

多卡车多机器人联合配送系统路径问题研究

高佳静 镇璐

【摘要】近年来,卡车与送货机器人联合配送系统为物流配送提供了新方向,在推广应用中存在卡车与送货机器人的时间衔接要求高和卡车与送货机器人的配送路径规划复杂问题,传统调度方式难以充分发挥系统潜力。为进一步研究该系统的应用价值,更好地规划该系统的卡车与机器人的平行独立运动路线及互相之间的关联路线,并拓展传统车辆路径规划问题,本文以系统总成本最小化为目标,建立了混合整数规划模型对该系统的联合配送路径问题进行研究。此外,本文设计了变邻域搜索算法求解模型,并通过数值实验验证了模型和算法的有效性。最后,本文通过敏感性分析实验,为物流公司卡车数量配置和卡车停靠位置等宏观规划决策提供了科学的参考依据。

【关键词】送货机器人;联合配送系统;无人配送;变邻域搜索算法;混合整数规划

【作者简介】高佳静,上海大学管理学院;镇璐(通讯作者)(1981-),男(汉族),湖北宜都人,上海大学管理学院,院长,教授,博士生导师,研究方向:生产与服务运作管理优化、运筹调度、物流与供应链管理优化,E-mail: lzhen@shu.edu.cn(上海 200444)。

【原文出处】《中国管理科学》(京),2023.3.48~57

【基金项目】国家杰出青年科学基金资助项目(72025103);国家自然科学基金重点资助项目(71831008)。

1 引言

在突发公共卫生事件的背景下,传统卡车配送不可避免会出现配送人员与收货人之间的接触,增加了安全风险。近几年各种“无接触”模式开始爆发式出现,基于无人配送的配送系统设计与应用受到了广泛关注。

无人配送多应用无人机、机器人等设备拓展传统卡车配送服务范围,取代配送终端人工上门服务,其应用历史可追溯至亚马逊公司在2013年提出的卡车无人机协同配送方案。送货机器人是无人配送中又一种常用设备。目前,Starship等公司开发的小型机器人可以在约定的时间内将订单传送给单个客户^[1]。机器人在道路上行驶,大多数时候可以在自主模式下安全移动,或者在出现问题时切换到远程控制。一旦机器人到达门口,客户就会收到通知,然后取走货物。

最近文献中基于卡车无人机的协同配送备受关注。最初以单卡车单无人机组成的车组为任务执行

单位执行配送任务,相关学术问题首先由Murray和Chu^[2]进行研究。基于Murray和Chu^[2]的研究,众多学者研究了单卡车单无人机配送路径问题^[3-7],之后,在单卡车单无人机配送问题的基础上,一些学者对单卡车多无人机配送路径问题进行了研究^[8-11]。其中,Luo Zhihao等^[10]考虑多无人机旅行商问题的复杂性,将此问题分解为三个子问题,并提出了禁忌搜索算法和两级解决方案评估方法。Bruni等^[11]虽然提出了一种基于逻辑的Benders分解的精确解决方案,但是他们假设无人机在同一个客户点发射和回收,这样,在无人机服务客户时,卡车需要浪费时间等待无人机。近年来,多辆卡车多架无人机组成的车组配送系统也受到了学者的关注^[12-17]。其中,Kitjacharoenchai等^[16]放宽了卡车容量约束,建立了混合整数规划模型并设计了自适应插入启发式算法。Amine Mas-moudi等^[17]扩展了Poikonen和Golden^[9]的研究,考虑了无人机单次服务多个客户,虽然这是无人机技术的进步,但是每次服务一个客户,是更佳选择。此外,

Amine Masmoudi 等^[17]假设无人机可以在不同的卡车之间发射和回收,在本文研究问题的应用背景下,将送货机器人和卡车以机组形式进行启动,更方便物流公司进行管理和轨迹追踪等。尽管已有文献试图在不同的情况和假设下有效地对卡车和无人机路线进行优化,但大多数文献将无人机发射和回收限制在客户点位置^[12-17]。然而,卡车可以停在服务区等其他可行位置发射和回收无人机,UPS公司进行的卡车无人机配送系统的试点实验也证明了这一观点^[18]。如果允许卡车在灵活的地点发射和回收无人机,卡车行驶的距离可能更短,无人机的利用率更高。此外,大部分研究假设卡车和无人机都可以为所有客户提供服务,但是在突发卫生安全事件背景下,假设所有的客户均由送货机器人进行服务,能最大程度减少人员的接触。

相比于配送无人机,送货机器人的安全性更高,稳定性更强,不受城市低空空域管控限制,对不同天气条件及城市复杂交通流环境的适应性更强,因而更适用于人口密集城市区域的无人配送。与卡车和无人机协同配送类似,卡车机器人协同配送也已应用于实践中,亚马逊、京东等电商企业都在相关领域进行技术开发工作,并形成了各自的机器人技术体系,构成了卡车与送货机器人配送系统。本文针对卡车机器人协同配送中产生的应用问题展开研究。此配送系统中包含了多个由一辆卡车和多个送货机器人组成的卡车机组,卡车作为移动的仓库,携带送货机器人和货物从仓库出发,沿路网行驶,到达客户点附近的停靠点后,卡车上的送货机器人携带包裹,从卡车出发,向客户运送货物。送货机器人每次送货行程服务一个顾客,完成送货任务后,返回到卡车上^[19,20]。卡车送货机器人联合配送系统运营过程中涉及路径规划、机器人调度等复杂问题,并在应用中出现了不同的调度模式。现有研究中,卡车在机器人出发执行配送任务时需原地等待机器人返回卡车,再前往停靠点执行下一任务^[20,21]。为提高效率,减少卡车等待时间,本文选择了更为实际的一种调度方式,即送货机器人配送过程中,卡车不需在原地等待机器人返回,可沿路网继续向其他位置行驶,选取任意停靠点与机器人汇合,突破了卡车原地等待

机器人的限制。相比现有研究而言,此配送过程更为复杂,需对卡车与机器人的平行独立运动及互相之间的关联进行深入分析与优化。

本文研究的多个由一辆卡车和多个送货机器人组成的卡车机组的配送问题,考虑了送货机器人在停靠点与卡车分离和汇合,减少了人员接触。此外,本文假设在送货机器人配送过程中,卡车不需要在原地等待机器人返回,可沿路网继续向其他位置行驶,选取任意停靠点与机器人汇合,突破了卡车原地等待机器人的限制。上述考虑因素导致决策优化维度多,解空间变大,同时增加了卡车和送货机器人的时间关约束,从而使得卡车和送货机器人的配送路径难以高效规划。因此,本文以卡车送货机器人联合配送系统为研究对象,将复杂的多卡车机组的配送路径问题数学化并提出运营决策,研究了卡车和送货机器人联合配送模式下配送任务在不同卡车机组之间的分配决策、机器人任务分配决策以及卡车、送货机器人配送路径规划决策,运用数学规划方法建立数学模型。此外,为了高效求解数学模型,本文设计了变邻域搜索算法,并通过数值实验和敏感性分析进一步分析系统配置等问题。大量数值实验验证了算法的有效性和高效性,卡车数量和停靠点数量变化的敏感性分析,为管理者决策提供建议。

2 问题描述

本文对多辆卡车和多个送货机器人联合完成包裹配送任务进行研究。研究问题可描述为:给定有送货需求的客户集合 C ,客户 i 所需的货物的重量为 q_i 。在一定范围内的区域中,此区域复杂的道路网络抽象为有向图,卡车只能在通路上行驶,在交通路网中,存在单向路、道路施工断交和交通事故断交等现象,设定参数 l_{ij} 表示节点 i 和节点 j 之间的连通关系, $l_{ij}=1$ 表示节点 i 和节点 j 之间是连通的,允许卡车从节点 i 行驶到节点 j , $l_{ij}=0$ 表示节点 i 和节点 j 之间不连通,不允许卡车从节点 i 行驶到节点 j 。 $|K|$ 个卡车机组可从配送起点仓库出发,卡车 k 容量始终不超过 m^k 。卡车在停靠点 i 和 j 之间的行驶时间是 t_{ij}^k ,送货机器人在节点 i 和 j 之间的行驶时间是 t_{ij}^h 。送货机器人需要携带包裹前往 $|C|$ 个有送货需求的客户完成配送任务。卡车 k 上的送货机器人 h 与卡车分离和汇

合需要在不同的停靠点完成。送货机器人到达客户 c 的时间必须在客户 c 的时间窗上限 e_c 内, 晚于 e_c 将受到惩罚, S^r 是单位时间内惩罚成本。另外, S^k 和 S^s 分别是单位时间内卡车和送货机器人的运输成本。本文针对静态问题进行研究分析, 不考虑配送过程中的多因素变化。

图1是多卡车与送货机器人协同配送的一个实例。图1展示了在一个有8个停靠点的路网中, 有6个有货物需求的客户, 两个卡车机组进行配送。根据已知参数的数值计算可得, 此配送网络中每个卡车机组的最优路线为: 卡车机组1的卡车从仓库出发, 依次通过停靠点5、6、7、4、1后, 回到仓库; 卡车机组1的送货机器人1在卡车上从仓库出发, 通过停靠点5和6后, 送货机器人在停靠点6离开卡车去服务客户4, 在停靠点7与卡车汇合, 然后装上客户5的货物去服务客户5, 在停靠点4与卡车汇合, 最后在卡车上通过停靠点1后, 回到仓库; 卡车机组1的送货机器人2在卡车上从仓库出发, 通过停靠点5和6后, 送货机器人在停靠点6离开卡车去服务客户1, 在停靠点7与卡车汇合, 然后装上客户6的货物去服务客户6, 在停靠点4与卡车汇合, 最后在卡车上通过停靠点1后, 回到仓库。卡车机组2的路线同卡车机组1的路线描述类似。

本文的研究问题与传统的车辆路径问题相比更复杂, 所建立的混合整数规划(mixed integer programming, MIP)模型重点对如何将客户在不同卡车机组

之间进行分配, 分配给同一卡车机组的客户应如何选择送货机器人以及如何规划卡车路线与送货机器人配送路径进行了决策, 从而实现最小化总成本的目标。

本文研究的一些基本假设如下:

- (1) 送货机器人的速度 < 卡车的速度。
- (2) 送货机器人只能在卡车停在停靠点或仓库时离开并返回卡车, 且送货机器人需在不同停靠点离开和回到卡车。
- (3) 送货机器人启动和更换电池时间忽略不计。

3 模型建立

本部分详细介绍了用于优化卡车和送货机器人的路线的MIP模型及其定义的参数和变量以及建模思路。

3.1 符号说明

(1) 索引和集合

- K : 卡车和送货机器人集合, 下标为 k ;
- H_k : 卡车 k 上的送货机器人集合, 下标为 h ;
- O : 路网节点(停靠点)的集合, $O = \{0, 1, \dots, o-1, o\}$, 0 和 o 表示仓库的位置, 即卡车路径的出发点与结束点, $O_- = \{0, 1, \dots, o-1\}$, $O_+ = \{1, \dots, o\}$, $O_0 = \{1, 2, \dots, o-1\}$;
- C : 客户点集合, $C = \{o+1, o+2, \dots, o+c\}$;
- N : 所有节点集合, $N = C \cup O$, 下标为 i, j, c 。

(2) 参数

- l_{ij} : 0-1 参数, 如果节点 i 和节点 j 之间连通, 则为

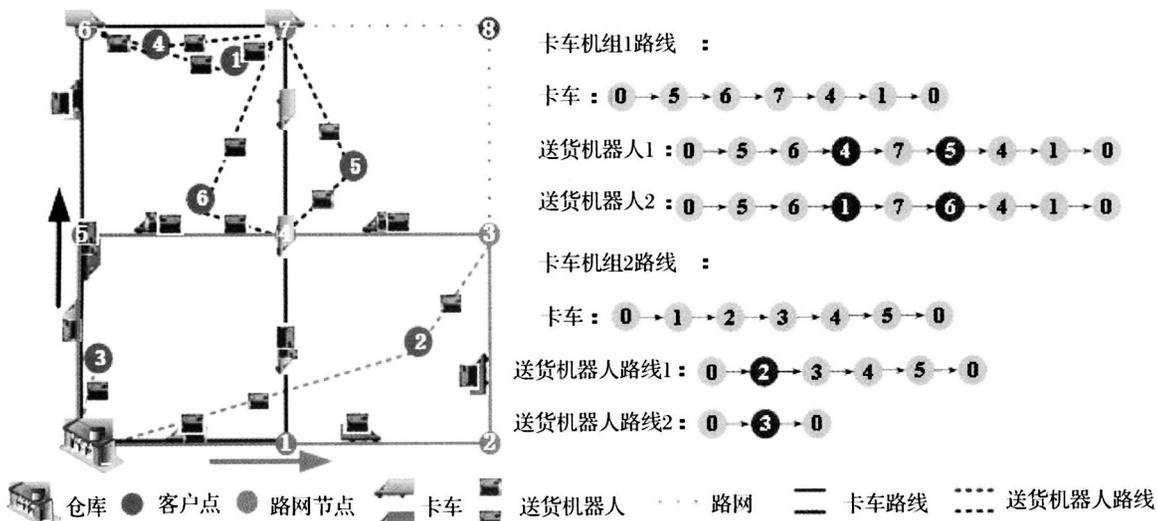


图1 多卡车与送货机器人协同配送实例

1, 否则为0;

- t_{ij}^k : 卡车从节点*i*和节点*j*的行驶时间;
- t_{ij}^a : 送货机器人从节点*i*和节点*j*的行驶时间;
- q_i : 客户*i*所需配送的货物的重量;
- m^k : 卡车的最大载重量;
- $[a_c, e_c]$: 服务客户*c*的时间窗;
- S^k : 单位时间内一辆卡车的运输成本;
- S^a : 单位时间内一个送货机器人的运输成本;
- S^T : 单位时间内惩罚成本;
- M : 一个足够大的正数。

(3) 决策变量

- α_{ijk} : 如果卡车*k*从停靠点*i*∈ O_+ 出发后紧接着到达停靠点*j*∈ O_+ , 则为1, 否则为0;
- β_{ijhk} : 如果卡车*k*上的送货机器人*h*从节点*i*∈ N 出发, 紧接着到达节点*j*∈ N , 则为1, 否则为0;
- δ_{ik} : 卡车机组*k*到达节点*i*∈ N 的离开时间。

3.2 建模思路

本文所研究的多卡车多送货机器人联合配送问题的建模思路如图2所示。本文将交通路网抽象为一个有向图, 有向图中的节点包括仓库、卡车停靠点和客户点。假设卡车停靠点有*n*个, 编号分别为*i*₁, ..., *i*_{*n*}, 客户点有*c*个, 客户的编号分别为*c*₁, ..., *c*_{*c*}, 需要被服务, 卡车在交通路网中行驶。按照*l_{ij}*的值, 将*n*个节点中*l_{ij}*为1的点连结, 即为本文中卡车机组可以行驶的路线网络。停靠点虽然是本文的已知参数, 但是在已知数据生成时, 需要通过技术和空间等方面充分考虑此点是否可以作为停靠点。本文模型的目标函数为最小化总成本, 总成本包括了卡车的运输成本、送货机器人单独运输货物的成本以及惩罚费用。通过对目标函数和决策变量之间关系的分析, 进一步理解和构建模型。

(1) 卡车行驶成本

影响卡车行驶成本的主要决策变量为 α_{ijk} 。在实际路网中, 存在单向路、道路施工断交和交通事故断交等问题, 本文设定参数*l_{ij}*判断节点*i*和节点*j*之间是否通路, *l_{ij}*的引入直接影响决策变量 α_{ijk} 的值。此外, 决策变量 α_{ijk} 直接决策卡车的路线, 卡车路线必须是连续的从仓库出发最后返回到仓库的闭合路线, 因此, 决策变量 α_{ijk} 应满足车辆路径问题的流平

衡等约束。

(2) 送货机器人行驶成本

影响送货机器人行驶成本的主要决策变量为 β_{ijhk} 。决策变量 β_{ijhk} 主要受到决策变量 α_{ijk} 影响, 在卡车路线的基础上, 送货机器人配送货物给客户, 送货机器人与卡车应拥有相同的分离汇合节点。更准确来说, 决策变量 α_{ijk} 和 β_{ijhk} 之间相互影响。与传统的车辆路径问题相比, 本文除了决策卡车路径, 还需要决策送货机器人的路径, 此类联合配送问题更复杂。送货机器人的路线分为两部分: 一部分为卡车和送货机器人共同行驶; 一部分为送货机器人携带货物单独进行配送。因此, 决策变量 β_{ijhk} 应满足车辆路径问题的相关基础约束, 同时还需要决策变量 β_{ijhk} 和决策变量 α_{ijk} 之间联系的约束。

(3) 晚于客户时间窗惩罚成本

影响晚于客户时间窗惩罚成本的主要决策变量为 δ_{ik} , 决策变量 δ_{ik} 主要受到决策变量 α_{ijk} 和 β_{ijhk} 影响。卡车和送货机器人在节点之间行驶时, 到达节点*i*的时间 δ_{ik} 与参数 t_{ij}^k 有关; 节点*i*为送货机器人和卡车的汇合节点时, 到达节点*i*的时间 δ_{ik} 与参数 t_{ij}^k 和 t_{ij}^a 有关。如图2中的节点*i*₇, δ_{i_7k} 应为卡车*k*到达*i*₇的时间和卡车机组*k*的所有送货机器人(1号送货机器人和2号送货机器人)到达*i*₇的时间的最大值。因此, 决策变量 δ_{ik} 受决策变量 α_{ijk} 和 β_{ijhk} 以及参数 t_{ij}^k 和 t_{ij}^a 的

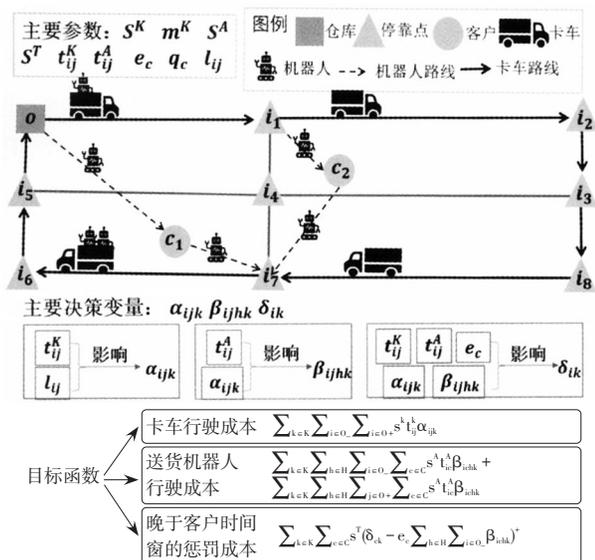


图2 建模思路

影响,模型中需要增加相关的时间约束,从而使得送货机器人服务客户的时间尽可能地满足客户的时间窗。本文需要同时考虑卡车的行驶时间和送货机器人的行驶时间,因此,需要较多的时间方面的约束来确保时间的准确性。

通过以上分析过程,可对多卡车送货机器人配送系统的总成本进行优化,从而优化卡车与送货机器人的路线,进而提升配送效率,同时节省成本。

3.3 数学模型

基于上述参数与变量定义,建立MIP模型:

$$\text{Min} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{k \in K} \sum_{i \in O_-} \sum_{j \in O_+} S^K t_{ij}^k \alpha_{ijk} + \\ \sum_{k \in K} \sum_{i \in O_-} \sum_{c \in C} \sum_{h \in H} S^A t_{ic}^A \beta_{ichk} + \\ \sum_{k \in K} \sum_{j \in O_+} \sum_{c \in C} \sum_{h \in H} S^A t_{jc}^A \beta_{cjhk} + \\ \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} S^T (\delta_{ck} - e_c \sum_{h \in H} \beta_{ichk})^+ \end{array} \right\} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \sum_{j \in O_+} \alpha_{0jk} = 1, \forall k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{i \in O_-} \alpha_{iok} = 1, \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{i \in O_-} \alpha_{ijk} = \sum_{i \in O_+} \alpha_{jik} \leq 1, \forall j \in O_+, k \in K \quad (4)$$

$$\alpha_{ijk} \leq t_{ij}, \forall i \in O_-, j \in O_+, k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{j \in O_+ \cup C} \beta_{0jhk} = 1, \forall h \in H, k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{i \in O_- \cup C} \beta_{ijhk} \beta_{iohk} = 1, \forall h \in H, k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{i \in O_- \cup C} \beta_{ijhk} = \sum_{i \in O_+ \cup C} \beta_{ijhk} \leq 1, \forall j \in O_+ \cup C, h \in H, k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{h \in H} \sum_{i \in O_-} \beta_{ichk} = 1, \forall c \in C \quad (9)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{h \in H} \sum_{j \in O_+} \beta_{cjhk} = 1, \forall c \in C \quad (10)$$

$$\beta_{ijhk} = 0, \forall i \in C, j \in C, h \in H, k \in K \quad (11)$$

$$\sum_{c \in C} \beta_{ichk} \leq 1, \forall i \in O_-, h \in H, k \in K \quad (12)$$

$$\sum_{c \in C} \beta_{cjhk} \leq 1, \forall j \in O_+, h \in H, k \in K \quad (13)$$

$$\delta_{0k} = 0, \forall k \in K \quad (14)$$

$$\delta_{jk} \geq \delta_{ik} + t_{ij}^K - M(1 - \alpha_{ijk}), \forall i \in O_-, j \in O_+, k \in K \quad (15)$$

$$\delta_{ck} \geq \delta_{ik} + t_{ic}^A - M(1 - \beta_{ichk}), \forall i \in O_-, c \in C, h \in H, k \in K \quad (16)$$

$$\delta_{jk} \geq \delta_{ck} + t_{jc}^A - M(1 - \beta_{cjhk}), \forall j \in O_+, c \in C, h \in H, k \in K \quad (17)$$

$$\delta_{jk} \geq \delta_{ik} + t_{ij}^K - M(1 - \beta_{ijhk}), \forall i \in O_-, j \in O_+, h \in H, k \in K \quad (18)$$

$$\delta_{jk} \geq \delta_{ik} - M(2 - \beta_{ichk} - \beta_{cjhk}), \forall i \in O_-, j \in O_+, c \in C, h \in H, k \in K \quad (19)$$

$$\beta_{ijhk} \leq \alpha_{ijk}, \forall i \in O_-, j \in O_+, h \in H, k \in K \quad (20)$$

$$\beta_{ichk} \leq \sum_{j \in O_+} \alpha_{ijk}, \forall i \in O_-, c \in C, h \in H, k \in K \quad (21)$$

$$\beta_{cjhk} \leq \sum_{i \in O_-} \alpha_{ijk}, \forall j \in O_+, c \in C, h \in H, k \in K \quad (22)$$

$$\sum_{i \in O_-} \sum_{c \in C} \sum_{h \in H} q_c \beta_{ichk} \leq m^k, k \in K \quad (23)$$

$$\delta_{ik} \geq 0, \forall i \in N, k \in K \quad (24)$$

$$\alpha_{ijk} \in \{0, 1\}, \forall i \in O_-, j \in O_+, k \in K \quad (25)$$

$$\beta_{ijhk} \in \{0, 1\}, \forall i \in N, j \in N, h \in H, k \in K \quad (26)$$

目标函数(1)是总成本最小化,总成本包括了卡车的运输成本、送货机器人的单独运输货物成本以及惩罚成本。约束(2)和(3)保证了每辆卡车从仓库出发,最终返回仓库。约束(4)为卡车流平衡约束,并且保证每个停靠点最多通过一次。约束(5)为卡车只能在通路上行驶。约束(6)和(7)保证了每个送货机器人初始位置都在仓库,最终位置也是仓库。约束(8)为送货机器人的路线流平衡约束。约束(9)和(10)表示每个客户都需要被送货机器人服务,且每个客户最多由一个送货机器人服务。约束(11)限制了送货机器人每次离开卡车后最多服务一个客户。约束(12)和(13)表明卡车k的送货机器人h在节点i最多离开卡车一次,在节点j最多回到卡车一次。约束(14)表明,卡车k和送货机器人h从仓库出发的时间为零。约束(15)为卡车行驶时间约束。约束(16)要求卡车机组k离开客户c的时间不小于卡车机组k离开节点i的时间加上送货机器人从节点i到客户c的行驶时间。约束(17)要求卡车机组k离开节点j的时间不小于卡车机组k离开客户c的时间加上送货机器人从客户c到节点j的行驶时间。约束(18)表明,若卡车搭载送货机器人从停靠点i出发到达停靠点j,则卡车机组k离开停靠点j的时间不小于卡车机组k离开停靠点i的时间加上卡车从停靠点i到停靠点j的行驶时间。约束(19)要求若送货机器人从节点i出发服务客户c后到达节点j,则卡车机组k离开节点j的时间应大于卡车机组k离开节点i的时间。约束(20)说明了送货机器人在停靠点之间前进时,是通过卡车行驶前进的。约束(21)说明,如果卡车k的送货机器人h从节

点 i 离开卡车 k 服务客户 c ,则必须将节点 i 分配给卡车 k 。约束(22)指出,如果卡车 k 的送货机器人 h 在停靠点 j 与卡车 k 会合,则必须将节点 j 分配给卡车 k 。约束(23)是容量约束,每个卡车机组服务的客户所需配送的货物的总重量不大于此卡车机组的卡车最大承载量。约束(24)~(26)定义了决策变量。

4 求解方法

本文研究的问题是车辆路径问题的变体,是NP难问题,随着算例规模的增大,CPLEX很难在规定时间内进行求解^[22]。变邻域搜索算法(variable neighborhood search, VNS)已被广泛用于组合优化问题^[23, 24],特别是一些仓储分拣问题^[25, 26]和车辆路径问题^[27]。本文设计了一种VNS算法来解决问题,VNS算法流程图和伪代码详见附录。VNS算法的主要思想:首先获得初始解,然后通过改变邻域结构进行邻域搜索以获得更优解。当迭代多次但结果不变时,进行扰动操作。

4.1 初始解生成

本文依照以下步骤生成初始解。

步骤1:根据客户的需求量,将客户按照从大到小的顺序进行排序。

步骤2:根据排序后的客户顺序和卡车的最大载重量,将客户分配给卡车机组的首个送货机器人。

步骤3:对于每一个客户 i ,在路网中寻找距离客户 i 最近的停靠点 j ,若卡车机组 k 服务客户 i ,则卡车 k 经过停靠点 j 。

步骤4:对于每个卡车机组,若此卡车机组的首个送货机器人服务客户,则此卡车机组路线是从仓库出发,通过步骤3确定的停靠点后,回到仓库。计算卡车机组离开各个节点的时间,并根据该卡车机组的路线对变量 α_{ijk} 和 δ_{ik} 进行赋值;若此卡车机组中的首个送货机器人没有服务客户,则此卡车机组未使用。

步骤5:在步骤4得到的卡车路线中,按照服务的客户顺序和通过的停靠点顺序,确定卡车机组的首个送货机器人与卡车的分离和汇合节点,同时计算卡车和送货机器人路线中到达停靠点和客户的时间,对于停靠点是分离或者汇合的节点来说,若此步骤计算得到的结果大于步骤4得到的结果,则更新此

停靠点时间,否则不更新。此卡车机组的其他送货机器人没有服务客户,此送货机器人路线同此卡车机组的卡车路线。对决策变量 β_{jkh} 和 δ_{ik} 进行更新赋值,得到可行的卡车机组路线。

4.2 邻域结构

本文的决策中包含卡车路径以及送货机器人路径,与常规的车辆路径问题相比,相对复杂。本文考虑所建模型的具体特征,设计了不同的邻域结构。具体来说,分别对决策变量 α_{ijk} 和 β_{jkh} 设计了交换和删除插入邻域结构。

送货机器人与客户交换:主要针对 β_{jkh} 进行交换操作,即先互换不同卡车机组的服务客户编号,计算该情况下的目标函数。对所求解出的目标函数值 F_2 与初始解 F_1 比较,若 $F_2 < F_1$,则更新 $F_1 = F_2$ 以及 β_{jkh} 值,后继续迭代;若 $F_2 > F_1$,则不更新,后继续迭代,直至满足停止准则为止。

客户与客户交换:主要针对 β_{jkh} 进行操作。互换同一个卡车机组的不同送货机器人服务的客户编号,得出该情况下的候选解。对所求解出的各个情况下候选解的目标函数值 F_2 进行比较,并与初始解 F_1 比较。比较过程同送货机器人与客户交换的比较过程。

停靠点删除插入:主要针对 α_{ijk} 进行删除插入操作,即去掉卡车行驶的停靠点中某一节点编号,根据约束(2)~(5),在卡车路线中插入满足约束的停靠点,计算该情况下的目标函数。对所求解出的目标函数值 F_2 与初始解 F_1 比较,若 $F_2 < F_1$,则更新 $F_1 = F_2$ 以及 α_{ijk} 值,后继续迭代;若 $F_2 > F_1$,则不更新,后继续迭代,直至满足停止准则为止。

4.3 扰动操作

在进行邻域搜索的过程中,算法可能会陷入局部最优。当前解等于当前最优解时,本文以当前解作为初始解,从设定的邻域结构中随机选择一个邻域作为扰动操作,生成的新解可能比当前解更差,更新下一次迭代的初始解为生成的新解。扰动操作可以让算法避免陷入局部最优解。

5 数值实验

本文进行了大量的数值实验来验证所提模型和算法的有效性,并进行了卡车数量和停靠点数量变

化的敏感性实验。所用实验平台的CPU为Intel Xeon E5-2643 v4 3.4 Ghz,内存为256 GB,六核处理器,采用Windows10 64位操作系统。代码在C#中实现,C#版本为Visual Studio 2019,使用版本号为12. 6.1的CPLEX用于求解模型和算法。所有算例的最大求解时间限制为一小时(3600秒)。

5.1 数据说明

本文随机生成一些分布在36平方千米区域的客户位置。假设卡车速度 v^k 为8.3 m/s,送货机器人速度 v^A 为1.8 m/s。节点 i 和 j 之间的距离为 d_{ij} ,则节点 i 和 j 之间的卡车行驶时间 $t_{ij}^k = \frac{d_{ij}}{v^k}$,送货机器人行驶时间 $t_{ij}^A = \frac{d_{ij}}{v^A}$ 。卡车载重量 m^k 为100千克,客户需求量在0~20千克之间随机产生。设定单位惩罚成本 S^r 为1,单位时间卡车行驶成本 S^k 为1。单位时间送货机器人行驶成本 S^A 为0.05。本文所设计的VNS算法的参数由以下几个构成:VNS算法的邻域结构操作迭代次数、VNS算法中扰动操作涉及的阈值以及VNS算法的停止条件所涉及的迭代次数。VNS算法的邻域结构操作迭代次数为1次,扰动操作涉及的阈值为2,即设定在进行邻域结构操作中若累计2次计算使得最优解未更新,则触发扰动策略,VNS算法的停止条件所涉及的最大迭代次数为10次,若算法运行到最大迭代次数,结束算法;若未达到最大迭代次数但是当前迭代得到的最终目标值与上一次迭代得到的全局最优目标值一样,同样结束算法。在实验中,随机生成了6个不同规模的算例。表1为不同算例的参数设置。

5.2 有效性测试

本文进行了大量的数值实验来测试算法的有效

性和高效性是否随着算例规模的增大而发生改变。为了测试本文提出的算法是否能够在合理的计算时间内求得最好的近似解,本文使用CPLEX来对所提的数学模型进行求解。在该实验中使用算例组ISG1、ISG2和ISG3,每组包含5个具有相同规模的算例。表2展示了CPLEX和VNS算法的比较结果。

由表2可知,VNS算法与CPLEX的Gap在2.84%以下,平均保持在0.98%,说明VNS算法在ISG1~ISG3规模下能得出一个较优的满意解,验证了该算法的有效性。表2中的“ Δ ”值表明,在CPLEX可求最优解的ISG1~ISG3规模问题中,VNS算法耗时比CPLEX平均缩短15.84%,并可在CPLEX无法求得最优解时高效求解。其中,ISG2规模VNS的求解时间平均Gap为-66.67%,说明VNS算法能快速求解,说明VNS算法能高效解决本问题。

随着客户点数量、停靠点数量和卡车机组数量的增加,CPLEX求解模型的时间呈现指数增长,当算例规模为ISG3时,CPLEX已经无法在3600 s内求得原模型最优解。在ISG3~ISG6规模实验中,已经无法用CPLEX求解模型解决,因此本文采用目前已有模式的配送规则(详见附录)和算法进行求解,并对得到的解进行评价。

表3主要展示了算例组ISG3~ISG6通过VNS算法求出的解和规则得出的解的对比结果。由表3可知,在ISG3~ISG6规模下,当算例的规模增大至21个停靠点、30个客户点、6个卡车机组,每个卡车机组有3个送货机器人时,VNS算法可以在1962秒之内求得结果,CPLEX早已无法在一个小时内求得最优解,说明了VNS算法可以高效地求解模型。表3中“ Δ ”列的平均Gap为30.99%,这表明算法的求解结果与

表1 算例说明

算例规模	停靠点的数量	客户节点的数量	卡车机组的数量	每个卡车机组的机器人数量
ISG1	9	5	2	2
ISG2	9	10	3	2
ISG3	21	15	3	2
ISG4	21	20	4	3
ISG5	21	25	5	3
ISG6	21	30	6	3

表2 ISG1 ~ ISG3 规模算例下 CPLEX 和 VNS 算法对比

算例		CPLEX		VNS			
规模	序号	F_{CPLEX}	$t_{\text{CPLEX}}(\text{s})$	F_{VNS}	$t_{\text{VNS}}(\text{s})$	$\Delta_{\text{CPLEX}}(\%)$	$\Delta_t(\%)$
ISG1	1	1942	4	1942	6	0.00	50.00
	2	1632	3	1632	4	0.00	33.33
	3	2066	4	2066	5	0.00	25.00
	4	1770	3	1770	5	0.00	66.67
	5	1976	5	1976	5	0.00	0.00
	6	3604	1024	3653	49	1.36	-95.21
ISG2	7	2958	85	3042	30	2.84	-64.71
	8	3106	133	3189	49	2.67	-63.16
	9	2933	114	2980	44	1.60	-61.40
	10	3142	133	3185	68	1.37	-48.87
	11	—	>3600	6409	182-	—	—
ISG3	12	—	>3600	4333	495-	—	—
	13	—	>3600	4882	251-	—	—
	14	—	>3600	4680	184-	—	—
	15	—	>3600	4881	201-	—	—
	平均值					0.98	~ 15.84

注： F_{CPLEX} 和 F_{VNS} 分别表示由 CPLEX 和 VNS 算法得到的解； t_{CPLEX} 、 t_{VNS} 分别表示 CPLEX、和 VNS 算法计算的耗时； Δ_{CPLEX} 表示 VNS 算法所得结果与 CPLEX 所得结果的相对误差， $\Delta_{\text{CPLEX}} = \frac{F_{\text{VNS}} - F_{\text{CPLEX}}}{F_{\text{CPLEX}}}$ ； Δ_t 表示 VNS 算法求解耗时与 CPLEX 求解耗时的相对误差 $\Delta_t = \frac{t_{\text{VNS}} - t_{\text{CPLEX}}}{t_{\text{CPLEX}}}$ 。

表3 ISG3 ~ ISG6 规模算例下规则与 VNS 算法的对比

算例		规则		VNS		
规模	序号	F_r	F_{VNS}	$t_{\text{VNS}}(\text{s})$	$\Delta_t(\%)$	
ISG3	1	6603	6409	182	2.94	
	2	11864	4333	495	63.48	
	3	6585	4882	251	25.86	
	4	6585	4680	184	28.93	
	5	6680	4881	201	26.93	
	6	8935	8675	1117	2.91	
	7	8947	6092	452	31.91	
ISG4	8	8835	6032	639	31.73	
	9	8849	5809	603	34.35	
	10	8779	5416	871	38.31	
	11	11291	10844	387	3.96	
	12	10962	7180	702	34.50	
ISG5	13	11368	7038	1419	38.09	
	14	11076	7394	500	33.24	
	15	11009	6900	1845	37.32	
	16	13164	9848	1083	25.19	
	17	13069	8611	1140	34.11	
ISG6	18	14845	8757	997	41.01	
	19	13553	7146	1962	47.27	
	20	13194	8206	1508	37.81	
平均值					30.99	

注： F_r 、 F_{VNS} 分别表示由规则和 VNS 算法求得的解； t_{VNS} 表示 VNS 算法计算的耗时； Δ_t 表示 VNS 算法和规则所得结果的相对误差， $\Delta_t = \frac{F_r - F_{\text{VNS}}}{F_r}$ 。

规则所得结果的差距很大,在ISG3~ISG6规模下,算法可以很好地改善规则得到的结果。

通过以上实验验证了本文设计的VNS算法的有效性和高效性。通过ISG1~ISG3规模实验可以看出,VNS算法可以得到平均Gap约0.98%,且计算时间明显缩短。另外,VNS算法在较大规模情况下同样能高效地求解模型,并得出一个较优的满意解。此外,与规则相比,算法的结果远优于规则得到的结果,验证了该算法的有效性和高效性。

5.3 敏感性分析

本文对实例ISG2和ISG3进行了敏感性分析,以得出一些管理意义。本文的敏感性分析从卡车数量和停靠点数量入手进行试验分析。

5.3.1 卡车数量的敏感度分析

卡车数量的不同对卡车机组系统的配送效率有着很大的影响。为了验证卡车数量对于总成本和算法求解时间的影响,本文选择ISG2和ISG3的规模,对卡车数量为3、5、7、9、11和13辆的情况进行了实验。

实验结果由图3可知,ISG2和ISG3规模下,总成本和算法求解时间随卡车数量的增加而产生变化。从图3的成本值曲线可以发现,随着卡车数量的增加,总成本是先下降后趋于平稳不变。因此,ISG2和

ISG3规模下,在卡车数量为5辆时,系统的总成本明显下降,说明卡车数量达到5辆时,会使系统的效益更高。从图3的时间曲线可以发现,随着卡车数量的增加,算法求解时间呈现增加的趋势。说明,卡车数量变化对算法的效率影响较大。此外,由图3发现,时间曲线和成本值曲线在卡车数量接近5辆时相交,说明当卡车数量为5辆时,配送系统趋于平衡状态。因此,ISG2和ISG3规模下,为使配送系统达到更优的效益,卡车数量应设置为5辆。对于不同规模下的车辆需求,物流公司可根据货物配送量和时间确定车辆需求。

5.3.2 停靠点数量的敏感度分析

停靠点是卡车行驶通过的节点,一部分停靠点也是送货机器人和卡车的分离汇合点,因此,停靠点数量的变化对卡车机组的配送性能是有影响的。此区域的路网未改变,停靠点增加,则增加了卡车的停靠点,使得卡车停车更灵活。为了验证停靠点数量对于总成本和算法求解时间的影响,本文选择ISG2和ISG3的规模,对停靠点数量为9、21、33、45和57个的情况进行了实验。

实验结果由图4可知,ISG2和ISG3规模下,总成本和算法求解时间随停靠点数量的增加而产生变

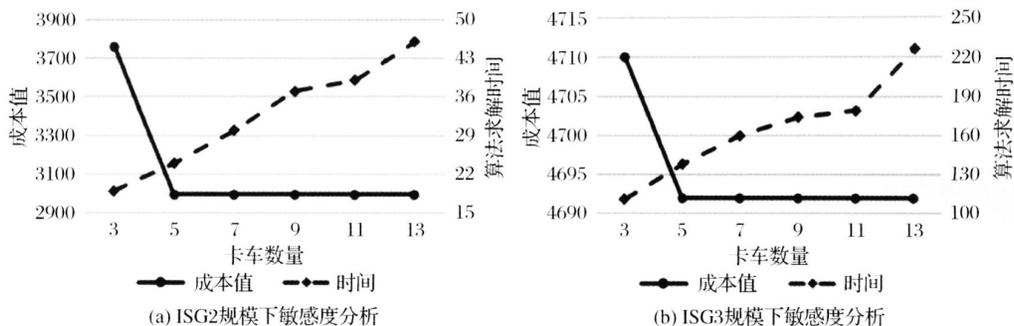


图3 卡车数量的敏感度分析

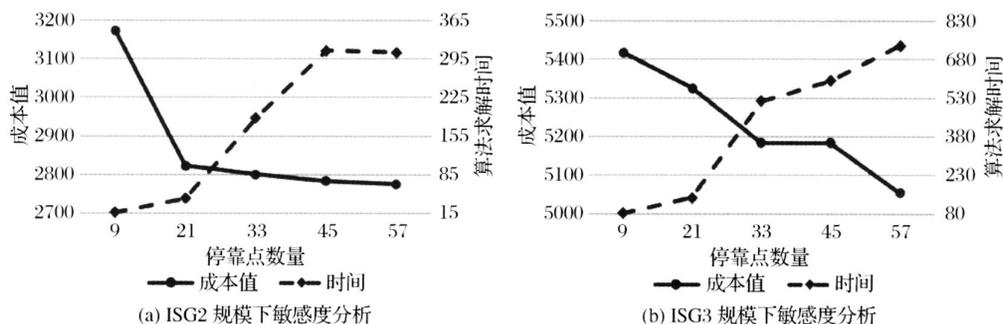


图4 停靠点数量的敏感度分析

化。从图4的成本值曲线可以发现,随着停靠点数量的增加,总成本呈现下降的趋势。从图4的时间曲线可以发现,随着停靠点数量的增加,算法求解时间呈现增加的趋势。说明停靠点数量变化对算法的效率影响大。此外,由图4发现,时间曲线和成本值曲线在停靠点数量在21~33个范围内相交,说明当停靠点数量在21~33个范围时,配送系统趋于平衡状态。因此,ISG2和ISG3规模下,为使配送系统达到更优的效益,停靠点数量应设置在21~33个范围内。

6 结语

本文研究的多个由一辆卡车和多个送货机器人组成的卡车机组的联合配送路径问题,丰富了送货机器人配送的相关文献,可以为新系统推广等提供全面的决策支持帮助。针对此静态问题,本文考虑了道路情况、时间限制、容量限制等约束,建立了一个MIP模型。为了解决此问题,设计了VNS算法,通过数值实验验证了所提算法的有效性和效率,并通过敏感性分析提出了管理启示。

本研究的主要贡献如下:

(1)本文针对卡车机器人联合配送系统这一无接触配送新模式展开研究,解决了多卡车多送货机器人联合配送中的路径规划等运营管理问题,实现了卡车路线和送货机器人路线的集成优化调度,为配送优化提供了指导。建立的MIP模型将复杂问题数学化,考虑了客户时间窗、卡车容量等因素,研究了卡车和送货机器人联合配送模式下配送任务在不同卡车机组之间的分配决策、机器人任务分配决策以及卡车、送货机器人配送路径规划决策。

(2)本文设计了一种具有较高求解精度和效率的VNS算法。本文研究的问题决策维度多,解空间大,同时时间约束多,模型求解很困难。本文通过考虑问题的具体特征,提出了一些邻域结构及其组合。本文设计的VNS算法为解决实际问题提供了有效的工具。此外,通过广泛的数值实验验证了VNS算法能高质高效求解实际规模问题。

(3)本文通过敏感性分析获得了一些管理见解,为管理者决策提供帮助。卡车数量和停靠点数量的变化对模型结果和算法效率都会产生一定的影响,运营者应控制卡车的数量。此外,道路建设和管理

相关部门可适当增加卡车停靠点,使得卡车可以灵活停车,缩短机器人配送时间。

在突发公共卫生事件背景下,卡车和送货机器人联合配送能够达到无接触配送的效果。在未来的研究中,可以研究同一个送货机器人在不同卡车之间配送货物的配送模式,以及考虑不同型号的机器人进行配送。此外,道路交通的拥堵是提高配送效率的瓶颈,未来的研究还可以考虑卡车速度可变等因素进行建模。而且,可以尝试提出求解该问题的精确算法,进一步提高算法的精度。

参考文献:

- [1]Heimfarth A, Ostermeier M, Huebner A. A mixed truck and robot delivery approach for the daily supply of customers[J]. *European Journal of Operational Research*, 2022, 303(1): 401-421.
- [2]Murray C C, Chu A G. The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery[J]. *Transportation Research Part C- Emerging Technologies*, 2015, 54: 86-109.
- [3]de Freitas J C, Penna P H V. A variable neighborhood search for flying sidekick traveling salesman problem[J]. *International Transactions in Operational Research*, 2020, 27(1): 267-290.
- [4]El-Adle A M, Ghoniem A, Haouari M. Parcel delivery by vehicle and drone[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2021, 72(2): 398-416.
- [5]Ha Q M, Deville Y, Pham Q D, et al. A hybrid genetic algorithm for the traveling salesman problem with drone[J]. *Journal of Heuristics*, 2020, 26(2): 219-247.
- [6]Poikonen S, Golden B, Wasil E A. A Branch-and-Bound approach to the traveling salesman problem with a drone[J]. *INFORMS Journal on Computing*, 2019, 31(2): 335-346.
- [7]杨双鹏,郭秀萍,高娇娇.“无接触”式卡车+无人机联合配送问题研究[J]. *工业工程与管理*, 2022, 27(1): 184-194.
- [8]Moshref-Javadi M, Hemmati A, Winkenbach M. A truck and drones model for last-mile delivery: A mathematical model and heuristic approach[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2020, 80: 290-318.

- [9]Poikonen S, Golden B. Multi-visit drone routing problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2020, 113: 104802.
- [10]Luo Zhihao, Poon M, Zhang Zhenzhen, et al. The multi-visit traveling salesman problem with multi-drones[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 128: 1-29.
- [11]Bruni M E, Khodaparasti S, Moshref-Javadi M. A logic-based benders decomposition method for the multi-trip traveling repairman problem with drones[J]. *Computers & Operations Research*, 2022, 145: 1-12.
- [12]Sacramento D, Pisinger D, Ropke S. An adaptive large neighborhood search metaheuristic for the vehicle routing problem with drones[J]. *Transportation Research Part C- Emerging Technologies*, 2019, 102: 289-315.
- [13]Zhen Lu, Gao Jiajing, Tan Zheyi, et al. Branch-price-and-cut for trucks and drones cooperative delivery[J]. *IIE Transactions*, 2022, 55(3): 271-287.
- [14]朱晓宁, 陈立双, 田昊彤, 等. 考虑区域限制的卡车搭载无人机车辆路径问题研究[J]. *中国管理科学*, 2022, 30(5): 144-155.
- [15]孟姗姗, 郭秀萍. 卡车-无人机混合配送的两阶段求解方法[J]. *工业工程与管理*, 2022, 27(5): 60-68.
- [16]Kitjacharoenchai P, Ventresca M, Moshref-Javadi M, et al. Multiple traveling salesman problem with drones: Mathematical model and heuristic approach[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 129: 14-30.
- [17]Amine Masmoudi M, Mancini S, Baldacci R, et al. Vehicle routing problems with drones equipped with multi-package payload compartments[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2022, 164: 1-29.
- [18]UPS tests residential delivery via drone. 2017. In: Youku. https://v.youku.com/v_show/id_XMjUyNjc3MDU00A==.html.
- [19]Boysen N, Schwerdfeger S, Weidinger F. Scheduling last-mile deliveries with truck-based autonomous robots[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 271(3): 1085-1099.
- [20]Chen Cheng, Demir E, Huang Yuan, et al. The adoption of self-driving delivery robots in last mile logistics[J]. *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, 2021, 146: 102214.
- [21]Yu Shaohua, Puchinger J, Sun Shudong. Van-based robot hybrid pickup and delivery routing problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2022, 298(3): 894-914.
- [22]谭哲一, 王正培, 张毅文. 面向复杂航道的领航员与船舶集成调度优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2021, 41(2): 332-344.
- [23]Jomaa W, Eddaly M, Jarboui B. Variable neighborhood search algorithms for the permutation flowshop scheduling problem with the preventive maintenance[J]. *Operational Research*, 2021, 21(4): 2525-2542.
- [24]Smiti N, Dhiaf M M, Jarboui B, et al. Skewed general variable neighborhood search for the cumulative capacitated vehicle routing problem[J]. *International Transactions in Operational Research*, 2020, 27(1): 651-664.
- [25]李珍萍, 贾顺顺, 卜晓奇, 等. 无人仓系统储位分配问题的优化模型与算法[J]. *中国管理科学*, 2022, 30(1): 124-135.
- [26]镇璐, 谭哲一, 萧理阳, 等. 面向双层自动分拣系统的包裹分拣优化模型与算法研究[J]. *中国管理科学*, 2021, 29(7): 171-180.
- [27]李阳, 范厚明, 张晓楠, 等. 动态需求下车辆路径问题的周期性优化模型及求解[J]. *中国管理科学*, 2022, 30(8): 254-266.