

引导电动汽车用户驾驶行为的充电导航策略

任丽娜[†], 路鹏伟, 刘福才

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 电动汽车充电导航便于用户合理选择充电站,降低用户自身的时间成本和经济成本,缓解配电网端的负荷压力.在电网分时电价的基础上,考虑电动汽车充电路径的选择与车主的驾驶行为密切相关,通过对电动汽车的负荷设备分类建模,根据不同设备类型的重要程度及用户的电动汽车实际工况和地形因素,利用遗传算法分析最佳出行路径,提出以时间成本与经济成本之和最优为目标,引导用户驾驶行为的充电导航策略.在20 km×10 km含3个充电站的区域内,通过3种不同充电导航策略仿真结果对比,验证所提出的导航策略的可行性和有效性.

关键词: 充电导航; 时间成本; 经济成本; 分时电价; 驾驶行为

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Charging navigation strategy by guiding the driving behavior of electric vehicle users

REN Li-na[†], LU Peng-wei, LIU Fu-cai

(College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The charging navigation of electric vehicle is convenient for users to choose charging station reasonably, reduce their own time cost and economic cost, and alleviate the load pressure of distribution network. Based on the time-of-use price of power grid, this paper considers that the choice of charging path of electric vehicle is closely related to the driving behavior of the vehicle owner, and models the load equipment classification of electric vehicle by means of classification. According to the importance of different equipment types and the actual working condition of the electric vehicle and road terrain factors, the optimal travel path is analyzed by using genetic algorithm, and a charging navigation strategy is proposed to guide the user's driving behavior with the aim of the optimal sum of time cost and economic cost. In the 20 km×10 km region with three charging stations, the feasibility and effectiveness of the proposed navigation strategy are verified by comparing the simulation results of three different charging navigation strategies.

Keywords: charging navigation; time cost; economic cost; time-of-use price; driving behavior

0 引言

当今,各国电动汽车销量迅猛增长,全球电动汽车保有量不断提升^[1].同时,智能交通运输系统和智能电网技术的发展也为电动汽车的进一步推广提供了广阔的前景^[2-4].电动汽车的发展有助于缓解环境污染和能源紧张问题,预计未来10年,电动汽车的数量将会超过燃油车,但是与燃油车相比,电动汽车仍有一些缺点.首先,电动汽车的电池容量有限,在中途不充电的情况下,电动汽车的行程比燃油车更短,某些出行线路也就不再可行;其次,电动汽车充电设施有限,短时间内很难满足快速增长的电动汽车充电需求.因此,研究电动汽车的合理、高效的充电导航策略是十分必要的.

目前,已有众多的国内外专家学者对电动汽车充

电引导策略进行了相关研究.文献[5]利用路段权值思想和Dijkstra的最短路径算法,提出了一种大规模电动汽车的最优充电策略和最短路径法,在一定程度上解决了交通拥挤和网格节点压降过大的问题;文献[6]建立了一种电动汽车在充电站中有序充电的模型,目标是最大化充电站运营商的经济效益;文献[7]提出了综合交通状况和电网状态的电动汽车快速充电导航策略;文献[8]为了避免大规模无序充电对配电网安全的影响,提出了基于实时交通信息感知的电动汽车物流配送导航系统模型.但是,上述研究更关注于大规模电动汽车充电对电网的影响,而不是从用户侧利益的角度出发,忽略了用户侧响应的问题.

文献[9]提出了在电动汽车电量不足以抵达目的地时,考虑电动汽车充电站的范围和位置,利用

收稿日期: 2019-04-30; 修回日期: 2019-08-12.

责任编辑: 林崇.

[†]通讯作者. E-mail: renlina@ysu.edu.cn.

Dijkstra算法选择经济有效的出行路径的方法. 然而, 当考虑到电动汽车再生制动产生的负路径成本的问题时, 现有的Dijkstra算法不再适用于电动汽车的路径规划. 因此, 文献[10]提出了使用Bellman-Ford算法解决电动汽车节能路径问题的方案; 文献[11]同样指出了Dijkstra算法的局限性, 提出了一种改进的遗传算法对多模态路径规划问题进行求解; 文献[12]针对现有搜索算法求解效率低的问题, 提出了混合智能优化算法OODE(ordinal optimization differential evolution)解决智能汽车的驾驶决策和轨迹规划问题; 文献[13]指出, 由于充电站设施和充电技术的限制, 将充电站的实时信息与电动汽车导航系统结合是实现高效的电动汽车路径优化的关键; 文献[14]提出了一种根据电网浮动电价进行充电导航的策略; 文献[15]考虑了分时电价对用户经济成本的影响; 文献[16]在电网分时电价的基础上进一步提出了根据实时的交通路况优化充电导航的策略.

综上, 当前的文献主要关注于交通因素及电网运行状态对电动汽车充电导航路径的影响, 从而忽略了电动汽车实际能耗对于电动汽车充电导航路径的影响. 因此, 本文在分时电价的基础上, 考虑电动汽车能耗对用户出行成本的影响, 通过对电动汽车的负荷设备按照重要程度进行分类建模, 根据用户当前行驶工况, 预测车辆的最佳充电路径, 在电动汽车无法抵达目标充电站或目的地时, 引导车主按照重要程度依次调整不同类型负荷设备的工作状况, 以达到节约成本或者完成出行计划的目的. 在某市20km×10km含3个充电站的交通路网中通过3种不同导航策略的对比较验证所提出的充电导航方案的可行性和有效性.

1 电动汽车负荷设备分类

在用户的电动汽车电量状态不足以抵达期望的充电站以实现最低成本的出行路径选择时, 引导车主驾驶行为应尽量降低其对用户驾驶体验的负面影响. 因此, 需要在进行驾驶引导时制定合理的引导次序. 按照负荷设备特性及重要程度对电动汽车负荷设备进行分类, 主要分为3类:

第1类: 必要设备类型. 此类能源为不可关闭类型, 主要指电动汽车行驶所消耗的电能. 考虑到雨天、雾天、夜间行驶等状况下照明系统的使用为必须能源消耗, 故也属于此类. 此外, 还包含车辆仪表系统等必要耗能设备.

第2类: 必要但可调整功率设备类型. 此类电器可调整工作等级来改善能源消耗. 主要指电动汽车

空调设备. 根据某款车型显示, 冬季空调制热功率约在3kW左右, 夏季空调制冷功率为850W左右. 电动汽车空调高负荷运行会造成极大的电量消耗. 因此, 在用户舒适度影响较小的情况下, 可考虑通过适当调整空调工作等级来提高续航里程.

第3类: 非必须能耗设备类型. 如电动汽车的音响等设备. 在电动汽车电量不足的情况下, 考虑优先关闭该类设备以提高续航里程.

2 电动汽车各类负荷设备功率模型

2.1 第1类负荷设备功率模型

第1类设备能耗 E_{first} 主要包括电动汽车行驶所消耗的电能 E_{drive} 、仪表设备消耗电能 E_{dash} 、照明系统消耗的电能 E_{light} , 即

$$E_{\text{first}} = E_{\text{drive}} + E_{\text{dash}} + E_{\text{light}} \cdot X_{\text{light}}. \quad (1)$$

其中: X_{light} 为决策变量, 当照明系统启用时为1, 否则为0.

为了计算电动汽车当前行驶速度所需要的能耗, 首先要求出电动汽车以该速度 V 匀速行驶所需要的力 F , 即

$$F = F_d + F_p + F_r, \quad (2)$$

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \cdot \rho \cdot S \cdot V^2, \quad (3)$$

$$F_p = m \cdot g \cdot \sin i, \quad (4)$$

$$F_r = C_r \cdot m \cdot g \cdot \cos i, \quad (5)$$

$$\tan i = \frac{h_{s2} - h_{s1}}{l_s}. \quad (6)$$

其中: F_d 为空气阻力, F_p 为坡度阻力, F_r 为滚动阻力, C_d 为空气阻力系数, ρ 为空气密度, S 为电动汽车迎风面积, V 为电动汽车行驶速度, m 为电动汽车重量, g 为重力系数, h_{s1} 为路段 s 起始点海拔高度, h_{s2} 为路段 s 终点海拔高度, l_s 为路段 s 的距离, C_r 为滚动阻力系数.

之后求得克服阻力以速度 V 匀速行驶所消耗的功率, 即

$$P_{\text{drive}} = \frac{F \cdot V}{\eta}, \quad (7)$$

其中 η 表示电能转化为机械能的效率^[17-18]. 那么路段 s 电动汽车以速度 V 匀速行驶造成的部分能耗为

$$E_{\text{drive}} = P_{\text{drive}} \cdot \frac{l_s}{V_s}. \quad (8)$$

当前电动汽车仪表设备通常采用LED/LCD显示, 其功耗 E_{dash} 相对于电动汽车整体功耗而言可忽略不计.

在路段 s , 电动汽车照明设备保持开启状态所消

耗的电能 E_{light} 为其功率 P_{light} 与该路段行驶时间的乘积,即

$$E_{\text{light}} = P_{\text{light}} \cdot \frac{l_s}{V_s}. \quad (9)$$

2.2 第2类负荷设备功率模型

如前文所述,第2类负荷设备主要指电动汽车空调设备.为了获取电动汽车空调设备功率,首先根据空调的热负荷组成建立热平衡方程

$$\begin{aligned} \text{QW} = & \text{QWB} + \text{QWG} + \text{QWBI} + \text{QE} + \\ & \text{QC} + \text{QM} + \text{QP} + \text{QV}. \end{aligned} \quad (10)$$

其中:QW为空调热负荷,QWB为通过车顶与车门传导进入车内的热负荷,QWG为通过各玻璃表面以对流方式进入车内的热负荷,QWBI为通过各玻璃表面以辐射方式直接进入车内的热负荷,QE为从发动机室一侧传导进入车内的热负荷,QC为从行李箱及车厢地板传导进入车内的热负荷,QM为空调风机造成的热负荷,QP为车内驾驶人员及乘客散发的热负荷,QV为密封处泄漏及补充新风进入车内的热负荷.

为了便于计算,根据是否直接与空调设定温度相关将其简化为两部分:

$$\text{QW} = \text{QA} + \text{QV} + \text{QE}, \quad (11)$$

$$\text{QA} = U \cdot \text{Ab} \cdot |T_{\text{set}} - T_{\text{srd}}|. \quad (12)$$

其中:QA为车整体的热传导负荷,U为车身的热传导系数,Ab为车身的面积, T_{set} 为空调设定温度, T_{srd} 为外部环境温度.

$$\text{QV} = F_{\text{air}} \cdot C_p \cdot |T_{\text{set}} - T_{\text{srd}}|. \quad (13)$$

其中:QV为通风负荷, F_{air} 为换气量, C_p 为空气比重.

QE用来统一表示除QA和QV之外的其他空调热负荷.

进一步可由空调热负荷计算出维持当前车内温度所需要的功率

$$P_{\text{air}} = \text{QW} \cdot \frac{\gamma}{\delta}. \quad (14)$$

其中: γ 为电动汽车内部空调热负荷传递系数, δ 为空调压缩机机械传动系数.

同理,在电动汽车空调以设定温度 T_{set} 运行时,路段 s 空调所消耗的电量为

$$E_{\text{air}} = P_{\text{air}} \cdot \frac{l_s}{V_s}. \quad (15)$$

2.3 第3类负荷设备功率模型

在不考虑电动汽车外接负载设备的情况下,该类设备功耗主要为电动汽车音响播放设备造成的电能

损耗,定义其在路段 s 消耗的电能 E_{media} 为

$$E_{\text{media}} = P_{\text{media}} \cdot \frac{l_s}{V_s}. \quad (16)$$

3 充电导航路径规划

电动汽车的充电导航路径规划主要从用户的角度出发,假设用户从出发点 S 到达目的地 O ,其考虑的充电方案主要有两种.首先,为了尽快抵达目的地而选择总的行程时间最短的充电方案;其次,不在乎行程时间的长短,只关心本次出行总的行程经济成本的充电方案;因此将目标函数定义为

$$y = \min\{\alpha \cdot T + \beta \cdot C_{\text{actual}}\}. \quad (17)$$

其中: α 、 β 仅取0值或1值, $\alpha = 0$ 、 $\beta = 1$ 为总的行程经济成本最低的充电导航方案, $\alpha = 1$ 、 $\beta = 0$ 为总的行程时间最短的充电导航方案; T 为电动汽车总的行程时间; C_{actual} 为电动汽车行程经济成本.

3.1 电动汽车行程时间

电动汽车的总的行程时间主要包含从出发点到目的地的路径行驶时间 T_{drive} 、充电等待时间 T_{wait} 和充电时长 T_{ch} 三个部分.

$$T = T_{\text{drive}} + T_{\text{wait}} + T_{\text{ch}}. \quad (18)$$

电动汽车的路径行驶时间 T_{drive} 可通过电动汽车由出发点到达目的地的各个路段时间和求得,即

$$T_{\text{drive}} = \sum_{s=1}^n \frac{l_s}{V_s}. \quad (19)$$

其中: n 为该行程经过的路段总数, l_s 为途经各路段的行驶距离, V_s 为各路段平均行驶速度.

电动汽车的充电等待时间和充电时长需要借助决策变量 X_k 获取.

$$T_{\text{wait}} = \sum_{k=1}^K T_{\text{wait},k} \cdot X_k, \quad (20)$$

$$T_{\text{ch}} = \sum_{k=1}^K \frac{80\%E_b - E_{\text{chs},k}}{P_{\text{ch}}} \cdot X_k. \quad (21)$$

其中: K 为区域内总的充电站个数; X_k 为决策变量,选择在充电站 k 处充电则为1,否则为0, $80\%E_b$ 表示默认最大充电至电池容量的80%即停止(为了保护电动汽车电池), $E_{\text{chs},k}$ 为在充电站 k 处开始充电时的电量, P_{ch} 为电动汽车在充电站的充电功率.

3.2 电动汽车行程经济成本

以往的电动汽车行程经济成本通常定义为行程花费^[14]或仅仅为充电费用^[15-16]的形式.考虑到在忽略电价变化影响的情况下,电动汽车与充电站距离越短意味着所需充电电量越少,行程花费越低,但是该

情形下在抵达目的地时最终剩余电量也更少,并不能很好地反映电动汽车用户对总的行程经济成本最低的要求. 因此, 本文将电动汽车的行程经济成本表示为以用户的行程花费减去抵达目的地后剩余电量的等价金额之差的形式, 即

$$C_{\text{actual}} = C_{\text{cost}} - E_{\text{end}} \cdot C_{\text{st}}. \quad (22)$$

其中: C_{cost} 为电动汽车行程花费, E_{end} 为电动汽车抵达目的地最终剩余电量, C_{st} 为电动汽车在充电站开始充电时的电价.

电动汽车的行程花费 C_{cost} 应包括各类负荷设备耗电量等价的总费用以及为电动汽车充电所支付的费用 C_{ch} 之和, 即

$$C_{\text{cost}} = C_{\text{first}} + C_{\text{air}} + C_{\text{media}} + C_{\text{ch}}, \quad (23)$$

$$C(t) = \begin{cases} 1.8044 \text{ 元 / (kWh)}, & t \in (10:00, 15:00) \text{ 或 } (18:00, 21:00); \\ 1.4950 \text{ 元 / (kWh)}, & t \in (07:00, 10:00) \text{ 或 } (15:00, 18:00) \text{ 或 } (21:00, 23:00); \\ 1.1946 \text{ 元 / (kWh)}, & t \in (23:00, 07:00). \end{cases} \quad (28)$$

3.3 约束条件

为了避免电动汽车电量耗尽的情况, 规定电动汽车抵达充电站时的剩余电量不得低于 10%, 否则该充电站不作为备选充电站, 即

$$E_{\text{chs},k} > 10\% E_b. \quad (29)$$

电动汽车经过的路段总距离应与经过的各相邻路网节点间距离总和相同, 即

$$\sum_{s=1}^n l_s = \sum_{i,j \in S_a \cup \Omega_a} D_{i,j} x_{i,j}. \quad (30)$$

其中: $x_{i,j}$ 为 0-1 路径约束变量, 若电动汽车依次经过节点 i 与 j 之间的路段 $D_{i,j}$, 则 $x_{i,j} = 1$, 否则 $x_{i,j} = 0$; S_a 为电动汽车经过的路网节点集合; Ω_a 为电动汽车经过的充电站节点集合.

考虑到电动汽车必须由初始节点 S 出发, 到达目的地节点 O 结束, 路径选择约束条件表达式为

$$\sum_{\substack{j=S \\ i,j \in S_a \cup \Omega_a}}^O x_{i,j} - \sum_{\substack{j=S \\ i,j \in S_a \cup \Omega_a}}^O x_{j,i} = \begin{cases} 1, & i = S; \\ 0, & i \neq S, O; \\ -1, & i = O. \end{cases} \quad (31)$$

3.4 电动汽车充电路径规划及求解算法

以往的电动汽车充电导航策略^[5-8,14-16]更关注于实时价格、实时交通信息对充电路径的影响, 忽略了地形、设备功耗对电动汽车的充电路径的影响. 因而,

$$C_{\text{first}} = \sum_{s=1}^n E_{\text{first}} \cdot C_{\text{st}}, \quad (24)$$

$$C_{\text{air}} = \sum_{s=1}^n E_{\text{air}} \cdot C_{\text{st}} \cdot X_{s1}, \quad (25)$$

$$C_{\text{media}} = \sum_{s=1}^n E_{\text{media}} \cdot C_{\text{st}} \cdot X_{s2}, \quad (26)$$

$$C_{\text{ch}} = P_{\text{ch}} \cdot \int_{T_k+T_{\text{wait},k}}^{T_k+T_{\text{wait},k}+T_{\text{ch},k}} C(t) dt. \quad (27)$$

其中: T_k 为电动汽车抵达充电站 k 的时刻, $T_{\text{ch},k}$ 为在充电站 k 处的充电时长, $C(t)$ 为充电站提供的充电电价及充电服务费 (元/kWh)^[19]. 由于第 1 类负荷设备为车辆行驶的的必要设备类型, 仅设置 X_{s1} 、 X_{s2} 分别作为第 2 类和第 3 类设备的决策变量, 当对应设备类型状态开启时为 1, 否则为 0. $C(t)$ 表达式为

本文将这些因素考虑到路径导航策略中, 分 3 种不同情形对充电导航策略进行设计.

情形 1: 不考虑地形、设备功耗的充电路径导航策略;

情形 2: 考虑地形、设备功耗等, 但不接受驾驶引导的充电路径导航策略;

情形 3: 考虑地形、设备功耗等且接受驾驶引导的充电路径导航策略.

情形 1 在进行路径规划时, 需要将各个路段距离转化为对应的权值^[5,9]. 鉴于 Dijkstra 算法遍历所有路径的优秀的全局寻优能力, 使用该算法对情形 1 的充电导航路径进行求解. 由于该情形下的导航路径忽略了地形因素造成的额外花费的影响, 在分析实际花费时需要按照该路径的实际能耗等计算实际花费.

情形 2 与情形 3 在进行路径规划时, 需要根据车辆的行驶工况, 进一步将情形 1 中代表路段距离的权值化为代表电动汽车能耗的权值. 考虑到电动汽车再生制动的问题, Dijkstra 算法无法解决权值为负给路径规划带来的影响^[10]. 遗传算法作为一种高效的全局优化搜索策略, 在求解组合优化问题方面具有良好的性能, 可将路网节点视为遗传算法中染色体的基因求解路径优化问题.

与情形 2 不同的是, 情形 3 在进行路径规划时, 首先忽略电量因素对区域范围内的各个充电站进行分析, 确定最佳充电站后计算抵达该充电站时的电

量.若电量满足约束条件即表明该充电路径即为最佳充电路径,若不满足则依次调整第3类、第2类设备负荷功率至满足约束条件即可,必要时可通过计算最佳行驶速度并将其提供给车主以引导其完成出行计划^[20].

4 算例仿真

4.1 参数设定

选择车型电池容量40.5 kWh,初始SOC为0.2,音响设备功率0.1 kW.由于不同时段电价存在差异,设置车主的出发时间为14时.此时车外环境温度为38℃,车内空调初始温度设定为23℃.在一个33节点的交通路网中验证所提出的规划模型的可行性.选取某市20 km×10 km的区域交通道路网,该路网包含53条路段,3个充电站节点,分别位于5、8、28三处路网节点.交通路网示意图如图1所示.为了突出地形因素对电动汽车实际电量损耗的影响,设置各路网节点海拔高度如表1所示.该区域整体地形为左下地势平缓,但路段距离较长,右上地势起伏较大,虽然上下坡路较多,但路段距离更短.

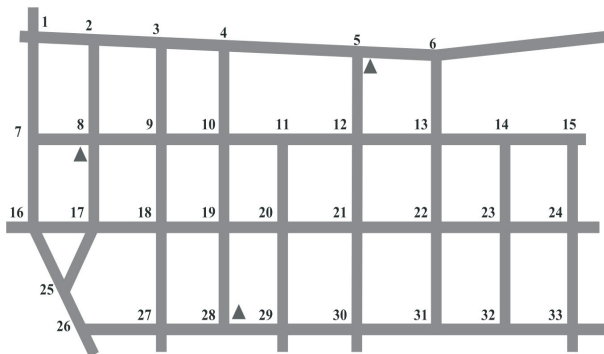


图1 交通路网示意图

表1 各路网节点海拔高度 单位: m

节点1	节点2	节点3	节点4	节点5	节点6
38.48	50.76	62.08	61.16	100.00	100.00
节点7	节点8	节点9	节点10	节点11	节点12
31.20	52.80	78.80	45.52	52.64	68.36
节点13	节点14	节点15	节点16	节点17	节点18
70.48	36.72	16.96	28.72	29.72	72.00
节点19	节点20	节点21	节点22	节点23	节点24
37.00	34.20	33.52	28.96	26.76	12.64
节点25	节点26	节点27	节点28	节点29	节点30
21.12	20.24	32.08	29.76	30.40	24.00
节点31	节点32	节点33			
20.40	23.00	10.64			

4.2 不同情形的导航策略对用户出行路径的影响

在以行程经济成本最低(即取式(17)中 $\alpha = 0, \beta = 1$)为目标的情况下按照前文所述的3种不同导航策略进行路径规划.设定出发点为路网节点1,目的地为路网节点33.获得3种情形下的出行路径如图2所示,3种情形下的规划结果如表2所示.

在图2中,短虚线为情形1,点划线为情形2,实线为情形3.

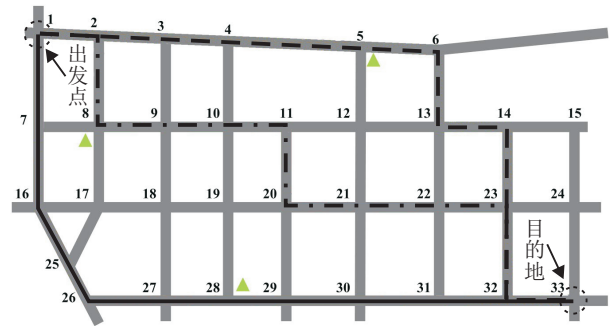


图2 不同情形下的路径规划图

表2 以经济成本最低为目标的规划结果

情形	行程 花费/元	行程 时间/h	排队 时间/h	充电 电量/kWh	剩余 电量/kWh
情形1	60.52	1.86	0.15	28.96	30.99
情形2	56.50	1.94	0.29	26.85	28.99
情形3	57.91	1.79	0.12	28.33	31.18

从表2可以看出,按照情形1的路径行驶实际需充电电量为28.96 kWh,逆推法得出其在抵达目标充电站时实际剩余电量为3.44 kWh,不满足式(29)中的约束条件,存在着中途电量不足无法抵达该充电站的风险.可见,采用情形一充电导航策略,忽略了实际地形因素和设备能耗因素的影响,不能很好地反映出车主电动汽车电量的动态变化,给出的出行路径并不合理.情形2考虑到了电动汽车行驶途中地形因素和设备工况造成的实际电量消耗,在不接受驾驶行为引导的情况下,考虑到当前车辆工况行驶到最佳充电站节点28时剩余电量不满足式(29)中的约束条件,可能导致车辆中途抛锚,只能选择充电站节点8作为目标充电站,充电路径选择空间较小.与情形2相比,接受驾驶行为引导后情形3虽然行程花费高出2.49%,但其最终剩余电量较情形2多出7.55%,并且整体行程时间缩短7.73%,表明在接受驾驶行为引导的情况下,情形3的路径选择较情形二更加合理,更能满足电动汽车车主对降低行程经济成本的要求.

在以行程时间最短(即取式(17)中 $\alpha = 1, \beta = 0$)为目标的情况下按照以上3种不同导航策略进行路径规划,同样选择路网节点1和路网节点33分别作为

电动汽车车主的出发点和目的地,获取3种情形下的规划结果如表3所示。

表3 以时间最短为目标的规划结果

情形	行程 花费/元	行程 时间/h	排队 时间/h	充电 电量/kWh	剩余 电量/kWh
情形1	60.52	1.86	0.15	28.96	30.99
情形2	56.61	1.91	0.29	26.85	28.93
情形3	57.91	1.79	0.12	28.33	31.18

情形1仍默认该最短路径即为时间花费最少的充电导航路径,原因同样是其忽略了实际电量消耗带来的额外充电时间的增加。此外,即使在不考虑交通因素、车速恒定的情况下,情形3中的总体行程时间较情形2仍缩短了6.28%,原因是通过引导用户的驾驶行为避免了长时间的充电排队等待,同时节约了充电时间,给车主提供了更多的路径选择空间。

4.3 多辆电动汽车导航结果分析

为了研究多辆电动汽车在本文提出的充电导航策略下的影响,分别以行程经济成本最低和行程时间最短为目标函数,选取该区域内100辆电动汽车并随机分配100×2个节点作为每辆电动汽车的出发点和目的地进行分析。利用蒙特卡洛法模拟该区域100辆电动汽车的出行时间和初始电量,获得不同目标函数下的导航前后结果如表4所示。

表4 路径规划前后结果对比

情形	总计行程 花费/元	总计行程 时间/h	总计剩余 电量/kWh
无导航	4110.99	157.37	2916.06
成本最低	3807.71	125.98	3142.11
时间最短	3805.22	124.76	3127.00

在无导航的情形下,考虑到电动汽车剩余电量较少,用户往往选择距离自己最近的充电站进行充电。从表4可知,与无导航的情况相比,以成本最低为目标函数和以时间最短为目标函数的引导电动汽车用户驾驶行为的导航策略,用户的总体行程花费分别下降了7.38%、7.44%;用户的总体行程时间分别减少了19.95%、20.72%;总体剩余电量分别提高了7.75%、7.23%。因此,考虑引导电动汽车车主驾驶行为的导航策略能为用户提供更加合理的充电路径,解决用户的“里程焦虑”问题^[21-22]。

5 结论

本文从用户角度出发,结合实际地形对电动汽车能耗的影响,同时考虑了路径选择和电池电量约束,分别以行程经济成本最低和行程时间最短为目标进

行了仿真,仿真结果表明:1)考虑用户实际行驶工况和地形因素的导航策略更加合理。2)根据用户实际行驶工况进行的驾驶行为引导能有效避免车辆因电量不足而导致的中途抛锚的意外情况发生,同时能够规划出对用户更加有利的充电路径。3)相对于以往的充电导航策略,本文不仅考虑了充电时间和充电花费,同时考虑了电动汽车最终抵达目的地时剩余电量对用户成本的影响,使得路径选择更符合车主利益。然而,本方法并未考虑到实际的交通拥堵、天气变化等因素给电动汽车车主出行路径带来的影响。在未来的工作中,全面考虑电动汽车车主实际出行环境,同时提供基于位置服务的交通导航和充电导航以满足不同车主的需求将是进一步研究的主要内容。

参考文献(References)

- [1] 罗艳托, 汤湘华. 全球电动汽车发展现状及未来趋势[J]. 国际石油经济, 2018, 26(7): 66-72.
(Luo Y T, Tang X H. The current situation and future trend of the global electric vehicle[J]. International Petroleum Economy, 2018, 26(7): 66-72.)
- [2] 管晓宏, 关新平, 郭戈. 信息物理融合系统理论与应用专刊序言[J]. 自动化学报, 2019, 45(1): 1-4.
(Guan X H, Guan X P, Guo G. Preface to special issue of information physics fusion system theory and application[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(1): 1-4.)
- [3] Buechel M, Frtunikj J, Becker K, et al. An automated electric vehicle prototype showing new trends in automotive architectures[C]. Proceedings of the 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems. Gran Canaria: IEEE Computer Society, 2015: 1274-1279.
- [4] Su W, Rahimi-Eichi H, Zeng W, et al. A survey on the electrification of transportation in a smart grid environment[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 8(1): 1-10.
- [5] Yan Y, Luo Y, Zhu T, et al. Optimal charging route recommendation method based on transportation and distribution information[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2015, 35(2): 310-318.
- [6] 张良, 严正, 冯冬涵, 等. 采用两阶段优化模型的电动汽车充电站内有序充电策略[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 967-973.
(Zhang L, Yan Z, Feng D H, et al. Two-stage optimization model based coordinated charging for E V charging station[J]. Grid Technology, 2014, 30(4): 967-973.)
- [7] Guo Q, Xin S, Sun H, et al. Rapid-charging navigation of electric vehicles based on real-time power systems and traffic data[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014,

- 5(4): 1969-1979.
- [8] 邓友均, 李明, 余千, 等. 基于实时信息感知的电动汽车物流配送路径优化与充电导航[J]. 南方电网技术, 2017, 11(2): 41-49.
(Deng Y J, Li M, Yu Q, et al. Optimization and charging navigation of electric vehicle logistics distribution route based on real-time information perception[J]. South China Power Grid Technology, 2017, 11(2): 41-49.)
- [9] Kobayashi Y, Kiyama N, Aoshima H, et al. A route search method for electric vehicles in consideration of range and locations of charging stations[C]. Intelligent Vehicles Symposium. Piscataway: IEEE, 2011: 920-925.
- [10] Abousleiman R, Rawashdeh O. A Bellman-ford approach to energy efficient routing of electric vehicles[C]. 2015 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo. Dearborn: IEEE, 2015: 1-4.
- [11] Yu H, Lu F. A multi-modal multi-criteria route planning method based on genetic algorithm[J]. Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica, 2014, 43(1): 89-96.
- [12] 付骁鑫, 江永亨, 黄德先, 等. 一种新的实时智能汽车轨迹规划方法[J]. 控制与决策, 2015, 30(10): 1751-1758.
(Fu X X, Jiang Y H, Huang D X, et al. A new real-time intelligent vehicle trajectory planning method[J]. Control and Decision, 2015, 30(10): 1751-1758.)
- [13] 郭戈, 张振琳. 电动车辆路径优化研究与进展[J]. 控制与决策, 2018, 33(10): 1729-1739.
(Guo G, Zhang Z L. Research and development of path optimization for electric vehicles[J]. Control and Decision, 2018, 33(10): 1729-1739.)
- [14] 苏舒, 孙近文, 林湘宁, 等. 电动汽车智能充电导航[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(S1): 59-67.
(Su S, Sun J W, Lin X N, et al. Intelligent charging navigation of electric vehicle[J]. Journal of China Electric Machinery Engineering, 2013, 33(S1): 59-67.)
- [15] 李明, 邓友均, 杨洪明, 等. 分时电价下电动汽车路径选择和充电导航策略[J]. 南方电网技术, 2016, 10(8): 61-66.
(Li M, Deng Y J, Yang H M, et al. Route selection and charging navigation strategy for electric vehicles under time-of-use price[J]. South China Power Grid Technology, 2016, 10(8): 61-66.)
- [16] 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.
(Yang H M, Li M, Wen F S, et al. Vehicle routing and charging navigation strategy, which is perceived by real-time traffic information[J]. Power System Automation, 2017, 41(11): 106-113.)
- [17] Guzzella L, Amstutz A. The QSS toolbox manual[Z]. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2005.
- [18] Guzzella L, Sciarretta A. Vehicle propulsion systems[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007: 12-28.
- [19] 北京市发展和改革委员会. 北京市发展和改革委员会关于本市电动汽车充电服务收费有关问题的通知[EB/OL]. (2015-09-06)[2018-05-04]. <http://www.bjpc.gov.cn/tztg/201505/t9040414.htm>.
(Beijing Municipal Commission of Development and Reform. Notice on relate issues of electric vehicle charging service fees by Beijing Municipal Commission of Development and Reform[EB/OL]. (2015-09-06)[2018-05-04]. <http://www.bjpc.gov.cn/tztg/201505/t9040414.htm>.)
- [20] 王琼, 郭戈. 车队速度滚动时域动态规划及非线性控制[J]. 自动化学报, 2019, 45(5): 888-896.
(Wang Q, Guo G. Platoon speed receding horizon dynamic programming and nonlinear control[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(5): 888-896.)
- [21] Smiai O, Bellotti F, Gloria A D, et al. Information and communication technology research opportunities in dynamic charging for electric vehicle[C]. 2015 Euromicro Conference on Digital System Design. Madeira: IEEE, 2015: 297-300.
- [22] Conrad R G, Figliozzi M A. The recharging vehicle routing problem[C]. Proceedings of the 2011 Industrial Engineering Research Conference. Norcross: Institute of Industrial and Systems Engineers(IISE), 2011: 1-8.

作者简介

任丽娜(1982—), 女, 副教授, 博士, 从事智能电网优化调度等研究, E-mail: renlina@ysu.edu.cn;

路鹏伟(1994—), 男, 硕士生, 从事车路网协同规划的研究, E-mail: 280741327@qq.com;

刘福才(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 从事非线性系统模糊辨识及其预测控制等研究, E-mail: lfc_xb@263.net.

(责任编辑: 闫妍)