考虑临时驻车充放电管理的电动汽车配送路径规划方法

汪顺其,向 月,王晏亮 (四川大学 电气工程学院,四川 成都 610065)

摘要:随着充电基础设施保障能力的提升,电动汽车配送工作过程中的长时间驻车行为与电网存在的交互行 为与能量转移存在研究价值。为提高电动汽车参与物流配送的效率,提出日调度背景下考虑临时驻车充放 电管理的电动汽车配送路径规划方法。计及实时电价、车载电量、载货限重、单侧送达时间窗约束,考虑电池 损耗、充电站服务时间、分时电价及实时服务费,构建以配送时间、耗电成本、车辆成本、配送延迟惩罚之和最 小为目标的电动汽车配送路径优化模型,采用模拟退火改进的非支配排序遗传算法求解。以某26节点路网 系统为算例,验证了所提方法能有效减少配送总成本,降低续航不足的风险,提升交通与能源互动潜力。 关键词:电动汽车;物资配送;临时驻车;路径优化;充放电管理

中图分类号:U469.72

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202208042

0 引言

随着低碳政策的落实及电动汽车(electric vehicle,EV)的普及,EV广泛应用于交通出行^[1]。然而, EV的续航以及能量补给方式与传统燃油车存在显 著差异,近年来引起广大学者的关注。其中,EV配 送交通路径规划问题实际可以从数学上描述为多车 辆路径规划问题^[2](multi vehicle routing problem, MVRP)并逐渐发展为复杂的系统调度优化问题。 车辆由固定配送点出发,面向指定用户点有序配送, 在满足一定约束条件的前提下,实现目标函数最优 解。而由于电动汽车续航里程较普通燃油车更短, 同时充电时间较长,EV参与的配送需要考虑续航问 题以及充电决策的建立。

EV 配送及路径规划问题的研究大多集中于能 耗、充电成本等方向的精细化建模。文献[3]提取 EV 行驶工况的特征参数,分析其与能耗的相关系数,提 出了动态能耗预测模型,估计了耗电量的变化趋势; 文献[4]考虑了动态负载对能耗的影响;文献[5]将 快充引起的电池寿命损耗纳入目标函数,进而考虑 EV 配送;文献[6]考虑了实时信息,通过群感知将大 规模用户行为纳入配送计算;文献[7]考虑实时路 网、坡道势能等因素,建立了能耗最小模型;文献[8] 同时考虑了不同充电站点之间的实时电价差异。上 述研究未考虑充电站的服务时间,忽略了因充电站运 营不在服务时间内的规划造成EV 续航不足的风险。

EV续航或与能源交互研究方面,一般通过快充、慢充、换电续航模式、通过车入网^[9](vehicle-togrid,V2G)技术放电、通过实时充电路径导航,综合

收稿日期:2022-04-28;修回日期:2022-08-10 在线出版日期:2022-08-29 基金项目:国家自然科学基金资助项目(52111530067)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52111530067)

建立响应目标函数获取最优充放电函数。文献[10] 在EV 配送过程中通过V2G,根据分时电价的影响向 电力市场出售电力获取利润。文献[11]在EV结束 配送后,于配送中心借助V2G功能向电网放电获取 收益;文献[12]以共享汽车为研究对象,额外考虑了 换车的续航模式;文献[13]建立"车-网-站"综合模 型,通过深度强化学习建立实时充电行为决策的奖励 函数与优化模型;文献[14]考虑订单热力分布对充换 电路径导航的影响,对电动网约车最小充换电成本进 行优化;文献[15]通过深度增强学习,建立充电的价 值评估函数,实现满足续航需求下的最优充电控制; 文献[16]通过问卷收集分析车主行为偏好,并基于此 制定差异化充电策略;文献[17]针对EV物流配送,单 辆车配送周期约为2~4h;文献[18]考虑了不同多车 型混合配送,对于长途配送,优先使用续航能力更长 的燃油车。上述研究多集中在以EV单次充放电管 理为依据的短时间尺度或中等续航要求下的路径规 划、充放电决策,如起始电量不足或出行周期为1h 至若干小时[19],未考虑在半天或更长的时间尺度、单 次充放电难以满足里程要求时的综合充放电管理。

可见,在"充电-停车"一体化背景下,当前关于 EV 续航路径规划的研究通常针对一定区域内个别 充电站开展,多侧重于充电站的选择与导航过程本 身,忽略了基于驾驶目的驱动的临时驻车行为与充放 电管理间的耦合关系。目前尚未有研究涉及 EV 临 时驻车时的充放电管理,而 EV 应用于物流配送,因 其驻车时间长的特点,作为研究切入点有重要意义。 对此,本文提出一种考虑临时驻车充放电管理的 EV 配送路径规划方法:在充电站服务时间范围内,EV 在驻车期间进行快慢充决策;在充电站广泛覆盖的 背景下,重构充电路网模型;建立时空分布电价差异 下的充电成本的优化方式;通过获取各节点分时电 价,以充电费用最优、配送成本最低、客户满意度最 高为目标进行优化,同时考虑路网拓扑、车载电量、 载货限重、服务时间约束,实现EV配送路径规划。

1 研究架构

EV物流配送问题描述为:在指定中心管理下, EV遵循调度约束及交通要求,实现配送与充电路径 规划。典型EV配送模型如图1所示,配送中心根据 实时用户需求数据,以EV耗电费用最少、电池损耗 最小、行驶时间最小、充电等候时间最小等为优化目 标,通过优化算法进行路径优化。相比于一般车辆 路径问题^[20](vehicle routing problem,VRP),除了优 化目标的增多,EV物流配送涉及不定量车辆派遣决 策、充电决策的步骤,模型更为复杂。



图 1 典型 EV 配送模型 Fig.1 Typical EV distribution model

本文以多车辆路径规划问题为基础,探讨"考虑 临时驻车充放电管理的EV配送"这一核心问题,物 流EV参与交通能源互联示意图如图2所示,对其作 如下说明。

1)单次行程里程数大,驻车服务时间久,日内行 驶周期长。基于此背景,考虑续航问题和充电站的 服务时间范围,同时考虑分时电价。另一方面,随着 充电设施保障的提高^[21],认为"充电-停车"一体化。

2)配送公司对EV路径规划实现按时配送,保证 用户节点满意度;同时,物流公司合理进行充电管 理,减小大电流对电网的冲击,辅助填谷。从电网侧 看,在负荷高峰时段,物流公司参与电力系统需求响 应,通过EV向电网提供放电服务,实现能源互动。

3)为满足EV在一日出行结束后,仍能支持后续 出行并可选择隔日充电的调度需求^[19],本文提出电 量平衡的配送方式,并基于对单站点物资中心开展 研究。

4)作为配送需要,考虑路径规划约束、时间窗约 束、需求与载重约束。同时具有 EV 特性,考虑荷电 状态(state of charge,SOC)约束、充电时间约束,并 根据电力需求响应产生充放电决策约束。约束之间 耦合,以配送时间、配送费用、用户满意度为指标,实 现联合优化。

2 EV 配送与充电站交互信息

2.1 EV行驶信息

依据交通流量,根据大量用户上传的实时交通数据,可以获得2个配送节点间的速度为:

$$v_{n,d} = l_d / t_{n,d} \tag{1}$$

$$\bar{v}_{d} = \frac{1}{N_{n}} \sum_{n=1}^{N} v_{n,d}$$
(2)

$$\begin{cases} v_{ij} = \frac{1}{D} \sum_{d=1}^{D} \alpha_d \overline{v}_d \\ \text{s.t.} \quad \alpha_d = l_d / \sum_{d=1}^{D} l_d \end{cases}$$
(3)

式中: $v_{n,d}$ 、 $t_{n,d}$ 分别为车辆n行驶在路段d的行驶速 度、行驶时间; l_d 为单个路段d的距离; \bar{v}_d 为根据大量 用户上传得到得单一路段行驶平均速度; N_u 为对应 上传数据的用户数目; v_{ij} 为用户节点i、j间的整个行 驶过程的平均速度;D为对应节点间的路段数。由 Dijkstra 算法计算所得 v_{ij} 对应经过路段满足路网可 达性条件,如式(4)所示。

$$\min\sum_{d=1}^{D} \frac{l_d}{\bar{v}_d} \tag{4}$$

EV 配送到达节点满足以下时间关系:

 $t_{i.end} = t_{i.star}$

$$+t_{i,\text{park}} + t_{i,\text{serve}}$$
 (5)



图 2 物流 EV 参与交通能源互联示意图

Fig.2 Schematic diagram of logistics EV's participation in transportation and energy interaction

 $t_{j,start} = t_{i,end} + d_{ij} lv_{ij} x_{ij,k} = 1$ (6) 式中: $t_{i,start}$ 、 $t_{i,end}$ 分别为到达、离开节点i的时刻; $t_{i,park}$ 为在节点i的寻找并确定停车位产生的附加时间; $t_{i,serve}$ 为到达物流点后,需要停留产生的附加时间; d_{ij} 为节点i、j之间的距离; $x_{ij,k}$ 为0-1变量,车辆k由节点i至j计为1,否则计为0。

2.2 充电站信息

上海发改委2021年文件《关于本市电动汽车充 电设施用电价格政策有关事项的通知指出》^[22]指出, 充电费包括电价及服务费,其中服务费在政府引导 下自主制定,上限不高于1.3元/(kW·h);电价根据 充电站地域性质决定,其分为一般工商业及其他用 电、居民用电平均电价水平以及目录电价。设定充 电电价为:

$$\rho(i,t) = \rho_{e}(i,t) + \rho_{serve}(i,t) \tag{7}$$

式中: $\rho_e(i,t)$ 、 $\rho_{serve}(i,t)$ 分别为充电站*i*在时刻*t*的电价、服务费,其中电价遵循不同制定标准下的分时电价或统一电价机制; $\rho(i,t)$ 为实际需要支付的费用。故单次充电总费用 C_{sbrt} 为:

$$C_{\text{char}} = \eta P t_i \rho(i, t) + c_{\text{park}} t_i$$
(8)

式中:η为充电效率;P为充电功率,在本模型中取决 于充电种类;t_i为充电和停车的时间;c_{park}为单位时 长的停车费用。同时,考虑充电站的服务时间,充电 时间应满足:

$$A_{i.min} < t_{i.char.start} < t_{i.char.end} < A_{i.max}$$
 (9)
式中: $A_{i.min} < A_{i.max}$ 分别为充电站开放服务的开始、结
束时间; $t_{i.char.start} < t_{i.char.end}$ 分别为车辆充电的开始、结束
时间。

3 充电决策模型

建立 EV 配送的充电决策模型,将 EV 所有节点 集合计为 N,对 EV 配送过程中的行为进行分类,分 类指示器 a 可表示为^[23]:

$$a = \begin{cases} 2 快充 \\ 1 慢充 \\ 0 停车等待 (10) \\ -1 行驶 \\ -2 放电 \end{cases}$$

研究表明,与慢充相比,快充会给EV电池带来 不可逆的寿命损耗,慢充带来的电池损耗可忽略^[24]。 其中快充损耗模型为^[25]:

$$Q_{\rm site} = c_{\rm ref} T_{\rm acc} S_{\rm acc} D_{\rm acc} N_{\rm k} \tag{11}$$

式中:Q_{site}为电池容量的永久减少量;T_{acc}为与温度有关的常数;S_{acc}为与电池容量有关的常数;c_{ref}、D_{acc}为与电池自身其余参数有关的系数;N_k为充放电次数。

忽略外界环境温度影响,电池损耗主要来源于 充电时的电池发热,其主要由快充所产生大电流引 起,可以得到单次快充引起电池主要损耗成本为^[26]:

$$C_{\rm loss} = \frac{C_{\rm k}Q_0 + C_{\rm charge}}{Y_{\rm max}Q_{\rm max}} \int_{t_{\rm start}}^{t_{\rm end}} P_{\rm fast} dt$$
(12)

式中: C_{loss} 为单次快充引起电池主要损耗成本; Q_{max} 为当前电池最大容量; Q_0 为额定容量; C_k 为单位容量电池成本; Y_{max} 为最大循环充电次数;积分项为快充充电电量; P_{fast} 为极限快充功率; C_{charge} 为等效极限快充功率所充的电量; t_{start} 、 t_{end} 分别为快充的起始、终止时间。

为提高时间利用率,考虑针对配送服务时间间 隔进行充电决策,设定2种充电策略,分别为优先考 虑慢充、在慢充不满足电量平衡条件下加入快充的 充电模型,以及现有研究常用的路径规划快充模型, 具体说明如下。

1)优先慢充,浅充浅放。在服务时长总和足够 使慢充满足符合电量平衡约束的条件下,采用慢充 策略。根据电价时空分布情况根据电费成本最低原 则选择充电节点。EV 在节点*i*处的实际充电电量 ΔQ_{icher} 满足约束:

$$\Delta Q_{i,\text{char}} = \eta P_{\text{char,slow}} t_{i,\text{char}} \gamma_{i,k}^{\text{slow}} \quad i \in N, \, k \in V$$
(13)

$$\begin{cases} \sum_{i \in N} \Delta Q_{\text{char}} \ge \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \frac{d_{ij}}{v_{ij}} x_{ij,k} \\ \Delta Q_{\text{char}} = \eta P_{\text{char,slow}} t_{i,\text{char}} \end{cases}$$
(14)

式中: $y_{i,k}^{\text{slow}}$ 为表示慢充决策的 0-1 变量,仅慢充条件 下取 1,否则取 0; $t_{i,char}$ 为在节点 i 的充电时间; $P_{char,slow}$ 分别为慢充速率;V为所有 EV 的集合; ΔQ_{char} 为不分 节点的理论充电量。

若全程慢充不足以抵消行程所需的电量损耗,则采用尽可能少的快充策略,即快慢混充。通过电价时空分布关系选择合适的快慢充电节点,使得电费成本最低。对应约束如下:

$$\Delta Q_{i} = P_{\text{char.slow}} t_{i,\text{serve}} y_{i,k}^{\text{slow}} + P_{\text{char.fast}} t_{i,\text{serve}} y_{i,k}^{\text{fast}} \quad i \in N, k \in V$$
(15)

$$\begin{cases} \sum_{i \in N} \Delta Q_{\text{char}} < \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \frac{d_{ij}}{v_{ij}} x_{ij,k} \\ \Delta Q_{\text{char}} = \eta P_{\text{char,slow}} t_{i,\text{char}} \end{cases}$$
(16)

式中:y_{i,k}为表示快充决策的0-1变量,仅快充条件下 取1,否则取0;易知在该充电决策下,当y_{i,k}为0表 示当前时间该充电站不在服务开放时间内或正在进 行快充;P_{char.fast}为折算到驻车时间内的实际平均快充 功率,范围在慢充和极限快充功率之间。

2)即充即走。作为对照策略。快充方式在功率 上远高于慢充,故参照文献[11]在配送途中的充电 方式,即在电量约束下,仅考虑单次快充,同时结合 本文方法利用临时驻车时间进行充电。此时,在满 足 SOC 瞬时约束下不需考虑全局约束,电量满足如 下关系:

$$\Delta Q_i = P_{\text{char.fast}} t_{i.\text{serve}} y_{i,k}^{\text{fast}}$$
(17)

4 EV 配送路径规划优化模型

考虑停驻充放电管理的EV 配送规划模型的优化目标与约束条件如下。

1)配送时间最短。

$$\min F_1 = \sum_{k \in V} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \frac{d_{ij}}{v_{ij}} x_{ij,k}$$
(18)

$$\sum_{k \in V} \sum_{i \in N} x_{ij,k} = 1 \quad j \in N \tag{19}$$

$$\sum_{i \in \mathbb{N}} q_i \sum_{j \in \mathbb{N}} x_{ij,k} \leqslant q_{\max} \quad k \in V$$
(20)

$$\sum_{i \in N} x_{0i,k} = 1 \quad i \in N, k \in V$$
(21)

$$\sum_{i\in N} x_{ij,k} - \sum_{i\in N} x_{ji,k} = 0 \quad j\in N, k\in V$$
(22)

$$\sum_{i \in N} x_{ij,k} = 1 \quad j \in N, \, k \in V \tag{23}$$

式中:F₁为配送总时间;q_i为用户节点*i*需要的货物 量;q_{max}为单辆车能承载最大货物量;式(19)—(23) 为约束,其中式(19)表示每个节点只访问1次,式 (20)表示每个路径载货量不能超过额定限重,式 (21)表示每辆车在1次配送中只发车1次,式(22)表 示每辆车行驶路径为起点终点相同的闭合回路,式 (23)表示1个节点只能由1辆车配送。

2) 配送延时最短。

$$\min F_2 = \sum_{i \in U} f_{\text{Del}}(i) \tag{24}$$

$$f_{\rm Del}(i) = \begin{cases} t_{i,k} - T_{i\max} & t_{i,k} > T_{i\max} \\ 0 & i \in U, k \in V \end{cases}$$
(25)

式中: F_2 为配送总延时(单位为min);U为用户节点 集合; $\sum_{i \in U} f_{\text{Del}}(i)$ 为用户节点i的配送延时惩罚函数表 达式; T_{imax} 为用户节点i接受最晚送达时间; $t_{i,k}$ 为车 辆k在用户节点i实际送达时间。约束条件如下:

$$0 < t_{\max} \le T_{all} \tag{26}$$

$$t_{i,k} = t_{j,k} + t_{j,\text{serve}} + \frac{d_{ji}}{v_{ji}} \quad i, j \in \mathbb{N}, k \in \mathbb{V}, x_{ji,k} = 1$$
(27)

式中: t_{max} 为配送结束时间; T_{all} 为最大配送周期,其值限定在1d内。到达时间按约束等式(27)计算。

3)总费用最少。总费用包括充电成本以及车辆 派遣成本,具体为:

min
$$F_3 = \sum_{i} \rho^*(i, t) Q_{i, char} + n_v C_v$$
 (28)

式中: F_3 为配送总费用; $\rho^*(i,t)$ 为快充损耗修正后 的单位电量充电成本; $Q_{i,char}$ 为在用户点i的充电电 量; n_v 为实际派出的车辆数目; C_v 为派出单辆车的启 动成本。

在式(28)所示的目标下,需要满足约束:

$$A_{i.\min} < t_i < A_{i.\max} \quad i \in N \tag{29}$$

$$Q_{i.\text{end}} = Q_{i.\text{start}} \quad i \in N, \, y_{j,k} = 0 \tag{30}$$

$$Q_{i.\text{end}} = Q_{i.\text{start}} + Q_{i.\text{char}} \quad i \in N, \, y_{j,k} = 1 \tag{31}$$

$$Q_{i.start} = Q_{j.end} - P_{drive} d_{ji} \quad i, j \in N, x_{ji,k} = 1$$
 (32)

$$\sum_{i \in N} Q_{i.char} = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \frac{d_{ij}}{v_{ij}} x_{ij,k}$$
(33)

$$Q_{i,\text{char}} = \begin{cases} \eta P_{\text{char,slow}} t_{i,\text{serve}} & y_{i,k}^{\text{slow}} = 1\\ \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \frac{d_{ij}}{v_{ij}} x_{ij,k} - \sum_{i \in N} \eta P_{\text{char,slow}} t_{i,\text{serve}} y_{i,k}^{\text{slow}} & (35)\\ & y_{i,k}^{\text{fast}} = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} Q_{i,\text{start}} + \Delta Q_{i,\text{char}} \leqslant Q_{\max} & y_{i,k} = 1\\ Q_{i,\text{end}} - P_{drive} d_{ji} \geqslant Q_{\min} & x_{ij,k} = 1 \end{cases}$$
(36)

$$n_{\rm v} \leq N_{\rm v} \tag{37}$$

式中:P_{drive}为行驶能耗;y_{j,k}为充电决策变量,充电计为1,否则计为0;N_v为最大可供派遣的车辆数;Q_{min}为EV配送中电量允许的下限。约束式(29)表示充电决策必须发生在充电站服务范围时间内,其中电量变化需满足约束式(30)—(32);约束式(33)表示EV停靠等待不耗电;约束式(34)表示车辆派出的决策变量;约束式(35)为耗电等式,第1个公式表示慢充电量,第2个公式表示快充电量;约束式(36)为各时刻SOC不等式约束;约束式(37)为车辆派遣约束。

综上所述,设定EV 配送规划模型的多目标优化 函数为:

$$F = \beta F_1 + \gamma F_2 + F_3 \tag{38}$$

式中:F为等效配送总成本; β_{γ} 为等效的成本折算系数。

结合文献[9,11]的权重分配,令β=γ=1,即单 位配送延迟或EV单位配送时间等效折算为单位配 送成本。

5 算法求解

考虑采用非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA-II)求解第4节中的 多目标非线性EV配送路径多目标优化问题。为加 速目标函数收敛,加入模拟退火机制,使得在寻优前 期有更大概率接受劣解,求解流程、充电决策的生成 及NSGA-II的编解码细节见附录A,具体步骤如下。

1)配送信息初始化。取配送节点集合基本信息,包括节点坐标、路段行驶速度、节点货物需求量、 接受最晚配送时间、节点附近充电站的分时电价和 实时服务费、充电站的服务范围等基本信息。生成 充电电费的时空矩阵,如式(39)所示。

$$\boldsymbol{\theta} = \left[\rho(i, t) \right]_{i \times T} \tag{39}$$

式中:**0**为存储时空电价的*I*×T维矩阵,*I*为节点充电站个数,*T*为时间(小时数)。

2)根据约束式(19)—(23),构造随机初始解,生 成随机种群,提取每个序列包含的配送车辆划分聚 类信息及每辆车的配送序列信息。按照载重限额选 取符合约束的个体序列,计算各节点到达的配送时间,计算车辆使用成本以及延迟配送惩罚成本。

3)每辆配送 EV 的出行链,根据 SOC 约束,对节 点时空电价排序,如式(40)所示。

 $\boldsymbol{M}_{\rho} = \left[\boldsymbol{\rho}_{m}(i,t) \right]_{1 \times M} \boldsymbol{\rho}_{m}(i,t) < \boldsymbol{\rho}_{m+1}(i,t)$ (40)

式中: M_{ρ} 为EV配送出行链途径所有节点充电电费 M维排序向量;M为出行链途径节点个数; $\rho_{m}(i,t)$ 为 对应排序第m个节点i时间的实时电费。

根据充电模型,确定所需充电电量,若优先慢 充,则转至步骤4),若优先快充,则转至步骤5)。

4)在满足起始SOC约束条件下,根据电价排序 *M*_p生成充电决策,根据式(29)一(35)计算各个节点 时刻的电量,至电量满足约束式(36)为止,最终得到 该条出行链下的最优充电决策。

5)选择电费最低站点进行快充,根据式(35)计 算节点电量,若不满足约束式(36),则根据电价排序 依次选择快充节点,直至满足约束式(36)为止。

6)根据式(18)计算配送时间,根据式(24)— (27)计算配送延迟惩罚,根据式(28)—(37)计算总 费用,根据式(38)计算目标函数;依据模拟退火改进 非支配排序遗传算法机制对个体进行选择,然后对 个体的路径节点编码进行交叉、变异、迭代,生成新 的种群个体后返回步骤3);若满足终止条件,则结 束运行,输出最优结果。

6 算例仿真与分析

以某45 km×85 km的26节点路网结构为例,其 中节点0为配送中心,所有EV由此发车并返回;其 余25个节点为用户节点。物流EV的电池容量、续 航能力等参数及充电桩的参数见附录B表B1,具体 网络节点参数见附录B表B2。在"停车-充电"一体 化模式下,充电桩电价信息、节点预计送达时间信 息、节点需求量信息见附录B图B1。当日充电站运 营时间范围见附录B图B2。单次驻车时间为90 min。 算例运行环境见附录B表B3。

6.1 考虑充电站服务时间范围的配送

假定在某配送情景下,到达各站点后的服务时间(即临时驻车时间)为90min,发车初始时间记为 0。考虑以下3种情形的仿真:情形1为所提模型优 化仿真;情形2为不考虑续航问题,以燃油车为模型 进行仿真;情形3为不考虑充电站的服务时间范围。 在不同站点差异化充电电价下,成本分布的仿真结 果如表1所示,路径规划的仿真结果如附录C图C1 所示,完整优化结果如附录C表C1—C3所示。物 流 EV 电量初始值均为40kW·h(66.7%)。其中,利 用配送总时间加权折算对应时间成本,时间成本的 数值即为所有 EV 配送总分钟数。求解时间见附录 C表C4,适应度曲线见附录C图C2。

情形1中,由于要考虑EV续航问题,其总成本

表1 成本分布的仿真结果

Table 1 Simulative results of cost distribution

情形	总成本(目标函数)/元	充电费用 / 元	时间成本 / 元
1	1 393.8300	110.7600	483.0693
2	1 261.373 6	0	461.3736
3	1 382.364 7	121.1376	461.2271

比情形2高出约10%(约为133元),由式(38)所示的 目标函数分析各项指标结果可知,其中充电费用(约 为110元)为主要原因。此外,因续航约束造成的小 范围路径规划改变也占了一定因素。但由于情形2 中没有考虑燃油车的油费,但油费通常远高于电费, 由此看来,采用EV配送优势更大。

情形3由于未考虑充电站的服务范围,其总成本(约为1382元)比情形1的总成本(约为1394元) 低了约10元,虽然情形3的充电费用(约为121元) 较情形1的充电费用更高,但该结果是权重下指标 组合最优的路径规划结果,同样受分时电价和路径 改变的影响。进一步分析情形1、3的详细结果,其 中,情形3下的最优规划结果将不在服务时间范围 内的充电站纳入了充电决策。故日调度时间周期 下,若不考虑发车时间和充电站服务范围进行路径 规划,会增加EV配送过程中的续航不足风险。

6.2 考虑电池损耗下的仿真分析

进一步结合充电站的服务范围与电池损耗成本 分析,确保里程裕度,同样设定物流EV电量初始值 均为40kW·h(66.7%),进行扩展仿真。

图3为情形1下EV的充电决策。图中:充电决 策为0、1、2、-1分别表示停车等待、慢充、快慢充混 合、行驶; ΔS_{sor} 为SOC变化量。不同充电策略下的 部分仿真结果见表2。其中,车辆1经过前2个节点 时,由于附近充电站不在服务时间范围内,无法进行 充电决策,整个配送过程中所消耗的电量需要加入 快充抵消补偿。而车辆3仅进行停充复用,即可满 足电量平衡条件。即充即走策略下的实际充电费用 为145.9元,本文所提优先慢充策略下的实际充电费 用相对提高了8%,为158.5元。分析可知,因分时电 价的影响,慢充受其充电功率限制,EV经过电价较 低的电站时不能在既定驻车时间内充足够多的电 量,需转向电费较高的电站进行补充续航充电,所以 实际充电费用更高。当纳入快充电流对EV电池造 成永久性寿命损耗时,优先快充的折算电量成本为 168.7元,高于慢充折算电量成本(162.2元),故在计 及电池损耗的条件下,本文所提方法更有优势。同 时,结合模型对比浅充浅放和即充即走方式,浅充浅 放方式下,除了车辆1受制于充电站服务时间的约 束,最低电量达到了7%,其余EV的SOC在整个过 程中均维持在47%~84%范围内,而即充即走下SOC 则在32%~90%范围内。

综上所述,采用临时驻车浅充浅放,远离了配送



Fig.3 Electric quantity changes of EV under different charging strategies

表2 不同充电策略下的部分仿真结果

 Table 2
 Partial simulative results under different charging strategies

	annerent	enarging	strategies	,	
理最低	〔电量	最大电量	充电费	电池损耗	总计 /

充电管

方式	百分比 / %	百分比 / %	用/元	成本 / 元	元
优先慢充	7,50,48,47	84,83,78,80	158.5	3.7	162.2
即充即走	7,35,32,36	84,90,82,81	145.9	22.8	168.7

EV电池过充、过放电量的阈值,减小了电池深度放 电风险,同时纳入实际情况的模型参数扰动,也减小 了汽车的续航不足风险。同时,该方式以慢充为主, 减小了充电过程大电流对电网的冲击。

继续探讨不同的开始配送时刻下的决策变化。 将00:00设为起始参考时间点计为0,改变发车时间 以模拟一天内不同发车时的配送,同时延迟期望送达 时间和配送开始时间,配送期望送达时间同时相对延 迟。取间隔为3h,则为0~21h时段内的发车成本变 化曲线见图4。由图可知:总成本为1588~1847元, 其在9h和15h达到极值,分别对应分时电价早间 (9~11h)峰值和晚间(19~21h)峰值;而充电成本与 总成本并无明显正相关,这是因为发车时间的改变使 对应的电价区间变化,EV 配送路径同样发生变化, 以抵消充电费用的增减,以实现总体最优解;在夜间 或凌晨发车,可有效降低总成本,辅助实现填谷。



Fig.4 Changes of departure costs

6.3 V2G入网仿真分析

在6.1与6.2节仿真模型的基础上,进行EV配送 过程中V2G并网的仿真分析。在负荷高峰时段,物 流公司参与电力系统需求响应,通过EV向电网提供 放电服务。为便于分析,假设电能需要的时间范围 全部对应于6.1节仿真中的充电站充电服务时间范 围外,计入充电损耗,以总成本为最优,设置SOC初 值为60%,防止因充放电管理使电池过充过放,建 立SOC充放电约束如式(41)、(42)所示。

$$0.2 Q_{\max} \leq \Delta Q_{i,t} \leq 0.8 Q_{\max} \tag{41}$$

$$-24 \text{ MW} \cdot \mathbf{h} \leq \Delta Q \leq 12 \text{ MW} \cdot \mathbf{h}$$
 (42)

式中: ΔQ 为整个过程电池电量相对初始发车时刻的 改变量。改变到达节点的驻车时间,以模拟不同的 配送背景,分别在驻车时间为30、60、90、120 min的 条件下进行仿真,得到不同驻车时间下的SOC变化 过程如附录C图C3所示。分析可知,驻车时间越 长,最大可能的放电量也会变多,这是因为驻车时间 在整个配送过程中占了更大的比重,充放电决策的 机会也在变多,EV进行充放电的潜能也越大。在图 C3(b)的情形下,快充电量已经超过了电池的阈值, 需进行约束修正;而图C3(c)、(d)中,SOC的上、下 限阈值均超出 SOC 约束范围。驻车时间为 120 min 时的SOC约束所起作用较驻车时间为90min更明 显。因此物流EV具有与电网进行更大能源交互潜 力的同时,受其SOC约束,进行充放电管理的决策也 更为复杂。特别地,当驻车时间为30 min时,物流配 送车为3辆,而驻车时间为120min时,物流配送车 变为5辆,结合式(28)、(38)所示的优化函数可知, 这是因为驻车时间的增加导致物流公司不得不派出 更多车辆,缩短总体配送时间,避免配送延迟带来的 损失,减小延迟惩罚函数带来的额外成本。

7 结论

本文考虑交通目的驱动与能源交互的耦合,提

出从临时驻车充放电管理入手,进行EV 配送路径规 划研究,提出物流公司参与电力系统需求响应,通过 EV向电网提供放电服务的集中式V2G实现方式。 以EV物流配送问题为研究对象,以驻车时间为着眼 点,考虑了充电站的服务时间范围、实时电价与配送 期望送达时间的交互、SOC约束与配送驻车时的充 电决策为交互,进行了EV 配送路径优化规划研究, 对出行链中电力电量关系和成本进行了研究论述, 并提出路径规划与充电决策优化嵌套式求解方法。 本文所得结论如下:①基于不同充电站的服务时间 范围,考虑实时电价分布,可有效减小物流配送总成 本,并减小续航不足的风险;②在日调度背景下的配 送模型中,充分利用临时驻车时间,采用优先慢充的 浅充浅放充电策略,可有效减小电池寿命损耗;③考 虑EV放电需求响应需求时,更久的驻车时间具有更 多的放电潜力,但也增大了配送延迟风险,并且受制 于SOC约束,实现充放电调度也更加复杂。

值得注意的是,本文考虑了充电引起的电池损耗,但未考虑V2G放电的折算成本损耗;此外,充电策略未考虑电网侧的负荷影响与充电交互,后续工作中将进一步深入研究。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

100

- 孟锦鹏,向月,顾承红,等.面向可靠性提升的电动汽车充电基 础设施协同优化规划[J].电力自动化设备,2021,41(6):36-50. MENG Jinpeng,XIANG Yue,GU Chenghong, et al. Collaborative optimization planning of electric vehicle charging infrastructure for reliability improvement[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(6):36-50.
- [2] XIANG Yue, YANG Jianping, LI Xuecheng, et al. Routing optimization of electric vehicles for charging with event-driven pricing strategy [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2022, 19(1):7-20.
- [3]苏粟,杨恬恬,李玉璟,等.考虑实时动态能耗的电动汽车充电路径规划[J].电力系统自动化,2019,43(7):136-143.
 SU Su,YANG Tiantian,LI Yujing, et al. Charging route planning for electric vehicles considering real-time dynamic energy consumption[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7):136-143.
- [4] 黄建华,刘方翔. 动态负载下电动汽车充电策略及路径优化问题[J/OL]. 计算机集成制造系统. (2021-09-22)[2022-04-21]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.tp.20210918.1145.008. html.
- [5] 郭放,杨珺,杨超.考虑充电策略与电池损耗的电动汽车路径 优化问题研究[J].中国管理科学,2018,26(9):106-118.
 GUO Fang,YANG Jun,YANG Chao. Study on the electric vehicle routing problem in the present of charging strategy and battery consumption[J]. Chinese Journal of Management Science,2018,26(9):106-118.
- [6] 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 Youjun,LI Ming,YU Qian, et al. Logistics distribution route optimization and charging navigation of electric vehicle based on real-time information sensing[J]. Southern Power

System Technology, 2017, 11(2):41-49.

- [7] CELA A, JURIK T, HAMOUCHE R, et al. Energy optimal real-time navigation system[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2014, 6(3):66-79.
- [8] 董进军,熊铜林,杨洪朝,等. 兼顾电价机制与物流配送需求的电动汽车充电策略[J]. 电力科学与技术学报,2018,33(3): 115-119.
 DONG Jinjun, XIONG Tonglin, YANG Hongzhao, et al. Re-

search on charging strategy of electric vehicle considering the price mechanism and logistics distribution demand[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33 (3):115-119.

- [9] 任峰,向月. 辅助负荷削峰的电动出租车 V2G协同策略与效益 分析[J]. 电力自动化设备,2022,42(2):63-69.
 REN Feng, XIANG Yue. V2G coordinated strategy and benefit analysis of electric taxis to assist peak load shifting [J].
 Electric Power Automation Equipment,2022,42(2):63-69.
- [10] 李家乐,刘真伯,王雪菲.智能电网下支持充放电策略的电动 汽车配送路径优化[J].华南理工大学学报(自然科学版), 2021,49(10):31-40.

LI Jiale,LIU Zhenbo,WANG Xuefei. Distribution path optimization of electric vehicles considering charging and discharging strategy in smart grid[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition),2021,49(10):31-40.

- [11] 邓友均,穆云飞,贾宏杰,等. 计及客户满意度的电动汽车物流 配送路径规划与充放电管理[J]. 运筹与管理,2021,30(7): 136-145.
 DENG Youjun, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Logistics distribution route planning and dis/charging management of electric vehicles considering customer satisfaction level[J]. Opera-
- tions Research and Management Science,2021,30(7):136-145.
 [12] 葛晓琳,何鈦博,符杨,等.融合分层规划和A*算法的共享电动汽车换车与充电路径规划[J].中国电机工程学报,2021,41 (22):7668-7680.
 GE Xiaolin, HE Hongbo, FU Yang, et al. Interchange and charging path planning of shared electric vehicles based on A* a b interchange in the state of the state of

A* algorithm combined with hierarchical programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(22):7668-7681.
[13] 沈国辉,赵荣生,董晓,等.基于多信息交互与深度强化学习的

- 电动汽车充电导航策略[J]. 南方电网技术,2022,16(1): 108-116. SHEN Guohui, ZHAO Rongsheng, DONG Xiao, et al. Electric vehicle charging navigation strategy based on multi-information interaction and deep reinforcement learning[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(1):108-116.
- [14] 胡方霞,谷飞强,周念成. 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[J]. 电力自动化设备,2020,40(5):54-61.

HU Fangxia, GU Feiqiang, ZHOU Niancheng. 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[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 40(5):54-61.

- [15] 杜明秋,李妍,王标,等.电动汽车充电控制的深度增强学习优 化方法[J].中国电机工程学报,2019,39(14):4042-4049.
 DU Mingqiu,LI Yan,WANG Biao, et al. Deep reinforcement learning optimization method for charging control of electric vehicles [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14):4042-4049.
- [16] CHAUDHARI K, KANDASAMY N K, KRISHNAN A, et al. Agent-based aggregated behavior modeling for electric vehicle charging load[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,

101

2019,15(2):856-868.

- [17] 林长通.基于充换电模式的电动物流车城市配送路径优化研究[D].北京:北京交通大学,2021.
 LIN Changtong. Research on urban distribution route optimization of electric logistics vehicles based on charging and
- swapping mode[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2021.
 [18] 袁强. 区域限行政策下多能源多车型城市配送车辆路径规划研究[D]. 西安:长安大学,2021.
 YUAN Qiang. Research on the multi-energy heterogeneous fleet vehicle routing planning of urban distribution under re-
- gional traffic restriction[D]. Xi'an:Chang'an University,2021.
 [19] 侯慧,唐俊一,王逸凡,等. 价格与激励联合需求响应下电动汽车长时间尺度充放电调度[J]. 电力系统自动化,2022,46 (15):46-55.

HOU Hui, TANG Junyi, WANG Yifan, et al. Long-time-scale charging and discharging scheduling of electric vehicles under joint price and incentive demand response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15):46-55.

- [20] 杨珺,冯鹏祥,孙昊,等. 电动汽车物流配送系统的换电站选址 与路径优化问题研究[J]. 中国管理科学,2015,23(9):87-96. YANG Jun,FENG Pengxiang,SUN Hao,et al. Battery exchange station location and vehicle routing problem in electric vehicles distribution system[J]. Chinese Journal of Management Science,2015,23(9):87-96.
- [21] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展改革委等 部门关于进一步提升电动汽车充电基础设施服务保障能力的 实施意见[EB / OL]. (2022-01-10)[2022-01-21]. https://www. ndrc.gov.cn / xxgk / zcfb / ghxwj / 202201 / t20220121_1312634. html?code=&state=123.
- [22] 上海市发展和改革委员会.《关于本市电动汽车充电设施用电价格政策有关事项的通知》[EB / OL]. (2021-09-16)[2021-09-21]. https://fgw.sh.gov.cn / fgw_jggl / 20211229 / 1a2b2f07425 e4fb0a19e007d1cecbaf6.html.
- [23] 吕林,许威,向月,等. 基于马尔科夫链充电负荷预测的多区域 充电桩优化配置研究[J]. 工程科学与技术,2017,49(3): 170-178.

LÜ Lin, XU Wei, XIANG Yue, et al. Optimal allocation of charging piles in multi-areas considering charging load forecasting based on Markov chain [J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(3): 170-178.

[24] 董婷婷. 增程式电动车能量管理及电池寿命研究[D]. 长春: 吉林大学,2013.

DONG Tingting. Study on energy management and battery life for extended-range electric vehicle [D]. Changchun; Jilin University, 2013.

- [25] 金珈辉,刘永慧,苏庆堂.基于储能利用的充换电站电池调度 路径优化[J].控制工程,2022,29(9):1658-1666. JIN Jiahui,LIU Yonghui,SU Qingtang. Research on battery dispatching path optimization of charging and swapping station based on energy storage utilization[J]. Control Engineering of China,2022,29(9):1658-1666.
- [26] 张谦,邓小松,岳焕展,等. 计及电池寿命损耗的电动汽车参与 能量-调频市场协同优化策略[J]. 电工技术学报,2022,37 (1):72-81.

ZHANG Qian, DENG Xiaosong, YUE Huanzhan, et al. Coordinated optimization strategy of electric vehicle cluster participating in energy and frequency regulation markets considering battery lifetime degradation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(1):72-81.

作者简介:



汪顺其

注顺其(2001—),男,主要研究方向为 电动汽车导航与路径规划、交通能源系统优 化(**E-mail**:shunqi_wang2020@163.com);

向 月(1987—),男,副教授,博士,通 信作者,主要研究方向为电动汽车与智能电 网交互(**E-mail**:xiang@scu.edu.cn);

王晏亮(1999—),男,硕士研究生,主 要研究方向为电动汽车与智能电网交互 (**E-mail**:wang_yl0300@163.com)。

(编辑 任思思)

Electric vehicle distribution path planning method considering charging and discharging management during temporary parking

WANG Shunqi, XIANG Yue, WANG Yanliang

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: With the improvement of charging infrastructure support capacity, there is a research value in the interaction behavior and energy transfer that exists between the long time parking behavior and the grid during the electric vehicle distribution work. An electric vehicle distribution path planning method considering temporary parking charging and discharging management in the context of daily dispatch is proposed to improve the efficiency of logistics distribution. Taking into account the constraints of real-time electricity price, on-board electric quantity, load limit and single-side delivery time window, and considering battery loss, charging station service time, time-of-use electricity price and real-time service fee, an electric vehicle distribution path optimization model with the minimum sum of delivery time, power consumption cost, vehicle cost and delivery delay penalty is constructed, which is solved by simulated annealing improved genetic algorithm. Taking a 26-node road network structure as an example, it is verified that the proposed method can effectively reduce the total distribution cost, reduce the risk of insufficient endurance, and improve the interaction potential of transportation and energy.

Key words: electric vehicles; logistics distribution; temporary parking; path optimization; charging and discharging management

附录 A





初始种群生成、交叉、变异、遗传的编码细节如下。

图 A2 NSGA-II 编码细节曲线示意图 Fig.A2 Curve diagram of NSGA-II coding details

EV 路径决策变量采用自然数编码,其中0作为分割标识符将不同EV 路径分离。其余自然数分别代表节点标号。充电决策在提取每个EV 路径的基础上插缝编码,根据式(10)进行自然数编码, 总体流程按图A1 求解。

对于充电决策的生成,提取某辆 EV 配送出行链,对于优先慢充,充电电量可由式(A1)构成。

$$Q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{N_{\rm c}-1} Q_{\rm char.slow} + Q_{\rm res}$$
(A1)

式中: $Q_{\text{char.slow}}$ 为临时驻车全部用来慢充下所能充电电量; Q_{res} 为根据式(35)所计算的剩余充电电量; N_{c} 为总充电次数。

根据式(40)电价排序向量 $M_{
ho}$,有存储经过时空节点电费排序:

$$\boldsymbol{M}_{\rho} = [m_1, m_2, ..., m_M] \tag{A2}$$

此时, 充电成本
$$\sum_{i}^{i} \rho^{*}(i,t)Q_{i,char}$$
 可通过下式计算:
 $\sum_{i}^{i} \rho^{*}(i,t)Q_{i,char} = Q_{char,slow} \sum_{i=1}^{i} m_{i} + Q_{res}m_{N_{c}} \quad Q_{res} < Q_{char,slow}$ (A3)

$$\sum_{i} \rho^{*}(i,t)Q_{i,\text{char}} = Q_{\text{res}}m_{1} + Q_{\text{char,slow}}\sum_{i=2}^{N_{c}}m_{i} \quad Q_{\text{res}} > Q_{\text{char,slow}}$$
(A4)

式(A3)对应停充混合,式(A4)对应快慢混充。基于上述情况,在不考虑式(36)所示的电量不

等式限制约束下,显然充电成本最低,若不能满足式(36),则选择充电决策调用整数规划求解器,对^M, 重新排序,对于每条给定 EV 出行链,满足如下线性整数规划:

$$\min\{Q_{\text{char.slow}} \sum_{i=1}^{N_{c}-1} m_{i} + Q_{\text{res}} m_{N_{c}}\}$$
s.t.
$$\begin{cases} x_{i} \in \{1, 2, \dots, M\} \\ Q_{i.\text{start}} + \Delta Q_{i.\text{char}} \leq Q_{\max} \quad y_{i,k} = 1 \\ Q_{i.\text{end}} - P_{\text{drive}} d_{ji} \geq Q_{\min} \quad x_{ij,k} = 1 \end{cases}$$
(A5)

附录 B

Table B1 EV parameters					
参数	参数值	参数	参数值		
行车速率/ (km h ⁻¹)	20	快充损耗系数	1.2		
容量 Q/(kW h ⁻¹)	60	最大荷载量/t	3		
每千米能耗/ (kWh km ⁻¹)	0.3	最大车辆台数	5		
车载货物限重/kg	200	电池最小电荷	0.1		
慢充速率(已计及 效率)/ kW	4	电池最大电荷	1		
快充极限功率/ kW	60	每辆车启动费用/ 元	80		

表 B1 EV 参数

表 B2 节点坐标参数 Table B2 Node coordinate parameters

				1			
节点	x 坐标/kr	n y坐标/kn	n 货物需求量/kg	古点	x 坐标/ki	m y坐标/k	xm 货物需求量/kg
0	40	50	0	13	22	75	30
1	45	68	10	14	22	85	10
2	45	70	30	15	20	80	40
3	42	66	10	16	20	85	40
4	42	68	10	17	18	75	20

表 B3 :	运行环境
Table B3 Opera	ting environment

元件	参数		
处理器	Intel (R)	Core (TM)	i5-8265U CPU @ 1.60GHz
内存		8	GB
软件环境		Matlał	o R2019b
核心/线程数			4/8



图 B1 节点信息

Fig.B1 Node information





附录 C

表 C1 情形 1 的仿真结果

Table C1 Simulative results of Scenario 1				
参数	仿真结果			
行驶时间/min	483.0693			
充电费用/元	110.76			
车辆费用	800			
延迟时间/min	0			
总折算成本	1393.83 元			
配送路线1	$0 \rightarrow 10 \rightarrow 7 \rightarrow 6 \rightarrow 9 \rightarrow 8 \rightarrow 0$			
配送路线 2	$0 \rightarrow 5 \rightarrow 3 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 11 \rightarrow 0$			

 $0 \rightarrow 20 \rightarrow 24 \rightarrow 25 \rightarrow 22 \rightarrow 21 \rightarrow 23 \rightarrow 0$ $0 \rightarrow 13 \rightarrow 17 \rightarrow 18 \rightarrow 19 \rightarrow 15 \rightarrow 16 \rightarrow 14$

→12→0

配送路线3

配送路线4

参数	仿真结果			
行驶时间/min	461.3736			
充电费用/元	0			
车辆费用	800			
延迟时间/min	0			
总折算成本	1261.3736			
配送路线1	$0 \rightarrow 20 \rightarrow 24 \rightarrow 25 \rightarrow 22 \rightarrow 21 \rightarrow 23 \rightarrow 0$			
配送路线 2	$0 {\rightarrow} 5 {\rightarrow} 3 {\rightarrow} 1 {\rightarrow} 2 {\rightarrow} 4 {\rightarrow} 6 {\rightarrow} 9 {\rightarrow} 11 {\rightarrow} 0$			
配送路线3	$0 \rightarrow 8 \rightarrow 7 \rightarrow 10 \rightarrow 0$			
西口: 半 肉 小 	$0 \rightarrow 13 \rightarrow 17 \rightarrow 18 \rightarrow 19 \rightarrow 15 \rightarrow 16 \rightarrow 14$			
配达路线4	$\rightarrow 12 \rightarrow 0$			
	表 C3 情形 3 的仿真结果			
Table C	3 Simulative results of Scenario 3			
参数	仿真结果			
行驶时间/min	461.2271			
充电费用/元	121.1376			
车辆费用	800			
延迟时间/min	0			
总折算成本	1382.3647			
配送路线1	$0 \rightarrow 5 \rightarrow 3 \rightarrow 7 \rightarrow 0$			
配送路线2	$0 {\rightarrow} 13 {\rightarrow} 17 {\rightarrow} 18 {\rightarrow} 19 {\rightarrow} 15 {\rightarrow} 16 {\rightarrow} 14 {\rightarrow} 12 {\rightarrow} 0$			
配送路线3	$0 \rightarrow 20 \rightarrow 24 \rightarrow 25 \rightarrow 21 \rightarrow 22 \rightarrow 23 \rightarrow 0$			
配送路维 /				

表 C2 情形 2 的仿真结果 Table C2 Simulative results of Scenario 2

表 C4	运行时长分析
Table C4	Runtime analysis

	5			
算法与求解平台	平均时间/s	最短时间/s		
NSGA-II	41.1	39.2		
NSGA-II+并行计算	28.2	27.5		
NSGA-II+探查器	170.9	166.3		

注: 以上时长针对 6.1 节仿真实验;并行计算调用 p=parpool (4) 命令,即 4 核并行计算;探查器用于分 析算法性能;通过分析模块运行时长以修改代码完善性能。



图 C1 3 种情形仿真结果对比 Fig.C1 Comparison of simulative results among three scenarios



注:适应度为将式(38)目标函数取负并对迭代过程所有存储值归一化所得结果;图中 x 轴迭代次数对应图 3 最外层循环迭代次数



图 C3 充放电情景下配送 EV 电量变化 Fig.C3 Change of electric quantity of distributed EV under charging and discharging scenario