

基于电动汽车的动态需求车辆路径问题

邵赛, 毕军, 关伟

(北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044)

摘要: 为了响应客户动态需求, 首先提出了基于更新时间的路线更新策略对路线进行实时在线调整。然后, 建立了充电模型为有充电需求的路线分配充电站。最后, 给出实例仿真路线更新过程, 以策略运行时间和总额外成本作为评价指标对更新时间进行参数分析。结果显示: 更新时间越少的策略越能够快速响应需求及降低成本; 随着更新时间的增加, 需要处理的动态需求和充电次数增多导致策略运行时间和成本增加; 最长的策略运行时间在可接受范围之内, 说明策略具有可行性和实用性。

关键词: 交通运输系统工程; 电动汽车; 车辆路径问题; 动态需求; 充电; 路线更新策略

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号:

Electric vehicle routing problem with charging and dynamic customer demands

SHAO Sai, BI Jun, GUAN Wei

(School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To respond dynamic customer demands, a route updating strategy with updating time is proposed to online adjust the routes. Moreover, a charging model is developed to allocate the charging stations to the routes with charging demands in transit. In conclusion, a case presents the simulation of the route updating strategy. In addition, the parameter analysis based on the running time and the extra cost is present. The result shows the strategy with the less updating time can quickly respond the dynamic customer demands and reduce cost. With the increasing updating time, the more and more processed dynamic customer demands and the number of charging lead that the strategy running time and cost are increasing. The most strategy running time is within acceptable limits, which indicates the strategy has the better performance.

Key words: engineering of communication and transportation system; electric vehicle; vehicle routing problem; dynamic customer demands; charging; route updating strategy

0 引言

电动汽车(Electric vehicle, EV)以其良好的环境保护和能源调整效应, 成为推动车辆节能减排, 实现汽车产业技术转型、升级以及跨越发展的主流技术方向。而电动汽车所具备的特性则完全符合现代物流业的客观要求, 与近年来所提出的“绿色物流”^[1]发展方向一致。在政策引导和示范运营推广下, 电动汽车已在物流领域进行初步尝试, 在城市区域为货物进行配送。作为电动汽车配送核心问题, 电动汽车车辆路径问题受到关注。

电动汽车是由全部或部分电能驱动的车辆类

型。但目前由于电池技术问题, 受限的续驶里程使得电动汽车在车辆路径问题上与传统汽油车不相同。并且当完成行程所需的里程不能得到满足, 车辆需要在行驶途中前往充电站补充电量。近几年, 国内外学者对基于电动汽车的车辆路径问题研究不多。大部分是通过考虑不同的影响因素如续驶里程约束、充电约束、载重约束或者时间窗约束等去建立模型, 最后采用算法进行求解。Sevgi等^[2]针对电动汽车续驶里程少和充电设施缺乏, 考虑时间窗约束, 提出绿色车辆路径问题, 运用两种启发式算法求解以求到达总的行驶距离最少; Schneider等^[3]研究电动汽车在物流问题“最后一公里”的应用, 考

收稿日期: 2016-09-01.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(T15JB00150);国家自然科学基金创新研究群体项目(71621001).

作者简介: 邵赛(1989-), 女, 博士研究生.研究方向: 电动汽车,智能交通等. E-mail: shaosai@bjtu.edu.cn

考虑顾客时间、货物重量、续驶里程约束，提出了电动物流车路径优化和调度模型，避免长时间配送货物的无用路线，且能在剩余里程不能满足配送任务的情况下选择合适充电站充电；Conrad 等^[4]考虑里程约束并允许车辆可在客户点进行充电，提出充电车辆路径问题，最后预测平均行驶里程；Worley 等^[5]同时结合充电站选址问题和电动汽车车辆路径问题建立模型。刘华旭^[6]重点考虑续驶里程约束、充电需求和充电时间，建立电动汽车物流配送调度模型，并用蚁群算法进行求解，最后分析各配送计划的合理性。高升^[7]构建以总配送成本最小为目标的电动汽车车辆路径问题模型。

在上述研究中，所有信息都是确定的。但在实际物流配送中，一些信息如顾客需求和交通状况往往存在不确定性。这些不确定的信息很有可能会动态改变路线，这时我们需要进行及时调整。因此，从 20 世纪 90 年代开始，动态车辆路径问题引起了广泛地关注和研究。Psarafti^[8]将动态问题定义为：不是所有信息在制定路线之前都已知，而是随着初始路线的执行逐步获得；并且一些有关初始路线的信息会随着时间的变化而变化。根据不同的动态特性，动态车辆路径问题分为多种^[9]。动态需求车辆路径问题为其中的一个重要分支。熊浩^[10]将动态需求车辆路径问题定义为：在现代信息技术条件下，在执行路径的过程中，顾客需求相关信息随时间不断向决策者揭示，且需要对车辆路径实施实时优化的问题。

目前，还未有专门针对电动汽车的动态需求车辆路径问题研究。电动汽车作为配送中运输货物的载体，如何在动态环境中充分地发挥其作用并提高配送效率成为本文研究重点。本文通过考虑里程约束和充电需求去解决基于电动汽车的动态需求车辆路径问题，规划合理的配送方案和充电计划，在满足顾客需求的基础上有效地避免在行驶过程中因电量不足造成电池过放或车辆抛锚等情况。

1 问题描述

传统的静态车辆路径问题是根据已知顾客需求输出一组不会发生任何变化的路线组合。而在动态需求车辆路径问题中，随着初始路线的执行，路线需要发生变化以快速地响应动态生成的需求。因此，动态需求车辆路径问题能够及时考虑动态信息的出现，并随着动态需求信息的输入，对路线进行实时

优化。而优化过程相当于对静态车辆路径问题重新进行求解，属于 NP hard 问题。对于大型网络而言，求解速度较慢。而且信息变化迅速，花费较多时间求出的最优方案有可能并不适合当前状况。因此我们需要确定一个描述输出路线如何在实时信息输入后产生的策略，去规定行动与系统状态之间的关系。为保证实时动态性，需要配备相应的车辆导航系统、信息通信系统和中心优化系统等，用于实时接收、处理和反馈车辆信息、顾客信息及路线信息。

由于电动汽车由电能驱动的特殊性，充电是电动汽车在行驶过程中面对的问题之一。当电池电量不足以完成整个行程时，公共充电站为在行驶途中的车辆提供快速便利的充电服务。本文采用的充电方式为快充，其能够在 30 min~1 h 内快速地完成整个充电过程。充电站可能不会位于既定的行驶线路上，从而车辆会发生行驶偏移，增加额外成本。所以，充电时间和充电成本的增加使得路线调整更加复杂，如何为有充电需求的车辆分配最合理的充电站也是本文研究之一。

综上所述，基于电动汽车的动态需求车辆路径问题可以描述如下：车辆首先按照初始路线给上一工作日的预约顾客送货；但是由于车辆执行配送任务中动态需求的生成，使得路线需要在线实时调整；并且在路线更新时需为有充电需求的路线分配充电站以完成后续行程。由于该问题考虑充电、充电站、载重和动态需求等多个因素，所以为简化问题，本文作如下假设：

- (1) 每个顾客的货运量均不超过车辆装载能力，即来自同一顾客的货物只由一辆车配送。
- (2) 车辆从车场装载货物为预约顾客送货，并从动态需求上取货送往车场。因此在配送过程中，不改变路线上被访问的预约顾客及其顺序。
- (3) 只考虑单车场问题。所有车辆从该车场出发，最后返回车场。
- (4) 为保证动态需求的服务及时性和车辆的配送效率，信息中心只接收时间窗内的动态需求。在 T_0 时刻，车辆开始出发执行初始路线，此时信息中心同时开始接受动态需求信息。在 T_c 时刻，信息中心关闭接收动态需求信息的窗口。
- (5) 所有车辆从起点出发时，电池为满电状态。车辆可以在行驶途中进行多次充电。
- (6) 充电站位置和数量已知。不考虑充电站内部车辆容纳情况，即充电站无条件满足车辆的充电需求。

为更好地描述问题，本文给出简单示例，见图 1。白点和黑点分别表示预约顾客和动态需求，菱形表示充电站。虚线和实线分别表示初始路线和已经完成的路线，点线表示插入动态需求后重新规划的路线。在图 1(a)中，车场内 3 辆车等待分配配送任务，8 个预约顾客等待接收货物。图 1(b)表示求解得到的初始路线：车场→2→8→5→6→车场(路线 1)，车场→4→1→7→3→充电站 1→车场(路线 2)。当路线更新时(图 1(c))，车辆 1 和 2 分别正前往预约顾客 8 和 7。此时需要将生成的 2 个动态需求(9 和 10)插入到未完成的路线中。图 1(d)表示调整后的路线。由于动态需求的生成，初始路线和初始充电计划都被调整。车辆 1 需要离开预约顾客 8 后前往动态需求 9。但是由于车辆偏离行驶去访问动态需求 9 以至于行驶里程增加导致电池电量不足，因此需前往充电站充电。而车辆 2 需要在前往充电站之前绕路去访问动态需求 10。

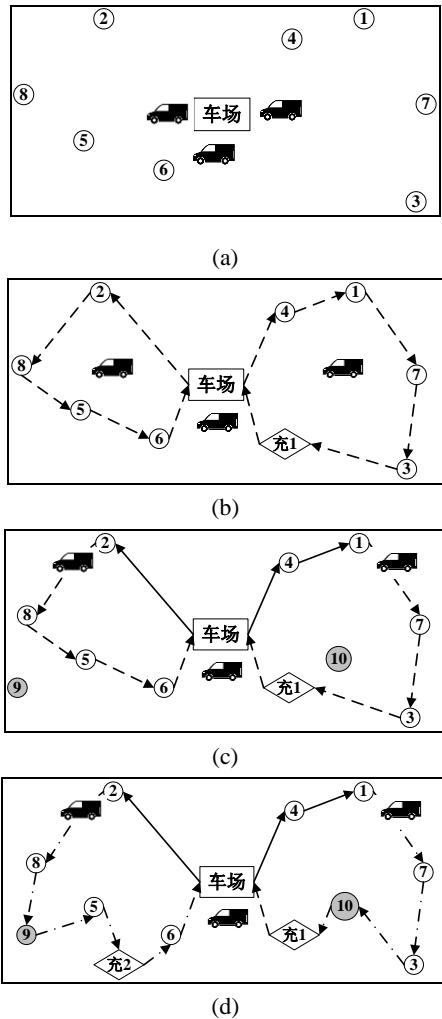


图 1 问题描述示例图

Fig.1 A simplified example of problem description

2 初始路线

对于动态需求车辆路径问题的求解，首先需要安排车辆的初始路线。初始路线是根据预约顾客需求提前制定的配送方案。把初始路线求解看作考虑充电、里程约束和载重约束的车辆路径问题，目标为总成本的最小化。总成本由派车成本、行驶费用及充电费用组成。利用混合整数规划构建模型。模型参数描述如表 1 所示。其中常量参数的取值依据常识经验和实例数据来源(见第 4 节)，确定常量参数取值。不同于路线更新策略的在线求解，初始路线为离线求解，因此对实时性要求不高。考虑到网络和约束的复杂性，本文应用遗传算法对初始路线模型进行求解。

表 1 模型参数描述

Table 1 Description of model parameters

参数	描述	参数	描述
C_0	总成本(元)	t_{ij}	从点 i 到点 j 的行驶时间(分钟), $\frac{d_{ij}}{40km/h} * 60$
Cf_k	派车成本(元)	D_{jk}	车辆 k 到达点 j 的剩余里程(千米)
Ct_k	行驶成本(元)	D_{max}	车辆最大行驶距离, 150 千米
Cr_k	充电成本(元)	d_{ij}	点 i 到点 j 的行驶距离(千米)
c_f	单位派车成本, 50 元/车辆数	q_j	预约顾客 j 的货物重量(千克)
c_t	单位行驶成本, 1 元/分钟	W_{max}	车辆装载容量, 200 千克
c_c	单位充电成本, 30 元/充电次数	t_c	充电时间, 30 分钟
C	预约顾客集合	z_j	0-1 变量。当点 j 有充电站时, 为 1; 否则, 为 0。
K	车辆集合	$0'$	终点(车场)
F	充电站集合	0	起点(车场)
y_{jk}	0-1 决策变量。当车辆 k 在点 j 充电, 为 1; 否则, 为 0。	x_{ijk}	0-1 决策变量。当车辆 k 从点 i 行驶到点 j , 为 1; 否则, 为 0。

$$\text{Min } C_0 = \sum_{k \in K} C f_k + C t_k + C r_k \quad (1)$$

Where

$$C f_k = c_f (1 - x_{00'k}) \quad (2)$$

$$C t_k = c_t \left[\sum_{j \in C \cup F \cup 0} \sum_{i \in C \cup F \cup 0} x_{ijk} t_{ij} \right] \quad (3)$$

$$C r_k = c_c \sum_{j \in F} y_{jk} \quad (4)$$

Subject to:

$$\sum_{i \in C \cup F \cup 0} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in C, \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in C \cup F \cup 0} x_{ijk} = \sum_{m \in C \cup F \cup 0'} x_{jmk} \quad (6)$$

$$\forall j \in C \cup F, \forall k \in K$$

$$x_{0jk} = 1 \quad \forall j \in C \cup F \cup 0', \forall k \in K \quad (7)$$

$$x_{i0'k} = 1 \quad \forall i \in C \cup F \cup 0, \forall k \in K \quad (8)$$

$$D_{jk} = [D_{ik} (1 - y_{ik}) + y_{ik} D_{\max} - d_{ij}] x_{ijk} \quad (9)$$

$$\forall j \in C \cup F \cup 0', \forall i \in C \cup F \cup 0, \forall k \in K$$

$$D_{jk} \geq 0 \quad \forall j \in C \cup F \cup 0', \forall k \in K \quad (10)$$

$$D_{0k} = D_{\max} \quad \forall k \in K \quad (11)$$

$$\sum_{j \in C} \sum_{i \in C \cup F \cup 0} x_{ijk} q_j \leq W_{\max} \quad \forall k \in K \quad (12)$$

$$y_{jk} \leq z_j \quad \forall j \in V, \forall k \in K \quad (13)$$

$$y_{jk} = \{0, 1\} \quad \forall j \in V, \forall k \in K \quad (14)$$

$$x_{ijk} = \{0, 1\} \quad (15)$$

$$\forall j \in C \cup F \cup 0', \forall i \in C \cup F \cup 0, \forall k \in K$$

式(1)表示总成本；式(2)表示基于派遣车辆数的派车成本；式(3)表示行驶成本，由行驶里程决定；式(4)表示由充电次数确定的充电成本；式(5)确保每个预约顾客都被访问到；式(6)表示流量守恒准则，

即车辆达到某节点后需保证离开该点；式(7)(8)要求车辆从车场出发，最后返回车场；式(9)(10)为里程约束，即保证车辆抵达任意节点时，其剩余里程不能小于 0。车辆按照两点直线行驶；式(11)表示车辆从起点出发时，电池为满电状态；式(12)为载重约束，即确保货物载重量不超过车辆装载容量；式(13)确保车辆只能在充电站充电；在式(14)(15)中，决策变量 y_{jk} 和 x_{ijk} 表示 0-1 变量。 x_{ijk} 为初始路线。 y_{jk} 为初始充电计划。

3 路线更新策略

当执行初始路线的过程中，为满足不断生成的动态需求，需要提出一种路线更新策略来实时调整路线。目前现有的一次性策略^[11]有：先来先服务策略(First come first served, FCFS)，随机队列中心定位策略(Stochastic queue median, SQM)和邻近优先策略(Nearest neighbor, NN)。相关的路线更新启动机制主要有两种：一种是顾客处更新路线。对于这种更新机制，如果两个顾客相距较远，行驶时间较长，将需要响应更多的动态需求，并且服务时效性较差；另外一种是在更新时间，即每隔一段时间更新路线。这种机制可通过设置不同的更新时间来调整策略以避免响应过多的动态需求，实用性比较强。因此，本文选择更新时间作为路线更新启动机制。并在此基础上，综合考虑充电站位置，里程约束、载重约束和动态需求，提出路线更新策略，目标为额外成本的最小化。额外成本是由于插入动态需求或者分配充电站所产生的额外费用，包括因改变充电计划而产生的额外充电费用和因偏离行驶而造成的额外行驶费用。成本问题是物流作业中最重要的考虑之一。由于本文不涉及时间目标(时间窗、需求相应时间和排队时间等)，因此以额外成本作为策略目标去衡量方案优劣较为合理。路线更新策略流程如图 2 所示。

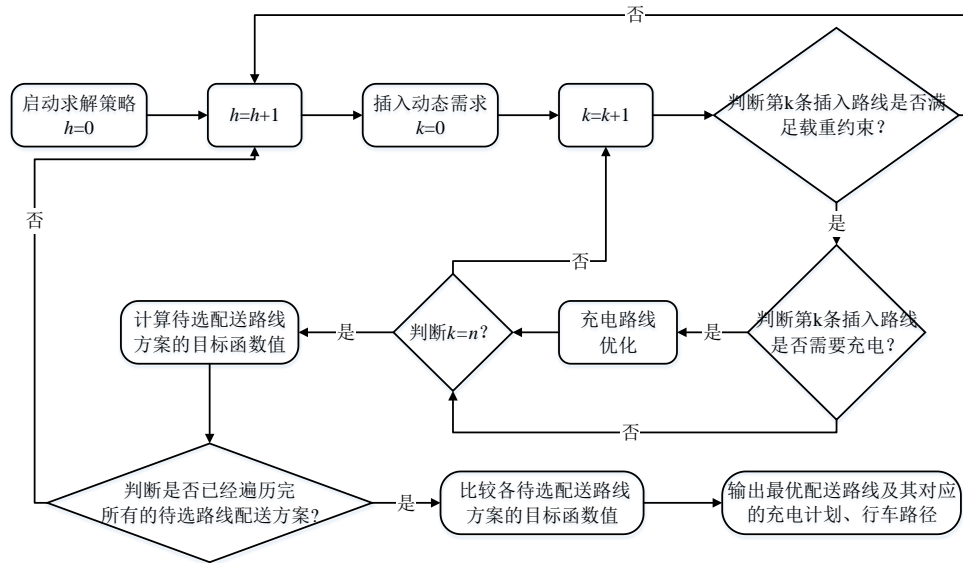


图 2 路线更新策略流程

Fig.2 Procedure of route updating strategy

Step 1: 启动求解策略，未执行完的配送路线及待分配的车辆组成可插入路线集合。这时 $h = 0$ 。

Step 2: $h = h + 1$ 。

Step 3: 插入动态需求。将所有未服务完的动态需求按照到达时间顺序插入到可插入路线集合中，得到第 h 个待选配送路线方案，里面有 n 条配送路线。这时， $k = 0$ 。

Step 4: $k = k + 1$ ；

Step 5: 判断第 h 个待选配送路线方案中的第 k 条配送路线是否满足载重约束。如不满足，重新插入动态需求，返回 Step 2；如满足，转下一步。

Step 6: 为有充电需求的配送路线分配充电站。根据里程约束判断第 h 个待选配送路线方案中的第 k 条配送路线是否需要充电。如果不满足里程约束，则建立充电路线优化问题模型为该配送路线分配充电站，生成充电计划，然后转入下一步；如满足，直接转入下一步。

Step 7: 判断对第 h 个待选配送路线方案中的所有配送路线都执行了 Step 5 和 Step 6。如果 $k = n$ ，则转入下一步；如果 $k \neq n$ ，返回 Step 4。

Step 8: 计算第 h 个待选配送路线方案的目标函数（不满足载重约束的待选配送路线方案的目标值为 ∞ ）。

Step 9: 判断是否已经遍历完所有的待选配送路线方案。如果 $h = q$ （ q 为待选配送路线方案个数），则转入下一步；如果 $h \neq q$ ，重复 Step 2~Step 8。

Step 10: 最后比较各待选配送路线方案的目标

函数值，并从中选出最小目标函数值所对应的待选配送路线方案作为最优配送路线。最优配送路线与其对应的充电计划和行车路径作为优化后的配送方案输出。

3.1 插入动态需求

在路线更新策略流程中，第三步为插入动态需求，其输出一个待选配送路线方案，示例如图 3 所示。图 3(a)表示上一个路线更新策略输出的配送路线。图 3(b)表示路线更新时的系统状态。此时，2 辆车在外执行配送任务，将要到达的节点分别为预约顾客 2 和 1，余下行程称为未完成路线。车场内现有 $m - 2$ 台等待分配任务的车辆，把它们看作 $m - 2$ 条中间不访问任何节点的虚拟路线。虚拟路线与未完成路线构成了可插入路线集合。由于动态需求的插入，导致行驶偏移和行驶里程增加，以至于初始充电计划可能不再适用。因此在未完成路线中插入动态需求时，不考虑初始充电计划，即删除初始路线 2 中被分配的充电站 1。后续将会为有充电需求的插入路线重新分配充电站，见第 4.2 节。插入点为可插入路线集合中任意两个相邻节点之间。插入点的确认解决了动态需求何时被访问的问题。从图 3(b)可以看出，当插入第一个动态需求时，共有 $m + 5$ 个插入点(未完成的路线有 7 个，虚拟路线有 $m - 2$ 个)。随着不断地插入动态需求，节点增多(动态需求也为一个节点)导致插入点也在增加。当插入第 i 个动态需求时，共有 $m + i + 4$ 个插入点。假设有

p 个动态需求, 可得到 $\prod_{i=1}^p m+i+4$ 个待选配送路线

方案。从未遍历的多个待选配送路线方案中选取一个待选配送路线方案。图 3(c)为其中的一个($p=2$)。

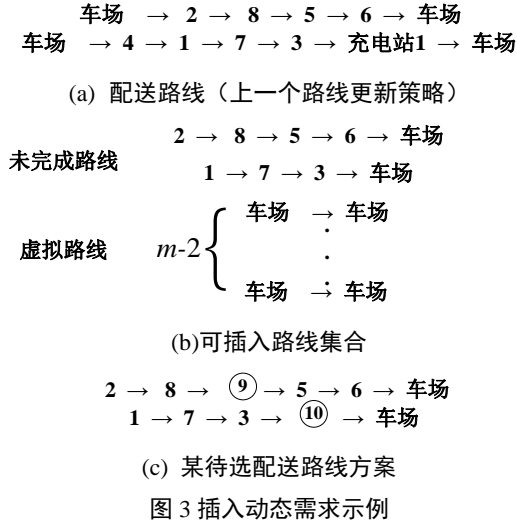


Fig.3 Simplified example of inserting dynamic demands

3.2 分配充电站

插入动态需求后, 需要对待选配送路线方案中的每个插入路线进行载重约束和里程约束判断。由于改变了原路线和原充电计划, 因此插入路线可能会出现电量不足的情况, 即在节点处的剩余里程小于零, 所以这时车辆需要在接下来的行程中前往充电站补充电量, 获得新充电计划。针对单个有充电需求的插入路线, 本文提出充电模型, 目标为最小化因分配充电站而产生的额外成本。由于模型较为简单, 运用精确算法中的分支定界算法进行模型求解。

$$\text{Minimize } Z = Z_1 + Z_2 \quad (16)$$

$$Z_1 = c_t \left(\sum_{i=1,2,\dots,l-1} t_{r_i r_{i+1}} - \sum_{i=1,2,\dots,n-1} t_{r_i^0 r_{i+1}^0} \right) \quad (17)$$

$$Z_2 = c_c \sum_{i=1,2,\dots,l} \sum_{j \in F} y_{r_i j} \quad (18)$$

Subject to:

$$y_{r_i j} \leq z_j \quad i=1,2,\dots,l, \quad \forall j \in F \quad (19)$$

$$D_{r_{i+1}} = [D_{r_i} (1 - y_{r_i j}) + y_{r_i j} D_{\max} - d_{r_i r_{i+1}}] \quad (20)$$

$$i=1,2,\dots,l-1$$

$$D_{r_i} \geq 0 \quad i=1,2,\dots,l \quad (21)$$

$$y_{r_i j} \in \{0,1\} \quad i=1,2,\dots,l, \quad \forall j \in F \quad (22)$$

r_i^0 表示插入路线中的某节点, 其访问顺序为 i 。

n 表示插入路线的节点数。 r_i 表示新插入路线中的某节点, 其访问顺序为 i 。 l 表示新插入路线的节点数。

$y_{r_i j}$ 为决策变量, 当节点 r_i 为充电站 j 时为 1,

否则为 0。 D_{r_i} 表示在节点 r_i 的剩余里程。 D_{\max} 、 $d_{r_i r_{i+1}}$

和 F 定义同表 1。

式(16)表示最小化额外成本, 由额外充电费用(式(17))和额外行驶费用(式(18))组成; 式(19)确保车辆只能在充电站补充电量; 式(20)(21)表示里程约束; 式(22)表示 $y_{r_i j}$ 为 0-1 变量, 表示新充电计划。

3.3 路线更新策略流程输出

本文采用穷举法(即遍历完所有的待选配送路线方案)得到多个待选配送路线方案。以额外成本最小化为目标, 对比所有的待选配送路线方案, 从中选出一个最优待选配送路线方案。在下一个更新时间到来之前, 车辆将按照该最优待选配送路线方案执行。

4 算例

算例的主要数据主要来源于 Solomon 设计的 C101, 其中包括 1 个车场地理位置, 100 个顾客地理位置和 25 辆车辆。并在网格上随机生成 20 个充电站(编号 S1~S20)地理位置。各节点(车场、顾客和充电站)地理位置如图 4 所示。

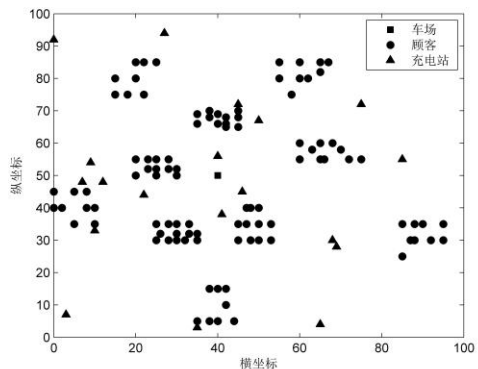


图 4 各节点(车场、顾客和充电站)地理位置

Fig.4 Node locations

4.1 动态需求生成

从 100 个顾客中随机选取 50 个顾客作为动态需求(编号 50~100),剩下顾客作为预约顾客(编号 1~50)。应用泊松分布产生动态需求的到达时间。当到达率 $\lambda = 5$ 时(参数 λ 表示单位时间 1 h 内生成的平均动态需求个数),在时间窗内(本文假设信息中心接收动态需求信息的时间窗为 8:00~15: 00)共生成有 30 个动态需求生成。结合 C101 数据,按小时为时间单位对各动态需求位置进行统计,如图 5 所示。

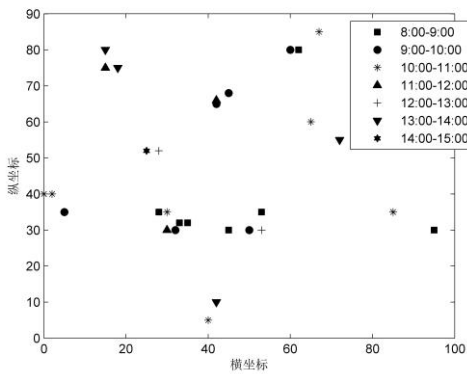


图 5 动态需求的位置分布(8:00~15: 00)

Fig.5 Location distribution of dynamic demands

4.2 初始路线求解

针对 50 个预约顾客的初始路线结果如表 2 所示。结果显示共有 8 辆车被派出执行预约顾客的配送任务。但由于里程受限,路线 5、7 需在充电站补充电池电量。为更好地可视化,在网格上规划出路线(以路线 5 为例),如图 6 所示。

表 2 初始路线

Table 2 Initial routes

车辆	初始路线	目标 (总成本)
1	车场 -24-26-17-18-29-28-27-25-车场	271.74
2	车场-30-33-22-12-车场	157.59
3	车场-42-41-43-44-36-车场	165.85
4	车场-45-50-1-车场	179.75
5(充电)	车场-21-11-4-3-S17-39-40-34-31	458.96

	-23-车场	
6	车场-32-38-37-35-车场	236.51
7(充电)	车场-14-16-6-10-8-S1-20-2-7-9-5-车场	388.65
8	车场-19-15-13-49-48-47-46-车场	230.74

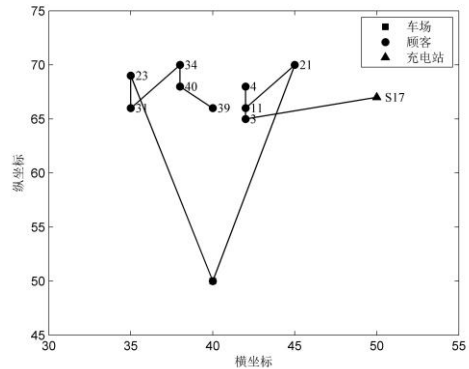


图 6 行驶线路(路线 5)

Fig.6 Driving path (Route 5)

4.3 路线更新结果

随着动态需求的加入,路线更新策略对路线动态调整,并对有充电需求的路线分配充电站。首先设置更新时间为 60 min(即每隔 60 min 更新路线)对路线更新过程进行仿真,结果如表 3 所示。调整后的路线的起点为该车辆将要到达的下一个节点。

(1)当 9:00 时,路线更新策略第一次启动。此时,初始路线中所派出的 8 辆车依旧在执行配送任务。从 8:00 到 9:00 产生的 6 个动态需求(51~56)分别被插入到路线 1、5、6 和 8。对于路线 8 而言,由于动态需求 56 的插入,导致车辆现有的剩余里程不足以完成整个行程,因此车辆需要在服务完预约顾客 13 后前往充电站 17 补充电量。而对于路线 5 来说,随着多个动态需求的插入,初始充电计划已经不再适合,因此重新分配了充电站,从充电站 17 变成充电站 10。由于没有被插入任何动态需求,路线 2、3、4 和 7 未有任何变化。

(2)当 10:00 时,车辆 2 和 3 已经返回车场并等待分配新的配送任务。而车辆 4 和 6 已经完成所有配送任务,正在返回车场的路上。从 9:00 到 10:00 期间,共产生 6 个动态需求(57~62),分别被插入到路线 1、5、7 和 8 中。虽然这些路线有了稍许变化,但是依然满足里程约束,因此并不没有改变上一阶段的充电计划。

(3)随着时间推移,路线及充电计划在不断地动态调整。部分车辆由于已经完成已有的配送任务且

又不需要去访问动态需求而返回车场，重新等待新的配送任务分配。当动态需求接收时间窗关闭时(15:00)，只剩下两条路线在线。但根据里程约束，路线 5 需要分配充电站。而在路线 7 中，车辆只要服务完 4 个动态需求返回车场即可。

(4)即使在路线更新策略中允许重新派出车辆，但所有的动态需求依然插入到未完成的路线上。这是因为在当前数量的动态需求下，一次充电就可以满足插入路线的充电需求，而且重新派车成本(50 元)略高于一次充电成本(30 元)，所以每当路线更新时在满足载重约束的前提下策略优先选择插入路线一次充电。

表 3 路线更新结果

Table 3 Result of updating routes

更新时间点	车辆	调整后的路线
9:00	1	17-18-29-28-27-25-55-车场
	2	12-车场
	3	44-36-车场
	4	50-1-车场
	5(充电)	21-11-4-3-S10-39-40-52-34-31-54- 57-51-23-车场
	6	38-37-53-35-车场
	7(充电)	6-10-8-S1-20-2-7-9-5-车场
	8(充电)	15-13-S17-49-48-47-4-6-56-车场
10:00	1	29-28-27-61-25-55-车场
	4	车场
	5(充电)	4-3-58-S10-39-40-52-34-63-31-54- 57-51-23-车场
	6	车场
	7(充电)	S1-20-59-2-7-9-5-车场
	8(充电)	S17-49-62-48-47-46-56-60-车场
	1	25-55-70-车场
	5(充电)	39-65-S19-40-68-52-34-63-31-54- 66-57-51-23-车场
11:00	6	车场
	7	20-69-67-59-2-7-9-5-车场
	8	48-47-64-46-56-60-车场
	5(充电)	39-65-S19-40-68-52-34-63-31-54- 66-72-57-51-23-车场
12:00	7	2-7-9-71-5-车场
	8	60-73-车场
	5(充电)	S19-40-68-52-34-74-63-31-54-66-
13:00	5(充电)	S19-40-68-52-34-74-63-31-54-66-

		72-57-51-23-车场
	7(充电)	7-9-71-5-S2-75-车场
14:00	5(充电)	68-76-52-34-74-63-31-54-77- -66-S7-72-57-51-23-车场
	7(充电)	S2-78-79-75-车场
	5(充电)	52-34-74-63-31-54-77-66-S7-72-57- -51-23-车场
15:00	7	78-79-80-75-车场

4.4 参数分析

在路线更新策略中，更新时间的设置在很大程度上影响路线调整结果。因此为分析这个参数的影响，本文针对不同的参数值情况下进行实验，并以总额外成本和运行时间为指标评价路线更新策略的优越性。总额外成本定义为满足时间窗内生成的所有动态需求所产生的额外费用。运行时间定义为运行一次策略所花费的平均计算时间。平均计算时间由时间窗内多次运行策略的总时间除以运行策略次数求得。

表 4 参数分析结果

Table 4 Parameter analysis

更新时间/min	总额外成本/元	运行时间/s
10	390.28	0.0062
20	390.38	0.0093
30	418.91	0.0104
40	412.38	0.0137
50	563.64	131.2694
60	445.36	0.0139
70	585.28	150.6474
80	538.47	185.873

参数分析结果如表 4 所示，从表中得到如下结论：

(1)当更新时间最长时(80 min)，运行时间为 185.873 s(3 min5 s)，为 8 个实验中最长。这是因为更新时间间隔较长导致每个时间段所积累的动态需求较多，所以遍历完所有的待选配送路线方案所耗费的时间较长。再加上有充电需求的插入路线增加，使得充电模型求解时间也在增长。但相比较于配送时间、行驶时间及充电时间来说，该运行时间较少，是在可接收范围之内。结果说明本文所提出的路线更新策略具有较好的在线实时处理能力。

(2)由于动态需求和充电次数增多,所以整体上(更新时间为 50 min 除外),总额外成本和运行时间随着更新时间的增加呈上升趋势。即使有个别相邻值下降,但相差不大。更新时间为 50 分钟的实验有个较大的突变是因为在路线更新前期节点之间距离较远,所以时间段内已经访问的节点数较少,未完成的路线中的节点较多。而这将导致遍历完所有的待选配送路线方案所花费的时间和充电模型求解时间变长。而更新时间为 60 min 的路线更新中,时间段内已经访问的节点数变多,而在需处理的动态需求数与 50 min 的实验相差不大,所以相比较于更新时间为 50min,更新时间为 60 min 的总额外成本和运行时间明显减少。

(3)无论从总额外成本还是运行时间来看,更新时间为 10 min 的路线更新策略性能最优。更新时间越少的路线更新策略不仅能够快速地满足动态需求,并减少成本。但当解决具有大量动态需求的车辆路线问题时,实时性越强的路线更新策略对软硬件要求越高。信息中心可根据自身的条件及动态需求数量综合考虑,动态调整路径更新策略。

5 结束语

本文首先考虑预约顾客需求、充电、里程约束和载重约束去建立基本车辆路径问题,利用遗传算法求解模型得到初始路线。然后提出一种基于更新时间的路线更新策略对路线进行在线实时调整以满足不断生成的动态需求,并且建立充电模型对有充电需求的路线分配充电站以避免因电量不足造成电池过放或车辆抛锚等情况。最后,由 50 个预约顾客、50 个动态需求和 20 个充电站组成的算例仿真路线更新过程。随着动态需求的插入,路线和充电计划不断地发生变化。但由于重新派车成本较高,路线更新策略优先选择插入路线的一次充电。参数分析实验对所提出的路线更新策略进行评价。结果可得策略具有较好的实时性和实用性,并且更新时间越少的策略更能够快速响应动态需求及减少成本。

参考文献

- [1] GB/T18354-2001.物流术语[S].
- [2] Sevgi E, Miller-hooks E. A green vehicle routing problem[J]. *Transportation Research Part E: Logistics & Transportation Review*,2012,48:100-114.
- [3] Schneider M, Stenger A, Goeke D. The electric

vehicle-routing problem with time windows and recharging stations[J]. *Transportation Science*,2014,48(4):500-520.

[4] Conrad R G, Figliozzi M A. The recharging vehicle routing problem[C]//61st Annual IIE Conference and Expo Proceedings, Reno, United States,2011.

[5] Worley O, Klabjan D, SWEDA T M. Simultaneous vehicle routing and charging station siting for commercial electric vehicles[C]//2012 IEEE International Electric Vehicle Conference, Greenville, SC, USA, 2012:1-3.

[6]刘华旭. 基于电动汽车技术特征的共同配送调度优化研究[D]. 北京: 北京交通大学交通运输学院,2012.

Liu Hua-xu. Joint Distribution scheduling optimization based on the features of electric vehicle[D]. Beijing: School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University,2012.

[7]高升. 基于电动汽车的带时间窗的路径优化问题研究[D]. 大连: 大连海事大学交通运输管理学院,2015.

Gao Shen. Electric vehicle routing optimization problem with time window[D]. Dalian: College of Traffic and Transportation Management, Dalian Maritime University,2015.

[8]Psaraftis H N. Vehicle Routing: Methods and Studies [M]. Amsterdam: Holland,1988.

[9]Pillac V, Gendreau M, Guéret C, et al. A review of dynamic vehicle routing problems[J]. *European Journal of Operational Research*,2013,225(1):1-11.

[10]熊浩. 动态需求车辆路径问题实时优化策略研究[M]. 北京: 经济科学出版社,2014.

[11]陆琳. 不确定信息车辆路径问题及其智能算法研究[M]. 北京: 科学出版社,2010.