

动态车辆路径问题的研究进展及发展趋势

周鲜成, 王 莉, 周开军[†], 黄兴斌

(1. 湖南商学院 湖南省移动电子商务协同创新中心, 长沙 410205;

2. 湖南商学院 移动商务智能湖南省重点实验室, 长沙 410205)

摘 要: 随着智能运输的发展, 动态车辆路径问题 (Dynamic vehicle routing problem, DVRP) 已引起学界的日益关注. 分析 DVRP 的特征, 从动态要素的角度将 DVRP 模型分为基于动态需求的 VRP、基于实时交通信息的 VRP、基于动态需求和实时交通信息的 VRP 三种类型, 并进行分类综述. 在此基础上, 对 3 类 DVRP 模型的路线更新策略及求解算法的研究进展进行介绍, 最后指出 DVRP 未来的发展趋势.

关键词: 车辆路径问题; 动态需求; 实时交通信息; 路线更新策略

中图分类号: F252; U116

文献标志码: A

Research progress and development trend of dynamic vehicle routing problem

ZHOU Xian-cheng, WANG Li, ZHOU Kai-jun[†], HUANG Xing-bin

(1. Mobile E-business Collaborative Innovation Center of Hunan Province, Hunan University of Commerce, Changsha 410205, China; 2. Key Laboratory of Hunan Province for Mobile Business Intelligence, Hunan University of Commerce, Changsha 410205, China)

Abstract: With the development of intelligent transportation, the dynamic vehicle routing problem (DVRP) has attracted increasing attention in the academic community. This paper analyzes the characteristics of the DVRP. From the perspective of dynamic elements, the DVRP model is divided into three types of the VRP including the dynamic demand based VRP, real-time traffic information based VRP, dynamic demand and real-time traffic information based VRP. Then, the three types of the VRP are reviewed respectively. On this basis, the research progress of the routing update strategy and optimization algorithm for three types of DVRP models are introduced. Finally, the future development trend of the DVRP is presented.

Keywords: vehicle routing problem; dynamic demand; real-time traffic information; routing update strategy

0 引 言

车辆路径问题 (Vehicle routing problem, VRP) 自 Dantzig 和 Ramser 于 1959 年提出以来, 引起了广大学者的持续关注, 现已成为运筹学领域研究最活跃、成果最丰硕的研究方向之一. 随着研究的深入, VRP 出现了多种变体, 如带容量约束的 VRP (Capacitated VRP, CVRP)、带时间窗约束的 VRP (VRP with time windows, VRPTW)、多车型 VRP (Heterogeneous VRP, HVRP)、多车场 VRP (Multi-depot VRP, MDVRP)、时间依赖型 VRP (Time-dependent VRP, TDVRP)、多周期 VRP (Multi-periodic VRP, MPVRP)、具有同时集送货

需求的 VRP (VRP with pickup and delivery, VRPPD)、绿色 VRP (Green-VRP, GVRP) 等. 目前关于 VRP 的研究, 大多数文献假定客户需求和车辆在各路段的行驶时间等要素均为静态或已知, 路径规划和实施过程中不会发生变化. 这种假设条件下, 车辆路径一经规划确定, 整个运作过程中车辆行驶路线不再改变, 这类 VRP 称为静态车辆路径问题 (Static vehicle routing problem, SVRP). 而实际的物流配送可能存在诸多动态因素, 如: 客户需求动态变化、路网交通状况动态变化等. 对于这些动态变化的情况, 传统的静态 VRP 理论和方法已不适用. 随着智能交通系统、物联网、人

收稿日期: 2018-09-25; 修回日期: 2018-12-04.

基金项目: 国家社科基金一般项目 (17BJL091); 湖南省重点研发计划项目 (2016NK2127); 湖南省社科基金项目 (17YBA243); 湖南省自然科学基金项目 (2018JJ3261).

责任编委: 刘士新.

作者简介: 周鲜成 (1965—), 男, 教授, 博士, 从事物流系统的建模与优化等研究; 王莉 (1978—), 女, 讲师, 从事优化方法与应用等研究.

[†]通讯作者. E-mail: alpha218@126.com.

工智能和网络通信技术的发展,实时获取动态需求和实时交通状况等信息已成为可能,这为研究DVRP提供了有力支持。

关于DVRP的研究可追溯到20世纪80年代,Psaraftis^[1]于1988年首次提出DVRP,随后,Bertsimas等^[2-3]、Psaraftis^[4]、Bertsimas等^[5]、Gendreau等^[6]对DVRP的内涵和特征作了进一步研究。目前,在DVRP领域已有一定数量的研究文献及综述论文^[4,7-11]。Psaraftis^[4]介绍了DVRP的应用领域以及相关技术的进展和影响;谢秉磊等^[7]分析了DVRP的特征及其渐进性,并对求解方法进行了综述;Ghiani等^[8]分析了实时VRP的类型及其主要特征,介绍了求解算法的研究进展;肖增敏等^[9]对动态网络VRP的定义、特征和分类进行研究,并对其模型与求解方法的研究进展进行了综述;Pillac等^[10]介绍了DVRP的应用领域,针对动态确定性VRP和动态随机性VRP两种类型,综述了求解方法的研究进展;Psaraftis等^[11]分析了新一代信息技术对DVRP的影响,按11种分类标准对现有研究文献进行分类综述。综观上述综述性文献可以发现,从动态需求、实时交通信息等动态要素的角度对DVRP模型进行分类和综述的文献较少,对DVRP路线更新策略进行综述的文献比较缺乏,关于DVRP不同模型求解算法的综述不够全面和系统。

DVRP的应用范围非常广泛,包括货运、客运、快递服务、设备保养服务等多个领域^[4,10],限于篇幅,本文主要聚焦于物流运输领域的DVRP,一些DVRP的特例(如动态旅行商问题(DTSP)、动态旅行修理员问题(DTRP)等)均不列入本文的综述范围。根据以上设定,以公开发表的文献为基础,选用关键词“Dynamic vehicle routing”、“Real-time AND vehicle routing”、“Dynamic demand AND vehicle routing”等在“Elsevier”、“Web of science”、“SpringerLink”、“Wiley online library”等外文数据库和相应关键词在中国知网中进行搜索,剔除报纸、书籍、科普等方面文献,筛选出76篇较高水平的论文对DVRP的研究进展进行综述。分析DVRP的特征及其分类,从动态要素的角度对DVRP模型的研究进展进行分类综述,介绍不同DVRP模型的路线更新策略和求解算法的研究进展,最后分析DVRP未来的发展趋势。

1 DVRP的特征及其分类

1.1 DVRP的特征

尽管DVRP概念的提出已有30年的时间,但到目前为止尚未形成统一的定义。Psaraftis^[1]从动态需求

的角度,将DVRP定义为“根据实时出现的顾客需求安排车辆路径”;谢秉磊等^[7]从信息实时性角度,将DVRP定义为“在系统信息实时更新的情况下,安排车辆路径以满足系统要求达到的目标”;肖增敏等^[9]从动态网络的角度对动态网络VRP进行定义。这些定义虽然侧重点各有不同,但都强调系统信息的动态性和实时性。为进一步明确DVRP的内涵,在已有定义的基础上,本文将DVRP定义为:系统根据已知信息对车辆路径进行初始规划,在实施过程中实时接收客户需求和交通状况等动态信息,按一定规则对车辆路径进行重新规划,以实现系统要求达到的目标。

在对DVRP进行定义的基础上,Psaraftis^[1]分析了DVRP与SVRP不同的12项特征,谢秉磊等^[7]、Ghiani等^[8]、肖增敏等^[9]、Pillac等^[10]从不同角度对DVRP的特征作了进一步研究。在此基础上,本文将DVRP的主要特征总结归纳如下:

1) 能实时接收各类动态信息。DVRP最重要的特征是车辆在行驶过程中,系统能实时接收各类动态信息,包括新增客户需求、老客户调整需求量和和服务时间、道路出现偶发性交通拥堵等。

2) 各类动态信息是随机和不确定的。系统收到客户需求和实时交通状况等动态信息的时间是随机的,无法预测;动态信息的内容,如新增客户数、服务时间窗、交通拥堵程度等是不确定的。

3) 车辆路径需动态更新。系统接收到各类动态信息后,需根据确定的路线更新策略,对车辆路径进行重新规划,实时更新车辆路线。

4) 对动态信息具有快速响应性。在DVRP中,系统接收到各类动态信息后,需进行实时处理,通过快速计算重新规划车辆路径,以确保系统的快速响应性和车辆路径更新的实时性。

5) 车辆油耗和碳排放量将会增加。在DVRP中,交通拥堵或车辆故障等状况使得车辆行驶速度低于正常速度,车辆路径将更新,这会导致车辆油耗和碳排放量增加。

1.2 DVRP的分类

在DVRP中,主要的动态要素包括:动态需求、动态的路段行驶时间、动态的服务车辆等^[11]。根据动态要素及其特征的不同,现有文献研究的DVRP主要分为以下3种类型:

1) 基于动态需求的VRP(Dynamic demand based VRP, DDVRP)。该类问题中,需求是动态变化的,包括新增客户需求、老客户取消配送服务、改变送货位置、需求量或时间窗等,导致车辆在行驶过程中需根据动

态需求信息更新车辆路线。

2) 基于实时交通信息的VRP(Real-time traffic information based VRP, RTVRP). 其特征是交通状况实时变化, 由于交通事故、车辆故障、天气变化等偶发事件影响引发交通拥堵, 导致车辆行驶速度受实时交通状况影响, 路段行驶时间动态变化, 车辆在行驶过程中需根据实时交通信息更新车辆路线。

3) 基于动态需求和实时交通信息的VRP(Dynamic demand & real-time traffic information based VRP, DDRVP). 这是DVRP最复杂的一类问题, 动态要素不仅包括客户的动态需求, 同时也包括路网交通状况的动态变化, 其求解比较复杂。

关于DVRP分类需要注意的是, TDVRP看似属于DVRP, 但实际上不是。在TDVRP中, 尽管车辆在各路段的行驶时间随时间段的不断可能发生变化, 但这种变化在路径规划之前就是已知和确定的, 车辆在行驶过程中不再改变行驶路线, 根据SVRP和DVRP的定义, TDVRP仍然属于SVRP。

2 关于DVRP模型的研究进展

2.1 关于DDRVP的研究

动态需求包括多种情况, 现有DDRVP文献研究最多的一种类型是新增客户需求, 有些文献还考虑了其他动态需求要素, 如需求量变化、时间窗变化、配送地址变化和订单取消等。根据考虑动态需求要素数量的不同, 现有DDRVP可分为单动态需求要素VRP和多动态需求要素VRP两种类型。

1) 关于单动态需求要素VRP的研究。现有文献研究的单动态需求要素主要集中在新增客户需求。针对新增客户需求并考虑容量约束, 以总成本最小化作为优化目标, Pillac等^[12]构建面向对象事件驱动的DVRP模型, 将客户需求视作场景, 采用多场景方法定期更新场景池, 并删除过时场景; Abdallah等^[13]构建带容量约束的DVRP模型, 按时间段将动态需求VRP转化成一系列SVRP; Hu等^[14]针对收集和配送货物不相容的问题, 以运输成本、被二次访问的顾客数量和总不相容性最小化作为优化目标, 构建带容量约束的DVRPPD模型, 制定了生成初始路径和动态优化路径的两阶段策略。针对新增客户需求并考虑时间窗或工作时间约束, Armas等^[15]以总行驶距离、延迟服务客户数等作为分层优化目标, 构建带软时间窗和客户优先权约束的多车型DVRP模型, 采用生成初始路径和实时动态调整的两阶段策略; Kuo等^[16]针对服务时间不确定的动态需求VRP, 以服务客户数量最大化和客户平均等待时间最小化作为优化目标,

运用模糊理论构建带工作时间约束的DVRP模型, 提出了一种改进模糊变化约束规划方法。针对新增客户需求并考虑容量和时间窗约束, Ghannadpour等^[17]以车辆数、总行驶距离、车辆等待时间最小化和用户总体满意度最大化作为优化目标, 构建带容量和模糊时间窗约束的多目标DVRP模型; Chen等^[18]以总成本最小化作为优化目标, 建立带容量和时间窗约束的DVRP模型。文献[17-18]均采用了生成初始路径和按时间段定期更新路径的两阶段策略。针对新增客户需求并考虑容量和时间窗约束的MPVRP, Angelelli等^[19]于2009年首次提出带随机顾客请求的MPVRP, 以接受请求数最大化和运作成本最小化作为优化目标, 按时间段定期重新规划车辆路径以满足短期动态客户需求; Sambola等^[20]以总成本最小化作为优化目标, 提出一种自适应服务策略, 以估计服务每个请求的最佳时间周期来降低配送成本; Ulmer等^[21]将带随机顾客请求的MPVRP视为马尔可夫决策, 以接受服务请求数最大化作为优化目标, 提出一种基于近似动态规划的预期动态策略。针对新增客户需求并考虑容量、时间窗或工作时间约束的MDVRP, Slater^[22]使用专家系统和人工智能预测电子商务环境下的客户需求, 以总行驶距离或总工时最小化作为优化目标, 建立带容量和时间窗约束的MDVRP模型, 采用决策支持系统进行求解; Okulewicz等^[23]以总成本最小化作为优化目标, 建立带容量和工作时间约束的MDVRP模型, 按时间段采用进化算法优化车辆路径。

2) 关于多动态需求要素VRP的研究。李兵等^[24]考虑新增客户需求和老客户配送地址变化2种动态需求要素, 以总成本最小化作为优化目标, 构建带容量和时间窗约束的DVRP模型, 引入虚拟任务点, 按时间段将客户需求随时间变化的DVRP转化成普通的SVRP; 张景玲等^[25]考虑新增客户需求和老客户需求量变化2种动态需求要素, 以总成本最小化作为优化目标, 构建带容量约束的多车型开放式DVRP模型, 制定了“预优化路线调度”和“实时动态调度”的两阶段策略。张文博等^[26]考虑新增客户需求、时间窗调整和订单取消3种动态需求要素, 以总成本最小化作为优化目标, 构建带容量和软时间窗约束的DVRP模型, 并将动态需求过程转化成为多个瞬时静态子过程; Schyns^[27]考虑新增客户需求、客户取消、需求量变化、时间窗变化、客户或车辆位置变化等多种动态需求要素, 以动态事件响应时间最小化作为优化目标, 构建带容量和时间窗约束的多车型DVRP模型,

并比较分析了定时更新策略和动态事件更新策略对响应性的影响程度。

2.2 关于RTVRP的研究

现有文献对实时交通信息没有进一步细分,根据考虑约束条件的不同,现有文献主要研究了带容量约束的RTVRP、带时间窗约束的RTVRP、带容量和时间窗约束的RTVRP三种类型。

1) 关于带容量约束RTVRP的研究. 李妍峰等^[28-29]针对车辆行驶过程中出现突发事故的情形,以行驶时间最小化作为优化目标构建带容量约束的DVRP模型,引入了一种在关键点更新路线的新机制; Davis^[30]以路段上实时的车辆数表征交通拥堵状况,以行驶时间最小化作为优化目标,构建带道路容量约束的DVRP模型; Wang等^[31]采用卡尔曼滤波器实时预测交通流,以行驶时间最小化作为优化目标,构建带道路容量约束的动态路径引导模型,并通过定时接收交通信息更新车辆路径。

2) 关于带时间窗约束RTVRP的研究. Kim等^[32]考虑时变交通流,以总成本和车辆使用数最小化作为优化目标,建立带时间窗约束的DVRP模型,采用基于马尔可夫决策的方法确定车辆最佳出发时间和最佳路线; 张杨等^[33]考虑堵塞点动态产生、堵塞时间为随机变量的情况,以总成本最小化作为优化目标,构建带时间窗约束的DVRP模型,采取了将堵塞点作为新起点的路线更新策略; Güner等^[34]将交通堵塞分为可预测的周期性堵塞和不可预测的非周期性堵塞,使用随机排队模型预估非周期性堵塞的时间延迟,以行驶时间最小化作为优化目标,建立了基于马尔可夫决策过程的DVRP模型。

3) 关于带容量和时间窗约束RTVRP的研究. 考虑路段行驶时间实时变化, Li等^[35]针对车辆故障导致收送货服务被中断的实时VRP,以运作、服务取消和路径中断3种成本的加权和作为目标函数,构建带容量和时间窗约束的实时VRP模型,并以车辆故障发生地作为起点对备份车辆进行路径规划. 以总成本最小化作为优化目标, Taniguchi等^[36]构建带容量和时间窗约束的DVRP模型,在顾客处接收行驶时间信息并进行路线更新; Qureshi等^[37]构建带容量和软时间窗约束的DVRP模型,实时接收动态行驶时间信息并更新车辆路径; Nakamura等^[38]考虑动态事件对路段行驶时间的影响,构建带容量和软时间窗约束的DVRP模型,分别采用3种最短路径模型确定两节点之间的最短路径,并比较了3种模型对总成本的影响。

2.3 关于DDVRP的研究

DDVRP是DVRP最复杂的一类问题,动态要素不仅包括顾客的动态需求,同时也包括路网交通状况的动态变化. 目前关于DDVRP的研究文献较少,主要包括带容量约束的DDVRP、带时间窗约束的DDVRP、带容量和时间窗约束的DDVRP三种类型. Núñez等^[39]考虑新增客户请求和动态路网的交通状况,以用户和运营商成本最小化作为优化目标,构建带容量和客户优先级约束的DVRPPD模型,采用混合自适应预测控制方法实时更新车辆路径; Potvin等^[40]考虑新增客户订单和动态的路段行驶时间,以行驶时间、配送总延迟时间和返回配送中心总延迟时间的加权和作为目标函数,构建带时间窗约束的DVRP模型,在顾客处接收顾客请求和动态行驶时间等信息,并更新车辆路径; Fleischmann等^[41]以总成本和总延迟最小化作为优化目标,构建带容量和时间窗约束的DVRP模型,实时优化车辆路径; Chen等^[42]考虑实时需求和突发事件对时间依赖型行驶时间的影响,以总行驶时间和总等待时间的加权和作为目标函数,构建带容量和时间窗约束的DVRP模型,提出了一种以关键点区分已服务顾客和未服务顾客的策略; 王江晴等^[43]考虑新增客户需求和路段行驶时间动态变化,以车辆使用数、行驶时间、客户等待时间和车辆等待时间最小化作为优化目标,构建带容量和时间窗约束的DVRP模型,当交通不畅或堵塞发生在最短(时间)路径上时,根据实时交通信息寻找新的最短路径; Wohlgemuth等^[44]考虑灾难救援中新增订单和动态行驶时间,以车辆数、总行驶时间最小化作为优化目标,构建带容量和时间窗约束的DVRPPD模型,采用兼顾时间窗和动态行驶时间的分级聚类方法聚类顾客,实时更新车辆路径。

2.4 关于动态要素和约束条件关联性的研究

动态需求、实时交通信息等动态要素对DVRP模型的构建及求解方法有着重要影响,并与容量、时间窗等约束条件具有较强的关联性. 因此,针对不同的动态要素,应根据不同情况和实际需要提出具体的处理方法和思路. 目前,关于动态要素和约束条件关联性的研究还比较零散,不够系统和全面. 现有文献主要集中在动态要素与容量约束、时间窗约束以及容量和时间窗约束的关联性3个方面。

1) 关于动态要素与容量约束关联性的研究. 针对新增客户需求, 王江晴等^[43]对于有配送需求的动态客户,采取重新派出车辆完成服务的策略; Pillac

等^[12]提出,当新增顾客需求量超过车辆剩余容量时,先完成车辆剩余容量货物的服务,然后返回仓库恢复车辆容量,再对该客户未完成的需求量进行服务;Hu等^[14]为满足不确定收货需求的需要,引入载荷比控制参数,若载荷比控制参数未超过设定值,则车辆在顾客处收集货物,否则安排第2轮收集.针对实时交通信息,Wang等^[31]考虑交通拥堵对道路容量的影响,利用BPR函数计算实时交通信息条件下的道路容量.

2) 关于动态要素与时间窗约束关联性的研究.针对新增客户需求,Armas等^[15]考虑新增客户需求对时间窗的影响,如果在原有路径中插入新客户违背时间窗约束,则对目标客户进行调整;Kuo等^[16]根据剩余工作时间和后续服务时间,确定是当天还是第2天为新客户服务.针对实时交通信息,张杨等^[33]考虑塞车概率和堵塞时间的期望及其对时间窗约束的影响,若违背时间窗约束则增加延迟惩罚成本;Potvin等^[40]考虑动态行驶时间对时间窗约束的影响,若车辆预计到达时间不满足目标客户时间窗要求,则直接将该客户移至另一条路径;Taniguchi等^[36]、Nakamura等^[38]考虑实时交通信息对时间窗约束的影响,若车辆延迟到达,则必须根据延迟时间长短支付延迟罚款;Güner等^[34]考虑拥堵和交通事故对时间窗约束的影响,由马尔可夫决策过程生成最小成本路径决策.

3) 关于动态要素与容量和时间窗约束关联性的研究.针对新增客户需求,Chen等^[18]考虑新请求对车辆容量和时间窗的影响,如果不违背容量和时间窗约束,则将新请求加到请求池等待插入当前路径,否则拒绝该请求.针对实时交通信息,Li等^[35]考虑实时交通信息对容量和时间窗约束的影响,若容量和时间窗任一约束条件不满足,则取消该服务.针对新增客户需求和实时交通信息,Chen等^[42]对车辆容量和车辆服务时间、到达时间进行预计算,若不满足容量或时间窗任一约束条件,则从服务清单中移除该新客户.

3 关于DVRP求解方法的研究进展

DVRP的求解涉及两个方面的问题:一是系统根据什么规则对车辆路线进行更新;二是系统采用何种优化算法对路径进行优化.

3.1 关于DVRP路线更新策略的研究

关于DVRP的路线更新策略,现有文献提出了4种策略:一是定期更新策略,该策略在DVRP领域由Kilby等^[45]于1998年首次提出,其基本思想

是将每个工作日划分为若干个相等的时间片,按时间片将DVRP转化成为一系列的SVRP,采用SVRP的优化方法更新车辆路径,文献[13,16-19,21,23,26-27,31,34,43,46-47]均采用该策略更新车辆路线;二是动态事件更新策略,最先由Gendreau等^[48]于1999年提出,其基本思想是,每当接收到新的动态事件,系统将其与原有信息进行聚合,更新当前路径,待车辆完成正在进行的需求点服务后,通知其下一个需服务的客户,文献[12,15,22,27,37,39,41,44,49]均采用该策略更新车辆路线;三是顾客处更新策略,每当车辆到达顾客处,调度中心与顾客和驾驶员进行通信,接收顾客请求和实时交通状况等动态信息,对车辆路径进行重新规划,并告知驾驶员下一个服务目的地^[36,40];四是关键点更新策略,系统在顾客处、路网节点和堵塞点等关键点重新进行路径规划^[28,29,33,42,50],Chen等^[42]首次提出关键点的概念,每当接收到动态信息,将有车辆正在服务或即将被服务的顾客点确定为关键点,据此区分已服务顾客和未服务顾客^[50],李妍峰等^[28-29]将车辆经过的路网节点定义为关键点,每当车辆到达关键点,便更新路段瞬时行驶时间,并将与关键点瞬时路径最短的顾客选择作为下一个服务点.

这4种路线更新策略各有特点,可根据实际情况和不同需要合理选用.定期更新策略将DVRP转化成为SVRP,采用SVRP的求解算法进行求解,算法选择空间大^[10],但不能对具有紧迫性的动态需求给予优先调度^[27],其效率取决于时间片长短的选取^[28].动态事件更新策略更新信息准确,调整路线及时,能对具有紧迫性的动态需求给予优先调度,但计算量非常大^[10].顾客处更新策略的实施过程相对简单,但如果车辆在去往下一顾客的途中遇到突发性交通拥堵,则会由于没有及时更新信息导致车辆陷入较长时间的等待^[29].关键点更新策略是一种比较有效的路线更新策略,与定时更新策略相比,信息更新更准确,调整路线更有效,与动态事件更新策略相比,计算量要小,与顾客处更新策略相比,信息更新和路线调整更及时^[29],但该策略要求能获得较为全面和准确的路网和交通状况信息.

3.2 关于DVRP优化算法的研究

DVRP求解算法主要包括精确算法和启发式算法两大类.用于求解DVRP的精确算法主要有:分支定界法^[43]、列生成算法^[37,46]、神经动态规划算法^[51]、自适应动态规划算法^[52]、近似动态规划算法^[53]和向后动态规划算法^[34]等.由于DVRP对快速性和实时

性要求高,而精确算法无法避开指数爆炸问题,只能求解小规模VRP且需耗费大量计算时间,现有文献大都采用启发式算法求解.在DVRP领域采用的启发式算法主要有禁忌搜索(TS)算法、邻域搜索(NS)算法、蚁群算法(ACO)、遗传算法(GA)、粒子群算法(PSO)和混合算法等.

Gendreau等^[48]针对带软时间窗约束的动态需求VRP,最先提出采用并行禁忌搜索算法进行求解,每当接收到动态请求,便采用插入算法将新请求插入到当前解中并更新. Ichoua等^[54]采用该算法求解DDVRP模型, Wohlgemuth等^[44]采用该算法求解DDRVRP模型.

针对动态需求VRPPD, Gendreau等^[49]提出一种基于排出链的邻域搜索算法进行求解;针对新增客户需求VRP, Pillac等^[12]、Azi等^[55]和Chen等^[18]采用自适应大邻域搜索算法求解DDVRP模型; Hu等^[14]、Armas等^[15]、Sambola等^[20]采用可变邻域搜索算法求解DDVRP模型; 饶卫振等^[56]采用贪婪算法和混合大邻域算法的两阶段算法求解DDRVRP模型.

Montemanni等^[47]针对新增订单请求的VRP,首次提出采用蚁群系统求解,系统由事件管理器、蚁群算法、信息素保存程序3部分构成,事件管理器负责接收新订单并跟踪已服务订单和车辆位置,蚁群算法对事件管理器产生的静态VRP进行优化求解,信息素保存程序用于将优良解信息从一个时间片传递到下一个时间片. Kuo等^[16]和Schyns^[27]均采用该算法求解DDVRP模型.

Hanshar等^[57]针对Montemanni等^[47]构建的DVRP模型,首次采用遗传算法求解;葛显龙等^[50]提出一种云遗传算法,利用云模型中云滴的随机性和稳定性,改进交叉与变异算子的设置方式,以提高算法的快速收敛性; Barkaoui等^[58]提出一种自适应混合二级遗传算法,通过优化主算法的遗传算子,获得选择、交叉和变异算子的最佳组合,以提高解的质量. Abdallah等^[13]和Ghannadpour等^[17]、Nakamura等^[38]、Núñez等^[39]分别采用该算法求解DDVRP、RTVRP和DDRVRP三种模型.

Sabar等^[59]首次应用PSO算法求解动态需求VRP,其后提出一种多群自适应PSO算法^[60],与可变邻域搜索算法相比,PSO算法具有较好的自适应性和稳定性^[61]; Cortes等^[62]为求解动态需求VRPPD提出了一种自组织PSO算法; Okulewicz等^[23]为求解动态需求MDVRP模型提出了一种两阶段多群PSO算法.

为提高DVRP模型优化解的质量,学者们提出了多种混合启发式算法. 针对多目标DDVRP,吴兆福等^[63]将演化算法与蚁群算法相结合,提出了一种演化蚁群算法. 为求解DDVRP, Elhassania等^[64]将大邻域搜索算法与蚁群算法相结合,提出一种基于大邻域搜索的蚁群算法; Euchl等^[65]将2-OPT局部搜索算法与蚁群算法相结合,提出了基于局部搜索的蚁群算法; Kuo等^[16]将模糊理论、聚类插入算法和蚁群算法相结合,提出了模糊蚁群算法. 为求解随机和带周期交通因素的RTVRP, Gao等^[66]将聚类算法与蚁群算法相结合,提出了一种聚类蚁群算法. 为求解带容量和软时间窗约束的DDVRP,王万良等^[67]将3-OPT局部搜索算法与量子算法相结合,设计了混合3-OPT量子进化算法.

除上述常用启发式算法外,相关文献还提出了DVRP的一些其他求解方法. 针对DDVRP模型, Slater^[22]提出一种并行巡游构建算法, Bent等^[68]提出采用多场景方法求解, 李兵等^[24]提出采用节约算法求解, 熊浩^[69]提出采用分区灵活分批TSP策略求解, Madziuk等^[70]提出采用Memetic局部优化算法求解, 张文博等^[26]提出采用模拟退火算法求解. 针对RTVRP模型, 刘士新等^[71]应用2-opt局域搜索算子更新车辆服务客户的顺序, 提出一种导向局域搜索算法, Li等^[35]提出一种基于拉格朗日松弛的启发式算法, 李妍峰等^[28-29]提出采用Dynasearch算法求解, Wang等^[31]提出一种改进的分层Dijkstra算法. 针对DDRVRP模型, Potvin等^[40]提出一种插入启发式算法求解, 王江晴等^[43]分别采用分支定界法、节约法和E-A算法求解并进行了比较分析.

4 发展趋势

综上所述,现有的DVRP模型研究主要考虑了动态需求要素和动态行驶时间等动态信息,同时考虑了容量或时间窗等约束条件,建立了多种DVRP模型,为DVRP的研究奠定了良好基础. 但随着智能运输和智能物流的快速发展,DVRP模型的研究正面临一些新的挑战 and 值得探讨的问题,主要包括:

1) 基于多种动态要素的DVRP模型研究. 现有DVRP模型的研究主要考虑动态需求或动态路网等单一要素,同时考虑多种动态要素的DVRP模型研究较少. 但在实际的物流配送领域,新增客户请求、改变配送地址和服务时间窗、交通拥堵、车辆抛锚等多种动态事件有可能同时发生,且智能交通系统和新一代信息技术的发展能为及时获得各类动态信息提供

有力保障. 此外,将大数据分析和预测分析学应用于DVRP领域,通过分析实时和历史性的海量物流运输数据,预测动态需求和动态行驶时间等未来可能出现的动态事件,有助于深化DVRP模型的研究^[11]. 因此,基于多种动态要素的DVRP模型研究有待进一步深入探索.

2) 考虑动态目标和多种约束条件的DVRP模型研究. 现有关于DVRP研究的相关文献,其优化目标大都与SVRP的静态目标类似,较少研究体现DVRP动态性的一些优化目标^[11],如单位时间服务顾客的数量、新增顾客请求的接受比例、动态事件响应时间、配送延迟时间和客户满意度等. 其次,现有DVRP文献考虑的约束条件主要是容量和时间窗约束,考虑多车型、多车场、多周期、时间依赖型等其他约束条件或包括多种约束条件的DVRP研究文献还较少. 此外,关于危险品运输的VRP研究已开始得到学者的关注^[72-73],而关于危险品运输的DVRP研究则非常缺乏. 因此,考虑动态目标和多种约束条件的DVRP模型还有待深入研究.

3) 考虑节能减排的绿色DVRP模型研究. 在RTVRP中,由于受交通拥堵等因素影响,车辆行驶速度是一个动态变量,而车速是影响车辆油耗和碳排放的重要因素,将DVRP与GVRP相结合进行研究很有必要^[11]. 在GVRP研究领域,Kara等^[74]于2007年首次提出了能耗最小化VRP,Bektas等^[75]于2011年提出了污染路径问题,Erdogan等^[76]于2012年提出了绿色车辆路径问题(GVRP)等概念. 尽管这些概念提法不同,但内涵没有本质区别,节能减排均为其重要的优化目标,本文将其统称为GVRP. 到目前为止,DVRP和GVRP均产生了较多的研究成果,但将两者结合在一起的绿色DVRP研究还很少^[11]. 在推进物流领域节能减排的背景下,绿色DVRP是一个很有前景的研究领域.

针对DVRP模型,现有文献主要采用精确算法或启发式算法求解,其应用场景大都为规模较小的仿真算例或模拟案例,与实际应用存在较大差距. 为此,在模型求解方面需要深入研究以下几个方面的问题:

1) 适用于大规模DVRP的并行求解算法研究. 现有文献采用的算例其客户数大都在100以下,DVRP的规模不大,求解算法大都是适用于SVRP的启发式算法,如应用于求解大规模DVRP将影响系统的实时性. 随着多核处理器、CUDA(Compute unified device architecture, CUDA)和GPU(Graphical processing unit,

GPU)的出现,并行计算得到广泛应用. 大规模DVRP模型的求解计算量大,对实时性要求高,因此,充分利用并行结构的优势,加强并行算法研究,设计出运算速度快、适用于大规模DVRP的并行算法是一个值得深入研究的方向.

2) DVRP求解算法标准测试案例库设计. DVRP已引起广大学者的关注,但目前尚没有公开的标准测试案例库. 现有文献大都是根据研究需要对Solomon基准案例库等进行改造或设计模拟案例作为DVRP的仿真算例,因采用的仿真算例相关参数不一致,不便于仿真结果的对比分析. 因此,建立适用于DVRP模型求解算法的标准测试案例库对促进DVRP的进一步研究具有重要价值.

3) DVRP模型与求解算法的实证研究. 为验证构建模型和提出算法的可行性和有效性,现有文献大都是采用VRP基准案例库的算例或小规模的模拟案例,将实际路网作为应用场景的研究还较少,如本文引用的76篇参考文献仅有6篇论文的应用场景是实际的交通路网. 因此,DVRP模型与求解算法的实证研究有待进一步加强.

参考文献(References)

- [1] Psaraftis H N. Vehicle routing: Methods and studies[M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1988: 223-248.
- [2] Bertsimas D J, Ryzin G V. A stochastic and dynamic vehicle routing problem in the euclidean plane[J]. Operations Research, 1991, 39(4): 601-615.
- [3] Bertsimas D J, Ryzin G V. Stochastic and dynamic vehicle routing in the euclidean plane with multiple capacitated vehicles[J]. Operations Research, 1993, 41(1): 60-76.
- [4] Psaraftis H N. Dynamic vehicle routing: Status and prospects[J]. Annals of Operations Research, 1995, 61(1): 143-164.
- [5] Bertsimas D J, Simchi-Levi. A new generation of vehicle routing: Robust algorithms, addressing uncertainty[J]. Operations Research, 1996, 44(2): 286-304.
- [6] Gendreau M, Potvin J. Fleet management and logistics[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1998: 115-126.
- [7] 谢秉磊, 郭耀煌, 郭强. 动态车辆路径问题: 现状与展望[J]. 系统工程理论方法应用, 2002, 11(2): 116-119. (Xie B L, Guo Y H, Guo Q. Dynamic vehicle routing problems: Status and prospect[J]. Systems Engineering-Theory Methodology Applications, 2002, 11(2): 116-119.)
- [8] Ghiani G, Guerriero F, Laporte G, et al. Real-time vehicle

- routing: Solution concepts, algorithms and parallel computing strategies[J]. *European J of Operational Research*, 2003, 151(1): 1-11.
- [9] 肖增敏, 李军. 动态网络车辆路径问题: 研究现状及展望[J]. *系统工程*, 2004, 22(7): 68-71.
(Xiao Z M, Li J. Vehicle routing problem in dynamic networks research status and prospect[J]. *Systems Engineering*, 2004, 22(7): 68-71.)
- [10] Pillac V, Gendreau M, Gu  ret C, et al. A review of dynamic vehicle routing problems[J]. *European J of Operational Research*, 2013, 225(1): 1-11.
- [11] Psaraftis H N, Wen M, Kontovas C A. Dynamic vehicle routing problems: Three decades and counting[J]. *Wiley-Interscience*, 2016, 67(1): 3-31.
- [12] Pillac V, Gu  ret C, Medaglia A L. An event-driven optimization framework for dynamic vehicle routing[J]. *Decision Support Systems*, 2012, 54(1): 414-423.
- [13] Abdallah A M F M, Essam D L, Sarker R A. On solving periodic re-optimization dynamic vehicle routing problems[J]. *Applied Soft Computing*, 2017, 55(6): 1-12.
- [14] Hu Z H, Sheu J B, Zhao L, et al. A dynamic closed-loop vehicle routing problem with uncertainty and incompatible goods[J]. *Transportation Research Part C*, 2015, 55(6): 273-297.
- [15] Armas J D, Batista B M. Variable neighborhood search for a dynamic rich vehicle routing problem with time windows[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2015, 85(7): 120-131.
- [16] Kuo R J, Wibowo B S, Zulvia F E. Application of a fuzzy ant colony system to solve the dynamic vehicle routing problem with uncertain service time[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2016, 40(23/24): 9990-10001.
- [17] Ghannadpour S F, Noori S, Moghaddam R T, et al. A multi-objective dynamic vehicle routing problem with fuzzy time windows: Model, solution and application[J]. *Applied Soft Computing*, 2014, 14(1): 504-527.
- [18] Chen S F, Chen R, Wang G G, et al. An adaptive large neighborhood search heuristic for dynamic vehicle routing problems[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2018, 67(4): 596-607.
- [19] Angelelli E, Bianchessi N, Mansini R, et al. Short term strategies for a dynamic multi-period routing problem[J]. *Transportation Research Part C*, 2009, 17(2): 106-119.
- [20] Sambola M A, Fern  ndez E, Laporte G. The dynamic multiperiod vehicle routing problem with probabilistic information[J]. *Computers & Operations Research*, 2014, 48(4): 31-39.
- [21] Ulmer M W, Soeffker N, Mattfeld D C. Value function approximation for dynamic multi-period vehicle routing[J]. *European J of Operational Research*, 2018, 269(3): 883-899.
- [22] Slater A. Specification for a dynamic vehicle routing and scheduling system[J]. *Int J of Transport Management*, 2002, 1(1): 29-40.
- [23] Okulewicz M, Madziuk J. The impact of particular components of the pso-based algorithm solving the dynamic vehicle routing problem[J]. *Applied Soft Computing*, 2017, 58(9): 586-604.
- [24] 李兵, 郑四发, 曹剑东, 等. 求解客户需求动态变化的车辆路径规划方法[J]. *交通运输工程学报*, 2007, 7(1): 106-110.
(Li B, Zheng S F, Cao J D, et al. Method of solving vehicle routing problem with customers' dynamic requests[J]. *J of Traffic and Transportation Engineering*, 2007, 7(1): 106-110.)
- [25] 张景玲, 赵燕伟, 王海燕, 等. 多车型动态需求车辆路径问题建模及优化[J]. *计算机集成制造系统*, 2010, 16(3): 543-550.
(Zhang J L, Zhao Y W, Wang H Y, et al. Modeling and algorithms for a dynamic multi-vehicle routing problem with customers' dynamic requests[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2010, 16(3): 543-550.)
- [26] 张文博, 苏秦, 程光路. 基于动态需求的带时间窗的车辆路径问题[J]. *工业工程与管理*, 2016, 21(6): 68-74.
(Zhang W B, Su Q, Cheng G L. Vehicle routing problem with time windows based on dynamic demands[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2016, 21(6): 68-74.)
- [27] Schyns M. An ant colony system for responsive dynamic vehicle routing[J]. *European J of Operational Research*, 2015, 245(3): 704-718.
- [28] 李妍峰, 高自友, 李军. 基于实时交通信息的城市动态网络车辆路径优化问题[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(7): 1813-1819.
(Li Y F, Gao Z Y, Li J. Vehicle routing problem in dynamic urba network with real-time traffic information[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2013, 33(7): 1813-1819.)
- [29] 李妍峰, 高自友, 李军. 动态网络车辆路径派送问题研究[J]. *管理科学学报*, 2014, 17(8): 1-9.
(Li Y F, Gao Z Y, Li J. Dynamic vehicle routing and dispatching problem[J]. *J of Management Sciences in China*, 2014, 17(8): 1-9.)
- [30] Davis L C. Dynamic origin-to-destination routing of wirelessly connected, autonomous vehicles on a congested network[J]. *Physica A*, 2017, 478(7): 93-102.
- [31] Wang J, Niu H. A distributed dynamic route guidance approach based on short-term forecasts in cooperative infrastructure-vehicle systems[J]. *Transportation*

- Research Part D: Transport and Environment, 2018, DOI: 10.1016/j.trd.2018.05.005.
- [32] Kim S, Lewis M E, Chelsea C. Optimal vehicle routing with real-time traffic information[J]. IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems, 2005, 6(2): 178-188.
- [33] 张杨, 黄庆, 卜祥智. 随机旅行时间局内车辆路径问题的模型及其算法[J]. 管理工程学报, 2006, 20(3): 82-84.
- (Zhang Y, Huang Q, Bu X Z. A semi-online algorithm for parallel machine scheduling on three machines[J]. J of Industrial Engineering and Engineering Management, 2006, 20(3): 82-84.)
- [34] Güner A R, Murat A, Chinnam R B. Dynamic routing under recurrent and non-recurrent using real-time its information[J]. Computers & Operations Research, 2012, 39(2): 358-373.
- [35] Li J Q, Mirchandani P B, Borenstein D. Real-time vehicle rerouting problems with time windows[J]. European J of Operational Research, 2009, 194(3): 711-727.
- [36] Taniguchi E, Shimamoto H. Intelligent transportation system based dynamic vehicle routing and scheduling with variable travel times[J]. Transportation Research Part C, 2004, 12(3): 235-250.
- [37] Qureshi A G, Taniguchi E, Yamada T. A microsimulation based analysis of exact solution of dynamic vehicle routing with soft time windows[C]. The 7th Int Conf on City Logistics. Mallorca: Elsevier, 2012, 39: 205-216.
- [38] Nakamura Y, Taniguchi E, Yamada T, et al. Selecting a dynamic and stochastic path method for vehicle routing and scheduling problems[C]. The 6th Int Conf on City Logistics. Puerto Vallarta: Elsevier, 2010, 2(3): 6042-6052.
- [39] Núñez A, Sáez D, Cortés C E. Hybrid predictive control for the vehicle dynamic routing problem based on evolutionary multiobjective optimization(EMO)[C]. Proc of the 17th World Congress Int Federation of Automatic Control. Seoul: The International Federation of Automatic Control, 2008: 13085-13090.
- [40] Potvin J Y, Xu Y, Benyahia I. Vehicle routing and scheduling with dynamic travel times[J]. Computer & Operation Research, 2006, 33(4): 1129-1137.
- [41] Fleischmann B, Gnutzmann S, Sandvoß E. Dynamic vehicle routing based on online traffic information[J]. Transportation Science, 2004, 38(4): 420-433.
- [42] Chen H K, Hsueh C F, Chang M S. The real-time time-dependent vehicle routing problem[J]. Transportation Research Part E, 2006, 42(5): 383-408.
- [43] 王江晴, 张潇. 复杂环境下动态车辆路径问题的建模与求解[J]. 武汉大学学报: 理学版, 2010, 56(4): 462-466.
- (Wang J Q, Zhang X. Modeling and solving of dynamic vehicle routing problem in complex environment[J]. J of Wuhan University: Natural Science Edition, 2010, 56(4): 462-466.)
- [44] Wohlgemuth S, Oloruntoba R, Clausen U. Dynamic vehicle routing with anticipation in disaster relief[J]. Socio-Economic Planning Sciences, 2012, 46(4): 261-271.
- [45] Kilby P, Prosser P, Shaw P. Dynamic VRPs: A study of scenarios[R]. APES-06-1998, University of Strathclyde, 1998.
- [46] Chen Z, Xu H. Dynamic column generation for dynamic vehicle routing with time windows[J]. Transportation Science, 2006, 40(1): 74-88.
- [47] Montemanni R, Gambardella L M, Rizzoli A E, et al. Ant colony system for a dynamic vehicle routing problem[J]. J of Combinatorial Optimization, 2005, 10(4): 327-343.
- [48] Gendreau M, Guertin F, Potvin J Y, et al. Parallel tabu search for real-time vehicle routing and dispatching[J]. Transportation Science, 1999, 33(4): 381-390.
- [49] Gendreau M, Guertin F, Potvin J Y, et al. Neighborhood search heuristics for a dynamic vehicle dispatching problem with pick-ups and deliveries[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2006, 14(3): 157-174.
- [50] 葛显龙, 王旭, 邓蕾. 基于联合配送的开放式动态车辆路径问题及算法研究[J]. 管理工程学报, 2013, 27(3): 60-68.
- (Ge X L, Wang X, Deng L. Research on open and dynamic vehicle routing problems based on joint distribution[J]. J of Industrial Engineering and Engineering Management, 2013, 27(3): 60-68.)
- [51] Secomandi N. Comparing neuro-dynamic programming algorithms for the vehicle routing problem with stochastic demands[J]. Computers & Operations Research, 2000, 27(11): 1201-1225.
- [52] Godfrey G, Powell W B. An adaptive dynamic programming algorithm for dynamic fleet management, I: Single period travel times[J]. Transport Science, 2002, 36(1): 21-39.
- [53] Novoa C, Storer R. An approximate dynamic programming approach for the vehicle routing problem with stochastic demands[J]. European J of Operational Research, 2009, 196(2): 509-515.
- [54] Ichoua S, Gendreau M, Potvin J Y. Exploiting knowledge about future demands for real-time vehicle dispatching[J]. Transportation Science, 2006, 40(2): 211-225.
- [55] Azi N, Gendreau M, Potvin J Y. A dynamic vehicle routing problem with multiple delivery routes[J]. Annals Operations Research, 2012, 199: 103-112.

- [56] 饶卫振, 金淳, 刘锋, 等. 一类动态车辆路径问题模型和两阶段算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(1): 159-166.
(Rao W Z, Jin C, Liu F, et al. Model and two-stage algorithm on dynamic vehicle routing problem[J]. J of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(1): 159-166.)
- [57] Hanshar F T, Ombuki-Berman B M. Dynamic vehicle routing using genetic algorithms[J]. Applied Intelligence, 2007, 27(1): 89-99.
- [58] Barkaoui M, Gendreau M. An adaptive evolutionary approach for real-time vehicle routing and dispatching[J]. Computers & Operations Research, 2013, 40(7): 1766-1776.
- [59] Sabar N R, Bhaskar A, Chung E, et al. A self-adaptive evolutionary algorithm for dynamic vehicle routing problems with traffic congestion[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2019, 44(2): 1018-1027.
- [60] Khouadjia M R, Alba E, Jourdan L, et al. Multi-swarm optimization for dynamic combinatorial problems: A case study on dynamic vehicle routing problem[C]. Int Conf on Swarm Intelligence. Berlin: Springer-Verlag, 2010: 227-238.
- [61] Khouadjia M R, Sarasola B, Alba E, et al. A comparative study between dynamic adapted PSO and VNS for the vehicle routing problem with dynamic requests[J]. Applied Soft Computing, 2012, 12(4): 1426-1439.
- [62] Cortes C E, Saez D, Nunez A, et al. Hybrid adaptive predictive control for a dynamic pickup and delivery problem[J]. Transportation Science, 2009, 43(1): 27-42.
- [63] 吴兆福, 董文永. 求解动态车辆路径问题的演化蚁群算法[J]. 武汉大学学报: 理学版, 2007, 53(5): 571-575.
(Wu Z F, Dong W Y. A mixed evolutionary ant algorithm for the dynamic vehicle routing problem[J]. J of Wuhan University: Natural Science Edition, 2007, 53(5): 571-575.)
- [64] Elhassania M, Jaouad B, Ahmed E A. A new hybrid algorithm to solve the vehicle routing problem in the dynamic environment[J]. Int J of Soft Computing, 2013, 8(8): 327-334.
- [65] Euch J, Yassine A, Chabchoub H. The dynamic vehicle routing problem: Solution with hybrid metaheuristic approach[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2015, 21(4): 41-53.
- [66] Gao S, Wang Y, Cheng J, et al. Ant colony optimization with clustering for solving the dynamic location routing problem[J]. Applied Mathematics and Computation, 2016, 285(7): 149-173.
- [67] 王万良, 黄海鹏, 赵燕伟, 等. 基于车辆共享的软时间窗动态需求车辆路径问题[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(5): 1056-1063.
(Wang W L, Huang H P, Zhao Y W, et al. Dynamic customer demand VRP with soft time windows based on vehicle sharing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(5): 1056-1063.)
- [68] Bent R W, Hentenryck P V. Scenario-based planning for partially dynamic vehicle routing with stochastic customers[J]. Operations Research, 2004, 52(6): 977-987.
- [69] 熊浩. 动态车辆路径问题的分区灵活分批 TSP 策略[J]. 控制与决策, 2013, 28(10): 1454-1458.
(Xiong H. Flexible nTSP strategy of dynamic vehicle routing problems[J]. Control and Decision, 2013, 28(10): 1454-1458.)
- [70] Madziuk J, Zychowski A. A memetic approach to vehicle routing problem with dynamic requests[J]. Applied Soft Computing, 2016, 48(11): 522-534.
- [71] 刘士新, 冯海兰. 动态车辆路径问题的优化方法[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2008, 29(4): 484-487.
(Liu S X, Feng H L. Optimization approach to solving dynamic vehicle routing problems[J]. J of Northeastern University: Natural Science, 2008, 29(4): 484-487.)
- [72] Wang N M, Zhang M, Che A, et al. Bi-objective vehicle routing for hazardous materials transportation with no vehicles travelling[J]. IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(6): 1867-1879.
- [73] Zhang M, Wang N M, He Z W, et al. Bi-objective vehicle routing for hazardous materials transportation with actual load dependent risks and considering the risk of each vehicle[J]. IEEE Trans on Engineering Management, 2018, 99(6): 1-14.
- [74] Kara I, Kara B Y, Yetis M K. Energy minimizing vehicle routing problem[C]. Int Conf on Combinatorial Optimization and Applications. Berlin: Springer-Heidelberg, 2007: 62-71.
- [75] Bektas T, Laporte G. The pollution-routing problem[J]. Transportation Research Part B, 2011, 45(8): 1232-1250.
- [76] Erdogan S, Miller-Hooks E. A green vehicle routing problem[J]. Transportation Research Part E: Logistics & Transportation, 2012, 48(1): 100-114.

(责任编辑: 郑晓蕾)