

计及订单热力分布和充换电节点成本差异的 电动网约车充换电路径最优规划方法

胡方霞¹,谷飞强²,周念成²

(1. 重庆工商职业学院 电子信息工程学院,重庆 400052;

2. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044)

摘要:提出一种计及订单热力分布和充换电节点成本差异的电动网约车充换电路径最优规划方法。对电动网约车充换电路径的影响因素进行分析,建立了“电动网约车-充换电节点-交通路网-配电网”模型,提出电动网约车的充换电最优路径优化方法。所提方法充分考虑订单热力分布对充换电路径导航的影响,以电动网约车综合成本最小进行自动优选,可得到实际电动网约车的最佳充换电路径以及对应的最小充换电成本。通过某实际电动网约车进行充换电路径导航的经济成本、时间成本对比分析,验证了所提方法的有效性。

关键词:电动网约车;订单热力分布;充换电节点成本;充换电路径;最优规划

中图分类号:U 469.72

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202005029

0 引言

随着政府机构出台《节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020年)》、《关于加快电动汽车充电基础设施建设的指导意见》等相关政策文件,我国将大力支持电动汽车(EV)产业^[1-3]、混合动力乘用车等上下游产业链的发展,并且适度鼓励电动出租车、电动网约车投入市场,加快新能源汽车产业发展,这对促进国家节能与低碳交融交通具有理论和实际意义^[4]。

借力于国家政策的红利以及电动汽车行业的不断发展,深圳、重庆等多个城市已经推出大量的纯电动出租车(PEV)、纯电动和混合动力电动(PHEV)网约车、分时租赁电动汽车作为公用服务车辆。据统计,纯电动出租车、纯电动网约车、电动公共汽车数量占电动汽车总量的50%~60%^[5-6]。随着网约车软件的普及和国家对新能源汽车的大力补贴,越来越多的电动汽车车主通过Uber、滴滴打车、神马专车、神州专车、曹操专车等打车平台进行运营。按照目前电动汽车的设计标准,其充满电后的续航里程约为200 km,远小于汽油车的续航能力,所以电动网约车每天都要进行充电。受限于有限的续航能力,当电动网约车需要充电或者换电时,有必要对其充换电最佳路径进行规划,这样才能尽可能地提升运营效益。

现有研究根据充电策略的服务对象进行分类,主要有以下4类:第1类为“电动汽车-配电网”模

型^[7-9],即以电动汽车这类移动负荷为研究对象,解决如何充电导航才能减少其对配电网运行性能的影响,提升配电网的电压质量;第2类是“电动汽车-交通路网”模型^[10-13],考虑交通路网拥堵对充电耗时间和里程成本的影响;第3类是“电动汽车-交通路网-配电网”模型^[14],目的在于改善交通路网的拥堵情况和提升配电网运行的整体性能;第4类是“电动汽车-充电设施网-交通路网-配电网”模型^[2,15],考虑新能源接入充电站,提出多网融合的充电路径规划方法。但是上述“电动汽车-充电设施网-交通路网-配电网”模型仅考虑新能源对充电设施网的影响,未充分考虑充电设施对电动汽车运营效益的影响。

从充电经济成本来看,在现有电网公司的分时电价机制下,部分充电站采用分时电价进行充电服务,但仍有部分充电站全天按统一电价进行充电。文献[16]对同一座充电站在不同的时刻进行充电的策略进行研究,以降低电动汽车的充电经济总成本。可见,在同一个时段内不同充电站进行充电的经济成本是不同的。从充电时间成本来看,文献[17]对道路交通拥堵价格进行抽象,以指导电动汽车选择不同的充电站进行充电,以降低充电空间距离不同所带来的时间成本。可见,同一个时段内不同充电站进行充电的时间不同,这对电动网约车的接单数量有直接的影响。

目前,大部分支持换电模式的电动汽车仍可采用常规的快/慢充电桩进行充电,如北汽新能源EU300、蔚来ES8等。从换电经济、时间成本角度来看,换电站可提供电池快速更换服务,整个跟换操作过程耗时5 min左右,相比于快速充电,可节省约2 h,但换电成本比充电成本高。若网约车的平均效益为

收稿日期:2019-11-22;修回日期:2020-03-27

基金项目:重庆市教委科学技术研究项目(KJZD-K201804001)
Project supported by the Science and Technology Research Project of Chongqing Municipal Education Commission(KJZD-K201804001)

100元/h,充电2h的电费为30元,则选择充电模式的花费为230元;相反地,如果进行换电,则2h内的效益约为200元,换电成本按60元计算,则大约盈利140元。由此可见,在网约车接单高峰时段前,对换电站进行导航的效益可能要高于充电站,但现有研究还未涉及换电导航的建模。另外,国内的滴滴打车已经推出约车订单热力图,且文献[18]已经采用热力图像进行了电网负荷预测。本文同样能充分利用约车订单密度数据来评价载客概率的高低,以指导电动汽车充电导航。

为此,本文考虑订单热力分布和充换电节点成本差异,对电动网约车的充换电路径进行优化研究。本文首先对网约车充换电路径的影响因素进行分析,然后建立了“电动网约车-充换电节点-交通路网-配电网”模型,最后提出了电动网约车的充换电最优路径优化方法。该方法充分考虑订单的热力分布对充换电路径导航的影响,对网约车综合成本最小进行自动优选,可得到实际电动网约车的最佳充换电路径和对应的最小充换电成本。

1 网约车充换电路径的影响因素分析

1.1 充换电节点:充换电经济、时间成本差异大

关于充电网络的收费模式,现有的充电运营商主要有青岛特来电新能源有限公司(特来电)、万帮充电设备有限公司(星星充电)和特斯拉等,其中特来电充电桩和星星充电按照分时电价或者统一电价、服务费和停车费进行收取,特斯拉充电桩只能为特斯拉汽车提供充电服务,而无法为其他品牌的电动汽车进行充电。现有的电动汽车换电站运营商主要有国家电网公司(换电站)、时空电动汽车换电站等。

附录A中图A1为重庆市不同充电运营商网络示意图,图中呈现了特来电和国家电网公司的充电桩,从数量上来看,重庆市已经形成了一定规模的充电网络。当电动汽车在不同的充电站进行充电时,收费模式有较大的差异。特来电充电站A按照2.06元/(kW·h)进行收费,不收取服务费,但是收取4元/h的停车费;特来电充电站B按照0.88~1.88元/(kW·h)的分时电价进行收费,并且按照0.2元/(kW·h)收取服务费,不收取停车费。可见,即使是同一个公司下的不同充电站,其收费价格也有所不同。当电动汽车在不同的换电站更换电池时,都是按统一价格进行收取。例如,时空电动汽车换电站的更换费用为40元/次。如果电动汽车选择合理的充电桩或者换电站对其进行充电或换电,可减少总的充换电经济成本。

在充换电节点的位置布局上,有些充电桩和换电站建设在地下停车场,有些充电桩和换电站则建

设在地面停车场侧。由于不同充电站的承载容量不同,电动汽车选择在就近的充电站进行充电可能需要排队,而选择到较远的充电站进行充电则不需要排队,但考虑到快速充电也需要1~2h,如果能通过充电时间的策略比较,选择合理的充电站或者换电站补充电量,可大幅减少充换电的时间成本。

1.2 交通路网:充换电路径时间、距离成本差异大

由于城市经济建设不断发展,城市汽车保有量呈现爆炸式增长。在工作日的上下班高峰期,汽车出行量较大,在城市某些道路将发生较为严重的交通拥堵现象。附录A中图A2给出了重庆市某片区18:00时刻的交通路况图,图中红色表示道路拥堵,绿色表示道路畅通。

当电动汽车需行驶至某一座充电站进行充换电时,有些前往的行驶道路路况可能存在交通拥堵,有些行驶道路路况却是畅通的,行驶路线的不同将导致不同的行驶时间和行驶距离成本。如果能选择行驶时间最少、行驶距离最短的路径到达充电站进行充换电,则可以减少充换电带来的时间和距离成本。

1.3 电网:充电负荷受电网运行安全限制

规模化电动汽车无序充电将增大电网的负荷谷差,随着充电负荷不断增长,现有城市配电网将出现区域负荷不平衡的问题。为了避免在高峰负荷时期出现110kV电压等级的主变超载、10kV电压等级的馈线满载和超载、节点电压幅值越安全下限等问题,电网公司可能会采取需求侧管理手段,即限制充电站的总负荷,将其控制在某一个阈值以下。附录A中图A3为某一10kV配电网中需求侧管理示意图。图中10kV电源端的110kV主变已经超载运行,处于过负荷告警状态,只能通过减少其所供的10kV母线负荷来消除主变过载,即对电动汽车充电站的总负荷进行需求侧管理。由于110kV变压器不能长时间过负荷运行,否则可能会影响变压器的安全运行,因此,对于出现过载的110kV变压器,需采取需求侧管理措施限制主变负荷的继续上涨。

当电力公司对充电站采取需求侧管理手段时,充电站运营商就会限制充电桩的投入数量以及对每辆电动汽车的充电时间。如果能够提前获知某座充电站的运营信息,就能选择其他更加合理的充电站进行充电。为此,本文考虑配电网需求侧管理对节点充电功率的限制,对电动网约车的充换电路径进行规划。采用需求侧管理手段后,通过限制部分节点的充电负荷大小,可以缓解电动汽车充电导致的电网负荷分布不均衡问题。但对于由其引起的电压质量问题,须通过自动电压控制系统进行电压调节,确保电动汽车充电时电网电压满足安全约束。

1.4 约车订单热力图:影响盈利概率

随着网约车越来越普及,用户每次出行的打

车记录都会上传至各个打车软件平台。在海量的打车数据基础上,可将各个地理位置的约车订单数量用热力图的形式展现,以供给网约车车主参考。在电动网约车前往充换电站的过程中,如果能尽可能地靠近约车订单较多的地点,就能相应提高载客的概率,以提升其运营效益。附录A中图A4给出了滴滴公司在深圳地区的约车订单热力图,图中红色区域表示用户约车订单数量的密度高,且颜色越深表明约车订单数量的密度越大,颜色越浅则表明约车订单数量的密度越小。通过考虑充换电节点成本、交通路网车流量、电网运行安全和约车订单热力图这4个主要因素,对其充换电最佳路径进行规划是本文研究的主要内容。

2 “电动网约车-充换电节点-交通路网-配电网”综合模型

2.1 电动网约车充电需求和充换电节点成本的计算

目前,大部分支持换电模式的电动汽车同时也具备常规的充电功能。为此,本文假设电动网约车同时支持换电和充电模式,将充电和换电的时间成本和经济成本进行比较,为网约车车主选择最佳充换电策略及充换电路径。对于电动网约车而言,其对充电时间的选择相对固定,不同车主的用车需求有相似性,即车主尽可能不选择在约车订单高峰期进行充电,避免错过约车订单的盈利机会,为此本文研究中未考虑不同电动网约车车主对用车需求的差异。

(1) 充电需求。

已知电动网约车的地理位置 p_s 到充电站的地理位置 p_d ,其经过的行驶路径集合为 L ,则电动网约车行驶至充电站所需时间的计算式^[19]为:

$$t_{EVH}(p_s, p_d, V) = \sum_{i=1}^{N_L} L_i / V_i \quad (1)$$

其中, L_i 为行驶路径集合 L 中的第 i 条道路长度; $\sum_{i=1}^{N_L} L_i$ 为行驶路径总长度; N_L 为行驶路径集合 L 中的道路总数; V 为电动汽车行驶至充电站的速度; V_i 为第 i 条道路的车辆平均行驶速度。

同时,电动汽车当前的电池荷电状态(SOC)需要保证电池剩余电量能使其行驶至充电站,即满足:

$$S_{SOC} B_c - E_{ave} \frac{\sum_{i=1}^{N_L} L_i}{100} \geq 0 \quad (2)$$

则电动汽车到达充电站后的充电电量 c_{EVH} 为:

$$c_{EVH} = B_c - \left(S_{SOC} B_c - E_{ave} \frac{\sum_{i=1}^{N_L} L_i}{100} \right) + \beta R_1 \quad (3)$$

其中, B_c 为电动汽车的锂电池容量; E_{ave} 为电动汽车每行驶100 km的平均电耗; S_{SOC} 为电动汽车的初始SOC; β 为0-1变量,当 $S_{SOC} B_c - E_{ave} \frac{\sum_{i=1}^{N_L} L_i}{100} \geq 0$ 时有 $\beta=0$,否则 $\beta=1$; R_1 为惩罚常数,本文中取为很大的正数。

(2) 充电成本。

电动网约车充满电的经济成本 $c_{EVH,e}$ 为:

$$c_{EVH,e} = c_{EVH}(Q_s + Q_d) + P_{parks} \frac{c_{EVH}}{P_r \eta_r} \quad (4)$$

其中, Q_s 为分时电价; Q_d 为充电服务费; P_{parks} 为充电桩收取的停车费; P_r 为电动汽车的额定充电功率; η_r 为电动汽车的充电效率; $c_{EVH}/(P_r \eta_r)$ 为电动汽车在充电站充电需要的时间。当多辆电动汽车同时进行路径规划时,可能出现多辆车同时到达充电站排队的情况。此时可利用队列模型模拟电动汽车在充电站的排队情况并计算排队时间^[19],将 $c_{EVH}/(P_r \eta_r)$ 与排队时间相加作为电动汽车的充电时间。

电动网约车充满电需要的时间成本 $c_{EVH,t}$ 为:

$$c_{EVH,t} = t_{EVH}(p_s, p_d, V) + \frac{N_c - N_{ch,new}}{N_{ch,new}} \Delta T + \frac{c_{EVH}}{P_r \eta_r} \quad (5)$$

其中, N_c 为到达该充电站进行充电的电动汽车总数; $N_{ch,new}$ 为充电站允许充电桩运营的数量; ΔT 为电动汽车在充电站排队充电的平均耗时。

但是,电动汽车的电池损耗会对充电和换电模式的选择产生影响。当电动汽车的电池损耗过大时,电池效率及容量衰减严重,此时电动汽车需选择换电模式。为此,本文对充电成本引入惩罚项,电动网约车的充电成本 F_{EV} 可表示为:

$$F_{EV} = c_{EVH,e} + \lambda_t c_{EVH,t} + \theta R_2 \quad (6)$$

其中, λ_t 为电动网约车在时段 t 的平均接单效益系数,其值等于采样周期内时段 t 的盈利总额除以采样点总数; θ 为0-1变量,当充电效率过低引起车辆报警时有 $\theta=1$,否则有 $\theta=0$; R_2 为惩罚常数,本文中取很大的正数,进而使电动汽车在充电效率过低(损耗高)时自动选择换电模式。

(3) 换电成本。

由于换电一次只需3~5 min,造成的停车成本几乎可以忽略,所以电动网约车换电需要的经济成本 $c_{EVH,m}$ 为:

$$c_{EVH,m} = Q_m \quad (7)$$

其中, Q_m 为换电一次所需成本。

2.2 交通路网模型及充换电节点的载客概率计算

(1) 交通路网模型。

交通路网模型与路网系统中的道路交叉节点集合 n_c 、道路权重集合 A_c 、路段道路等级 L_d 、各道路的零流速度 V_m 、通行能力 C 有关^[14],故交通路网模型可

表示为:

$$R_L = (n_c, A_c, L_d, V_m, C) \quad (8)$$

当交通路网各节点的空间位置集合为 N_{net} 、电动汽车的地理位置为 p_s 和充电站的地理位置为 p_d 时,电动汽车的行驶路径集合 $L^{[7]}$ 可表示为:

$$L = R_L(N_{\text{net}}, p_s, p_d) \quad (9)$$

(2) 充换电节点的载客概率。

不同地点的约车订单数量有显著的差异,由约车订单数量可统计得到载客概率较大的商圈。如果在电动网约车前往充电站的过程中,能尽可能靠近载客概率较大的地点,就能相应提高网约车载客的的概率。根据现有打车平台的规则,网约车车主的日接单数量越多,服务星级越高,其收入、补贴、派车次数就会越多。在不考虑车主服务质量的条件下,平台会给距离较近的网约车派单。因此,电动网约车的最佳充电站地理位置 $p_{d, \text{opti}}$ 与载客概率有关,即:

$$p_{d, \text{opti}} = p_d \sum_{i=1}^{N_p} \frac{\rho_i}{\rho_{\max}} \quad (10)$$

其中, $p_d(\cdot)$ 为待选充电站关于载客概率的函数;

$\sum_{i=1}^{N_p} \frac{\rho_i}{\rho_{\max}}$ 为充换电站附近 1 km 范围内的载客概率, ρ_i 为第 i 条道路的约车订单热力图密度, ρ_{\max} 为约车订单热力图的最大密度值, N_p 为充换电站附近 1 km 范围内所有道路的数量。

综上所述,电动网约车充满电(或者更换电池)需要的经济成本 $c_{\text{EVH}, e}(c_{\text{EVH}, m})$ 和时间成本 $c_{\text{EVH}, t}$ 或载客概率 $\sum_{i=1}^{N_p} \frac{\rho_i}{\rho_{\max}}$ 都是影响选择合理充电站的因素。

为此,本文采用载客效益 F_p 表示不同充换电站对应的载客效益,如式(11)所示。

$$F_p = p_{d, \text{opti}} \lambda_i \quad (11)$$

考虑电动网约车的充电成本、换电成本、载客效益时,对于充电站 k 或者换电站 k 而言,其综合成本 $F_{\text{opti}, k}$ 可表示为:

$$F_{\text{opti}, k} = \begin{cases} c_{\text{EVH}, m, k} - F_{p, k} & k \text{ 为换电站} \\ F_{\text{EV}, k} - F_{p, k} & k \text{ 为充电站} \end{cases} \quad (12)$$

2.3 配电网需求侧管理模型

采取适当的电价策略可实现电动汽车与配电网的双向互动^[20],通过主动引导充电负荷的合理分布,缓解用电高峰时段部分设备的负载压力,但紧急情况下仍需考虑采取需求侧管理措施,限制同时接入的充电负荷数量。下面仅考虑在用电高峰时段电力公司采取限制充电总负荷的需求侧管理手段,此时部分时段的充电负荷受限,可能会延长电动汽车的充电时间,但可避免用电高峰时段部分设备出现过载。设本文所有充电站建设的均是快速充电桩。根

据《电动汽车充电站通用要求》,假设所有充电站都通过 10 kV/0.4 kV 的变压器直接接入 10 kV 配电网,则当电力公司进行需求侧管理时,根据配电网需求侧管理函数 S_p 可计算得到充电站允许接入电网的最大负荷 $P_{\text{load}, \text{max}}$ 为:

$$P_{\text{load}, \text{max}} = S_p(u) \quad (13)$$

其中, u 为配电网运行的潮流状态变量。那么,充电站允许充电桩运营的数量 $N_{\text{ch}, \text{new}}$ 为:

$$N_{\text{ch}, \text{new}} = \begin{cases} N_{\text{ch}} & N_{\text{ch}} P_{\text{charging}} \leq P_{\text{load}, \text{max}} \\ \lceil P_{\text{load}, \text{max}} / P_{\text{charging}} \rceil & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

其中, N_{ch} 为充电站内的充电桩数量; P_{charging} 为充电桩的额定充电功率; $\lceil P_{\text{load}, \text{max}} / P_{\text{charging}} \rceil$ 表示对 $P_{\text{load}, \text{max}} / P_{\text{charging}}$ 进行取整, $\lceil \cdot \rceil$ 为高斯函数。

设 1 个充电桩只能为 1 辆电动汽车提供充电服务,那么该充电站允许同时充电的电动汽车数量 $N_{\text{car}, c}$ 为:

$$N_{\text{car}, c} = N_{\text{ch}, \text{new}} \quad (15)$$

3 电动网约车的充换电最优路径规划方法

电动网约车的充换电最优路径优化方法的流程如图 1 所示(图中 j_{emax} 、 j_{dmax} 分别为待选充电站、换电站的数量),当电动网约车行驶至充电站时,受限于交通路网的拥堵程度,因此其行驶时间成本和行驶距离成本不同,故需要通过对待选充电站按照时间优先、距离优先这 2 种方法进行对比优选。

当电动网约车需要充换电时,按照其剩余里程筛选出可以前往充换电的待选充/换电站集合;然后对每座待选充电站按照时间优先、距离优先 2 种方法,并采用计算最短路径的 Dijkstra 算法^[5]规划时间、距离最短的充电导航路径;同样地,对每座待选换电站按照时间优先、距离优先 2 种方法,采用计算最短路径的 Dijkstra 算法规划时间、距离最短的换电导航路径;最后根据电动网约车综合成本最小进行自动优选,以确定最佳的充/换电站,保存其充/换电路径。

4 算例分析

4.1 算例的基础数据

在 MATLAB R2012a 平台上对某地区交通路网进行电动网约车充换电导航路径的仿真计算。假设该片区具体交通路网每小时的约车订单热力图分布如附录 B 中图 B1 所示。本文选择的电动汽车型号为东风 ER30,其地理位置见附录 B 中图 B1,蓄电池容量 $B_c = 24 \text{ kW} \cdot \text{h}$,当前剩余 SOC 为 20%,行驶 100 km 的平均电耗 $E_{\text{ave}} = 10 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

3 座充电站的位置见附录 B 中图 B1,将其命名为 C_1 — C_3 ,并假定每座充电站含有 4 台快充充电机,

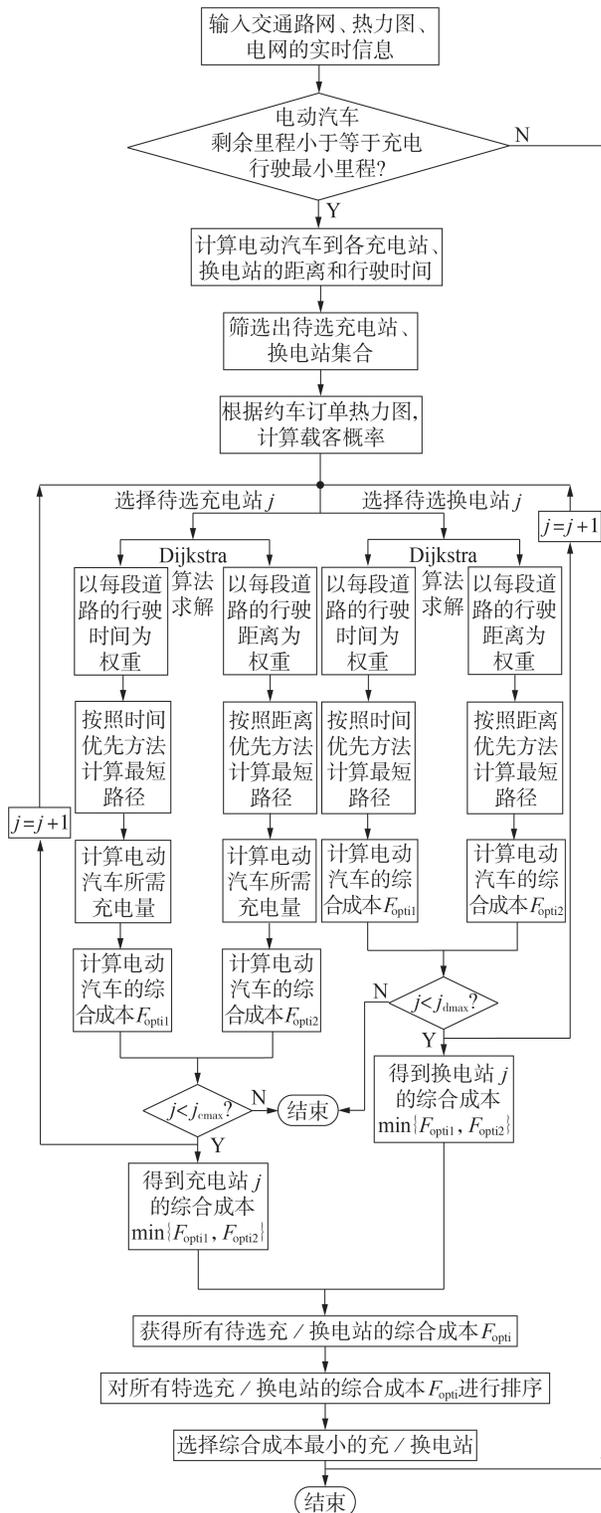


图1 电动网约车充换电最优路径规划流程

Fig.1 Optimal charging and swapping route planning process of online electric vehicle-hailing

每台快充充电机的充电功率均为 $15 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。电动汽车的充电效率 $\eta_c = 0.98$ 。1座换电站的位置见附录B中图B1,将其命名为 D_1 ,换电池成本为60元/次。根据电力公司高峰时段需求侧管理的要求,对充电站 C_3 的充电桩进行需求侧管理,允许接入的充电桩

数量为3个。在其余时段,各座充电站的所有充电桩均可投入使用。

附录B中图B2给出了该片区09:00和20:00时刻的交通路况。表1给出了各座充电站的收费模式。图2给出了充电站 C_1 的分时电价曲线以及电动网约车在一天内的平均接单效益系数曲线,其中图2(b)将一天以15 min为时间间隔分为96个时段。

表1 各座充电站的收费模式

充电站	充电电价+服务费/[元·(kW·h) ⁻¹]	停车费/元
C_1	1.80(11:00—19:00), 1.48(19:00至次日11:00)	10
C_2	1.88	0
C_3	1.70	0

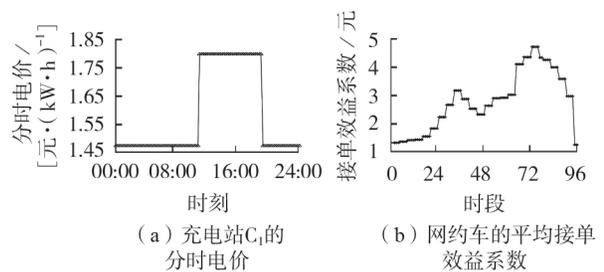


图2 充电站 C_1 的分时电价和网约车的平均接单效益系数
Fig.2 Time-of-use electricity price of charging station C_1 and average profitability coefficients of online electric vehicle-hailing

4.2 算例分析

(1)不同充电站的经济成本比较。

根据表1中各充电站的收费模式,图3比较了网约车在不同SOC下进行充电的成本。由图3可知,SOC值越低,网约车的充电量越大,成本也就越大。关于充电时段,若网约车选择在充电站 C_1 充电,在15:00时刻且SOC值为0时,充电成本约为45元;但在20:00时刻进行充电时,只需花费约37元。关于充电站的选择,比如充电站 C_1 和 C_2 ,当SOC值为0时,在充电站 C_1 充电需花费37元,但在充电站 C_2 充电则花费46元。可见,对充电时段以及充电站进行优选,能够减少电动网约车的经济成本。

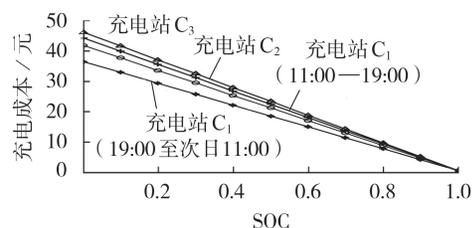


图3 不同SOC下的充电成本比较

Fig.3 Comparison of charging costs under different values of SOC

(2)不同充电站、换电站的成本比较。

设电动网约车到达充电站进行排队充电,此时允许使用的充电桩仅有1个,正在排队的车辆数为1辆,计算得到充电时间需要1 h,则该车到达充电站后需要的时间为 $c_{EVH,t} = 1 \times 1 + 1 = 2$ (h)。图4给出了网约车在不同时段进行充电时的 $\lambda_t c_{EVH,t}$ 曲线。

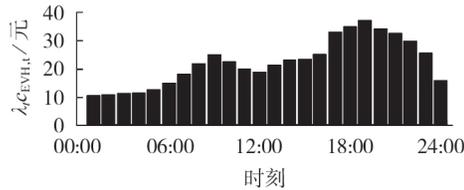


图4 在不同时段进行充电的 $\lambda_t c_{EVH,t}$ 曲线

Fig.4 Curves of $\lambda_t c_{EVH,t}$ when charging in different periods

由图4可知,若网约车选择在24:00时刻进行排队充电,花费2 h充电相当于减少2 h的接单成本,即2 h的接单成本约为49.2元;若选择在18:00时刻进行排队充电,其花费2 h充电的成本约为174元。由此可见,在不同的时段进行充电花费的时间成本差别很大,选择接单效益系数较低的时段进行充电能够减少时间成本。

当然,电动网约车的剩余电量是不受时段限制的,当其在18:00时刻就需要进行充电时,与换电站更换电池的成本60元相比,换电站的时间成本将显著低于充电成本174元。但如果在24:00时刻选择充电站进行充电,其成本效益更加显著。由此可知,电动网约车在接单效益系数的高峰时段选择更换电池的时间成本较低;在盈利低谷时段选择充电的成本较低。

(3)电动网约车最短路径和最少时间成本比较。

根据附录B中图B2所示电动网约车交通路况,设该电动网约车需要在此时进行充电。首先,根据图B2获取每条路径的平均车速,以计算得到各条道路的平均通行时间 $\sum_{i=1}^{N_L} L_i/V_i$,分别以时间和道路长度作为权重,采用最短路径Dijkstra算法对时间优先、距离优先这2种方法进行计算。设该电动汽车在09:00时刻和20:00时刻进行充换电。根据该电动网约车的剩余电量进行筛选后,其待选充电站为 C_1 — C_3 ,待选换电站为 D_1 。根据图1所示计算流程,表2比较了该电动网约车前往不同充/换电站路径的时间成本和最短路径成本。

关于是否选择路径最短的充/换电站进行充换电则所需时间成本就最少这一问题,由表2可知,在09:00时刻该电动网约车到充电站 C_3 的路径最短,但到充电站 C_1 的时间成本最少;但是在20:00时刻该电动网约车到换电站 D_1 的时间成本最少。由此可看出,到达不同充/换电站的时间成本和路径成本都

表2 最少时间成本、最短路径成本比较

Table 2 Comparison of minimum time cost and shortest route cost

充/换电站	最少时间成本/h		最短路径成本/元
	充换电时刻为09:00	充换电时刻为20:00	
C_1	0.12	0.31	0.42
C_2	0.21	0.26	0.81
C_3	0.15	0.45	0.35
D_1	0.19	0.24	0.65

是不同的。不同充电站的经济成本以及充电站与换电站的经济成本还需要进行进一步比较,才能得到最少的充电成本。综合这些因素后,还需要考虑电动网约车的最短路径、最少时间成本带来的附加充电成本。为此,需要综合考虑上述3个方面,进行优选才能得到最佳的充电站或者换电站和充电路径。

(4)电动网约车的最佳充换电成本分析。

根据附录B中图B1所示热力分布,表3给出了各座充电站、换电站附近的载客概率以及假设各充电站均没有出现排队情况下该电动网约车的综合成本。

表3 各充/换电站的综合成本和载客概率

Table 3 Comprehensive cost and passenger carrying probability of charging and battery swapping stations

充/换电站	载客概率/%	充换电成本/元		综合成本/元	
		充换电时刻为09:00	充换电时刻为20:00	充换电时刻为09:00	充换电时刻为20:00
C_1	23	73.28	91.07	65.27	83.05
C_2	79	78.91	92.71	51.38	65.18
C_3	93	64.96	86.87	32.55	54.47
D_1	52	65.39	69.01	47.25	50.89

由表3可知,在出行早高峰09:00时刻,该电动汽车选择充电站 C_3 进行充电,载客概率最高,且综合成本最低,仅为32.55元;但是在晚高峰20:00时刻,该电动汽车选择换电站 D_1 进行换电,其综合成本为50.89元,相应的最优充电路径如附录B中图B3所示,图中红色虚线表示电动网约车的充电路径。设充电站 C_3 出现多辆车同时到达充电站而需排队的情况,采用队列模型模拟电动汽车在充电站 C_3 的排队时间,重新计算早高峰09:00时刻充电站 C_3 的综合成本,结果见表4。

由表4可知,网约车在充电站 C_3 进行排队充电,会引起其综合成本的增加,综合成本为49.30元,此时的最优路径是优选换电站进行换电而不是选择充电站进行充电。综上所述,本文充分考虑订单热力分布和充换电节点成本的差异,并计及订单的热力分布对充电路径导航的影响,对完成和未完成订单

表4 充电站 C_3 需排队与无需排队时的
综合成本对比(09:00)

Table 4 Comparison of comprehensive cost of
charging station C_3 between conditions of
queuing and no queuing(09:00) 单位:元

是否需排队	充换电成本	综合成本
否	64.96	32.55
是	94.20	49.30

数量规则的网约车综合成本最小分别进行自动优选,可得到实际电动网约车的最佳充换电路径。

5 结论

本文提出了计及订单热力分布和充换电节点成本差异的电动网约车充换电最优路径优化方法,该充换电路径导航方法具有如下特点。

(1)所建立的“电动网约车-充换电节点-交通路网-配电网”综合模型充分考虑了充换电设施节点对电动网约车运营效益的影响,分别从空间和时间角度提出了电动汽车充换电成本的计算公式。并且根据约车订单热力图,可优选尽可能靠近约车订单最多的充/换电站进行充换电,以提高网约车的载客概率。

(2)所提电动网约车的充换电最优路径优化方法充分利用交通路况数据,按照时间优先、距离优先2种方法进行路径规划,并结合约车订单热力分布图,对电动网约车综合成本最小进行自动优选。通过该充换电路径导航策略,尽可能为网约车车主起到节省成本和载客激励的作用,对推动绿色出行具有实际意义。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 郭创新,刘洞宇,朱承治,等. 电动汽车居民区充电负荷建模分析[J]. 电力自动化设备,2020,40(1):1-9.
GUO Chuangxin, LIU Dongyu, ZHU Chengzhi, et al. Modeling and analysis of electric vehicle charging load in residential area[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 1-9.

[2] 苏舒,林湘宁,张宏志,等. 电动汽车充电需求时空分布动态演化模型[J]. 中国电机工程学报,2017,37(16):4618-4629,4887.
SU Shu, LIN Xiangning, ZHANG Hongzhi, et al. Spatial and temporal distribution model of electric vehicle charging demand[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4618-4629, 4887.

[3] 王浩林,张勇军,毛海鹏. 基于时空特征变量数据分析的共享汽车充电负荷预测方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):169-175.
WANG Haolin, ZHANG Yongjun, MAO Haipeng. Charging load prediction method of shared vehicles based on data analysis of spatiotemporal characteristic variables[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 169-175.

[4] 陈立兴,黄学良. 高速公路充电站电动汽车有序充电策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(1):112-117,126.
CHEN Lixing, HUANG Xueliang. Ordered charging strategy of electric vehicles at charging station on highway[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 112-117, 126.

[5] 葛晓琳,裴晨皓. 考虑电动汽车随机特性的机组组合问题研究[J]. 电力自动化设备,2018,38(9):77-84.
GE Xiaolin, PEI Chenhao. Study on unit commitment problem considering stochastic characteristics of electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 77-84.

[6] 孟旭瑶,张维戈,鲍彦,等. 考虑充电功率的电动汽车快充站充电设施优化配置[J]. 电力自动化设备,2018,38(7):28-34.
MENG Xuyao, ZHANG Weige, BAO Yan, et al. Optimal configuration of charging facility for electric vehicle fast charging station considering charging power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 28-34.

[7] 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(增刊1):59-67.
SU Shu, SUN Jinwen, LIN Xiangning, et al. Electric vehicle smart charging navigation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(Supplement 1): 59-67.

[8] 陈丽丹,张尧, Antonio Figueiredo. 融合多源信息的电动汽车充电负荷预测及其对配电网的影响[J]. 电力自动化设备,2018,38(12):1-10.
CHEN Lidan, ZHANG Yao, ANTONIO Figueiredo. Charging load forecasting of electric vehicles based on multi-source information fusion and its influence on distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 1-10.

[9] 杜习超,刘永民,徐则诚,等. 电动汽车随机负荷建模及对配电网节点电压分布的影响[J]. 电力自动化设备,2018,38(6):124-130.
DU Xichao, LIU Yongmin, XU Zecheng, et al. Modeling of random load of electric vehicle and its influence on node voltage distribution of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 124-130.

[10] TAN J, WANG L F. Real-time charging navigation of electric vehicles to fast charging stations: a hierarchical game approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 846-856.

[11] LIU C S, ZHOU M, WU J, et al. Electric vehicles en-route charging navigation systems: joint charging and routing optimization[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2019, 27(2): 906-914.

[12] CERNÁ F V, POURAKBARI-KASMAEI M, ROMERO R A, et al. Optimal delivery scheduling and charging of EVs in the navigation of a city map[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4815-4827.

[13] 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 Hongming, LI Ming, WEN Fushuan, et al. Route selection and charging navigation strategy for electric vehicles employing real-time traffic information perception[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 106-113.

[14] 严弈遥,罗禹贡,朱陶,等. 融合电网和交通网信息的电动车辆最优充电路径推荐策略[J]. 中国电机工程学报,2015,35(2):310-318.
YAN Yiyao, LUO Yugong, ZHU Tao, et al. Optimal charging route recommendation method based on transportation and distribution information[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 310-318.

[15] 徐智威,胡泽春,宋永华,等. 基于动态分时电价的电动汽车充电站有序充电策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(22):3638-3646.

- XU Zhiwei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Coordinated charging strategy for PEV charging stations based on dynamic time-of-use tariffs[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3638-3646.
- [16] 项顶, 宋永华, 胡泽春, 等. 电动汽车参与V2G的最优峰谷电价研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 15-25.
XIANG Ding, SONG Yonghua, HU Zechun, et al. Research on optimal time of use price for electric vehicle participating V2G[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 15-25.
- [17] TANG D F, WANG P. Nodal impact assessment and alleviation of moving electric vehicle loads: from traffic flow to power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 4231-4242.
- [18] WANG Q G, WANG J, LEI C, et al. Short-term planning model for distribution network restructuring based on heat maps[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(14): 3569-3577.
- [19] 邵尹池, 穆云飞, 林佳颖, 等. “车-站-网”多元需求下的电动汽车快速充电引导策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(18): 60-66, 101.
SHAO Yinchi, MU Yunfei, LIN Jiaying, et al. Fast charging guidance strategy for multiple demands of electric vehicle, fast charging station and distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18): 60-66, 101.
- [20] 杨思渊, 姜子卿, 艾芊. 考虑备用服务的电动汽车代理商竞价与定价联合优化[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 25-32.
YANG Siyuan, JIANG Ziqing, AI Qian. Joint optimization of bidding and pricing strategy for electric vehicle aggregators considering reserve service[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 25-32.

作者简介:



胡方霞

胡方霞(1972—),女,重庆人,教授,主要研究方向为软件工程和人工智能与物联网技术应用(**E-mail**: 1289346426@qq.com);

谷飞强(1994—),男,河南洛阳人,硕士研究生,主要研究方向为人工智能与物联网技术应用(**E-mail**: 20133925@cqu.edu.cn);

周念成(1969—),男,重庆人,教授,博士,从事电力系统自动化、电能质量方面的教学和研究工作(**E-mail**: cee_nczhou@cqu.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Optimal planning method of charging and swapping route for online electric vehicle-hailing considering thermal distribution of orders and cost difference of charging and swapping node

HU Fangxia¹, GU Feiqiang², ZHOU Niancheng²

(1. School of Electronic Information Engineering, Chongqing Technology & Business Institute, Chongqing 400052, China;

2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,

Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: An optimal planning method of charging and swapping route for online electric vehicle-hailing considering thermal distribution of orders and cost difference of charging and swapping node is proposed. The influence factors of charging and swapping route for online electric vehicle-hailing are analyzed, the model of online electric vehicle-hailing-charging and swapping node-traffic network-distribution network is established, and then the optimization method of charging and swapping route for online electric vehicle-hailing is proposed. The influence of thermal distribution of orders on the charging and swapping route navigation is fully considered. The optimal charging and swapping route and the corresponding minimum charging and swapping cost can be obtained by automatic optimization with the minimum comprehensive cost of online electric vehicle-hailing. The effectiveness of the proposed method is verified by comparing and analyzing the economic cost and time cost of charging and swapping route navigation of a practical online electric vehicle-hailing.

Key words: online electric vehicle-hailing; thermal distribution of orders; cost of charging and swapping node; charging and swapping route; optimal planning

附录 A

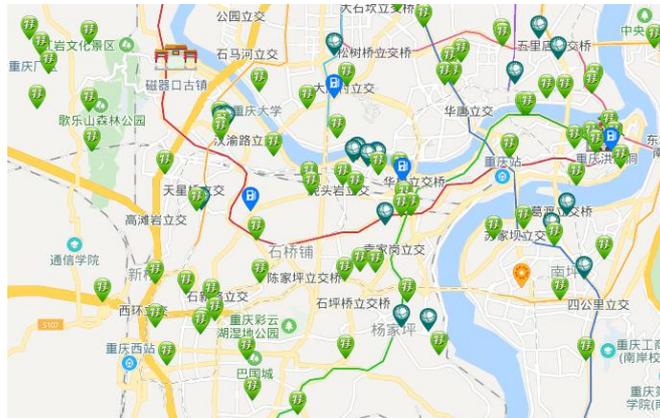


图 A1 重庆市某片区的充电网络图
Fig.A1 Charging network of a district in Chongqing

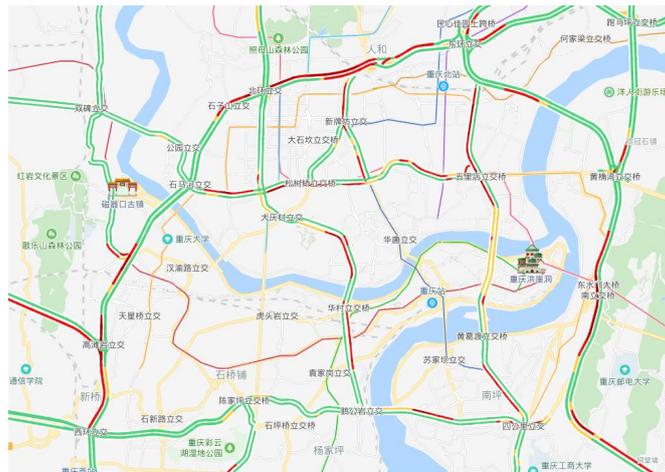


图 A2 重庆市某片区 18:00 时刻的交通路况图
Fig.A2 Traffic road map of a district in Chongqing at 18:00

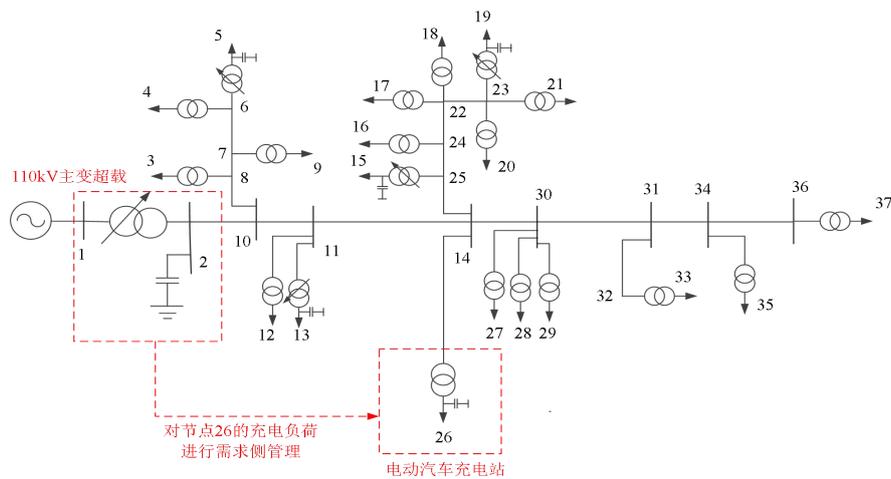


图 A3 10 kV 配电网的需求侧管理示意图
Fig.A3 Schematic diagram of demand-side management of 10 kV distribution network

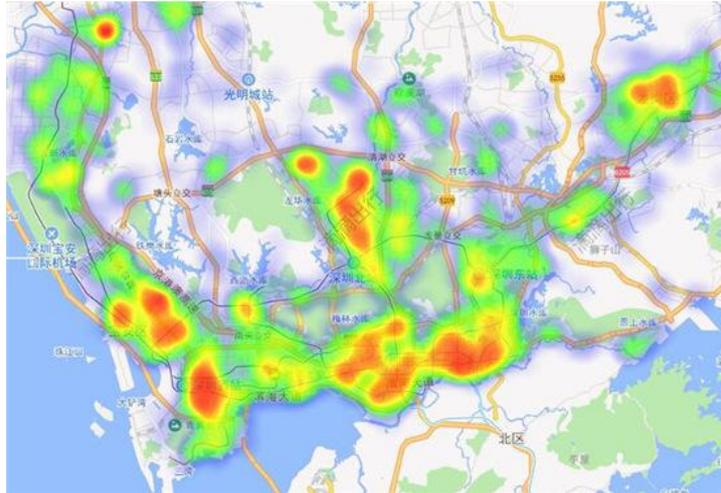


图 A4 深圳滴滴约车订单热力图
 Fig.A4 Thermal map of car-hailing orders of Shenzhen

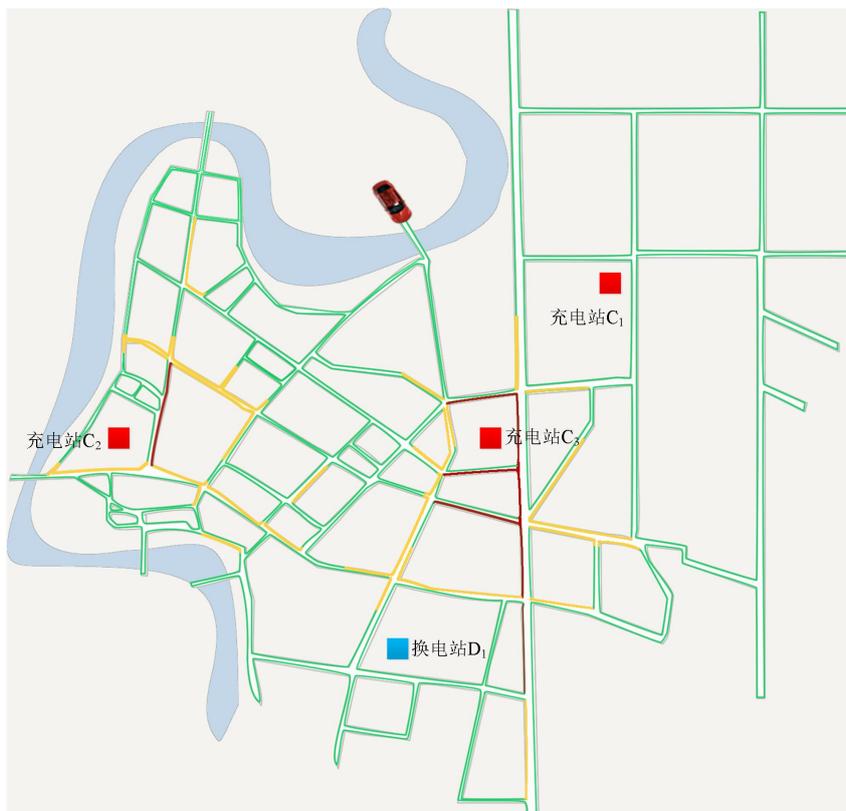
附录 B



图 B1 交通路网及约车订单热力图
 Fig.B1 Traffic map and thermal map of car-hailing orders



(a) 09:00 时刻



(b) 20:00 时刻

图 B2 该片区的交通路况图
Fig.B2 Traffic map of a district



(a) 09:00 时刻



(b) 20:00 时刻

图 B3 电动网约车的最优充换电路径图

Fig.B3 Optimal charging and swapping route of online electric vehicle-hailing