

文章编号:1007-5321(2020)03-0077-06

DOI:10.13190/j.jbupt.2019-196

绿色车辆路径问题研究

孔继利, 陈 璨

(北京邮电大学 现代邮政学院, 北京 100876)

摘要: 对绿色车辆路径问题的发展形势进行了分析. 阐述了绿色车辆路径问题的起源, 梳理了绿色车辆路径问题的研究热点, 将其划分为最小化燃料消耗的绿色车辆路径问题、考虑污染路径的绿色车辆路径问题、结合新能源车的绿色车辆路径问题这3个研究的主要阶段, 指出了绿色车辆路径问题研究的不足和未来可能的研究方向.

关键词: 绿色车辆路径问题; 污染路径问题; 新能源车

中图分类号: U4

文献标志码: A

Research Review of Green Vehicle Routing Problem

KONG Ji-li, CHEN Can

(School of Modern Post, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: To raise the awareness of environmental protection, arouse the great attention of enterprises and respond to the strong push of the government, the development situation of green vehicle routing problem in recent years is analyzed. The origin of the green vehicle routing problem is described focused on the research of hot topics of green vehicle routing problem in the form of teamwork. Minimizing fuel consumption, considering the pollution path, and combining with new energy vehicles are the three main stages of green vehicle routing problem. The article points out the shortcomings of current research on green vehicle routing problem and directions of possible future research.

Key words: green vehicle routing problem; pollution routing problem; new energy vehicle

随着全球经济的不断发展以及人们生活水平的日益提高, 环境污染问题日益突出, 低碳环保的可持续发展成为全球经济发展的新方向. 国家统计局的最新数据显示: 2019年, 我国的民用汽车保有量已超过2.6亿辆, 以每年超过8%的幅度增长. 据国家统计局发布的《中国统计年鉴-2019》统计, 2018年我国民用载货汽车已有2 567.82万辆, 2017年交通运输、仓储和邮政业的能源消费总量达到42 191万吨标准煤. 由此可知, 交通运输业有很大的绿色化前景.

2019年, 全国社会物流总额298万亿元, 按可比价格计算, 同比增长5.9%; 物流业总收入为10.3万亿元, 比2018年增长9.0%. 随着电子商务的发展, 我国邮政业务量以30%左右的涨幅不断增长. 近5年来, 我国快递业务量分别为206亿件、313亿件、400.6亿件、507.1亿件和635.2亿件. 到2019年, 邮政行业业务总量完成16 229.63亿元, 其中快递业务收入完成7 497.8亿元, 同比增长24.2%; 快递业务收入在行业中占比达77.8%, 比2018年提高1.4个百分点. 物流业、邮政业成为新的经济增

收稿日期: 2019-09-17

基金项目: 教育部人文社会科学研究青年基金项目(20YJC630054); 国家自然科学基金项目(71772010)

作者简介: 孔继利(1982—), 男, 副教授.

通信作者: 陈 璨(1997—), 女, 硕士生, E-mail: 415767852@qq.com.

长点. 而当前我国的物流费用高、资源浪费严重、环境问题突出. 以快递业为例, 包装材料中的胶带、泡沫、塑料袋等以聚氯乙烯为主要原料, 难以降解; 而纸张、塑料等的原材料大多为木材、石油, 不可再生. 因此, 物流产业的绿色发展道路成为国家及各界人士关注的焦点.

为积极响应国家对绿色物流、低碳生活的号召, 各企业将绿色发展的理念融入实际配送领域. 中国邮政、菜鸟驿站、京东等多家企业正计划使用新能源车替代传统燃油汽车, 优化配送路线, 在各自的绿色物流建设与发展的道路上寻求更高的经济效益. 中国邮政已经启动绿色运输有关项目, 提升新能源车使用比例; 优化运输方式, 提高运输集约化运营程度. 菜鸟驿站使用绿色燃料, 优化配送方式, 并通过共同配送优化配送路线, 缩短配送距离. 京东新能源车已经进入实质落地阶段, 并计划在2年内把国内自营车辆全部换为新能源车.

笔者基于城市绿色发展的需求, 面对物流业迅速发展的现实情况, 从物流运输、配送环节入手, 系统地梳理了绿色车辆路径问题的相关文献, 总结了绿色车辆路径问题的研究现状, 指出当前研究的不足, 并结合科技发展趋势, 预测绿色车辆路径问题未来可能的研究方向.

1 绿色车辆路径问题的定义

车辆路径问题由 Dantzing 和 Ramser^[1]于1959年首次提出. 早期的车辆路径问题大多以成本最低为决策目标, 考虑装载量约束^[2]、时间窗约束^[3]、随机时间^[4]等因素, 设计精确算法^[5]或启发式算法^[6]求解最优路径.

随着人们环保意识的增强, 低碳环保、节能减排的理念成为研究车辆路径问题新的指导思想, 绿色车辆路径问题成为新的研究方向. 绿色车辆路径问题是在传统车辆路径问题的基础上, 以降低油耗、减少碳排放为目标, 来获取最优路径的优化问题. 绿色车辆路径问题由 Chang 和 Morlok^[7]在2005年首次研究, 他们深入探讨不同速度曲线下车辆耗油量的变化情况, 得出行驶速度影响耗油速率的结论.

此后, 各界学者首先以传统燃油车为研究对象, 以燃料消耗最小化为目标进行路径优化; 其次, 考虑影响车辆行驶效率的各种外界因素, 详细研究各种类型的污染路径问题; 最后, 以混合动力汽车和纯电动汽车为例, 对考虑新能源车的绿色车辆路径问题

进行研究.

2 绿色车辆路径问题的研究主题

近年来, 国际上已有不少学者对绿色车辆路径问题进行研究. 以现有绿色车辆路径问题相关文献为基础, 依据不同的研究主题, 按时间轴选取合适的、有代表性的文献进行梳理. 总结了目前绿色车辆问题的主要研究方向, 梳理国内外各研究团队已取得的研究成果, 详细阐述绿色车辆路径问题的发展脉络.

2.1 最小化燃料消耗的绿色车辆路径问题

早期的绿色车辆路径问题大多以燃油车为研究对象, 将最小化燃料消耗作为优化目标, 来确定较优的路径方案. 于^[8]将燃料消耗拆分为货物耗油和货车耗油2个部分, 建立以燃料消耗最小为目标、取送结合的车辆路径问题模型. Norouzi 等^[9]提出时变车辆路径问题, 并设计改进粒子群算法, 所确定的优化方案通过缩短车辆的行驶时间来达到减少燃油消耗的目的. Ghannadpour 等^[10]构建一个多目标、多车型、带时间窗的车辆路径问题模型, 利用带精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA II)求解燃料消耗最小和行驶距离最短的多目标模型, 在考虑客户优先级与客户满意度的前提下, 获得最优的配送路线.

这部分文献中考虑使用传统燃油车, 且大部分以燃料消耗量为优化目标, 少量辅以成本目标、时间目标. 这类绿色车辆路径问题, 出现时间早, 模型表达形式简单, 故在后续研究中常与其他类型的绿色车辆路径问题混合出现.

2.2 考虑污染路径的绿色车辆路径问题

在仅考虑减少汽车燃料消耗的基础上, 学者们开始研究各项影响车辆行驶效率的因素. Bektas 和 Laporte^[11]在2011年提出污染路径问题, 开始综合考虑多种可能影响车辆行驶效率的外界因素. 他们与 Demir^[12]考虑燃料、排放与驾驶员成本等影响因素, 设计了一种适用于污染路径问题的自适应大邻域搜索算法; 之后, 3位学者^[13]构建了一种双目标模型, 将Epsilon约束法与自适应加权法相结合以处理考虑驾驶时间、燃料消耗等因素的污染路径问题, 并得到了高质量的解决方案.

Franceschetti 致力于研究时间相关的污染路径问题, 与 Honhon 等^[14]在考虑交通拥堵状况的基础上, 以排放成本和驾驶员成本为决策目标, 确定最优路径, 以达到避免拥堵, 并降低成本的目的. 2017

年,他们^[15]进一步研究该问题,并以最小化驾驶员工资和温室气体排放为目标,设计自适应大邻域搜索算法来确定最优行驶路线,并优化车辆行驶速度.

葛等^[16]在分析能耗与碳排放相互关系的基础上,提出物流配送问题的碳排放计算方法,建立带有载重与工作时间约束的开放式污染路径问题的数学模型,同时设计改进自适应遗传算法求解该问题. Eshtehadi 等^[17]以燃料消耗为目标函数,研究需求、行驶时间不确定的污染路径问题,针对最坏情况、不确定预算和机会限制等不同情形设计不同的求解方法. 秦等^[18]将经典带时间窗的车辆路径问题,扩展为考虑拥堵情形的污染路径问题,并建立拥堵情形下的线性规划模型. Raeesi 等^[19]提出一种 Steiner 污染路径问题,考虑城市货运配送的实际运行条件(灵活的时间窗和出发时间、拥挤的城市道路网络、随机的车辆数目等)以及车辆瞬时加速、减速时的燃料消耗量,利用现有的宏观交通数据构建混合整数规划模型,以求解芝加哥道路网络的污染路径问题.

上述学者通常以影响车辆行驶效率的各种外界因素中的某一因素为研究对象(车辆载重、温度、道路拥堵状况、驾驶员行为习惯等),在减少车辆碳排放、降低配送成本的基础上,对配送路径进行更贴合实际情况的分析优化.

2.3 结合新能源车的绿色车辆路径问题

随着技术的进步,新能源车逐渐替代传统燃油车成为交通出行的主要工具. 目前,常用的新能源车有混合动力汽车、纯电动汽车、燃料电池汽车等. 由于燃料电池的燃料装载量有限,不足以维持汽车的正常行驶,通常考虑在混合动力汽车中装载燃料电池的场景. 因此,学者们大多研究混合动力汽车、纯电动汽车与车辆路径问题相结合的应用.

1) 混合动力汽车的路径问题

在新能源车的发展初期,仅依靠电动机不能维系车辆行驶足够的里程,而混合动力汽车拥有多个驱动系统,能够在低碳的同时达到普通燃油车辆的行驶里程. Arslan 等^[20]使用混合动力汽车,构建混合整数规划模型,并设计离散逼近动态规划启发式算法和最短路径启发式算法,在具有加油站和充电桩的路网中确定成本最低的配送路径方案. Strehler 等^[21]考虑具有充电站和资源站的模型,使用混合动力车辆,寻找更节能的配送路线. Murakami^[22]建立了混合整数规划模型,设计精确算法、两阶段启发式

算法、改进两阶段启发式算法等来解决混合动力汽车路径规划及调度问题. Zhen 等^[23]研究混合动力汽车的模式选择系统,建立混合整数线性模型,设计改进粒子群优化算法,用以对问题进行求解,达到燃料最佳使用的目的.

Yan 等^[24]致力于研究基于预测的混合动力汽车的路径优化问题. 他们在 2014 年提出一种并联混合动力汽车的实时能量管理优化控制策略,基于预测驾驶循环的最小原理来优化车辆动力分配和发动机使用时机,达到提高燃油经济性的目的. 他们还能量需求和行驶路线^[25]、实时驾驶条件^[26]进行预测,并根据电池荷电状态(SOC, state of charge)设计自适应等效消耗最小化方法,达到最小化燃料消耗的目的.

Zeng 等^[27]以混合动力汽车的能量管理为出发点进行路径优化,将道路坡度视为随机变量,建立道路坡度马尔可夫链模型、随机混合动力汽车燃料消耗模型和 SOC 模型,设计有限时域的马尔可夫决策过程和随机动态规划方法,对模型进行优化求解. 2016 年,他们提出一种两级随机方法优化混合动力汽车行驶的固定路线^[28],利用固定路线的历史数据,建立基于路段的随机混合动力汽车模型. 他们还依据路线信息、驾驶员的驾驶风格对车辆未来的行驶路线及概率进行预测^[29],解决更高级别的插电式混合动力汽车的最优控制问题.

2) 纯电动汽车的路径问题

近年来,随着电池技术的发展,纯电动汽车的行驶里程已能够满足人们的基本需求. 与此同时,社会充电网络的逐步建立也为纯电动汽车的普及提供了基本保障. de Weerd 等^[30]设计了一种用于电动汽车的意向感知路由系统,该系统同时考虑配送目标、其他车辆、充电桩的排队时间,可以使车辆在充电桩的等待时间减少 80% 以上,总体行程时间缩短 50% 以上. Koc 等^[31]设计了一种基于精确解的模拟退火算法来解决绿色车辆路径问题,使用分支切割算法,结合有效不等式来提高目标函数的下界,通过模拟退火算法获得目标函数的上界,从而在合理的计算时间内获得最优解. 吴^[32]对电动车的电机效率、电池性能等进行定性分析,并应用于以成本最小为目标的考虑二次配送的纯电动物流车辆调度优化模型中,利用遗传算法对城市道路环境中纯电动物流车的车辆路径问题进行求解,满足车辆 1 天内多次配送,降低配送成本的实际需求. 赵^[33]构建了关

于行驶速度、车辆质量以及道路坡度的非线性电量消耗模型,将非线性的电量消耗、客户时间窗、车辆载重以及车辆数量作为约束条件,得出的优化方案比一般模型更加贴近现实。

Yao 等^[34-35]从 2013 年开始研究电动汽车的耗能因素,比较了不同道路条件下电动汽车的耗能因素,全面分析电动汽车的具体能耗因素。Yang 等^[36]分析了电动汽车驾驶员的充电和路径选择行为,验证了电动汽车的初始充电状态、充电站的位置及充电时间对驾驶员的路径选择行为有重要影响。还考虑了电动汽车进入城市交通网络后的时间可靠性与充电可靠性,设计了一种基于可靠性的网络平衡框架,通过增加电动汽车的数量来降低道路网络的不确定性,有效降低了总成本^[37]。

Schneider 与 Desaulniers 合作,考虑了电动汽车的有限自主性,构建了 4 种时间窗变形的电动车辆路径规划模型^[38]。2017 年, Schneider 与 Hof 等^[39]设计了一种自适应可变邻域搜索算法来解决电动汽车电池交换站的选址与路径双层规划问题。他还与 Schiffer 等^[40]回顾车辆路径问题和带中间站点的车辆路径问题,按应用场景和解决方法将已出版的文献分成不同类别,并总结绿色车辆路径问题的未来发展趋势。

Bi 等^[41]从 2012 年开始深入研究电动汽车的相关问题。他们与 Shao 等先对锂离子电池的充电状态进行估计,使用径向基函数神经网络在线估计 SOC 模型;2017 年,他们提出具有可变行程时间的电动车辆路径问题,使用动态 Dijkstra 算法寻找最短路径,该模型可反映动态交通环境并寻求最优行驶路径^[42]。Bi 等^[43]提出基于回归和时间序列方法的充电时间预测模型,可准确描述北京市电动汽车的充电时间特征。Wang 等^[44]建立了行驶时间、能源消耗、充电成本的多目标优化模型,引入模糊规划方法和模糊偏好关系,设计遗传算法并结合驾驶员的 4 个加权条件来求解更好的行驶路线。

新能源车在早期发展阶段,由于电池技术的阻碍,主要使用混合动力汽车,以保证车辆达到足够的行驶距离。今后随着电池技术的进步和社会充电桩的建设,纯电动汽车成为更环保的出行工具。绿色车辆路径问题与新能源车的结合,顺应新能源车的发展趋势,考虑新能源车不同于传统燃油车的特殊需求,会得到更加低碳环保的配送路径。

3 绿色车辆路径问题及未来可能的研究方向

目前国内外学者对绿色车辆路径问题已形成较多成果——最初仅考虑传统燃油车的燃料使用最小化,之后综合研究各种外界因素对路径优化产生影响的污染路径问题;随着科技的发展,还将新能源车与车辆路径问题相结合,构建更符合目前应用场景的绿色车辆路径问题模型。但目前对绿色车辆路径问题的研究还有很多不足之处,具体如下。

1) 充电设施不完善,导致车辆路径方案绿色性差。社会充电桩是新能源车很重要的能源站之一,更是纯电动汽车行驶的基本保障。部分城市由于缺乏充电设施,在路径规划时会导致冗余的充电线路、车辆数量,这与节能减排的绿色理念相悖。

2) 顾客的随机需求导致方案响应性差、路径方案整体最优性较弱。随着互联网的发展,很多平台为顾客提供可随时退换的物流服务,这些为物流企业的运输、配送带来巨大考验。在顾客需求发生变化后,目前的求解方法并不能实时响应。在删除或取消订单的客户点、增加需要退货的客户点等后,需重新进行路径规划,这会导致方案的整体最优性较差。

3) 道路网络的复杂性导致绿色车辆路径方案的可用性较弱。车辆路径问题大多研究在一定路网条件下,车辆的行驶路线。但在实际的交通环境中,道路状况是实时变化的,如何考虑在行驶过程中及时寻觅更优配送路径,是绿色车辆路径问题需要攻克难题。

未来,随着科学技术的发展和人们日益增长的文化需求,绿色车辆路径问题可能会有如下发展方向。

1) 社会充电网络与绿色车辆路径集成优化问题。社会充电桩的建设是求解绿色车辆路径问题的前提条件,选择更合适的充电站位置能够为路径优化带来更高效率。

2) 基于 5G、物联网技术的绿色车辆路径问题。目前,5G、物联网技术正处于蓬勃发展时期,未来可依据此类技术更高效地获得路网信息与顾客需求信息,从而实现对配送路线的实时、动态更新。

3) 基于区块链、大数据等技术的绿色车辆路径问题。利用数据挖掘、大数据的自动筛选来预测顾客需求和路网信息,在高效、全面、准确实现信息传

递的区块链中建立有效绿色车辆路径模型,从而实现对客户低成本的精确配送,提高配送效率。

4 结束语

绿色车辆路径问题是车辆路径问题的重要研究方向,在物流运输、末端配送等领域有广泛的应用前景。绿色车辆路径问题,通过构建有确定目标的数学模型,利用精确算法或元启发式优化算法,为车辆调度与路径规划提供辅助决策,能有效融入实际场景,且有重要的现实意义。同时,绿色车辆路径问题对于优化行车路径、提高能源利用率、缓解环境压力等有重要作用,是推广新能源车和可持续发展理念的有效方式。基于对现有绿色车辆路径问题相关文献的梳理,讨论不同主题下绿色车辆路径问题的研究现状。此外,未来对于绿色车辆路径问题的研究,需顺应电子商务的发展、客户需求的多样化和科学技术的进步,寻求更符合实际的、随机动态的解决方案。

参考文献:

- [1] Dantzing G, Ramser J. The truck dispatching problem[J]. Management Science, 1959, 6(2): 80-91.
- [2] Balinski M L, Gomory R E. A primal method for the assignment and transportation problems[J]. Management Science, 1964, 10(3): 578-593.
- [3] Solomon M M. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints[J]. Operations Research, 1987, 35(2): 254-265.
- [4] Laporte G, Louveaux F, Mercure H. The vehicle routing problem with stochastic travel times[J]. Transportation Science, 1992, 26(3): 161-170.
- [5] Clarke G, Wright J W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points[J]. Operations Research, 1964, 12(4): 568-581.
- [6] Parragh S N, Cordeau J F. Branch-and-price and adaptive large neighborhood search for the truck and trailer problem with time windows[J]. Computers and Operations Research, 2017, 83(7): 28-44.
- [7] Chang D J, Morlok E K. Vehicle speed profiles to minimize work and fuel consumption[J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(3): 173-182.
- [8] 于雷. 模拟并行蚁群算法的绿色物流最小油耗配送路径优化[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [9] Norouzi N, Sadegh-Amalnick M, Tavakkoli-Moghaddam R. Modified particle swarm optimization in a time-dependent vehicle problem: minimizing fuel consumption[J]. Optimization Letters, 2017, 11(1): 121-134.
- [10] Ghannadpour S F, Zarrabi A. Multi-objective heterogeneous vehicle routing and scheduling problem with energy minimizing[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2019, 44(1): 728-747.
- [11] Bektas T, Laporte G. The pollution-routing problem[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2011, 45(8): 1232-1250.
- [12] Demir E, Bektas T, Laporte G. An adaptive large neighborhood search heuristic for the pollution-routing problem[J]. European Journal of Operational Research, 2012, 223(2): 346-359.
- [13] Demir E, Bektas T, Laporte G. The bi-objective pollution-routing problem[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 232(3): 464-478.
- [14] Franceschetti A, Honhon D, Van Woensel T, et al. The time-dependent pollution-routing problem[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2013, 56(10): 265-293.
- [15] Franceschetti A, Demir E, Honhon D, et al. A meta-heuristic for the time-dependent pollution-routing problem[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 259(3): 972-991.
- [16] 葛显龙, 苗国庆, 谭柏川. 开放式污染路径问题优化建模与算法研究[J]. 工业工程与管理, 2015, 20(4): 46-53.
- Ge Xianlong, Miao Guoqing, Tan Baichuan. Research on optimization modeling and algorithm for open pollution routing problem[J]. Industrial Engineering and Management, 2015, 20(4): 46-53.
- [17] Eshtehadi R, Fathian M, Demir E. Robust solutions to the pollution-routing problem with demand and travel time uncertainty[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 51(2): 351-363.
- [18] 秦进, 刘致远. 考虑拥堵情形的污染路径问题及其求解算法[J]. 工业工程与管理, 2018, 23(2): 23-32.
- Qin Jin, Liu Zhiyuan. The pollution routing-problem with congestion and its solution algorithm[J]. Industrial Engineering and Management, 2018, 23(2): 23-32.
- [19] Raeesi R, Zografos K G. The multi-objective Steiner pollution-routing problem on congested urban road networks[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2019, 122(4): 457-485.
- [20] Arslan O, Yildiz B, Karasan O E. Minimum cost path problem for plug-in hybrid electric vehicles[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2015, 80(8): 123-141.
- [21] Strehler M, Merting S, Schwan C. Energy-efficient

- shortest routes for electric and hybrid vehicles [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017, 103(S1): 111-135.
- [22] Murakami K. Formulation and algorithms for route planning problem of plug-in hybrid electric vehicles[J]. *Operational Research*, 2018, 18(2): 497-519.
- [23] Zhen Lu, Xu Ziheng, Ma Chengle, et al. Hybrid electric vehicle routing problem with mode selection[J]. *International Journal of Production Research*, 2020, 58(2): 562-576.
- [24] Yan Bin, Hu Yanqing, Yan Ting, et al. Route-based adaptive optimization for energy management of hybrid electric vehicles[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2014, 15(7): 1175-1182.
- [25] Feng Tianheng, Yang Lin, Gu Qing, et al. A supervisory control strategy for plug-in hybrid electric vehicles based on energy demand prediction and route preview [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(5): 1691-1700.
- [26] Hu Yanqing, Yang Lin, Yan Bin, et al. An online rolling optimal control strategy for commuter hybrid electric vehicles based on driving condition learning and prediction[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(6): 4312-4327.
- [27] Zeng Xiangrui, Wang Junmin. A parallel hybrid electric energy management strategy using stochastic model predictive control with road grade preview[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 23(6): 2416-2423.
- [28] Zeng Xiangrui, Wang Junmin. A two-level stochastic approach to optimize the energy management strategy for fixed-route hybrid electric vehicles[J]. *Mechatronics*, 2016, 38(6): 93-102.
- [29] Zeng Xiangrui, Wang Junmin. Optimizing the energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles with multiple frequent routes[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2019, 27(1): 394-400.
- [30] de Weerd M M, Stein S, Gerding E H, et al. Intention-aware routing of electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(5): 1472-1482.
- [31] Koc C, Karaoglan I. The green vehicle routing problem: a heuristic based exact solution approach[J]. *Applied Soft Computing*, 2016, 39(2): 154-164.
- [32] 吴思华. 纯电动物流车城市配送调度优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [33] 赵雅兰. 基于非线性能量消耗的电动车路径规划研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- Zhao Yalan. Electric-vehicle path planning based on nonlinear energy consumption[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [34] Yao Enjian, Yang Zhiqiang, Song Yuanyuan, et al. Comparison of electric vehicle's energy consumption factors for different road types[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2013.
- [35] Yao Enjian, Wang Meiyang, Song Yuanyuan, et al. Estimating energy consumption on the basis of microscopic driving parameters for electric vehicles[J]. *Transportation Research Record*, 2014, 2454(1): 84-91.
- [36] Yang Yang, Yao Enjian, Yang Zhiqiang, et al. Modeling the charging and route choice behavior of BEV drivers [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016, 65(4): 190-204.
- [37] Zhang Rui, Yao Enjian, Yang Yang. Degradable transportation network with the addition of electric vehicles: network equilibrium analysis[J]. *PloS One*, 2017, 12(9): 1-29.
- [38] Desaulniers G, Errico F, Irnich S, et al. Exact algorithms for electric vehicle-routing problems with time windows [J]. *Operations Research*, 2016, 64(6): 1388-1405.
- [39] Hof J, Schneider M, Goeke D. Solving the battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles using an AVNS algorithm for vehicle-routing problems with intermediate stops[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017, 97(3): 102-112.
- [40] Schiffer M, Schneider M, Walther G, et al. Vehicle routing and location routing with intermediate stops: a review[J]. *Transportation Science*, 2019, 53(2): 319-343.
- [41] Bi Jun, Shao Sai, Guan Wei, et al. State of charge estimation of Li-ion batteries in an electric vehicle based on a radial-basis-function neural network [J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(11): 1-5.
- [42] Shao Sai, Guan Wei, Ran Bin, et al. Electric routing problem with charging time and variable travel time[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 2017(1): 1-14.
- [43] Bi Jun, Wang Yongxing, Sun Shuai, et al. Predicting charging time of battery electric vehicles based on regression and time-series methods: a case study of Beijing[J]. *Energies*, 2018, 11(5): 1-18.
- [44] Wang Yongxing, Bi Jun, Guan Wei, et al. Optimising route choices for the travelling and charging of battery electric vehicles by considering multiple objectives[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 64(7): 246-261.