

文章编号:1671-1637(2016)05-0095-08

时效要求下的甩挂牵引车调度问题与求解

李红启¹, 赵文聪¹, 李嫣然²

(1. 北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191; 2. 北京华运交通咨询开发公司, 北京 100038)

摘要:针对时效要求下的甩挂牵引车调度问题,以整车运输和多对多运输需求为基本特征,以货运吨公里 CO₂ 排放量为目标函数,构建了混合整数规划模型,设计了基于节约算法和邻域搜索算法的两阶段启发式算法,进行了带有时间窗的既有算例的求解。计算结果表明:启发式算法所得满意解对基准算例 1~12 初始解的优化率分别为 4.21%、2.06%、2.70%、3.87%、2.03%、3.54%、2.23%、3.35%、1.54%、2.11%、1.58%、0.81%,平均水平为 2.50%;最优解分别为 101.22、107.05、106.21、103.94、116.23、103.16、102.61、102.14、101.05、103.38、103.69、100.54 g · (t · km)⁻¹,平均值为 104.27 g · (t · km)⁻¹,因此,本文所构建的混合整数规划模型与启发式算法是可行和有效的,时效要求下的甩挂牵引车调度优化可产生良好的节能减排效果。

关键词:公路运输;甩挂牵引车调度;节约算法;甩挂运输;时间窗

中图分类号:U492.22

文献标志码:A

Trailer pick-up tractor routing problem with timeliness requirement and solving

LI Hong-qi¹, ZHAO Wen-cong¹, LI Yan-ran²

(1. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Beijing Huayun Traffic Consulting and Development Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: Aiming at trailer pick-up tractor routing problem with timeliness requirement, full-truck load transportation and many to many transportation demand were taken as basic characteristics, CO₂ emissions per ton-kilometer of freight transportation was taken as objective function, and a mixed integer programming model was built. A two-stage heuristic algorithm was designed based on saving algorithm and local search algorithm, and some known instances with time windows were solved. Calculation result shows that compared to the initial solutions of benchmark instances 1-12, the optimization rates of satisfactory solutions are 4.21%, 2.06%, 2.70%, 3.87%, 2.03%, 3.54%, 2.23%, 3.35%, 1.54%, 2.11%, 1.58%, and 0.81% respectively, and the average level is 2.50%, the optimum solutions are 101.22, 107.05, 106.21, 103.94, 116.23, 103.16, 102.61, 102.14, 101.05, 103.38, 103.69, and 100.54 g · (t · km)⁻¹ respectively, and the average value is 104.27 g · (t · km)⁻¹. Obviously, the mixed integer programming model and the heuristic algorithm are feasible and effective, and the optimization of trailer pick-up tractor routing with prescription requirement can produce good energy saving and emission reduction effect. 2 tabs, 4 figs, 28 refs.

Key words: highway transportation; trailer pick-up tractor routing; saving algorithm; trailer

收稿日期:2015-12-11

基金项目:国家自然科学基金项目(71202016)

作者简介:李红启(1977-),男,山东平度人,北京航空航天大学讲师,工学博士,从事物流与供应链管理优化研究。

pick-up transportation; time window

Author resume: LI Hong-qi (1977-), male, lecturer, PhD, +86-10-82339923, lihongqi@buaa.edu.cn.

0 引 言

在当前中国部分企业开展公路甩挂运输试点过程中,依托既有公路快速货运干线资源开展甩挂运输是普遍采用的试点形式。如:山东交运集团开展济南至济宁、济南至日照、济南至临沂等“专线甩挂、一头两挂”式甩挂运输;聊城交运集团千千佳物流有限责任公司以聊城至临沂、济南至北京等零担专线为基础开展一线两点式甩挂运输;山东荣庆物流以北京至上海专线等作为甩挂运输试点线路;日照三运实业公司在青岛港至日照港、淄博至邹平间开展甩挂运输。可见,当前中国企业尝试开展甩挂运输时多表现在城际快速货运领域,运输时效性要求较高,而货运时效性和甩挂车辆(特别是甩挂牵引车)工作时间利用率是相通的追求目标。由于车型差异、车辆运用模式的不同,考虑时效性的甩挂车辆调度问题较传统车辆调度问题(Vehicle Routing Problem, VRP)^[1-2]更为复杂。首先,甩挂运输模式为充分利用车辆动力部分的工作时间创造了条件,但这需要在尊重货运服务时间窗的前提下,确保牵引车具有非常灵活的调度运用方式;其次,相对于卡车,具有更多有效工作时间的牵引车在每日运行路径上可串接起更多的场站,牵引车路径设计方案既影响着货物服务能力,又影响着牵引车工作时间利用率;最后,中国物流运输企业相关调度作业人员有多年针对传统卡车调度工作的经验,但考虑时效性的甩挂车辆运用工作很难直接借助既有经验,物流运输企业作业人员的思维调整和工作模式的转变需要一个过程。

从车辆构造的角度看,用于公路货运活动的车辆可分为动力部分和载货部分^[3],由此,可将货运汽车分为两大类:卡车和汽车列车。汽车列车是由卡车、牵引车、全挂车、半挂车等通过特定组合而成,汽车列车的动力部分主要是卡车或牵引车,载货部分主要是卡车的载货车厢、全挂车和半挂车。甩挂运输所用公路牵引车和半挂车的调度问题属于 VRP 的一类拓展问题,学术界普遍认为汽车列车的调度问题是非确定性多项式难题,部分学者认为传统 VRP 只是汽车列车调度问题的一个特例^[4-6]。迄今国内外学术界在汽车列车调度问题方面的研究成果

主要体现为三类^[7-8]:卡车与全挂车调度问题(Truck and Trailer Routing Problem, TTRP)、滚装滚卸车辆调度问题(Rollon-rolloff Vehicle Routing Problem, RRVRP)和牵引车与半挂车调度问题(Tractor and Semi-trailer Routing Problem, TSRP)。

对于卡车与全挂车组合的调度优化问题,学术界一般称其为卡车加全挂车的路径问题。在 TTRP 中,一些客户点既可以由汽车列车提供服务,也可以由单独的卡车提供服务,而有些客户点仅能由卡车提供服务。Semet 等较早给出了卡车加全挂车类型的汽车列车在实践中的应用^[9];Gerdessen 将一类卡车加挂全挂车的路径问题定义为带有挂车的车辆调度问题^[10];Chao 完整地描述了 TTRP^[11];Lin 等放松了基本 TTRP 中对卡车数和挂车数的限制^[12],考虑到实践中客户点的货运需求服务通常存在时间约束,又提出带时间窗的 TTRP^[13];Derigs 等在基本 TTRP 基础上考虑了客户点的服务是否有时间窗的问题^[14]。

学术界针对牵引车加半挂车组合的运用问题研究工作主要体现在两方面:RRVRP 和 TSRP。De Meulemeester 等研究了单场站、多客户点、多处处理站的挂车调度问题^[15],这是 RRVRP 的早期形式;Bodin 等较早地提出了 RRVRP^[16];Wy 等在考虑多个处理站、多个空挂车存储站等因素的基础上,对 RRVRP 添加了多时间窗的约束^[17];Baldacci 等将 RRVRP 的站点类型增加到 4 种^[18]。迄今,学术界针对 TSRP 的研究背景主要有 2 种:短途(配送)运输^[19-21]和中长途(干线)运输^[22-24]。范林强以场站数量和间距、任务完成时间窗等因素为主要约束条件建立了多目标模型^[19];张磊磊在每辆牵引车每天的最大行驶里程限制和各节点取货时间窗限制等约束下,设计了循环甩挂运输方案^[20];范宁宁研究了甩挂运输牵引车调度问题,所建模型具有双重时间窗约束^[21]。TSRP 的干线运输应用前景更被看好,城际干线运输网络的几乎所有节点间均可能存在货运需求,这种节点间的运输需求呈现为多对多的关系,与 VRP 中节点间运输需求的一对多关系明显不同。带时间窗的 VRP^[25]是在基本 VRP 的基础上添加时间窗约束条件而形成,学术界针对此问题已经形成了较为全面的模型描述以及较为成熟

的求解算法。

尽管国外学术界针对甩挂运输车辆调度问题的研究成果已出现了30多年,但该类研究工作主要针对卡车加全挂车和牵引车加半挂车这2种汽车列车应用于城市内物流配送或垃圾转运等领域的调度问题。由于现阶段中国对甩挂车型的限制,牵引车加半挂车是唯一可以在各类道路上行驶的甩挂运输车辆,物流运输企业亟需适用于中国甩挂运输车辆调度问题的理论研究成果。本文旨在研究货运时效要求下的公路甩挂牵引车调度问题,将多对多运输需求和时间窗因素考虑在牵引车加半挂车型汽车列车的调度优化问题中。

1 时效要求下的公路甩挂牵引车调度问题数学模型

由于可用车型多样,国外甩挂运输模式广泛应用于城际干线运输和城市配送等领域。现阶段中国企业能够用于开展甩挂运输的车型特点,决定了城际干线运输是甩挂运输模式的主要应用领域。城际干线运输网络化、规模化的特征能够体现甩挂运输的技术经济优势;城际干线运输的货物流量大、运距长,便于实现甩挂运输货源组织的规模化,这有利于发挥甩挂运输的整车运输优势。对于物流运输企业而言,在货源组织和车辆装备条件都得以保证时,干线甩挂运输组织工作的重点就是甩挂运输车辆调度方案设计工作。若能对甩挂运输车辆进行合理高效的调度,则可提高公路货运的时效性,减少运输过程中的油耗与碳排放,降低物流成本。本文立足于高时效、低排放要求的公路货运,建立带时间窗的、应用于城际干线甩挂运输过程的车辆调度问题数学模型,时效要求下的公路甩挂牵引车调度问题的主要特点如下。

(1)不考虑空半挂车的调度。

(2)客户点上货运需求的计量单位为一台半挂车的载运量,即只考虑整车运输,车辆的载运能力相同,车辆满足互换和匹配要求。

(3)运输网络上有2类节点:一个场站和若干个客户点。牵引车路径闭合。

(4)货运需求可存在于任意2个节点之间。

(5)每辆牵引车只能独自行驶或拖带一辆载货半挂车行驶,同一辆牵引车不重复服务同一个客户点。

(6)每个客户点有且仅有一个时间窗。若牵引车在时间窗之前到达,则需等待至时间窗开启时方可拖带另一载货半挂车离开;若牵引车在某节点的

时间窗之后到达,则只能甩下所拖挂的载货半挂车,直接独自行驶前往下一个节点。

(7)为寻求和明确甩挂运输模式的节能减排效果,本文将时效要求下的公路甩挂牵引车调度问题的目标函数拟定为货运吨公里 CO_2 排放量。这是因为甩挂运输竞争优势的发挥依赖于车辆装备和组织管理技术,在相应的市场和软硬件装备条件下,甩挂运输的技术经济特点得以发挥,由此带来的效果就是道路货运效率的提升。货运效率的提升意味着以更少的投入获得更多的产出。货运的投入因素体现为固定成本投入和变动成本投入,其中的油耗量是占比较大的一种变动成本。根据联合国政府间气候变化专门委员会提供的 CO_2 排放量计算方法,油耗量与 CO_2 排放量间为确定的比例关系。货运的产出因素体现为货物周转量。吨公里 CO_2 排放量可同时表征甩挂运输车辆调度模式的运输效率和节能减排效果。该指标越高,说明货运效率越低,节能减排效果越差。在中国甩挂运输试点工作中,各企业甩挂运输试点方案的评价指标之一就是 CO_2 排放量,本文选用吨公里 CO_2 排放量指标可以使研究结果尽可能贴近中国甩挂运输企业实践。

时效要求下的公路甩挂牵引车调度问题中牵引车路线示例见图1,包含一个场站和若干个客户点,圆形内数字代表客户点编号,线侧数字代表节点之间的车辆行驶时间。甩挂车辆调度方案包含2条路线:牵引车1在到达客户点2、6时,均不满足这2个客户点的时间窗,牵引车1不能从这2个节点拖带载货半挂车驶往下一个目标节点;牵引车2从场站出发时符合场站时间窗,但由于场站到客户点4没有货运需求,牵引车2从场站独自行驶前往客户点4,当其到达客户点5时,已不能满足客户点5的时间窗,故从客户点5独自行驶前往客户点6。此外,牵引车2能够在客户点6的时间窗开启之前到达,故其可以从客户点6拖带载货半挂车驶往场站。

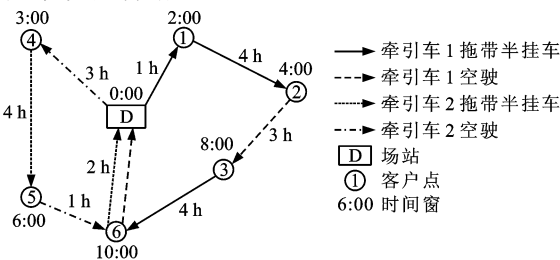


图1 牵引车路线示例

Fig. 1 Tractor route example

若某客户点有多个时间窗,则可将该客户点虚拟为具有各自时间窗和需求的地理坐标相同的多个客户点,这样多时间窗的问题就可以转化为单时间

窗的问题。

本文建立的时效要求下的公路甩挂牵引车调度问题数学模型如下。目标函数 Z 为

$$\min Z = \frac{\gamma \left[\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} C_{ij} X_{ijk} + c_{ij} x_{ijk} + \delta \sum_{i \in V} \sum_{k \in K} w_{ik} \right]}{W \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} X_{ijk} d_{ij}} \quad (1)$$

约束条件为

$$r_{ij} = \sum_{k \in K} X_{ijk} \quad i, j \in V, i \neq j \quad (2)$$

$$\sum_{j \in U} X_{0jk} + x_{0jk} = \sum_{j \in U} X_{j0k} + x_{j0k} = 1 \quad k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{i \in V} X_{ijk} + x_{ijk} = \sum_{i \in V} X_{jik} + x_{jik} \leq 1 \quad j \in U, k \in K \quad (4)$$

$$w_{ik} \geq T_i - a_{ik} - M \left(1 - \sum_{j \in V} X_{ijk} \right) \quad i \in U, k \in K \quad (5)$$

$$a_{ik} + w_{ik} - M \left(1 - \sum_{j \in V} X_{ijk} \right) \leq T_i \quad i \in U, k \in K \quad (6)$$

$$a_{ik} + w_{ik} + M \left(1 - \sum_{j \in V} X_{ijk} \right) \geq T_i \quad i \in U, k \in K \quad (7)$$

$$a_{ik} + t_{ij} + w_{ik} - M(1 - X_{ijk}) \leq a_{jk} \quad i \in V, j \in U, k \in K \quad (8)$$

$$a_{ik} + t_{ij} + w_{ik} + M(1 - X_{ijk}) \geq a_{jk} \quad i \in V, j \in U, k \in K \quad (9)$$

式中: γ 为牵引车每消耗 1 L 柴油的 CO_2 排放量; V 为节点 i, j 的集合, 包括场站和客户点; K 为可用牵引车 k 的集合; C_{ij}, c_{ij} 分别为牵引车在路段 (i, j) 上拖带载货半挂车行驶和独自行驶时的油耗; X_{ijk}, x_{ijk} 为 0-1 变量, 若牵引车 k 拖带载货半挂车行驶于路段 (i, j) , 则 X_{ijk} 为 1, x_{ijk} 为 0, 若牵引车 k 独自行驶于路段 (i, j) , 则 X_{ijk} 为 0, x_{ijk} 为 1; δ 为将车辆等待时间成本转化为油耗成本的转化系数; w_{ik} 为牵引车 k 在节点 i 的等待时间; W 为每辆半挂车载货量; d_{ij} 为节点 i 到节点 j 的行驶里程; r_{ij} 为由节点 i 到节点 j 的货运需求 (以半挂车为计量单位); U 为客户点集合, 也可视为半挂车集散点集合, 节点 0 为场站; T_i 为节点 i 的时间窗, 只考虑牵引车在客户点的等待惩罚成本, 不考虑迟到惩罚成本, 模型只涉及时间窗区段的左侧参量, 未引入时间窗区段的右侧参量; a_{ik} 为牵引车 k 到达节点 i 的时刻; M 为足够大的正数; t_{ij} 为节点 i 到节点 j 的行驶时间。

式(2)为货运需求约束; 式(3)为牵引车进出场站约束, 确保牵引车路径闭合; 式(4)为客户点平衡度约束, 确保同一辆牵引车不重复服务同一个客户点; 式(5)为等待时间约束; 式(6)、(7)为时间窗约束; 式(8)、(9)为时间连续性约束。

2 求解算法设计

既有研究通常使用精确算法或者启发式算法对

VRP 及其变形形式进行求解。求解小规模 VRP 算例时, 虽然精确算法能够求得算例的最优解, 但求解时间长, 且所能求解的算例规模有限。对于相同节点规模的算例, 时效要求下的公路甩挂牵引车调度问题算例的货运需求与所需车辆总数明显多于其他问题, 这就使得时效要求下的公路甩挂牵引车调度问题的精确算法求解方式更为复杂。

凭借灵活性和扩展性方面的优势, 节约算法在求解 VRP 领域得到了较为广泛的应用。但由于在计算流程中存在一定的贪婪性, 其求解结果往往存有明显的优化空间, 因此, 节约算法常用于与其他启发式算法相结合, 节约算法求解结果一般可作为其他启发式算法的初始解。模拟退火算法与邻域搜索算法的流程有较大的类似性, 但其在中间过程解的更新过程中有一定的概率接受较差解。接受较差解虽然可能增加整体求解时间, 但有助于跳出局部最优解的局限, 从而增加求解得到全局最优解的概率。综合比较, 本文选择节约算法构造时效要求下的公路甩挂牵引车调度问题的初始解, 选择性地对其进行初步优化; 然后, 分别使用基本邻域搜索算法和基于模拟退火思维的改进邻域搜索算法分别优化节约算法的求解结果。

2.1 节约算法

最初的节约算法是将每个客户点分配到一条单独路径上, 计算将任意一对路径合并后所产生的成本

节约量,不断地确立节约量最大的路径合并方案,直到达到一定的约束为止。节约算法得到了学术界的认可与广泛应用^[22,26-28],不少启发式算法都局部或改进运用了节约算法的思想。由于每次的路径合并均选择当前最优的节约量,而不考虑这一选择对后续合并操作的影响,节约算法带有贪婪计算的特点。

2.1.1 构建基本路径

设定可行解中的基本路径形式为 $0-i-j-0$, 该形式表示牵引车从场站独自行驶出发,完成从节点 i 到节点 j 的货运需求,并最终独自行驶回到场站。这里的路径以有货运需求的 2 个点及其之间的货运连接为一个单元,以需求非 0 的基本路径 $0-i-j-0$ 为单位,将货运需求矩阵转化为基本路径合集。

2.1.2 路径合并

路径合并操作采取枚举策略,即将 2 条基本路径合并,得到一条新路径,再将该新路径与第 3 条基本路径合并,以此类推,直到无法继续路径合并操作为止。考虑到时效要求下的公路甩挂牵引车调度问题的时间顺序特点,根据车辆到达时刻与客户点的时间窗来判断路径是否能够合并。

2.1.3 平行路线

首先,确定平行路线的数量 R ,所有从场站出发的基本路径必须为最终路径中的第 1 个基本路径。若某个算例中从场站出发的货运需求数为 n ,则该算例至少有 n 条最终路径。令初始平行路线数量为 n ,并将从场站出发的共 n 条基本路径分别作为 n 条最终路径的初始路径。每次迭代操作都随机选取当前的 R 条平行路径中的某一条进行合并。当某条路径无法再合并其他路径时,将其存入临时路径方案集合,并从剩余未被选择的基本路径中随机选取一条作为新路径的初始路径。

2.1.4 节约量

在测算行驶时间节约量的同时,加入车辆在节点上等待时间的节约量。由于整体层面上的车辆载货行驶时间为固定值,行驶时间主要受到牵引车独自行驶时间的影响。在目标函数中,等待时间被 δ 转化为行驶成本。在计算节约量时,对等待时间乘以相同的系数。计算路径 $0-i-j-0$ 与 n 条不同基本路径合并的节约量,选择节约量最大的路径替换路径 $0-i-j-0$ 。

2.2 邻域搜索

2.2.1 邻域搜索算子

邻域搜索过程中算子的移动或交换过程均以带需求的路段为操作单位,使用节约算法生成的初始

解中,各路径均已符合时间窗约束,若对单条路径进行内部的路段移动或交换操作,则会出现违背时间窗的情况,因此,本文采用的邻域搜索算子均不考虑单条路径内部的移动或交换操作。邻域搜索算子如下。

(1)路径间单个需求路段的移动操作。从原路径方案中随机选取 2 条路径;针对这一对路径,随机选择一条中的一个路段,移动到另一条路径中。当移动后 2 条路径都满足时间窗约束时,保留该次移动操作的结果;若移动后,其中一条路径中需求路段数量为 0,则删除这条路径;若移动操作产生的结果不符合要求,则再次随机选取 2 条路径重新进行移动操作。

(2)路径间货运需求路段的交换。从既有路径方案中随机选取 2 条路径内的 2 个路段进行交换操作,当交换操作后 2 条路径分别满足时间窗约束时,保留该交换操作结果;若交换操作结果不可行,则再次随机选取 2 条路径进行交换操作。

(3)路径间连续路段的交叉。从既有路径方案中随机选取 2 条路径内靠后分布的几个连续路段进行交叉操作,当交叉操作后 2 条路径分别满足时间窗约束时,则保留交叉操作结果;否则,再次随机选取 2 条路径进行交叉操作。

(4)多条路径间的操作。从既有路径方案中随机选取 3 条路径进行随机排序,随机选择上述 3 种算子中的一种,对第 1 条和第 2 条路径进行操作,再对第 2 条和第 3 条路径进行操作。当操作后各路径分别满足时间窗约束时,保留操作结果;若操作后某条路径中需求路段数量为 0,则删除该路径;若操作结果不可行,再次随机选取 3 条路径进行类似操作。

2.2.2 基本邻域搜索算法

基本邻域搜索算法是在初始解的基础上进行迭代,每次迭代都使用算子改变既有解的结构。若邻域解的目标值优于当前解的目标值,则将邻域解作为当前解,再进行下一次迭代,直到达到迭代次数上限。基本邻域搜索算法的优势在于只接受最优解,从而加快收敛速度,能够在较短的时间内求得满意解。

2.2.3 改进邻域搜索算法

由于基本邻域搜索算法可能陷入局部最优,本文结合模拟退火算法的思维,对基本邻域搜索算法进行改进,使其在迭代过程中以一定的概率接受较差解,从而使运算具备跳出局部最优的能力,得到改进邻域搜索算法。在比较目标函数值时,该算法有一定的概率选择结果比当前解差的邻域解,这一概率随着迭代次数的增加而减小。

3 算例求解

Li 等使用既有 VRP 基准算例,通过增加和调整一些信息而构造了 12 个公路牵引车调度问题基准算例^[22]。本文对这些基准算例再增添各节点的时间窗信息,构造出时效要求下的公路甩挂牵引车调度问题基准算例。以基准算例 1 为例,其节点分布及各节点的时间窗见图 2,各节点的时间窗标注于节点下方。

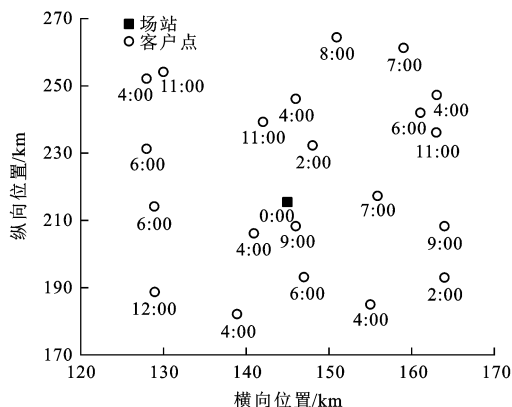


图 2 基准算例 1 的节点分布与时间窗

Fig. 2 Distribution and time windows of nodes for benchmark instance 1

3.1 主要参数取值

进行基准算例求解运算时,选用交通运输部发布的道路运输车辆燃油消耗量达标车型,分别为 STQ4201CL3Y7D3 型牵引车和 ST9351XXY 型半挂车。牵引车基本参数见表 1。半挂车最大总质量为 35 t,整备质量为 7.2 t。由于牵引车最大准拖挂质量为 24 t,故将该牵引车与半挂车组合的载货能力设定为 17 t。车辆空驶与载货状态下的油耗均设定为 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时的燃油消耗,半挂车实载率设定为 70%。

表 1 牵引车基本参数

Tab. 1 Basic parameters of tractor

整备 质量/ t	准拖挂 质量/ t	50 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 空载 等速百公里 油耗/L	不同车速 ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$) 下 满载等速百公里油耗/L				
			40	50	60	70	80
6.98	24.00	16.2	23.1	26.4	28.5	32.5	37.8

3.2 运算结果分析

设定好启发式算法中涉及的主要参数后,每种算法均对各基准算例计算 5 次,再求取平均值。计算结果见表 2,优化率是相对于初始解的满意解改善水平,结果分析如下。

(1) 各基准算例的 CO_2 排放量最优解为 $100 \sim 110 \text{ g} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$, 平均值为 $104.27 \text{ g} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ 。

表 2 基准算例的计算结果

Tab. 2 Calculation results of benchmark instances

基准算例 编号	初始解/ [$\text{g} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$]	节约算法平均值/ [$\text{g} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$]	邻域搜索算法平均值/ [$\text{g} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$]	优化率/%	最优解/ [$\text{g} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$]
1	105.81	104.76	101.35	4.21	101.22
2	109.56	108.54	107.30	2.06	107.05
3	109.33	108.74	106.37	2.70	106.21
4	108.16	107.78	103.97	3.87	103.94
5	118.73	118.32	116.32	2.03	116.23
6	107.03	106.67	103.24	3.54	103.16
7	105.01	104.92	102.67	2.23	102.61
8	105.71	105.43	102.17	3.35	102.14
9	102.65	102.54	101.07	1.54	101.05
10	105.64	105.52	103.42	2.11	103.38
11	105.38	105.29	103.72	1.58	103.69
12	101.39	101.35	100.57	0.81	100.54

启发式算法对于这些基准算例的优化率平均水平为 2.50%,这在一定程度上表明本文所用启发式算法的稳定性。值得指出的是,基准算例 12 的优化率为 0.81%,低于 1.00%,这主要是由于该算例的规模大,在有限的求解时间内不足以达到满意的优化程度。

(2) 货运吨公里 CO_2 排放量是一类相对量指标,在关键参数的同等设置条件下不会随着算例规模的变化而发生大幅度的变化,可作为不同规模算

例求解运算结果校准的重要参考。

(3) 运输网络上节点分布形态和时间窗的设置等因素对基准算例的求解结果有明显影响。以基准算例 5、6 为例,其节点分布及各节点的时间窗分别见图 3、4。从场站选址看,基准算例 5 的场站位置较偏,而基准算例 6 的场站基本位于其客户点集聚区的中心;从客户点分布情况看,基准算例 5 的客户点呈不规则分布,部分客户点位置较为聚集,部分客

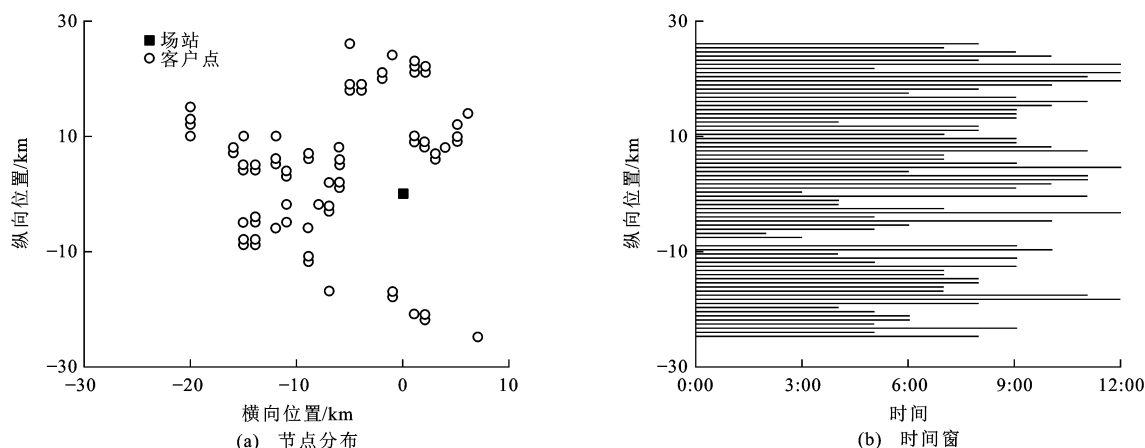


图3 基准算例5的节点分布与时间窗

Fig. 3 Distribution and time windows of nodes for benchmark instance 5

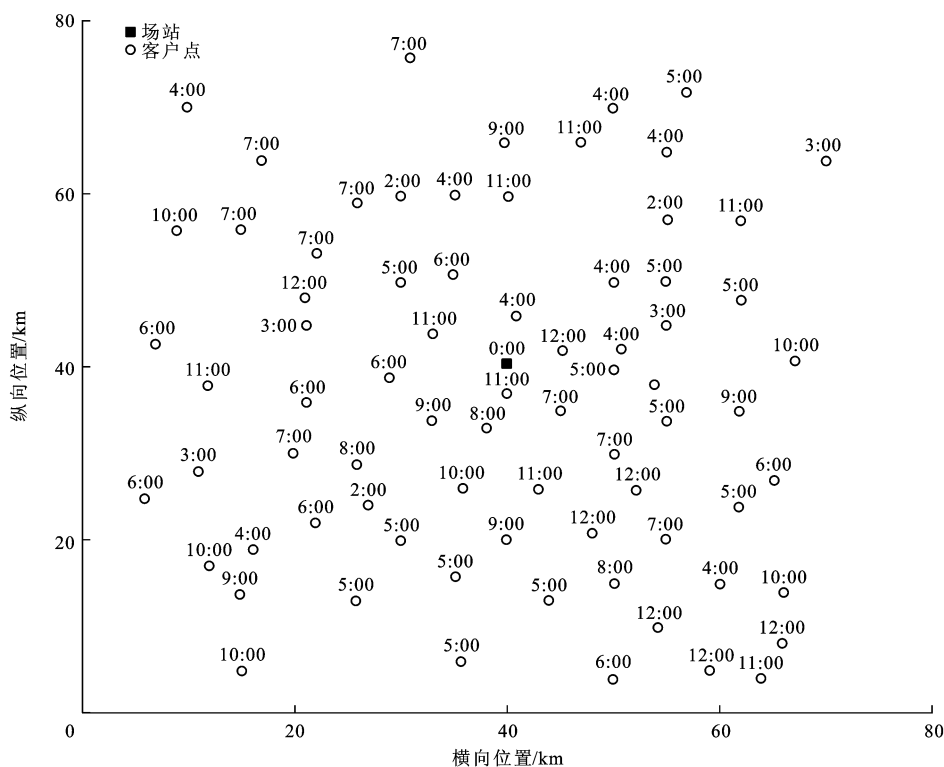


图4 基准算例6的节点分布与时间窗

Fig. 4 Distribution and time windows of nodes for benchmark instance 6

户点位置较为分散,而基准算例6的客户点分布较为平均;从时间窗设置看,受场站与客户点间相对距离的影响,基准算例5的时间窗相对较晚,且变化幅度较小,这在一定程度上影响了牵引车调度方案设计。

4 结 语

本文针对时效要求下的公路甩挂牵引车调度问题,兼顾城际甩挂牵引车调度的一般特点,构建混合整数规划模型,并提出两阶段启发式算法,该算法能够在2 h内求出大规模基准算例的满意解。经优化

的牵引车调度方案可有效地降低货运吨千米 CO_2 排放量、提高货运效率。

合理的场站选址方案对物流运输成本有明显的影响,企业在新场站选址前应综合考虑物流网络布局、运输需求分布、车辆调度方案等因素。

本文构建的时效要求下的公路甩挂牵引车调度问题数学模型及所采用的基准算例可为当前中国甩挂运输试点企业的城际甩挂牵引车优化调度提供参考,后续研究工作将寻求具备较高求解效率的精确算法或具备更好求解效果的启发式算法。

参考文献：

References：

- [1] LAPORTE G. Fifty years of vehicle routing[J]. Transportation Science, 2009, 43(4): 408-416.
- [2] BALDACC R, TOTH P, VIGO D. Recent advances in vehicle routing exact algorithms [J]. 4OR: A Quarterly Journal of Operations Research, 2007, 5(4): 269-298.
- [3] DREXL M. Applications of the vehicle routing problem with trailers and transshipments[J]. European Journal of Operational Research, 2013, 227(2): 275-283.
- [4] TAN K C, CHEW Y H, LEE L H. A hybrid multi-objective evolutionary algorithm for solving truck and trailer vehicle routing problems [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 172(3): 855-885.
- [5] SCHEUERER S. A tabu search heuristic for the truck and trailer routing problem[J]. Computers and Operations Research, 2006, 33(4): 894-909.
- [6] LIN S W, YU V F, CHOU S Y. Solving the truck and trailer routing problem based on a simulated annealing heuristic[J]. Computers and Operations Research, 2009, 36(5): 1683-1692.
- [7] LI Hong-qi, LU Tan, LU Ying-rong. The combination truck routing problem: a survey[J]. Procedia Engineering, 2016, 137: 639-648.
- [8] 李红启, 吕 潭. 汽车列车调度问题研究综述[J]. 大连海事大学学报: 社会科学版, 2015, 14(6): 1-10.
LI Hong-qi, LU Tan. Research summary of vehicles combination routing problem[J]. Journal of Dalian Maritime University: Social Sciences Edition, 2015, 14(6): 1-10. (in Chinese)
- [9] SEMET F, TAILLARD E. Solving real-life vehicle routing problems efficiently using tabu search[J]. Annals of Operations Research, 1993, 41(4): 469-488.
- [10] GERDESSEN J C. Vehicle routing problem with trailers[J]. European Journal of Operational Research, 1996, 93(1): 135-147.
- [11] CHAO I M. A tabu search method for the truck and trailer routing problem[J]. Computers and Operations Research, 2002, 29(1): 33-51.
- [12] LIN S W, YU V F, CHOU S Y. A note on the truck and trailer routing problem [J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(1): 899-903.
- [13] LIN S W, YU V F, LU C C. A simulated annealing heuristic for the truck and trailer routing problem with time windows[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(12): 15244-15252.
- [14] DERIGS U, PULLMANN M, VOGEL U. Truck and trailer routing—problems, heuristics and computational experience[J]. Computers and Operations Research, 2013, 40(2): 536-546.
- [15] DE MEULEMEESTER L, LAPORTE G, LOUVEAUX F V, et al. Optimal sequencing of skip collections and deliveries[J]. The Journal of the Operational Research Society, 1997, 48(1): 57-64.
- [16] BODIN L, MINGOZZI A, BALDACC R, et al. The rollon-rolloff vehicle routing problem[J]. Transportation Science, 2000, 34(3): 271-288.
- [17] WY J, KIM B I, KIM S. The rollon-rolloff waste collection vehicle routing problem with time windows[J]. European Journal of Operational Research, 2013, 224(3): 466-476.
- [18] BALDACC R, BODIN L, MINGOZZI A. The multiple disposal facilities and multiple inventory locations rollon-rolloff vehicle routing problem[J]. Computers and Operations Research, 2006, 33(9): 2667-2702.
- [19] 范林强. 汽车甩挂运输组织模式选择问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
FAN Lin-qiang. Study on the choice of organization modes of semi-trailer swap transportation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [20] 张磊磊. LPG 循环甩挂运输调度优化研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
ZHANG Lei-lei. Research on LPG cycle drop and pull transport optimization scheduling[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013. (in Chinese)
- [21] 范宁宁. 烟大滚装甩挂运输牵引车调度优化研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
FAN Ning-ning. Research on tractor optimization scheduling of rollon left-hanging transportation from Yantai to Dalian [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2012. (in Chinese)
- [22] LI Hong-qi, LU Tan, LI Yan-ran. The tractor and semitrailer routing problem with many-to-many demand considering carbon dioxide emissions[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2015, 34: 68-82.
- [23] LI Hong-qi, LI Yan-ran, LU Yue, et al. The effects of the tractor and semitrailer routing problem on mitigation of carbon dioxide emissions[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2013, 2013: 1-14.
- [24] LI Hong-qi, LI Yan-ran, ZHAO Qiu-hong, et al. The tractor and semitrailer routing considering carbon dioxide emissions[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 2013: 1-12.
- [25] SOLOMON M M, DESROSIERS J. Survey paper—time window constrained routing and scheduling problems [J]. Transportation Science, 1988, 22(1): 1-13.
- [26] ERDOGAN S, MILLER-HOOKS E. A green vehicle routing problem[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2012, 48(1): 100-114.
- [27] CHU C W. A heuristic algorithm for the truckload and less-than-truckload problem[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 165(3): 657-667.
- [28] LAI M, CRAINIC T G, FRANCESCO M D, et al. An heuristic search for the routing of heterogeneous trucks with single and double container loads[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2013, 56: 108-118.