$SOC_{end} = \max\left(SOC_{up_limit}, \left(\frac{E_{j+1}}{Q_{pack}}\right) \times 100\%\right) \tag{8}$$

式中：Q_{pack}为电池容量，E_{j+1}为第j+1次行程消耗的电量，SOC_{up_limit}为用户设定的荷电状态上限。

1.3.3 充电方式选择

在本模型中，用户充电方式选择主要取决于目的地类别与用户在目的地的停留时间。若目的地类别为住宅（H或H_1类）时，用户仅可选择慢充；若目的地为工作场所（W）或其他场所（O）时，则根据充电所需时间与初始停留时间t_p决定充电方式。快充与慢充所需时间的计算公式为：

$$\begin{cases} t_{charge_fast} = \dfrac{\left(SOC_{end} - SOC_j^e\right) \cdot Q_{pack}}{P_{fast}} \\ t_{charge_slow} = \dfrac{\left(SOC_{end} - SOC_j^e\right) \cdot Q_{pack}}{P_{slow}} \end{cases} \tag{9}$$

式中：t_{charge_fast}和t_{charge_slow}分别为快充和慢充所需的充电时间，P_{fast}和P_{slow}分别为快、慢充平均功率。

如果用户在目的地初始停留时间t_p大于慢充所需的充电时间t_{charge_slow}则用户选择慢充方式，否则用户将选择快充方式。

1.3.4 充电仿真

根据充电决决策结果（充电方式、目标SOC），计算充电需求时间，更新停车时间，并将充电功率需求按时间叠加，得到该地区该类场景的充电功率需求。

充电需求时间t_{charge}的计算公式为：

$$t_{charge} = \frac{\left(SOC_{end} - SOC_j^e\right) \cdot Q_{pack}}{P_{avg}} \tag{10}$$

式中：P_{avg}为所选充电方式的平均功率。

本文模型设定，当用户在目的地初始停留时间t_p无法满足充电需求时间t_{charge}时，用户将选择延长停留时间，此时用户在目的地停车时间为：

$$t_p = \max\left(t_{pj}, t_{charge}\right) \tag{11}$$

式中：t_{pj}是第j次行程的初始停留时间。

充电开始时间t_{cs}与结束时间t_{ce}分别为：

$$\begin{cases} t_{cs} = t_{ei} \\ t_{ce} = t_{ei} + t_{charge} \end{cases} \tag{12}$$

在仿真过程中，首先将全天24 h划分为96个离散时段。对于任意时段t，系统遍历区域内所有电动汽车的充电状态，若第i辆车的充电起止时间区间$[t_{cs}^i, t_{ce}^i]$覆盖了当前时段t，则判定该车处于充电状态。最后，将该时段内所有处于充电状态车辆的充电功率P_{avg}^i进行累加，从而获得该区域在t时段的总充电负荷。通过遍历所有时段，最终生成该区域全天的充电负荷时空分布曲线。

2 电动汽车实时调度策略

2.1 动态分时电价模型

峰谷分时电价策略是一种基于电力系统负荷变化的定价机制，通常将一天划分为高峰、平段和低谷3个时段，并设定不同的电价，以此激励用户在电力需求较低的时段使用电力，从而优化能源配置、缓解电网运行压力。然而，该种策略可能导致部分用户（尤其是电动汽车用户）将充电需求集中转移至电价最低的时段，从而可能引发新的用电高峰。为了应对这一问题，动态分时电价策略应运而生。该策略根据电网实时负荷情况动态调整电价，能够更精确地反映电力市场的实时供需关系，具备更强的响应灵活性，从而

在平衡电力供需的同时，有效规避传统分时电价可能引发的负荷集中转移问题。

设动态分时电价与总负荷之间具有如下函数关系：

$$C_{(t)} = f(P_z) \tag{13}$$

$$P_z = P_{base} + P_{EV} \tag{14}$$

式中：$C_{(t)}$为动态分时电价，P_z为总负荷，P_{base}为不包括电动汽车充电负荷的原始负荷值，P_{EV}为电动汽车充电的净负荷。

在平均总负荷$P_{average}$处，对公式(13)进行一阶泰勒展开，得到：

$$\begin{aligned} C_{(t)} &= f(P_z) \\ &= f\left(P_{average}\right) + f'\left(P_{average}\right)\left(P_z - P_{average}\right) \end{aligned} \tag{15}$$

分析可知，在函数曲线中必然存在某一点的导数是该点切线的斜率K：

$$f'\left(P_{average}\right) = K \tag{16}$$

令$f\left(P_{average}\right) - K P_{average} = B$，则可得到动态分时电价数学模型为：

$$C_{(t)} = f(P_z) = KP_z + B \tag{17}$$

2.2 成本分析

2.2.1 充放电成本

充放电成本指电动汽车用户总购电成本与售电收益的差值，与电动汽车充放电功率及实时电价直接相关。为了简化计算，假设电动汽车在每一时间段内充放电功率保持恒定，则接入电网的电动汽车在时刻t的总负荷L_t^{EV}为：

$$L_t^{EV} = \sum_{i=1}^{N} x_{i,t} \tag{18}$$

式中：$x_{i,t}$为第i辆电动汽车在t时刻的充放电功率，N为电动汽车总数。

假设基础负荷L_t^{base}在时段内保持恒定，则t时刻电网总负荷为：

$$z_t = L_t^{base} + L_t^{EV} \tag{19}$$

结合动态分时电价模型，电动汽车充电总成本为：

$$\begin{aligned} C_1 &= \int_0^T \int_{P_{base(t)}}^{P_{z(t)}} (KP_z + B)\,\mathrm{d}P_z\,\mathrm{d}t \\ &= \sum_{t=1}^{T} \left(\frac{K}{2}\left(P_{z(t)}{}^2 - P_{base(t)}^2\right) + B\left(P_{z(t)} - P_{base(t)}\right)\right) \end{aligned} \tag{20}$$

2.2.2 电池损耗成本

电动汽车频繁充放电不仅会导致电池物理性能的逐渐退化，降低其续驶里程，还可能引发一系列伴生问题，如电池热管理效率下降、充电速度减慢等，从而影响用户参与V2G调度的积极性。电池损耗受多种因素影响，包括充放电功率、累计充放电电量、放电深度、环境温度、荷电状态及循环次数等[15]。在众多影响因素中，虽然充放电功率的波动和工作环境温度的变化对电池损耗的影响程度相对较小，且放电深度和荷电状态的不同最终可以通过累计的充放电电量来间接反映，但这并不意味着其影响可以完全忽略不计。实际上，每个因素都在以某种方式、在某种程度上对电池的健康状态和寿命产生影响。然而，为了简化问题、突出重点，本文在量化电池损耗时，主要聚焦于电池的循环使用次数及其在整个生命周期内的累计充放电电量这2个最为关键的因素，通过精确建模和分析，以期为V2G调度策略的优化提供有力的数据支持和理论依据。

本文选用的电动汽车电池为锂离子电池，构建了循环次数成比例的线性模型。该线性模型与电池更换成本有关，故可以得到电池的退化成本C_2为：

$$C_2 = \frac{IC + (RC \cdot N_r)}{E_{tot}} + \frac{M \cdot L}{E_{tot}} \tag{21}$$

式中：C_2为单位能量的退化成本，IC为电池的初始购置成本，RC为电池的更换成本，N_r为在电池预期寿命内预计的更换次数，E_{tot}为电池在整个寿命期间能提供的总能量(考虑容量衰减)，M为电池的维护成本；L为电池的预期使用寿命(通常以年计算)。

2.2.3 总成本

综上，单日内所有的电动汽车完成充电任务的总成本为：

$$C = C_1 + C_2 \tag{22}$$

2.3 算法描述

2.3.1 目标函数

为兼顾电网运行稳定与电动汽车用户的经济性，本文选取包含电动汽车充电成本与电池损耗成本在内的总成本最小化为优化目标，目标函数如下：

$$\begin{aligned} \min C &= \min(C_1 + C_2) \\ &= \min \sum_{t=1}^{T} \left(\left(\frac{K}{2}\left(P_{z(t)}{}^2 - P_{base(t)}^2\right) + \right.\right. \\ &\quad \left.\left. B\left(P_{z(t)} - P_{base(t)}\right) + \frac{IC + (RC \cdot N_r)}{E_{tot}} + \frac{M \cdot L}{E_{tot}} \right) \end{aligned} \tag{23}$$

2.3.2 约束条件

2.3.2.1 电动汽车充放电功率约束

为了保证充电安全，电动汽车充放电功率需限制在允许范围内。对于参与V2G的电动汽车和仅充电

的电动汽车，应分别满足：

$$0 < x_{i,t} < P_{\text{char}} \tag{24}$$

$$P_{\text{dis}} < x_{i,t} < P_{\text{char}} \tag{25}$$

式中：P_{char}为最大充电功率，P_{dis}为最大放电功率，$x_{i,t}$为第辆车在t时段内的充放电功率。

2.3.2.2　电动汽车荷电状态约束

电动汽车用户在接入电网时，会综合考虑用车需求来设定离网的目标电量为E_i^{off}，优化结果应满足离网时的电量不小于用户设定的目标电量，同时为了保证电池充电时的安全，设定电池荷电状态的上限和下限，故在电动汽车入网时，电池电量应满足如下关系：

$$E_i^{\text{in}} + \sum_{t=t_i^{\text{in}}}^{t_i^{\text{off}}} x_{i,t} \geqslant E_i^{\text{off}} \tag{26}$$

$$0 \leqslant E_i^{\text{in}} + \sum_{t=t_i^{\text{in}}}^{t_i} x_{i,t} \leqslant E_i^{\text{cap}}, \forall t_i \in [t_i^{\text{in}}, t_i^{\text{off}}] \tag{27}$$

式中：E_i^{in}为第i辆电动汽车入网时刻的初始电量，t_i^{in}为第i辆电动汽车接入电网的时段，t_i^{off}为第i辆电动汽车预先设定的离网时段，t_i为第i辆电动汽车的在网时刻，E_i^{cap}为第i辆电动汽车的电池最大容量。

2.3.2.3　优化算法

通过上述分析可知目标函数为多参数单目标最优函数，而且所有约束条件均为线性约束，故采用遗传算法方法进行求解本优化问题。

遗传算法是一种模拟生物进化过程的优化算法，用于解决复杂的搜索和优化问题。该算法借鉴了达尔文的进化理论和遗传学的观念，通过模拟自然选择、交叉和变异等机制，逐步寻找问题的最优解，其基本描述如下：

$$SGA = (C, E, P_0, M, \phi, \Gamma, \varphi, T) \tag{28}$$

式中：C为个体的编码方案，E为个体适应度评价函数，P_0为初始种群，M为种群大小，ϕ为选择算子，Γ为交叉算子，φ为变异算子，T为遗传算法终止条件。

遗传算法主要流程见图2，总体调度流程如图3所示。具体而言，遗传算法首先对问题进行编码并生成初始种群，通过模拟自然选择、交叉和变异等生物进化过程不断迭代，以适应度函数为评价标准筛选优质个体，直至满足终止条件输出最优充放电策略。总体调度流程则采用滚动时域优化方法，在每个调度时刻t，系统首先筛选当前可调度车辆并更新优化时间范围，结合实时基础负荷数据，利用遗传算法求解得出当前时刻的最优充放电功率，随后更新车辆荷电状态并推进至下一时刻，直至完成全天96个时段的调度任务。

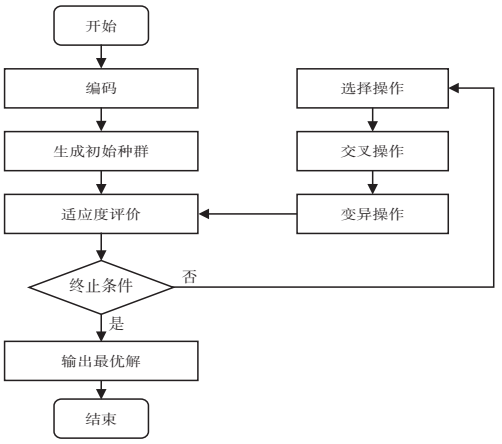


图2　遗传算法流程

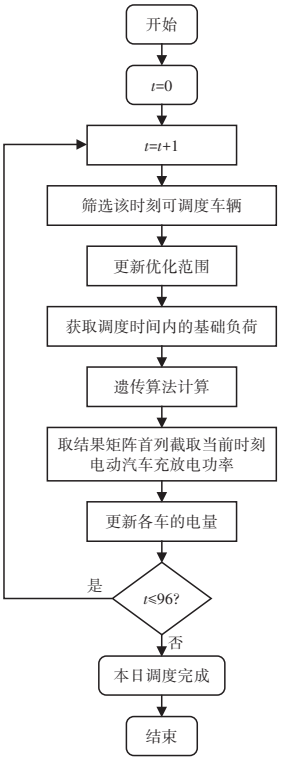


图3　优化调度流程

3　仿真验证

3.1　行程链的仿真结果

首先依据行程链生成方法，模拟了500辆电动汽车的日行程链，共生成了1 444个行程，部分数据如表1所示。其首次出行时间和出行次数的分布如图4和图5所示。

表2对比了模拟数据和NHTS数据中不同行程类型的占比。在NHTS数据集中，“H-O”类行程占比达38.08%，占比最高；模拟数据中该比例下降了5.30%，其他3种模式的比例分别增加了1.64%、2.69%和2.97%。表3显示，模拟数据中家庭和工作场所的平均停车时间分别为7.11 h和6.32 h，与真实数据非常接

近，说明模型具有较好的可靠性。

表1　部分车辆仿真结果数据

车辆ID	出发时间	到达时间	行程类型	SOC_s/%	SOC_e/%	行程里程/km
5	7:00	7:15	H-W	88	86	5
5	16:20	17:00	W-H	86	77	31
64	7:00	7:45	H-W	84	77	26
64	16:50	17:20	W-H	77	70	13
64	17:50	18:20	H-O	70	63	8
64	19:05	20:20	O-H	63	45	30
144	17:00	17:25	H-O	72	70	7
144	18:10	18:45	O-H	70	62	19
144	19:15	19:40	H-H	62	56	8
144	20:10	20:45	H-O	56	48	19
144	21:45	23:05	O-H	48	29	51

注：W代表工作地点，H代表家，O代表其他地点。

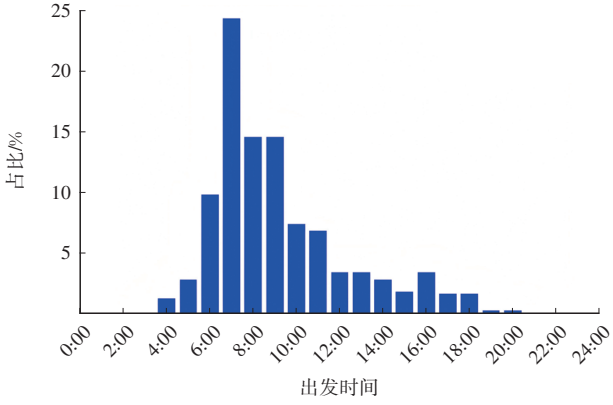


图4　仿真数据的首次出行时间分布

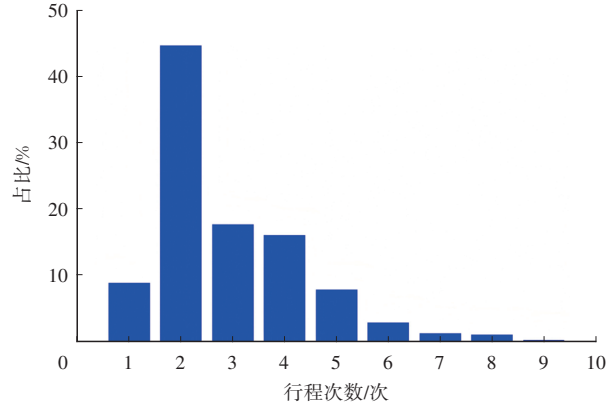


图5　仿真数据的行程次数分布

表2　仿真数据中不同行程类型占比

行程类型	实际占比/%	模拟占比/%	误差率/%
H-O&O-H	38.08	32.78	-13.92
W-O&O-H	11.63	13.27	14.10
H-W&W-H	29.95	32.64	8.98
O-O	20.34	23.31	14.60

表3　仿真数据中平均停车时长比较

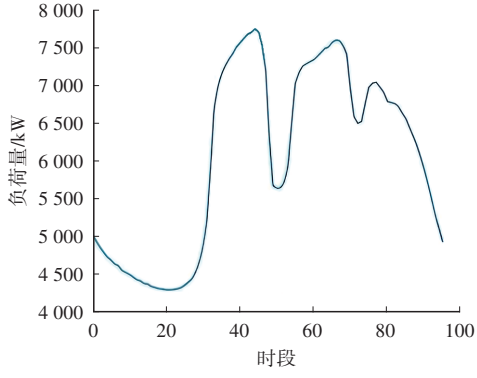
停车地	实际平均停车时长/h	模拟平均停车时长/h	误差率/%
H	6.44	7.11	10.40
W	5.83	6.32	8.40
O	1.47	1.29	-12.24

3.2　充放电优化调度仿真结果

在获取电动汽车充电负荷数据后，对电动汽车充放电功率进行优化控制。设置某配电区域内共有500辆支持V2G的电动汽车，每辆车最大充放电功率为7 kW，电池容量为30 kW·h，其余参数设置见表4。同时，为了便于计算，将一天24 h划分为96个时段（T=96），每个时段的时间步长为15 min，行程链起止时间均转换为对应时段，同时假定电动汽车停车时刻即为其入网时刻，该区域基础负荷曲线如图6所示。

表4　参数取值

参数	取值	参数	取值
E_i^{cap}/kW·h	53.1	K	1
P_{char}/kW·h	7	B	1
P_{dis}/kW·h	-7	T	96



注：每个时段对应的时间步长为15 min。

图6　分段后的基础负荷

无序充电场景下，车辆接入后即以最大功率充电至满电量，导致电网负荷上升、运行成本增加。利用本文的优化调度算法对电动汽车进行充放电控制的优化结果如图7所示。在第50和70时段（约12:30与17:30）附近，电网峰值负荷得到了有效抑制。总负荷较无序充电场景显著下降，表明所提策略可实现削峰填谷并降低电网总负荷。

对更多场景（如轻工业区，商业区，重工业区）进行优化调度，获取各场景优化后的电网负荷以及电动汽车的充放电负荷，如图8~图13所示。对比不同功能区的仿真结果可知，本文提出的充电优化策略在应对差异化场景时表现出不同的调节特性。从削峰

效果来看，在各功能区的用电高峰时段（如商业区的日间工作时段），优化后的负荷曲线均明显低于基础负荷曲线，表明V2G放电对降低电网峰值压力作用显著。从填谷效果来看，虽然在夜间等低谷时段，电动汽车的集中充电使电网总负荷有所回升，但受限于配电区域内可调度电动汽车的总容量占基础负荷比重较小等因素，填谷幅度相对平缓，效果不如削峰显著。总体而言，该策略能够有效平抑电网负荷的剧烈波动，特别是在遏制负荷尖峰、降低电网运行风险方面具有明确的实际效益。

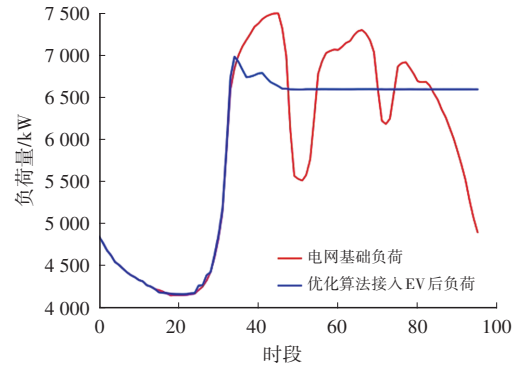


图7　优化调度下的电网负荷曲线对比

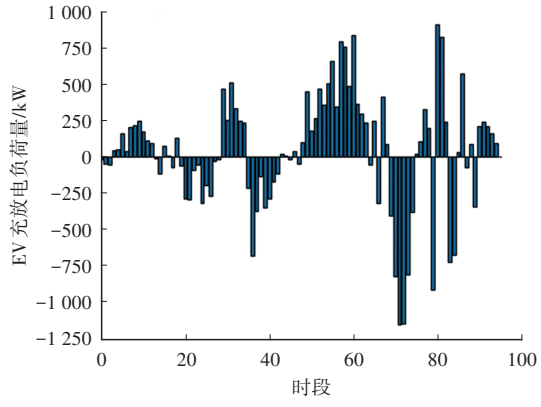


图8　轻工业区优化后各时段的电动汽车充放电负荷

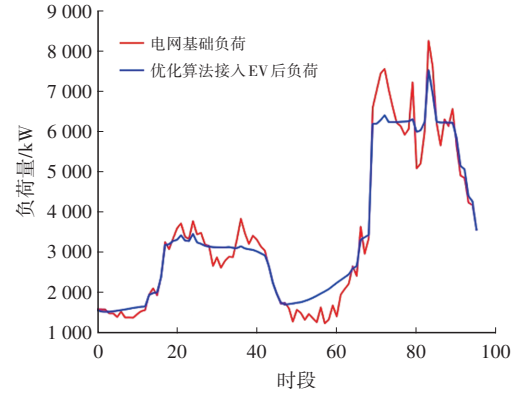


图9　轻工业区优化后电网负荷曲线对比

为说明单车的调度效果，选取低谷时段与高峰时段各一辆车，分析其SOC变化曲线。第60辆电动汽车的SOC曲线如图14所示。该辆车从第19个时段接入电网，于第33个时段结束充电，由于此时电网负荷较低，所以对于该辆车首先进行充电，而后将多余的电量对电网进行出售。对于高峰时段的第468辆电动汽车的SOC曲线如图15所示，该辆车从第71个时段接入电网，于第91个时段结束充电，由于此时电网负荷处于高峰时段，所以对于该辆车首先进行放电，而后再进行充电。结果表明，本文策略能针对每辆车制定具体充放电计划，实现错峰充电，使用户在低谷低价充电、高峰高价放电，从而降低充电成本。

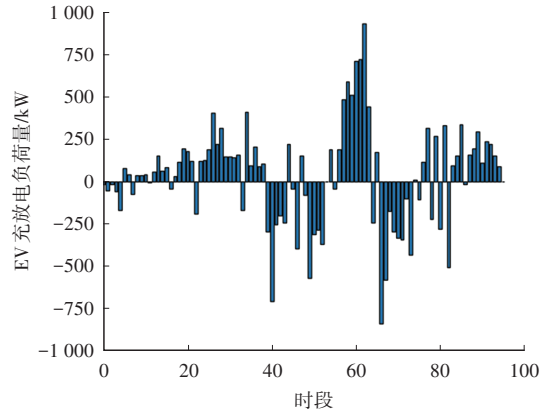


图10　商业区优化后各时段的电动汽车充放电负荷

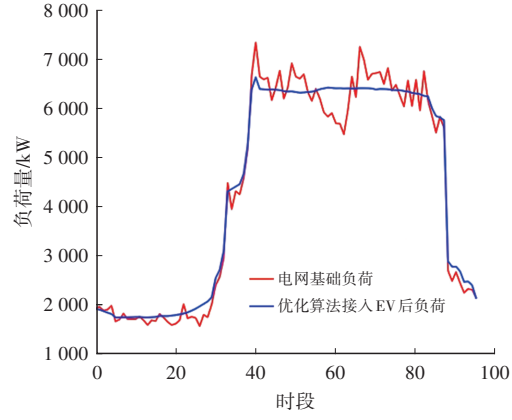


图11　商业区优化后电网负荷曲线对比

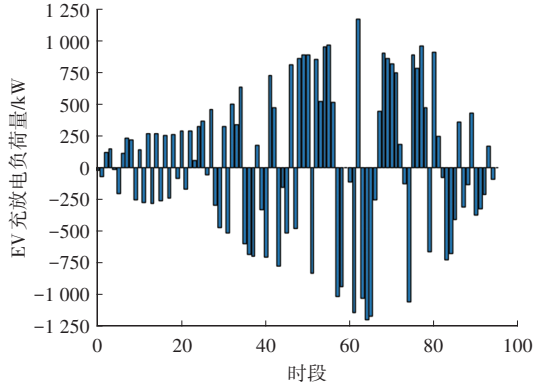


图12　重工业区优化后各时段的电动汽车充放电负荷

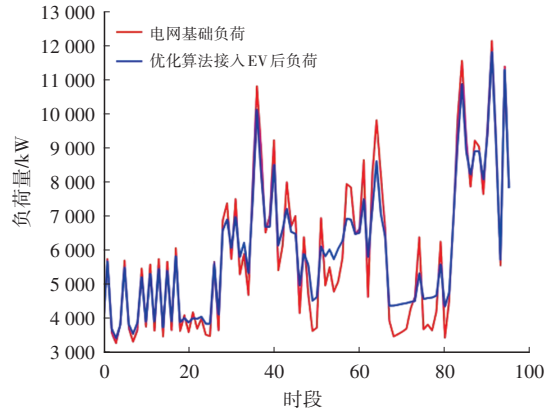


图13　重工业区优化后电网负荷曲线对比

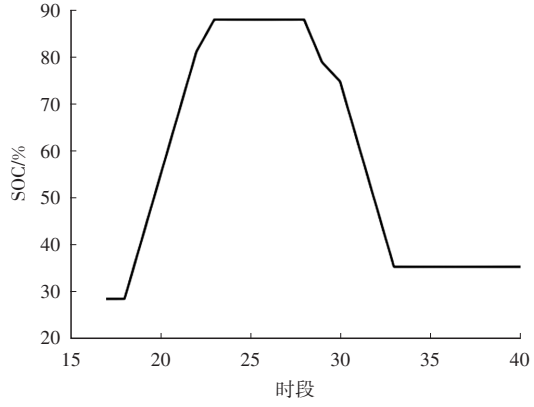


图14　优化后第60辆车的SOC变化曲线

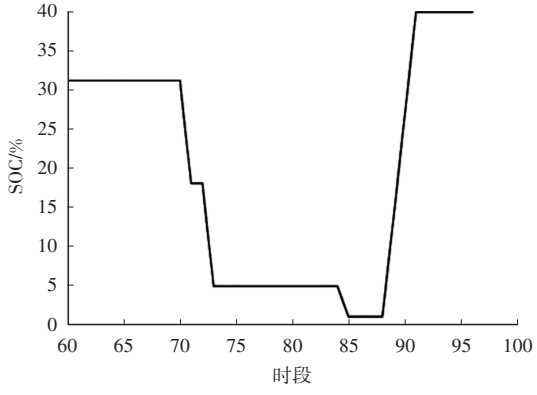


图15　优化后第468辆车的SOC变化曲线

将各个时段所有入网车辆的充放电负荷量进行统计，如图16所示。在高峰时段，电动汽车整体处于放电状态；在低谷时段，电动汽车整体处于充电状态，说明优化调度实现了车网功率的互补调节。

如表5所示，与基础负荷相比，无序充电使峰谷差增大至1.185 3×10^4 kW，增幅约4.85%，说明大量电动汽车在高峰时段充电，加剧了电网负荷的“峰上加峰”效应。经优化调度后，峰谷差大幅降至0.835 6×10^4 kW，较无序充电降低约29.5%，较基础负荷降低约26.1%。这表明分时电价引导下的有序充放电策略，有效实现了“削峰填谷”，显著平抑了负荷波动。从总负荷来看，优化后总负荷（2.466 0×10^4 kW）略高于无序充电（2.483 5×10^4 kW），但负荷分布更均匀，避免了极端高峰对电网设备的冲击，提升了系统运行的安全性与经济性。

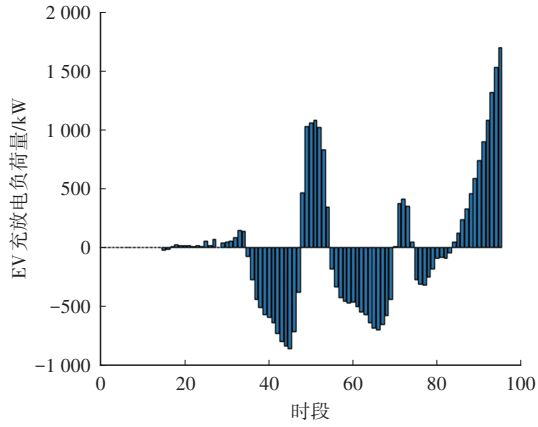


图16　优化后各时段的电动汽车充电负荷

表5　不同策略的结果对比　　kW

	基础负荷	无序充电	优化调度
峰谷差	1.130 5×10^3	1.185 3×10^3	0.835 6×10^3
日总负荷	2.430 8×10^5	2.483 5×10^5	2.466 0×10^5

4　结论

本文提出了一种基于动态分时电价的电动汽车实时优化调度控制策略。首先，利用NHTS数据建立行程链模型，生成电动汽车日行程数据。其次，结合设定的充电需求与方式决策模型得到各个时刻每一辆电动汽车的充放电功率。然后，选择包含用户充电成本和电池老化成本的总成本作为目标函数，结合电动汽车充放电功率与荷电状态约束，采用遗传算法进行优化求解。仿真结果表明，所提策略在降低电动汽车用户充电成本的同时，有效实现了电网的削峰填谷。主要结论如下：

（1）基于NHTS的车辆行驶数据设计了朴素贝叶斯分类器来构建行程链模型。仿真结果显示，模拟的平均停车时长与真实停车时长数据最大相对误差控制在12.3%以内，且行程类型占比趋势一致，验证了模拟行程数据的可靠性，为后续调度提供了精准的负荷预测基础。

（2）利用动态分时电价模型建立电价与电网负荷的函数关系，并利用遗传算法求解充放电策略。该策略有效降低了用户充电成本，实现了低谷充电与高峰放电的有序引导。

（3）优化调度结果表明，该策略能有效响应电网削峰需求。量化分析显示，在典型场景下，优化后的电网峰谷差较无序充电降低了约29.5%，且日总负荷

略有下降，显著遏制了高峰时段的负荷尖峰，有效平抑了电网负荷波动，提升了系统运行的稳定性。

参 考 文 献

[1] 夏小禾. 2030年新能源汽车市场渗透率目标为60%[N]. 机电商报, 2023-12-25(A03).

[2] 李伟生. 基于V2G的电动汽车充放电优化调度策略研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.

[3] 王敏, 吕林, 向月. 计及V2G价格激励的电动汽车削峰协同调度策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4): 27-33+85.

[4] 胡文平, 何立夫, 陈杰军, 等. 考虑大规模电动汽车接入电网的双层优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 22-28.

[5] 欧名勇, 陈仲伟, 谭玉东, 等. 基于峰谷分时电价引导下的电动汽车充电负荷优化[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(5): 54-59.

[6] 刘红. V2G模式下"车-站-网"融合的电动汽车充放电调度研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2024.

[7] 陈丽娟, 秦萌, 顾少平, 等. 计及电池损耗的电动公交车参与V2G的优化调度策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 52-60.

[8] 陈凯炎, 牛玉刚. 基于V2G技术的电动汽车实时调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 1-9.

[9] 陈明强, 高健飞, 畅国刚, 等. V2G模式下微网电动汽车有序充电策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 141-148.

[10] 汪思奇. 考虑V2G的区域综合能源系统运行调度优化[J]. 科学技术创新, 2022(34): 30-34.

[11] 王娟, 陈明, 支刚, 等. 电动汽车充电负荷的蒙特卡洛预测方法[J]. 云南电力技术, 2024, 52(4): 10-14.

[12] 熊俊. 基于季节特性能耗模型的电动汽车充电负荷预测[J]. 电工材料, 2024(5): 65-70.

[13] 范宏, 李嘉晖, 郭琦. 考虑用户充电决策行为的电动汽车充电引导策略[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4): 23-30.

[14] 张美霞, 吴子敬, 杨秀. 基于动态能耗模型与用户心理的电动汽车充电负荷预测[J]. 现代电力, 2022, 39(6): 710-719.

[15] 谢远德, 邓沙丽. V2G技术模式下计及电池损耗的电动汽车充放电策略[J]. 东北电力技术, 2025, 46(4): 8-13.

（责任编辑　**明慧**）

《汽车工艺与材料》投稿须知

《汽车工艺与材料》于1986年创刊，是由中国第一汽车集团有限公司主办的国内外公开发行的汽车材料与制造技术类月刊，目前已入选《中文核心期刊要目总览》（第二版）、RCCSE中国准核心学术期刊（B+）、中国核心期刊（遴选）数据库、中国学术期刊综合评价数据库、欧洲学术出版中心数据库（EuroPub）、哥白尼精选期刊数据库（ICI Journals Master List）、EBSCO International数据库、J-Gate数据库。

《汽车工艺与材料》以"为中国报道汽车制造，为汽车引领工艺材料"为办刊宗旨，致力于报道以汽车轻量化技术和智能制造技术为核心的先进制造技术与材料应用技术，重点关注电动汽车蓄电池、电机、电控关键材料技术，燃料电池材料技术，高强度钢、铝镁合金、非金属材料及其成形技术，连接技术，智能装备与绿色制造等，以期通过高质量学术内容的出版和传播助推行业创新技术的交流与发展。

《汽车工艺与材料》杂志关注领先的整车及零部件企业和材料、装备等供应商，及时报道汽车行业最新的产品设计、制造、材料、加工技术、生产装备、检测技术等方面的成功案例。

主要栏目：

AT&M视界、生产现场、材料应用、生产装备、检测技术、数字化园地、行业动态等。

投稿要求：

（1）来稿须具有独创性并与实践相结合，文章字数最好控制在5 000～8 000字。

（2）来稿不能在国内、外公开杂志上发表过，请勿一稿多投。

（3）来稿的试验方法、试验数据、试验结论必须准确、可靠。

（4）来稿须包括以下项目：题名、作者姓名、作者单位、摘要（200字左右）、参考文献等。来稿采用word文档的格式。

（5）来稿文章格式应符合一般科技论文格式，或参考近期本刊所刊登文章格式。

（6）文章必须附有公开发表的、体现本领域最新研究成果的参考文献，且在文中应标注文献引用处。

（7）本刊使用网站投稿，投稿网址：http://qcgyycl.cbpt.cnki.net，咨询电话：0431-82026054。

竭诚欢迎汽车行业及相关各界的专家学者积极向本刊投稿。