

3-22-2022

Path-Based Model for the Heterogeneous-Fleet Electric Vehicle Routing Problem with Partial Linear Recharging

Weiquan Wang

1.School of International Trade and Economics, University of International Business and Economics, Beijing 100029, China;3.Department of Information Management, University of International Business and Economics, Beijing 100029, China;; wangweiquan@uibe.edu.cn

Ding Ding

1.School of International Trade and Economics, University of International Business and Economics, Beijing 100029, China;; dingd@uibe.edu.cn

Linsha Yan

2.School of Government, University of International Business and Economics, Beijing 100029, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Path-Based Model for the Heterogeneous-Fleet Electric Vehicle Routing Problem with Partial Linear Recharging

Abstract

Abstract: The heterogeneous-fleet electric vehicle routing problem with partial linear recharging is studied for realistic logistics distribution scenarios using multiple electric vehicle fleets with different transport capacities, driving ranges and acquisition costs. *A path-based mixed integer linear model is proposed. The model enumerates the paths visited by all vehicle types between any non-charging nodes, eliminates the infeasible paths through capacity constraints and time window constraints, and eliminates the dominated paths by the dominance criterion.* Compared with the traditional charging station replica-based model, this model *eliminates the need to set the number of charging station replicas.* The results show that the model outperforms other models in terms of solution quality and solution speed, and verifies the validity of the model by conducting simulation experiments on the public benchmark instances at different scales.

Keywords

heterogeneous-fleet, partial linear recharging, electric vehicle routing problem, path-based model, dominance rules

Recommended Citation

Weiyan Wang, Ding Ding, Linsha Yan. Path-Based Model for the Heterogeneous-Fleet Electric Vehicle Routing Problem with Partial Linear Recharging[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(3): 614-623.

线性充电策略下多车型电动车辆路径模型研究

王伟权^{1,3}, 丁鼎^{1*}, 颜林莎²(1. 对外经济贸易大学 国际经济与贸易学院, 北京 100029; 2. 对外经济贸易大学 政府管理学院, 北京 100029;
3. 对外经济贸易大学 信息化管理处, 北京 100029)

摘要: 针对现实物流配送场景下使用多种具有不同载重、不同续航里程和不同购置成本的电动车队进行物流配送的问题, 研究了线性可变充电策略下的多车型电动车辆路径问题。提出了基于路径的混合整数线性模型。列举了任意非充电节点之间所有车型访问的路径, 通过负载约束、时间窗约束剔除不可行的路径, 通过占优准则剔除被占优的路径。与传统的基于充电站副本的模型相比, 该模型不再需要设置充电站副本个数。通过对该模型在不同规模下的公共算例进行仿真实验, 结果表明, 该模型在求解质量与求解速度方面优于其他模型, 验证了模型的有效性。

关键词: 多车型; 线性可变充电; 电动车辆路径问题; 基于路径模型; 占优准则

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2022)03-0614-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-1082

Path-Based Model for the Heterogeneous-Fleet Electric Vehicle Routing Problem with Partial Linear Recharging

Wang Weiquan^{1,3}, Ding Ding^{1*}, Yan Linsha²(1. School of International Trade and Economics, University of International Business and Economics, Beijing 100029, China;
2. School of Government, University of International Business and Economics, Beijing 100029, China;
3. Department of Information Management, University of International Business and Economics, Beijing 100029, China)

Abstract: The heterogeneous-fleet electric vehicle routing problem with partial linear recharging is studied for realistic logistics distribution scenarios using multiple electric vehicle fleets with different transport capacities, driving ranges and acquisition costs. A *path-based mixed integer linear model* is proposed. The model enumerates the paths visited by all vehicle types between any non-charging nodes, eliminates the infeasible paths through capacity constraints and time window constraints, and eliminates the dominated paths by the dominance criterion. Compared with the traditional charging station replica-based model, this model eliminates the need to set the number of charging station replicas. The results show that the model outperforms other models in terms of solution quality and solution speed, and verifies the validity of the model by conducting simulation experiments on the public benchmark instances at different scales.

Keywords: heterogeneous-fleet; partial linear recharging; electric vehicle routing problem; path-based model; dominance rules

引言

在国家政策的激励下, 电动物流车辆在中国大

幅度增长, 但从物流企业的角度来看, 纯电动汽车与汽油车相比, 面临着如下 3 个问题: ①购置成本

收稿日期: 2021-10-26

修回日期: 2021-11-04

基金项目: 北京市社会科学基金(17GLB026); 对外经济贸易大学中央高校基本科研业务费(16JQ01, 19YB06)

第一作者: 王伟权(1991-), 男, 博士生, 研究方向为电动车辆路径优化。E-mail: wangweiquan@uibe.edu.cn

通讯作者: 丁鼎(1977-), 男, 博士, 副教授, 博导, 研究方向为物流与供应链管理。E-mail: dingd@uibe.edu.cn

过高。目前多数纯电动卡车的购置成本仍高于同级别的燃油车。②充电时间较长。充电速度的快慢取决于充电站功率的大小,以功率最大的超充为例,需要1h才能充满电,相比于汽油车的加油时间,充电时间过长。③续航里程较短。电动车辆续航里程取决于搭载的电池容量,而搭载高容量的电池将挤压车辆的运载空间,电池容量不足又无法保障车辆的正常行驶,产生“续航焦虑”。此外,为了适应不同物流配送场景,物流公司通常会使用多种车型进行物流配送。因此,研究多车型电动车辆路径问题具有很重要的现实意义。

文献[1]研究了绿色车辆路径(green vehicle routing problem, G-VRP)问题。文献[2]提出了带时间窗的电动车辆旅行商(electric traveling salesman problem with time windows, E-TSPTW)问题,但未考虑容量约束。文献[3]研究了线性完全充电策略下带时间窗的电动车辆路径(electric vehicle routing problem with time windows with full recharging, E-VRPTW-FR)问题,考虑了容量约束、里程约束和时间窗约束。文献[4]在文献[3]的基础上做了进一步拓展,研究了4种不同的充电情形并提出了分支定价算法,可精确求解至100个商户规模。上述的研究皆针对单一车型。文献[5]提出了混合车队的VRP(fleet size and mix VRP, FSM-VRP)问题,考虑了具有不同购置成本的车队,并且行驶里程成本取决于车辆类型。文献[6]提出了E-VRPTW和混合车队(E-VRPTW-MF)问题,考虑了3个目标函数:总行驶距离,包含电池成本的总成本和不包含电池成本的总成本。文献[7]研究了线性完全充电策略下的多车型电动车辆路径(the electric fleet size and mix vehicle routing problem with time windows and full recharging, E-FSMFTW-FR)问题,考虑使用不同载重、电池容量和购置成本的车型进行物流配送。文献[8]继续研究了具有时间窗和充电站的混合异构电动车队路由问题,其车队中包含了纯电动汽车、插电式混合动力汽车和汽油车3种车型。该作者比较了使用同类型

汽油车、电动汽车和插电式混合动力汽车获得的解决方案与使用混合车队的最优解决方案的总成本。文献[9-12]对多车型和混合车型电动车辆问题进行了研究。在充电策略方面,文献[13-15]提出了线性可变充电策略,即车辆在充电站可充任意电量。文献[16-17]则更进一步研究了非线性充电策略。

此外,启发式算法也是车辆路径问题在仿真领域的研究重点,这类算法的特点是求解速度快,结构灵活。该类算法有大规模邻域搜索算法^[18-22]、变邻域搜索算法^[23]、遗传算法^[24]、蚁群算法^[25]、粒子群算法^[26]、智能水滴算法^[27]等,而启发式算法的缺点是不保证找到最优解。

总结现有研究成果可知,暂未有学者考虑线性可变充电策略下的多车型电动车辆路径问题。鉴于此,本研究将E-FSMFTW问题与线性可变充电策略进行结合,对E-FSMFTW-PR(EFSMFTW with partial linear recharging)问题提出了一种新的基于路径的模型,并对该问题进行仿真实验。

1 问题描述

E-FSMFTW-PR表述如下:某物流企业有若干种不同续航里程、不同负载和不同固定成本的电动车型。该物流企业有一个配送中心,需要对全市的商户进行服务。每个商户都有时间窗和服务时间。该城市有若干个充电站,每个充电站有足够的电力和车位允许多个车辆同时充电。车辆需从配送中心出发,服务完商户后返回配送中心,如果提前到达商户则需等待。车辆需在里程消耗完全之前前往充电站进行充电,充电范围可任意,充电速率恒定,即充电里程与充电时间呈正比线性关系。车辆在运输过程中不得超出该车型最大负载。目标为最小化车辆的固定成本与行驶里程成本之和。

2 相关工作

为精确求解电动车辆路径问题,如何在模型中处理充电站是一个难点。国内外大多数学者将商户

节点、起点配送中心节点、终点配送中心节点和充电站节点进行统一管理，并设置整数决策变量表示任意 2 个节点连接与否。在 E-VRPTW 问题中，文献[3, 13]的模型设置整数决策变量 x_{ij} 表示节点 i 到节点 j 的弧是否被访问，并为每个节点设置了用于表示里程、负载和时间的一维连续决策变量。文献[7-10]针对多车型问题设置了三维整数决策变量 x_{ij}^k 表示车型 k 从节点 i 到节点 j 的弧是否被访问，并为每个节点设置了表示里程、负载和时间的二维连续变量。考虑到现实场景下，同一个充电站可以被不同车辆多次访问，且每个充电节点都有不同的到达时间，因此这类模型需要为每一个充电站添加对应的副本。这里称这类模型为基于充电站副本的模型(replication-based model)。其缺点在于求解时需要先验设置充电站副本的数量，数量设置过多将大幅度增加求解时间，数量设置过少则很可能达不到最

优解。据我们所知，只有文献[16]提出了设置充电站副本数量的准则。

为了避免设置充电站副本，文献[17, 28]分别针对 G-VRP 问题和非线性充电的电动车辆路径问题(E-VRP-NL)提出了基于路径(path-based model)的模型，将任意商户节点或配送中心节点之间可能的路径枚举出来作为 0-1 整数变量。但是 G-VRP 问题和 E-VRP-NL 问题皆为单一车型，且未考虑时间窗约束。

表 1 展示了各类 E-VRP 变种问题的特征。由于线性完全充电策略可以视作线性可变充电策略的一种特殊形式，因此文献[3]研究的 E-VRPTW-FR 问题、文献[13]研究的 E-VRPTW-PR 问题和文献[7]研究的 E-FSMFTW-FR 可视为本文 E-FSMFTW-PR 问题的 3 种特殊形式。本文提出的模型不仅可以解决本文问题，还可以解决这 3 类问题。

表 1 各类 E-VRP 变种问题的特征
Table 1 Summary of the E-VRP features

文献	问题	多车型	容量	时间窗	线性完全充电	可变充电	模型
[3]	E-VRPTW-FR		√	√	√		
[13]	E-VRPTW-PR		√	√		√	
[4]	EVRPTW		√	√	√	√	Replication-based model
[7]	E-FSMFTW-FR	√	√	√	√		
[10]	E-HVRPTW	√	√	√	√		
[2]	E-TSPTW			√	√	√	
[17]	E-VRP-NL					√	Path-based model
本文	E-FSMFTW-PR	√	√	√	√	√	

3 基于路径模型(path-based model)

3.1 枚举路径

通过枚举的方式，将任意 2 个非充电节点(起点配送中心、商户和终点配送中心)之间所有车型通过的路径枚举出来，并将每条路径是否被选中作为 0-1 整数变量。

本文对所有路径的集合 P 通过如下 2 种定义进行分类处理。

定义 $P = P^{DP} \cup P^{CRP}$ 。任意 2 个非充电节点之间只有 2 种连接方式：①直接达到，本文将这类路径集称为直达路径集 P^{DP} ；②访问充电站节点到达，本文将这类路径集称为充电路径集 P^{CRP} 。

定义 $P = \Omega^{OC} \cup \Omega^{CC} \cup \Omega^{CO}$ 。任意 2 个非充电节点之间只有 3 种起点到终点的组合：①从起点配送中心出发到商户终止，这类路径集为 Ω^{OC} ；②从商户出发到商户终止，这类路径集为 Ω^{CC} ；③从商户出发到配送中心终止，这类路径集为 Ω^{CO} 。

本文模型的符号定义如表2所示。由于充电时间可变, 因此通过每一条充电路径 $p \in P^{CRP}$ 的时间是可变的, 它被限定在 $[T_p^{\min}, T_p^{\max}]$ 。 T_p^{\min} 表示该路径 p 不充任何电量通过的时间, T_p^{\max} 表示该路径 p 充最多电量通过的时间。显然, 对于每一条直达路径 $p \in P^{DP}$, 该路径 $T_p^{\min} = T_p^{\max}$ 。此外, 每一条路径 p 有通过该路径的车型 t 对应的最大里程 Q_p 、最大负载 Y_p 和固定成本 f_p 。

表2 本文模型的符号

符号	含义
V	车型的集合
C	商户节点的集合
I	所有节点的集合 $I = C \cup \{0, N+1\}$
P^{DP}	直达路径集
P^{CRP}	充电路径集
Ω^{OC}	从起点配送中心出发到商户终止的路径集
Ω^{CC}	从商户出发到商户终止的路径集
Ω^{CO}	从商户出发到终点配送中心终止的路径集
P	$P = P^{DP} \cup P^{CRP} = \Omega^{OC} \cup \Omega^{CC} \cup \Omega^{CO}$
M	一个充分大的数
D_p	路径 p 的通过距离
T_p^{\max}	路径 p 的最长通过时间
T_p^{\min}	路径 p 的最短通过时间
Q_p	路径 p 的最大负载
Y_p	路径 p 的最大里程
f_p	路径 p 的车辆固定成本
s_i	商户 i 的服务时间
q_i	商户 i 的服务负载
$[\alpha_i, \beta_i]$	节点 i 的服务时间窗
$[A, B]$	配送中心的服务时间窗
π	单位时间内充电的里程
$\phi_L(p)$	路径 $p_{ij} \in P^{CRP}$ 上从 i 到最左充电节点的距离
$\phi_R(p)$	路径 $p_{ij} \in P^{CRP}$ 上从最右充电节点到 j 的距离
R_p	路径 p 上的充电节点个数
x_p	如果车辆访问路径 p 则为1, 反之, 则为0
λ_p	路径 p 上的充电里程
a_i	车辆到达商户 i 的时间
l_i	车辆离开商户 i 的时间
w_i	车辆离开商户 i 的负载状态
r_i	车辆离开商户 i 的里程状态

3.2 剔除不可行路径和被占优路径

以 t 种车型、 m 个非充电节点、 n 个充电站节点为例, 枚举的复杂度为 $\mathcal{O}(tm^2n!)$ 。当商户规模和充电站规模增长时, 所需枚举的路径数量将指数级增长。因此需要通过约束条件和占优准则对枚举的路径进行剔除, 降低枚举路径集的规模。

首先可以通过容量约束和时间窗约束剔除掉不可行的路径。如式(1)所示, 对于任意一条路径 $\forall p_{ij} \in P$, 如果节点 i 与节点 j 的负载之和超出最大负载则为不可行的路径; 如果从节点 i 的最早服务时间开始服务, 到达节点 j 的时间依然超出节点 j 的最晚服务时间则为不可行路径。

$$(q_i + q_j > Q_p) \vee (\alpha_i + s_i + T_p^{\min} > \beta_j) \quad (1)$$

其次可以通过距离信息设置占优准则剔除掉被占优的路径。假设有2条访问充电站节点的路径 $p_1 \in P^{CRP}$ 和 $p_2 \in P^{CRP}$, 它们从左节点到最左侧充电站的距离分别为 $\phi_L(p_1)$ 和 $\phi_L(p_2)$, 它们最右侧充电站到右节点的距离分别为 $\phi_R(p_1)$ 和 $\phi_R(p_2)$, 它们的行驶距离分别为 D_{p_1} 和 D_{p_2} 。如果它们满足式(2), 则路径 p_1 被路径 p_2 占优, 可以剔除掉 p_1 。

$$(D_{p_1} > D_{p_2}) \wedge (\phi_L(p_1) > \phi_L(p_2)) \wedge (\phi_R(p_1) > \phi_R(p_2)) \quad (2)$$

3.3 数学建模

基于上述定义, 本文模型描述如下。

$$\min \sum_{p \in P} x_p D_p + \sum_{p \in \Omega^{OC}} x_p f_p \quad (3)$$

$$\sum_{p \in P_{ij}, j \in N} x_p = 1 \quad \forall i \in C \quad (4)$$

$$\sum_{p \in P_{ij}, i \in N} x_p = 1 \quad \forall j \in C \quad (5)$$

$$\sum_{p \in P_{ij}, j \in I} x_p = \sum_{p \in P_{ij}, j \in I} x_p \quad \forall i \in C, \forall t \in V \quad (6)$$

$$\sum_{\forall p_1 \in \Omega^{OC}} x_{p_1} = \sum_{\forall p_2 \in \Omega^{CO}} x_{p_2} \quad (7)$$

$$q_i + w_i - Q_p \leq M(1 - x_p) \quad \forall p_{ij} \in P \quad (8)$$

$$w_i - w_j - q_j \geq M(x_p - 1) \quad \forall p_{ij} \in P \quad (9)$$

$$\alpha_i \leq l_i - s_i \leq \beta_i \quad \forall i \in C \quad (10)$$

$$a_i + s_i \leq l_i \quad \forall i \in C \quad (11)$$

$$T_p^{\min} + M(x_p - 1) \leq a_j - l_i \leq T_p^{\max} + M(1 - x_p) \quad \forall p \in P \quad (12)$$

$$r_i - Y_p \leq M(1 - x_p) \quad \forall p_{ij} \in P \quad (13)$$

$$r_i - r_j - D_p \geq M(x_p - 1) \quad \forall p_{ij} \in P^{\text{DP}} \quad (14)$$

$$Y_p - \phi_R(p) - r_j \geq M(x_p - 1) \quad \forall p_{ij} \in P^{\text{CRP}} \quad (15)$$

$$r_i - \phi_L(p) \geq M(x_p - 1) \quad \forall p_{ij} \in P^{\text{CRP}} \quad (16)$$

$$\lambda_p + M(x_p - 1) \leq r_j + D_p - r_i \leq \lambda_p + M(1 - x_p) \quad \forall p_{ij} \in P^{\text{CRP}} \quad (17)$$

$$\lambda_p = 0 \quad \forall p \in P^{\text{DP}} \quad (18)$$

$$M(x_p - 1) \leq \lambda_p - \pi(a_j - l_i - T_p^{\min}) \leq M(1 - x_p) \quad \forall p_{ij} \in P^{\text{CRP}} \cap \Omega^{\text{CC}} \quad (19)$$

$$a_j - \frac{\lambda_p}{\pi} - T_p^{\min} - A \geq M(x_p - 1) \quad \forall p_{ij} \in P^{\text{CRP}} \cap \Omega^{\text{OC}} \quad (20)$$

$$l_i + \frac{\lambda_p}{\pi} + T_p^{\min} - B \leq M(1 - x_p) \quad \forall p_{ij} \in P^{\text{CRP}} \cap \Omega^{\text{CO}} \quad (21)$$

$$R_p \cdot Y_p \geq \lambda_p \geq 0, x_p \in \{0, 1\} \quad \forall p \in P^{\text{CRP}} \quad (22)$$

$$a_i \geq 0, l_i \geq 0, w_i \geq 0, r_i \geq 0 \quad \forall i \in C \quad (23)$$

式(3)表示目标函数为最小化总行驶里程与固定成本之和。式(4), (5)表示每个商户节点必须且只能被访问一次。式(6)表示每个商户只能被同一种车型所访问并离开。式(7)表示从起点送中心出发的车辆数等于返回终点配送中心的车辆数。式(8)表示每个节点的负载不得超过该路径对应车型的最大负载。式(9)表示通过每条路径时, 离开上一个节点的负载必须大于等于离开下一个节点的负载与下一个节点的服务负载之和。式(10), (11)表示各节点必须满足时间窗约束。式(12)表示通过每条路径的时长必须处在该路径可通过的最短时间与最长之间。式(13)表示每条路径的节点的里程状态不得超出该路径对应车型的最大里程。式(14)表示对于每条直达路径而言, 离开上一个节点的里程必须大于等于离开下一个节点的里程与通过该路径里程之和。对于每条充电路径而言, 式(15)保证了车辆有足够的里程在充电完以后前往下一个节点, 式(16)保证了车辆有足够的里程到达第1个充电站。对于每条充电路径而言, 式(17)表示该路径的充电里程多少。式(18)对每条直达路径的充电里程强制赋值为0。式(19)表达每条从商户出发到商户终止

的充电路径, 其充电里程与充电时间的线性关系。式(20)表达每条从起点配送中心出发到商户终止的充电路径, 其充电里程与充电时间的线性关系。式(21)表达每条从商户出发到终点配送中心终止的充电路径, 其充电里程与充电时间的线性关系。式(22)表达了每条充电路径上能够充电的最大里程。式(23)为决策变量的取值范围。

3.4 与副本模型比较

表3展示本文模型与文献[3, 7, 13]提出的副本模型在决策变量上的比较。副本模型的思路是对节点之间的弧是否被访问设置0-1整数变量, 对负载、时间和里程等参数设置连续变量。在混合整数线性规划模型当中, 整数决策变量的维度对求解效率有很大影响, 从表3可以看到, 本文模型的整数决策变量和连续变量皆为一维决策变量, 而文献[3, 13]不仅需要在模型中添加充电站的副本, 且整数变量为二维变量。文献[7]设置了三维整数变量, 新增一个维度 k 用以表示车型。

表3 与副本模型比较

文献	0-1 整数变量	连续变量
[3]	x_{ij}	τ_i, u_i, y_i
[13]	x_{ij}	τ_i, u_i, y_i, Y_i
[7]	x_{ij}^k	τ_i, u_i^k, y_i^k
本文	x_p	$a_p, l_p, r_p, w_p, \lambda_p$

4 实验研究

4.1 实验算例

本文使用了 Schneider 等^[3]构造的小规模 E-VRPTW 算例和 Hiermann 等^[8]构造的小规模 E-FSMFTW 算例对本文模型进行仿真实验。

E-VRPTW 算例源于文献[29]经典 VRPTW 算例, 文献[3]在 VRPTW 算例的基础上设计了36个带充电站的小规模算例, 算例的商户规模为5, 10, 15个, 充电站规模为3~6个不等。这些算例按照商户的地理位置, 分成了3类: 随机分布(random, R), 集中分布(cluster, C)和半随机半集中

分布(half random half cluster, RC)。此外, 该作者还对商户的时间窗松紧、充电速率和商户的负载轻重等参数做了差异化处理。

文献[8]在文献[3]的36个E-VRPTW算例基础上, 设计了最多6种不同最大负载、最长里程和固定成本的车型, 为了充分评估负载、里程和固定成本这3个因素对总成本的影响, 该作者设计了A, B, C 3组算例集, 每组算例集有36个算例, 合计108个算例。

4.2 实验环境

本文模型使用IBM CPLEX 12.8进行求解, CPLEX最大运行时长设置为7 200 s, 在CPU为3.30-GHz Intel Core i5-4590、内存为8G的Windows 7实验平台下运行。

4.3 本文模型对EVRPTW算例的实验结果

为了验证本文提出的Path-based model的性能, 本模型对36个小规模E-VRPTW算例在线性完全充电策略(full recharging, FR)和线性可变充电策略(partial recharging, PR)下分别求解, 当实施线性完全充电策略时, 只需要在原模型中加入约束(24)即可, 结果如表4和表5所示。

$$M(x_p - 1) \leq Y_p - \phi_r(p) - r_j \leq M(1 - x_p) \forall p \in P^{CRP} \quad (24)$$

对于E-VRPTW-FR问题, 文献[3]基于充电站副本的模型只能对25个算例在限定时间内精确求解, 平均求解时间为405.48 s, 其余11个算例在7 200 s内仅找到了上界解。而本文的模型可对35个算例精确求解, 平均求解时间仅8.21 s, 只有RC204C15未能精确求解, 但其在7 200 s内找到的上界解质量优于文献[3]的解。

对于E-VRPTW-PR问题, 文献[13]的模型可对33个算例平均用时74.70 s精确求解, 其余3个算例仅在7 200 s内找到上界解。Schiffer和Walther^[30]的模型可对31个算例平均用时554.92 s精确求解, 其余5个算例仅找到上界解。本文模型可对35个算例平均用时5.97 s, 只有一个算例

仅找到上界解。

以上结果表明, 在求解质量和求解时间上, 本文提出的Path-based model优于文献[3, 13, 30]的Replication-based model。

表4 E-VRPTW-FR小规模算例的实验结果
Table 4 Results of small-scale E-VRPTW-FR instances

模型	文献[3]	本文
#Opt/#Num	25/36	35/36
Ave Opt time/s	405.48	8.21

表5 E-VRPTW-PR小规模算例的实验结果
Table 5 Results of small-scale E-VRPTW-PR instances

模型	文献[13]	文献[30]	本文
#Opt/#Num	33/36	31/36	35/36
Ave Opt time/s	74.70	554.92	5.97

4.4 本文模型对E-FSMFTW算例的实验结果

文献[7]给出了108个E-FSMFTW小规模算例在线性完全充电策略(full recharging, FR)下的最优解, 如表6~8中的“FR”所示。本文模型对这些算例在线性可变充电策略(partial recharging, PR)下进行求解, 结果如表6~8中的“PR”所示。“Gap”为2种充电策略下最优解之间的差距; “Time”表示本文模型运行的时间。

本文模型对A类E-FSMFTW-PR问题, 精确求解了26个算例, 平均耗时512 s; 对B类E-FSMFTW-PR问题精确求解了30个算例, 平均耗时351 s; 对C类E-FSMFTW-PR问题精确求解了33个算例, 平均耗时308 s。共计精确求解89个算例, 其余19个算例仅在7 200 s内找到了上界解, 这些上界解与线性完全充电策略下的最优解相同。线性可变充电策略相比线性完全充电策略, 在A类算例集上平均可以降低1.41%的成本, 在B类算例集上平均可以降低0.42%的成本, 在C类算例集上平均可以降低0.33%的成本, 共计对21个算例降低了总成本, 并在表格里用黑体标明。在求解规模上, 本文模型可对所有商户规模为5的算例精确求解, 在36个商户规模为10的算例中精确求解34个, 在36个商户规模为15的算例中精确求解19个。

表6 A类E-FSMFTW小规模算例的实验结果
Table 6 Results of small-scale E-FSMFTW instances of type A

算例	文献[7] FR	本文 PR	Gap/%	Time/s
C101-5	857.75	857.75	0	0.06
C103-5	476.05	475.37	-0.14	0.09
C206-5	1 261.88	1 252.10	-0.78	0.09
C208-5	1 164.34	1 164.34	0	0.17
R104-5	327.25	327.25	0	0.17
R105-5	346.08	346.08	0	0.05
R202-5	609.18	609.18	0	0.27
R203-5	645.63	645.63	0	0.17
RC105-5	511.96	511.96	0	0.08
RC108-5	532.04	532.04	0	0.14
RC204-5	496.74	496.74	0	4.19
RC208-5	328.89	328.89	0	0.44
C101-10	1 302.15	1 296.84	-0.41	0.13
C104-10	902.71	902.71	0	7 200
C202-10	1 304.32	1 304.32	0	1.22
C205-10	2 631.97	2 282.61	-13.27	1.11
R102-10	595.34	585.18	-1.71	3.75
R103-10	478.07	478.07	0	6 069
R201-10	1 138.38	773.35	-32.07	3.16
R203-10	952.16	952.16	0	7 200
RC102-10	1 100.27	1 100.27	0	0.19
RC108-10	693.27	693.27	0	6.44
RC201-10	684.63	682.48	-0.31	1.58
RC205-10	1 064.59	1 064.59	0	15.34
C103-15	1 291.03	1 274.43	-1.29	7 200
C106-15	1 253.59	1 250.76	-0.23	1.05
C202-15	2 403.35	2 403.35	0	7 200
C208-15	2 325.89	2 325.89	0	7 200
R102-15	850.58	846.74	-0.45	36.38
R105-15	760.13	760.13	0	13.73
R202-15	1 311.24	1 311.24	0	7 200
R209-15	1 033.50	1 033.50	0	7 200
RC103-15	840.97	840.97	0	7 200
RC108-15	1 013.70	1 013.70	0	7 200
RC202-15	1 101.60	1 101.60	0	487.84
RC204-15	810.90	810.90	0	7 200
Average Gap/%			-1.41	
Average Opt Time/s			512	
#Opt/#Num			26/36	

表7 B类E-FSMFTW小规模算例的实验结果
Table 7 Results of small-scale E-FSMFTW instances of type B

算例	文献[7] FR	本文 PR	Gap/%	Time/s
C101-5	377.75	377.75	0	0.03
C103-5	236.05	235.37	-0.29	0.08
C206-5	461.88	452.10	-2.12	0.09
C208-5	364.34	364.34	0	0.17
R104-5	175.25	175.25	0	0.16
R105-5	194.08	194.08	0	0.05
R202-5	249.18	249.18	0	0.26
R203-5	285.63	285.63	0	0.17
RC105-5	295.96	295.96	0	0.08
RC108-5	313.93	313.93	0	0.11
RC204-5	255.55	255.55	0	1.09
RC208-5	208.89	208.89	0	0.52
C101-10	582.15	576.84	-0.91	0.13
C104-10	422.71	422.71	0	1 244.39
C202-10	504.32	504.32	0	0.72
C205-10	711.97	682.61	-4.12	1.22
R102-10	325.19	325.19	0	1.23
R103-10	262.07	262.07	0	1 392
R201-10	418.38	404.23	-3.38	1.92
R203-10	392.16	392.16	0	1 494.97
RC102-10	572.27	572.27	0	0.19
RC108-10	422.12	422.12	0	17.19
RC201-10	429.17	429.17	0	0.99
RC205-10	504.59	504.59	0	1.84
C103-15	571.03	554.43	-2.91	7 200
C106-15	533.59	530.76	-0.53	5.36
C202-15	803.35	803.35	0	4 630.06
C208-15	725.89	725.89	0	7 200
R102-15	511.55	506.69	-0.95	11.19
R105-15	436.89	436.89	0	6.22
R202-15	591.24	591.24	0	7 200
R209-15	473.50	473.50	0	7 200
RC103-15	499.67	499.67	0	1 387.36
RC108-15	514.65	514.65	0	7 200
RC202-15	541.61	541.61	0	351.37
RC204-15	410.90	410.90	0	7 200
Average Gap/%			-0.42	
Average Opt Time/s			351	
#Opt/#Num			30/36	

表 8 C 类 E-FSMFTW 小规模算例的实验结果
Table 8 Results of small-scale E-FSMFTW instances of type C

算例	文献[7] FR	本文 PR	Gap/%	Time/s
C101-5	317.75	317.75	0	0.03
C103-5	206.05	205.37	-0.33	0.08
C206-5	361.88	352.10	-2.70	0.08
C208-5	264.34	264.34	0	0.22
R104-5	156.25	156.25	0	0.16
R105-5	175.08	175.08	0	0.05
R202-5	204.18	204.18	0	0.25
R203-5	240.63	240.63	0	0.17
RC105-5	268.96	268.96	0	0.08
RC108-5	283.93	283.93	0	0.13
RC204-5	220.55	220.55	0	0.77
RC208-5	193.89	193.89	0	0.51
C101-10	492.15	486.84	-1.08	0.16
C104-10	362.71	362.71	0	277.16
C202-10	404.32	404.32	0	1.38
C205-10	471.97	471.97	0	1.08
R102-10	287.19	287.19	0	1.05
R103-10	235.07	234.30	-0.33	813.61
R201-10	328.38	320.93	-2.27	1.78
R203-10	322.16	322.16	0	421.74
RC102-10	498.51	498.51	0	0.19
RC108-10	386.12	386.12	0	1.73
RC201-10	384.17	384.17	0	0.69
RC205-10	429.69	426.69	-0.70	1.23
C103-15	481.03	464.43	-3.45	3 081.31
C106-15	415.13	415.13	0	4.33
C202-15	603.35	603.35	0	944.92
C208-15	525.89	525.89	0	305.22
R102-15	465.94	460.69	-1.13	9.77
R105-15	387.89	387.89	0	3.05
R202-15	495.64	495.64	0	7 200
R209-15	403.50	403.50	0	3 150.45
RC103-15	448.67	448.67	0	1 057.94
RC108-15	445.25	445.25	0	7 200
RC202-15	471.61	471.61	0	114.02
RC204-15	360.90	360.90	0	7 200
Average Gap/%			-0.33	
Average Opt time/s			308	
#Opt/#Num			33/36	

5 结论

本文研究了线性可变充电策略下的多车型电动车辆路径问题(E-FSMFTW-PR), 并提出了一个基于路径的模型来精确求解该问题。该模型先将任意非充电节点之间所有车型访问的路径枚举出来, 接着通过载重约束、时间窗约束剔除不合法的路径, 再通过距离信息剔除掉被占优的路径。

通过仿真实验, 本文的模型在 E-VRPTW 问题上优于文献[3, 13, 18]的模型; 在 E-FSMFTW-PR 问题上, 对 108 个算例精确求解了 89 个, 其中可精确求解所有商户规模为 5 的算例, 可精确求解绝大部分商户规模为 10 的算例, 可精确求解超过一半的商户规模为 15 的算例。此外, 仿真结果还表明了采用线性可变充电策略可进一步降低总成本。未来将对该类问题的启发式算法进行研究, 以求解决更大规模的问题。

参考文献:

- [1] Erdoğan S, Miller-Hooks E. A Green Vehicle Routing Problem[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review (S1366-5545), 2012, 48(1): 100-114.
- [2] Roberti R, Wen M. The Electric Traveling Salesman Problem with Time Windows[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review (S1366-5545), 2016, 89: 32-52.
- [3] Schneider M, Stenger A, Goeke D. The Electric Vehicle-Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations[J]. Transportation Science (S0041-1655), 2014, 48(4): 500-520.
- [4] Desaulniers G, Errico F, Irnich S, et al. Exact algorithms for Electric Vehicle-Routing Problems with Time Windows[J]. Operations Research, (S0030-364X), 2016, 64(6): 1388-1405.
- [5] Golden B, Assad A, Levy L, et al. The Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem[J]. Computers & Operations Research, (S0305-0548), 1984, 11(1): 49-66.
- [6] Goeke D, Schneider M. Routing a Mixed Fleet of Electric and Conventional Vehicles[J]. European Journal of Operational Research, (S0377-2217), 2015, 245(1): 81-99.
- [7] Hiermann G, Puchinger J, Ropke S, et al. The Electric

- Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations[J]. *European Journal of Operational Research* (S0377-2217), 2016, 252(3): 995-1018.
- [8] Hiermann G, Hartl R F, Puchinger J, et al. Routing a Mix of Conventional, Plug-in Hybrid, and Electric Vehicles [J]. *European Journal of Operational Research* (S0377-2217), 2019, 272(1): 235-248.
- [9] Macrina G, Laporte G, Guerriero F, et al. An Energy-Efficient Green-Vehicle Routing Problem with Mixed Vehicle Fleet, Partial Battery Recharging and Time Windows[J]. *European Journal of Operational Research* (S0377-2217), 2019, 276(3): 971-982.
- [10] 揭婉晨, 杨珺, 杨超. 多车型电动汽车车辆路径问题的分支定价算法研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(7): 1795-1805.
Jie Wanchen, Yang Jun, Yang Chao. Branch-and-Price Algorithm for Heterogeneous Electric Vehicle Routing Problem[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2016, 36(7): 1795-1805.
- [11] 李得成, 陈彦如, 张宗成. 基于分支定价算法的电动车与燃油车混合车辆路径问题研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2021, 41(4): 995-1009.
Li Decheng, Chen Yanru, Zhang Zongcheng. A Branch-and-Price Algorithm for Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows and Mixed Fleet[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2021, 41(4): 995-1009.
- [12] 李英, 张鹏威, 吴一帆. 电动汽车/传统汽车混合车队配置及路径优化模型[J]. *系统管理学报*, 2020, 29(3): 522-531.
Li Ying, Zhang Pengwei, Wu Yifan. Vehicle Routing Problem with Mixed Fleet of Conventional and Electric Vehicles[J]. *Journal of Systems & Management*, 2020, 29(3): 971-982.
- [13] Keskin M, Çatay B. Partial Recharge Strategies for the Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* (S0968-090X), 2016, 65: 111-127.
- [14] Felipe Á, Ortuño M T, Righini G, et al. A Heuristic Approach for the Green Vehicle Routing Problem with Multiple Technologies and Partial Recharges[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* (S1366-5545), 2014, 71: 111-128.
- [15] Sweda T M, Dolinskaya I S, Klabjan D. Adaptive Routing and Recharging Policies for Electric Vehicles[J]. *Transportation Science* (S0041-1655), 2017, 51(4): 1326-1348.
- [16] Montoya A, Guéret C, Mendoza J E, et al. The Electric Vehicle Routing Problem with Nonlinear Charging Function[J]. *Transportation Research Part B: Methodological* (S0191-2615), 2017, 103: 87-110.
- [17] Froger A, Mendoza J E, Jabali O, et al. Improved Formulations and Algorithmic Components for the Electric Vehicle Routing Problem with Nonlinear Charging Functions[J]. *Computers & Operations Research* (S0305-0548), 2019, 104: 256-294.
- [18] Schiffer M, Walther G. An Adaptive Large Neighborhood Search for the Location-Routing Problem with Intra-Route Facilities[J]. *Transportation Science* (S0041-1655), 2018, 52(2): 331-352.
- [19] 赵灿华, 侍洪波. 基于自适应邻域搜索的大规模电动汽车车辆路径优化[J]. *华东理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 46(5): 694-701.
Zhao Canhua, Shi Hongbo. Large-Scale Electric Vehicle Route Optimization Based on Adaptive Variable Neighborhood Search[J]. *Journal of East China University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2020, 46(5): 694-701.
- [20] Zhao M, Lu Y. A Heuristic Approach for a Real-World Electric Vehicle Routing Problem[J]. *Algorithms* (S1999-4893), 2019, 12(2): 45.
- [21] Wen M, Linde E, Ropke S, et al. An Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic for the Electric Vehicle Scheduling Problem[J]. *Computers & Operations Research* (S0305-0548), 2016, 76: 73-83.
- [22] Cortés-Murcia D L, Prodhon C, Afsar H M. The Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows, Partial Recharges and Satellite Customers[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* (S1366-5545), 2019, 130: 184-206.
- [23] Hansen P, Mladenović N. Variable Neighborhood Search: Principles and Applications[J]. *European Journal of Operational Research* (S0377-2217), 2001, 130(3): 449-467.
- [24] Vidal T, Crainic T G, Gendreau M, et al. A Hybrid Genetic Algorithm with Adaptive Diversity Management for a Large Class of Vehicle Routing Problems with Time-Windows[J]. *Computers & Operations Research* (S0305-0548), 2013, 40(1): 475-489.
- [25] 胡蓉, 陈文博, 钱斌, 等. 学习型蚁群算法求解绿色多车场车辆路径问题[J]. *系统仿真学报*, 2021, 33(9): 2095-2108.
Hu Rong, Chen Wenbo, Qian Bin, et al. Learning Ant Colony Algorithm for Green Multi-Depot Vehicle Routing Problem[J]. *Journal of System Simulation*, 2021, 33(9): 2095-2108.
- [26] 宁涛, 郭晨, 陈荣, 等. 一种动态车辆路径问题解决策略仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2015, 27(12): 2942-2947.

- Ning Tao, Guo Chen, Chen Rong, et al. Simulation Study on Scheduling Strategy of Dynamic Vehicle Routing Problem[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(12): 2942-2947.
- [27] 范双南, 陈纪铭, 高为民, 等. 基于改进智能水滴算法的动态车辆配送路径优化[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(9): 1808-1817.
- Fan Shuangnan, Chen Jiming, Gao Weimin, et al. Dynamic Vehicle Distribution Path Optimization Based on Improved Intelligent Water Drop Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(9): 1808-1817.
- [28] Bruglieri M, Mancini S, Pezzella F, et al. A Path-Based Solution Approach for the Green Vehicle Routing Problem[J]. Computers & Operations Research (S0305-0548), 2019, 103: 109-122.
- [29] Solomon M M. Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints[J]. Operations Research (S0030-364X), 1987, 35(2): 254-265.
- [30] Schiffer M, Walther G. The Electric Location Routing Problem with Time Windows and Partial Recharging[J]. European Journal of Operational Research (S0377-2217), 2017, 260(3): 995-1013.