

文章编号:1671-1637(2016)05-0103-09

空挂任务不确定情形下的甩挂运输调度优化

杨珍花¹, 杨光敏^{1,2}, 徐奇¹, 郭姝娟¹, 靳志宏¹

(1. 大连海事大学 交通运输管理学院, 辽宁 大连 116026; 2. 云南省交通科学研究院, 云南 昆明 650011)

摘要:在实际路网下建立了空挂任务不确定情形下的甩挂运输调度优化模型,设计两阶段启发式算法进行求解,第1阶段分别按照空挂调运距离最小和重挂任务起终(OD)点总顺差最低2种策略确定空挂调运方案,第2阶段结合任务节点顺差和贪婪思想确定所有任务的执行序列,采用算例分析算法的性能。分析结果表明:空挂运输成本与总成本分别为325.5、1 010.5元,比原有方案分别节约10.44%、3.62%,且使用的牵引车更少;基于辽宁省内城市间甩挂运输算例所得空挂调运距离最小和重挂任务OD点总顺差最低2种策略的最优值分别为2 561.3、2 464.6元,平均求解时间分别为21.5、27.3 s,第2种策略各结果的稳定性较好;模拟退火算法所得总成本均在3 100元以上,求解时间均在80 s以上。可见,本文算法的精度和效率较高,重挂任务OD点总顺差最低策略在求解空挂任务不确定情形下的甩挂运输调度问题方面有着明显的优势。

关键词:甩挂运输;启发式算法;调度优化;空挂供需;任务切换距离;节点任务顺差

中图分类号:U492.22

文献标志码:A

Optimization on tractor-and-trailer transportation scheduling with uncertain empty-trailer tasks

YANG Zhen-hua¹, YANG Guang-min^{1,2}, XU Qi¹, GUO Shu-juan¹, JIN Zhi-hong¹

(1. School of Transportation Management, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China;

2. Yunnan Science Research Institute of Communications and Transportation, Kunming 650011, Yunnan, China)

Abstract: In actual road network, the optimization model on tractor-and-trailer transportation scheduling with uncertain empty-trailer tasks was built. A two-stage heuristic algorithm was designed to solve the model. At the first stage, the transportation scheme of empty-trailer task was decided by two strategies, minimizing the transportation distance of empty-trailer and minimizing the total surplus of origin destination (OD) points for heavy-trailer tasks respectively. At the second stage, the task node surplus and the greed thought were combined to determine the execution sequence of all tasks. Numerical examples were used to analyze the performance of the algorithm. Analysis result shows that empty-trailer transportation cost and total cost are 325.5 and 1 010.5 yuan respectively, which respectively save by 10.44% and 3.62% compared to the original scheme, and less tractors are used. Based on the numerical example of tractor-and-trailer transportation among cities in Liaoning Province, the optimal values under two strategies, minimizing the transportation distance of empty-trailer and minimizing the total surplus of OD

收稿日期:2016-04-11

基金项目:国家自然科学基金项目(71172108,71302044,71572023,71302085);欧盟 FP7 居里夫人项目(ENRICH-612546);交通运输部应用基础研究计划项目(2014 329 225 110);辽宁省自然科学基金计划项目(2015020092);中国博士后科学基金项目(2014M550153);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20132125120009)

作者简介:杨珍花(1991-),女,山东青岛人,大连海事大学工学博士研究生,从事物流系统优化与仿真研究。

导师简介:靳志宏(1963-),男,辽宁沈阳人,大连海事大学教授,工学博士。

points for heavy-trailer tasks are 2 561.3 and 2 464.6 yuan respectively, average solving times are 21.5 and 27.3 s respectively, and the results under the second strategy have good stability. The total costs computed by using simulated annealing algorithm are all above 3 100 yuan, and the solving times are all above 80 s. So, the algorithm in this paper has higher precision and efficiency, and the strategy of minimizing total surplus of OD points for heavy-trailer tasks has obvious advantages on tractor-and-trailer transportation scheduling problem with uncertain empty-trailer tasks. 7 tabs, 8 figs, 25 refs.

Key words: tractor-and-trailer transportation; heuristic algorithm; scheduling optimization; empty-trailer supply and demand; task switching distance; node task surplus

Author resumes: YANG Zhen-hua(1991-), female, doctoral student, +86-411-84724090, yangzhenhua91@126.com; JIN Zhi-hong(1963-), male, professor, PhD, +86-411-84729563, jinzhihong@dlmu.edu.cn.

0 引 言

甩挂运输是一种新型高效的运输组织形式,牵引车可在挂车交换点迅速将挂车甩下,挂上新的挂车或空驶去执行下一项任务,无需等待装卸货,提高了运输效率。同时,相比于传统运输方式,甩挂运输可将牵引车重复与不同的挂车耦合使用,减少牵引车的购置和使用数量,节约成本,降低碳排放。目前,国内的甩挂运输形式多为牵引车加1辆半挂车,牵引车不可载货,主要侧重甩挂的高效性,客户的货量较大,以挂车为单位。

国外的甩挂运输形式多为卡车拖带挂车,卡车可载货,相应的调度问题称为卡车与挂车调度问题(Truck and Trailer Routing Problem, TTRP),该问题最早由 Chao 提出并开发禁忌搜索算法进行求解^[1];在此基础上, Lin 等设计了模拟退火算法,分别求解了经典 TTRP^[2]、无车辆数量限制的 TTRP^[3]和带时间窗的 TTRP^[4]; Villegas 等研究了带有子车场的单甩挂车的车辆路径问题^[5],子车场用于存放挂车,各客户只允许用卡车服务,之后又提出解决 TTRP 的混合元启发式方法^[6]和集合划分规划法^[7]; Derigs 等研究了 TTRP 中汽车和挂车不可交换货物的问题^[8],参考关于局部搜索和大邻域搜索的方法,提出了一种较为复杂的启发式方法进行求解; Zhang 等研究了带有灵活订单的集装箱拖运问题^[9],引入临时顶点集来区分不同的集卡状态,并设计4种策略进行求解; Scheuerer 提出2种构筑法解决 TTRP^[10],并设计禁忌搜索算法进行改进; Mirmohammadsadeghi 等建立了带有随机需求约束的 TTRP 模型^[11],并依托乳品工业的生产实际,求解了客户需求服从泊松随机分布的配送问题;胡志

华等运用混合进化算法进行求解 TTRP^[12],并用两元素优化方法 2-opt 对线路进行了优化; Tan 等构建了考虑外包任务的多目标甩挂运输模型并进行求解^[13]; Lee 等得出甩挂运输调度中2种外包任务提前选取的规则^[14]; Xue 等通过引入虚拟节点将任务进行拆分^[15],同一任务的2项子任务可由不同的牵引车完成,之后设计了蚁群优化算法^[16]、CBC 算法^[17]解决大规模区域港口集装箱拖挂问题; Francis 等提出变半径方法和贪婪随机过程来求解有确定任务和灵活任务的多资源(牵引车和挂车)路径问题^[18],但并未给出不确定任务的现实意义; Cheng 等求解了钢铁工业生产中的甩挂运输调度问题^[19],与分散调度结果的对比证明甩挂运输在提高效率、节约成本方面有较大的优势; Li 等设计启发式算法求解了甩挂运输车辆路径问题^[20]; 余莉等将配送网络转化为有向图,设计了启发式算法^[21]; 薛亮等以粤闽干线开展甩挂运输为实例,分析了甩挂运输创造的经济效益和社会效益^[22]; 钟慧玲等解决了内河港口甩挂运输组织中场站选址问题^[23]; 胡志华等提出港口集装箱集散过程中的循环甩挂模式^[24],设计两阶段优化方法进行求解,并在后续研究中运用该方法求解了两港口间的集装箱互拖问题^[25]。

通过分析可以发现,现有研究主要存在3个问题:研究对象仅有重挂任务;空挂任务直接由重挂调运方案决定,并非独立存在;将空挂调运任务视为确定性任务。但实际中,空挂作为一种移动仓库,其在节点间的移动虽未产生实际效用,却是保障系统后续正常运营的必要手段,即空挂任务是系统内一种不可避免的无效作业。通常情况下,各点对空挂的供需数量也是明确的,但具体调度方案需要另行规划。本文针对甩挂运输的这一特点建立数学模型,分别规划空挂任务和

整体调度方案,针对性地提出两阶段求解算法,最终通过算例验证算法的有效性,并对比各策略的优劣。

1 问题描述

某运输系统内分布着单个车场与多个客户点,车场可提供牵引车,客户点处仅能存挂车。牵引车从车场出发,在调度期内完成所有的挂车任务后最终返回车场。由于系统内部的货流稳定,根据货物的供需,重挂任务的数量和相应的起终(Origin Destination, OD)点可提前获知。同时,客户点对于空挂车的供需量也可预知,但由于所有空挂车的性质一致,某一特定需求的供给点是不能提前确定的,因此,空挂任务不确定情形下的甩挂运输车辆调度优化涉及两阶段,第1阶段需确定所有空挂需求的供给点,进而形成明确的空挂调运任务,第2阶段针对所有的挂车任务安排牵引车的数量和行驶路线,使得调度方案的总成本最低。

1.1 空挂任务 OD 点匹配

该阶段旨在为每一项空挂需求匹配相应的供给客户点。存在路网 $G=(V, e)$, 可将其视为赋权无向连通图,其中 V 为点集, e 为边集。任意边上的权值为其在路网中的长度,任意2点间的距离以其在路网中的最短距离计。

系统中的部分客户点处需要空挂车进行装货作业,即空挂需求,另一部分客户点处存有闲置的空挂车,即空挂供给,且空挂车的供给总量能够满足需求总量。仅针对空挂车进行调运,按照空挂任务距离最短原则或重挂任务 OD 点总顺差最低原则,为所有的空挂需求安排供给客户点,形成具有明确 OD 点的空挂任务。

1.2 总体调度优化

在空挂任务已经确定的基础上,结合重挂任务对牵引车的行驶路线进行调度优化,系统内甩挂运输模式见图1,1~8为客户点编号,任务1→2、5→6为空挂任务,3→4、5→7、6→7为重挂任务,7→8为2项重挂任务,不同的线型代表不同的牵引车路径。

当2项任务被同一牵引车连续执行时,紧前任务的终点与紧后任务的起点重合,2项任务之间的切换距离为0,若两点不重合,2项任务的切换距离即为两点之间的路网距离,因此,针对任意2项任务 i, j , 定义两者之间的切换距离 D_{ij} 为

$$D_{ij} = \begin{cases} 0 & E_i = I_j \\ F_{E_i I_j} & E_i \neq I_j \end{cases} \quad (1)$$

式中: I_i, E_j 分别为任务 i 的起始节点和任务 j 的终

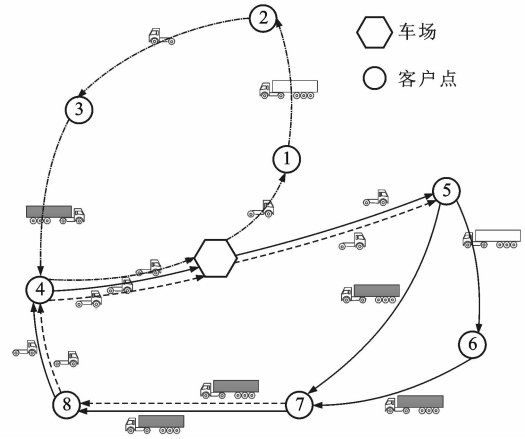


图1 甩挂运输模式

Fig. 1 Tractor-and-trailer transportation mode

止节点; $F_{E_i I_j}$ 为节点 E_i, I_j 之间的切换距离。

设置2项虚拟任务 U_1 和 U_2 , 分别代表牵引车从车场出发和牵引车返回车场, 可将这2项任务的OD点均视为车场。

2 混合整数规划模型

2.1 假设条件

模型基于以下假设条件建立: 路网中任意两点间的最短距离已知; 单一车场, 车场内牵引车数量足够; 牵引车始终以相同的速度匀速行驶; 所有空挂车的性质无差异; 客户点处的空挂需求量或空挂供给量已知; 系统内空挂的供给量能满足需求; 客户点处不同时存在空挂需求和供给2种状态; 调度开始前, 所有重挂任务的数量和OD点已知; 各任务均以挂车为基本单位; 每项任务的执行过程是连续的, 不存在中途换挂的情况。

2.2 符号说明

C 为客户点编号集合; c, d 为客户点编号; N_{c1} 为客户点 c 的空挂需求量; N_{c2} 为客户点 c 的空挂供给量; M 为重挂任务集合; N 为空挂任务集合; $F_{I_i E_i}$ 为任务 i 的起与终点之间的距离; K 为牵引车总数; k 为牵引车编号; t_1 为牵引车最大工作时间; t_2 为牵引车与挂车耦合、分离所需的时间; v 为牵引车的行驶速度; b_1 为牵引车空驶单位距离的成本; b_2 为牵引车拖挂空挂车行驶单位距离的成本; β_{cd} 为从客户点 c 调往客户点 d 的空挂车数量; z_{kij} 为0-1变量, 若牵引车 k 连续依次执行任务 i 和任务 j , 其值为1, 否则为0; x_{ki} 为0-1变量, 若牵引车 k 执行任务 i , 其值为1, 否则为0。

2.3 数学模型

目标函数 f 为

$$\min f = \sum_{k=1}^K \sum_{i,j \in \{U_1, U_2\} \cup M \cup N} b_1 D_{ij} z_{kij} + \sum_{k=1}^K \sum_{i \in N} b_2 F_{I_i E_i} x_{ki} \quad (2)$$

约束条件为

$$\sum_{c \in C} N_{c2} \geq \sum_{c \in C} N_{c1} \quad (3)$$

$$\sum_{c \in C} \beta_{cd} \geq N_{d1} \quad d \in C \quad (4)$$

$$\sum_{d \in C} \beta_{cd} \leq N_{c2} \quad c \in C \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^K x_{ki} = 1 \quad i \in M \cup N \quad (6)$$

$$x_{kU_1} x_{kU_2} = 1 \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j \in \{U_2\} \cup M \cup N} z_{kij} = \sum_{k=1}^K \sum_{j \in \{U_1\} \cup M \cup N} z_{kji} \quad i \in M \cup N \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^K z_{kU_1 U_2} = 0 \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j \in \{U_1\} \cup M \cup N} z_{kU_2 j} = 0 \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i \in \{U_2\} \cup M \cup N} z_{kiU_1} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\sum_{i,j \in \{U_1, U_2\} \cup M \cup N} D_{ij} z_{kij} + \sum_{i \in M \cup N} F_{I_i E_i} x_{ki}}{v} + 2t_2 \sum_{i \in M \cup N} x_{ki} \leq t_1 \quad (12)$$

$$x_{ki}, z_{kij} \in \{0, 1\} \quad i, j \in \{U_1, U_2\} \cup M \cup N \quad (13)$$

$$x_{kj} = \sum_{i \in \{U_1\} \cup M \cup N} z_{kij} \quad j \in M \cup N \quad (14)$$

$$x_{ki} = \sum_{j \in \{U_2\} \cup M \cup N} z_{kij} \quad i \in M \cup N \quad (15)$$

目标函数式(2)以牵引车空驶成本和拖挂空挂车运行成本最低为目标,不涉及运输重挂的成本;式(3)保证系统内空挂车的供给量能够满足需求;式(4)保证调入每个客户点的空挂数量能够满足其需求;式(5)保证每个客户点调出的空挂数量不超出其供给能力;式(6)保证每项实体任务仅被服务一次;式(7)保证每辆牵引车从车场出发,最终回到车场;式(8)为实体任务流的约束;式(9)避免虚拟任务连续;式(10)、(11)联合保证虚拟任务与实体任务的先后顺序;式(12)保证每辆牵引车连续工作的时间不能超过上限;式(13)为决策变量取值范围约束;式(14)表示每一牵引车的路线中除虚拟任务外,任何一项任务有且只有一项紧前任务;式(15)表示每一牵引车的路线中除虚拟任务外,任何一项任务有

且只有一项紧后任务。

3 两阶段求解算法

3.1 算法设计思想

空挂任务不确定情形下的甩挂运输系统本质上属于多机并行系统,决策主体较多,调度方案的任意一项任务在整体方案中的位置发生变化,会造成结构重塑的影响,导致原位置新形成的紧前紧后 2 项任务的切换距离发生变化,极有可能造成恶化解,智能算法在这种不利的局面下很难在有限的时间内收敛到较优解。而通过前面的分析可以发现,2 项任务之间的切换距离可以采取一定的规则进行优化,因此,针对先确定空挂任务后进行总体调度的问题本质,相应地设计两阶段求解算法进行求解,问题的优化空间相当程度地取决于任务切换距离。而任务切换距离为紧前任务的终点与紧后任务的起点之间的路网距离,不难发现最理想的状态即是上一任务的终点便是下一任务的起点。是否能达到这种目标与各任务 OD 点的任务顺差直接相关,定义客户点 c 的任务顺差为输入该点的任务数量减去从该点输出的任务数量,算法整体思路见图 2。

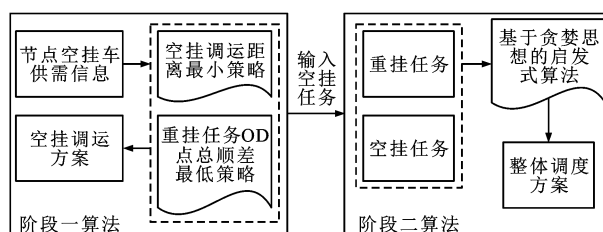


图 2 算法整体思路

Fig. 2 Algorithm overall idea

3.2 两种策略确定空挂调运任务

第 1 阶段的编码方式及对应的调运方案见图 3。采用双层编码刻画空挂调运方案,上层编码为提供空挂的客户点编号,下层编码为接收相应空挂的客户点编号,各编号出现的次数为其提供或接收空挂车的数量。上层编码中,左侧对应实际的空挂调出的客户点来源,只有空挂供给点的右侧对应空挂存留在相应的客户点处。空挂调运方案对整体方案的影响主要体现在两个方面,一是完成空挂运输任务的成本,二是空挂任务 OD 点的配对不同对所有任务切换距离的影响。根据这两方面因素,对第 1 阶段的求解设计了 2 种策略。

第 1 种策略是空挂调运距离最小策略。空挂调运距离是指满足所有空挂需求所形成的任务本身所覆盖的路网距离。在随机生成初始空挂调运方案后,

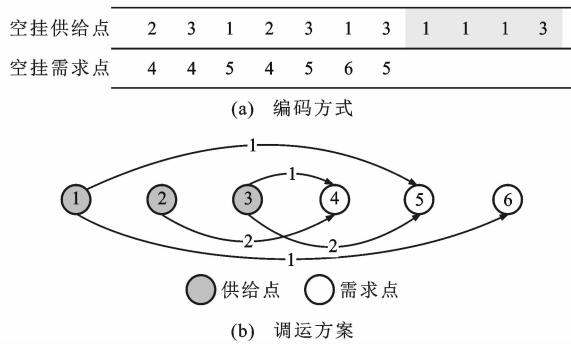


图3 第1阶段的编码方式及对应的调运方案

Fig. 3 Coding mode and corresponding dispatching scheme at the first stage

迭代过程中随机选择上层编码中不同的两点进行交换,即改变某2项空挂任务的起始点,且能保证变换

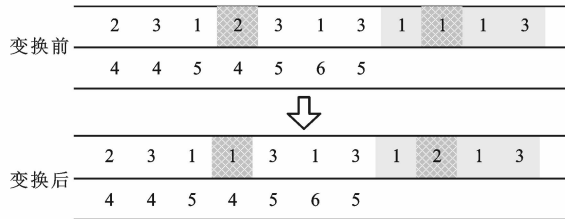


图4 空挂调运方案变换

Fig. 4 Scheme transformation of empty-trailer transportation

之后的解均为可行解,空挂调运方案变换见图4。每迭代一次,计算空挂调运距离,若新方案的距离更小则接受,否则不接受。重复该过程,直至达到最大计算次数。

第2种策略是重挂任务OD点总顺差最低策略。生成空挂调运方案前,计算重挂任务OD点的任务顺差,在空挂供给序列中,优先安排顺差大的空挂供给节点,具体步骤如下。

Step 1: 计算所有重挂任务OD点的任务顺差,形成包含节点、节点任务顺差的矩阵 A 。

Step 2: 统计空挂供给情况,形成包含供给点、供给数量的矩阵 B 。

Step 3: 随机生成空挂需求序列,并令空挂供给序列为空,对应参数 $s=1$ 。

Step 4: 判断 A 是否为空。若为空,将 B 中剩余供给点置于空挂供给序列末端,输出空挂调运方案。若不为空,执行 Step 5。

Step 5: 找到 A 中任务顺差的最大值,令其对应的客户点为 $\max(c)$,并令该列为空。

Step 6: 判断 B 中供给点是否包含 $\max(c)$ 。若不包含,返回 Step 4。若包含,执行 Step 7;

Step 7: 找到 B 中对应于 $\max(c)$ 的空挂供给数量 n ,令空挂供给序列的第 $s \sim s+n$ 位均为 $\max(c)$ 。

B 中该列为空, $s=s+n$ 。返回 Step 4。

3.3 基于贪婪思想的启发式算法优化整体调度方案

采用以任务为对象的整数编码可以直接保证每项任务独立完成后才能执行下一项任务,不存在中途换挂的现象,具体的编码方式见图5,图5显示了4辆牵引车执行40项任务时,各辆牵引车的任务执行序列。

任务序列1	32	40	22	34	35	6	3	11	30	33	7
任务序列2	38	28	17	14	16	8	5	29	21		
任务序列3	25	37	31	27	26	19	15	1	36	23	2
任务序列4	18	24	39	13	9	20	10	12			

图5 以任务为对象的整数编码

Fig. 5 Integer coding taking tasks as objects

算法原则为:优先选择起始点任务顺差大的任务为每个任务序列的第1项任务;考虑构筑方案的后效性,每添加一项任务后,重新计算尚未加入方案的所有任务所涉及节点的任务顺差;为当前任务选择紧后任务时,优先选择任务切换距离小的任务。若同时有多项任务满足条件,则选择终点的任务顺差绝对值最小的任务,具体步骤如下。

Step 1: 将空挂任务与重挂任务合并,形成总体任务集合 T ,整体调度方案 S 为空。

Step 2: 令当前任务序列编号 $L=1$,当前任务序列中已安排的任务数量 $h=1$ 。

Step 3: 判断 T 是否为空集。若为空集,输出 S 即为最终的调度方案;否则,执行 Step 4。

Step 4: 若此时序列 L 中尚无任务,执行 Step 5,否则执行 Step 6。

Step 5: 计算 T 中所有任务起始节点的任务顺差,并找出值最大的点 p 。将所有以 p 为起点的任务,置于集合 H 中。若任务的OD点相同,随机选择一项任务作为序列 L 中的第 h 项任务;若任务的OD点并非完全相同,计算 H 所有任务终点的任务顺差,选择绝对值最小的任务作为序列 L 中的第 h 项任务。若仍有多项任务满足要求,随机选择,将选择的任务从 T 中移除,令 $h=h+1$,返回 Step 3。

Step 6: 判断完成现有序列 L 所需的时间,若未达到牵引车最大工作时间,从 T 中选择与当前任务切换距离最小的任务加入现有序列 L 。若同时存在多项满足要求的任务,计算所有满足要求任务的终点的任务顺差,并选择绝对值最小的任务置于当前序列末端。若仍存在多项任务满足要求,则随机选择,将选中的任务从 T 中移除,并令 $h=h+1$,返回

Step 3。若已达到牵引车最大工作时间,令 $L=L+1, h=1$, 返回 Step 3。

4 仿真试验结果分析

所有的仿真试验均在中央处理器为 Intel Core i3、内存为 2GB、系统为 Windows 7 的计算机上完成。

余莉等在解决网络型甩挂运输模式下的车辆调度问题时要求所有客户点的挂车数量保持不变^[21], 因此, 在计算运输成本时, 需要将满足这一条件的空挂运输成本加以考虑。另外, 所有的任务序列求解结束后, 依照距离最短原则选择两端的车场。运用本文算法求解文献^[21]的算例, 所得牵引车运行方案为: 任务序列 1 为 A-(5-7)-(7-9)-(7-9)-(7-9)-(10-9)-C; 任务序列 2 为 B-(6-7)-(6-7)-(5-7)-(5-7)-(8-3)-(3-4)-(4-3)-(4-3)-B; 任务序列 3 为 A-(2-4)-(1-2)-(1-2)-A。A、B、C 为车场编号, 数字为客户点编号。本文算法的结果与原有结果的对比见表 1。

表 1 本文算法结果与原有结果的对比

Tab. 1 Comparison of result computed by algorithm in this paper and original result

比较参数	重挂行驶 距离/km	重挂运输 成本/元	空挂行驶 距离/km	空挂运输 成本/元	总成本/ 元
文献 ^[21] 算法	1 370	685	1 040	364	1 049
本文算法	1 370	685	930	326	1 011
相对差值/%			10.58	10.44	3.62

可见, 本文算法所得空挂运输成本比原有方案节约了 10.44%, 总成本节约了 3.62%。原有调度方案中需要配置 5 辆牵引车, 若每辆牵引车仅使用一次, 虽未考虑牵引车行驶的固定成本, 但其购置及维护费用必然较高; 若同一辆牵引车多次使用, 牵引车独自在车场之间转移的行驶成本并未加以考量, 因而实际运营成本必然会更高。而本文得出的调度方案仅需 3 辆牵引车工作即可, 不仅能降低运行成本, 同时可减少牵引车的使用数量, 降低系统的设备购置和维护成本。显然, 本文算法是有效的。

4.1 基于算例的算法性能分析

基于某运输公司在辽宁省内各地级市间开展甩挂运输的业务数据形成算例, 各城市编号见表 2。牵引车每天最大工作时间为 24 h, 平均行驶速度为 $90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 运输空挂的成本为 $0.35 \text{ 元} \cdot \text{km}^{-1}$, 空驶成本为 $0.30 \text{ 元} \cdot \text{km}^{-1}$, 牵引车与挂车耦合或分离需要 10 min。路网中任意 2 点间的最短距离见表 3, 节点编号与城市编号对应, 重挂任务 OD

点和数量见表 4, 系统内各点空挂车的供给与需求情况见表 5, 正值表示可提供空挂, 负值表示需要调入空挂。

表 2 城市编号

Tab. 2 Cities numbering

编号	城市名称	编号	城市名称
0	沈阳	7	营口
1	铁岭	8	朝阳
2	辽阳	9	锦州
3	本溪	10	葫芦岛
4	鞍山	11	大连
5	阜新	12	丹东
6	盘锦		

表 3 节点之间的最短距离

Tab. 3 Shortest distances between nodes km

节点	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0	69	84	75	114	196	168	191	314	223	270	390	238
1	69	0	151	146	182	228	236	259	352	291	337	458	309
2	84	151	0	75	27	233	144	120	297	205	252	319	219
3	75	146	75	0	91	282	208	184	361	268	315	383	170
4	114	182	27	91	0	243	124	100	306	214	260	299	235
5	196	228	233	282	243	0	130	192	138	139	195	407	410
6	168	236	144	208	124	130	0	60	192	100	147	287	289
7	191	259	120	184	100	192	60	0	255	163	210	219	267
8	314	352	297	361	306	138	192	255	0	92	145	470	473
9	223	291	205	268	214	139	100	163	92	0	61	378	381
10	270	337	252	315	260	195	147	210	145	61	0	424	427
11	390	458	319	383	299	407	287	219	470	378	424	0	307
12	238	309	219	170	235	410	289	267	473	381	427	307	0

表 4 重挂任务分配

Tab. 4 Assignment of heavy-trailer tasks

任务 OD 点	数量	任务 OD 点	数量	任务 OD 点	数量
1→2	2	8→3	1	5→9	1
1→6	2	10→9	1	5→10	1
2→4	1	12→7	2	7→4	2
3→4	1	11→8	1	7→5	2
4→3	2	4→9	1	11→6	2
5→7	3	4→11	2	7→8	2
6→7	2	5→4	1	7→12	2
7→10	3	10→7	1	8→7	2

算例中共有重挂任务 40 项, 空挂任务 15 项。将第 1 阶段采用的空挂调运距离最小策略与重挂任务 OD 点总顺差最低策略分别称为策略一和策略二。运用 2 种策略对该算例计算 1 000 次, 重复此操作

表 5 空挂供需情况

Tab. 5 Supply and demand situation of empty-trailers

节点编号	供需数量	节点编号	供需数量
1	+3	7	+5
2	-2	8	-2
3	+4	9	-4
4	-1	10	-3
5	-2	11	-1
6	+5	12	+2

10 次,所得最低总成本见表 6。策略一的平均求解

表 6 两种策略所得最低总成本

Tab. 6 Lowest total costs by two strategies

策略	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
一	2 799.8	2 885.3	2 561.3	2 666.1	2 735.0	2 785.3	2 661.7	2 712.6	2 611.3	2 679.1
二	2 567.6	2 561.4	2 512.3	2 577.2	2 583.8	2 572.4	2 464.6	2 516.3	2 591.6	2 524.3

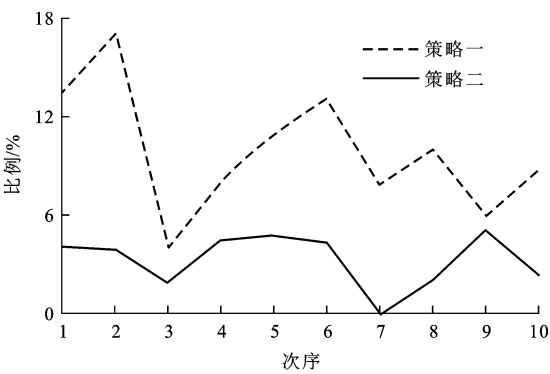


图 6 各结果高于最优值的比例

Fig. 6 Proportions of results higher than optimal value

4.2 不同情境下 2 种策略的对比

考虑到实际运营情况的变化,在重挂任务不平衡度变化、空重挂任务比例变化 2 种直接影响调度方案的情境下对 2 种策略的性能作进一步分析。

定义重挂任务不平衡度为所有重挂任务起、终点顺差绝对值之和的平均值。同样沿用某运输公司在辽宁省内各地级市间开展甩挂运输的业务数据的算例,保持数量不变,重新生成重挂任务,并分别将重挂任务的不平衡度调整为 10%、50%、80% 和 100%,应用策略一和策略二分别求解 1 000 次,求解结果见图 7。可以看出,当重挂任务不平衡程度较低时策略二的效果要优于策略一,说明此时考虑重挂任务的不平衡度来安排空挂调运方案有着积极意义。随着重挂任务不平衡度的增大,客户点作为挂车提供点或挂车需求点的性质趋于单一,挂车任务的起点和终点的交集变小,任务切换距离为 0 的情况逐渐减少,根据重挂任务的不平衡度来安排空

时间为 21.5 s,策略二的平均求解时间为 27.3 s。所有结果中的最优值为 2 464.6 元,该值由策略二求得。各计算结果高出该最优值的比例见图 6。可以看出,策略二的求解结果较好,且表现比较稳定,波动控制在 6%以内;策略一的求解结果较差,且波动范围大,因此,空挂调运方案的不同对系统运营成本有着相当程度的影响,在进行空挂调运方案的设计时需要协同考虑重挂 OD 点的任务顺差,利用空挂任务的不确定性平衡系统总体任务顺差,进而减少任务切换距离,降低总体调度成本。

挂任务对任务间切换距离的优化效果已经变得非常微小,而依据此原则造成的空挂调运任务本身的成本覆盖了此效果并造成总成本上升。此时,策略一求解的方案中空挂任务本身的距离小,故而效果优于策略二。

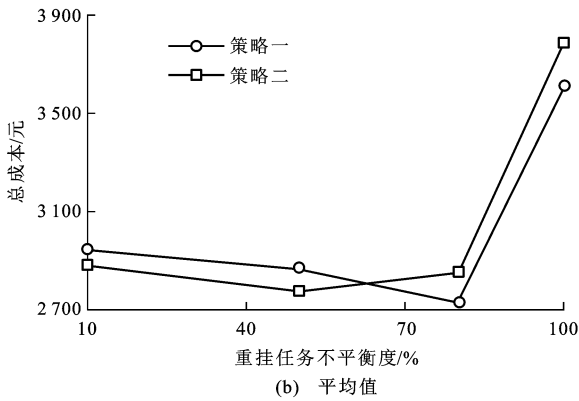
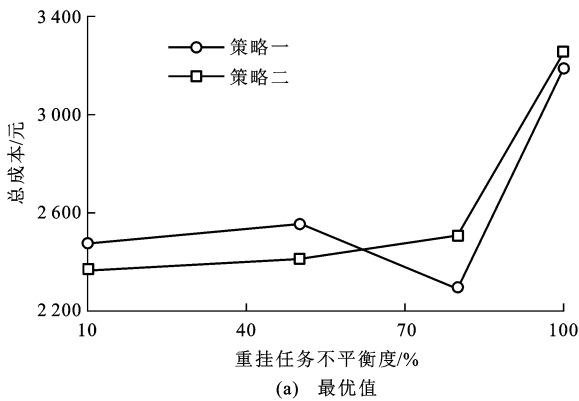


图 7 重挂任务不平衡度变化的求解结果

Fig. 7 Solving results with different unbalance degrees of heavy-trailer tasks

沿用同样的算例,重挂任务不发生任何变化,保

持空挂供需比例为 2:1, 改变空挂任务的数量, 使其分别与重挂任务的数量比例为 1:4、1:2、3:4 和 1:1, 其中, 空重挂任务比例为 1:4、3:4 时空挂供需点的地域分布各自聚集, 空重挂任务比例为 1:2、1:1 时空挂供需点的地域分布相互混合。运用策略一和策略二求解 1 000 次, 求解结果见图 8。可以看出, 在空挂任务的数量逐渐增长至与重挂任务持平的过程中, 策略二在求解结果的最优值和平均值均胜过策略一。尽管空挂需求有所变化, 供需点的地域分散程度不同, 但是根据重挂任务的不平衡度来安排空挂任务, 始终能够在一定程度上减少任务间的切换距离, 而且这种效果能抵消可能由此带来的空挂调运任务本身成本的上升, 进而降低系统总体运输成本。

4.3 两种算法的仿真结果对比

模拟退火算法是一种精度较高的启发式算法, 运用模拟退火算法依照现行调度规则, 采用多邻域搜索方式求解实例。对算法中的重要参数初始温度和降温速率分别设定不同的值进行试验, 运用 Kirkpatrick 提出的规则求得初始温度最大值为 1 000, 降温速率在常用范围 0.50~0.99 内选取, 终止温度为 1, 链长为 1 000, 求解结果见表 7。将其与本文两阶段求解算法所得结果进行对比可以看出, 在算法初始温度和降温速率不同的情况下模拟退火算法所得总成本均较两阶段求解算法所得总成本高, 且在相同的计算机环境下计算耗时均比两阶段求解算法长, 充分证明两阶段求解算法的精度和效

表 7 模拟退火算法的求解结果

Tab. 7 Solving results of simulated annealing algorithm

初始温度	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	900	800	700	600	500
降温速率	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
求解时间/s	429.8	190.7	118.1	81.3	57.4	378.1	327.7	278.6	226.3	179.4
总成本/元	3 118.7	3 279.1	3 309.5	3 353.4	3 369.3	3 149.7	3 136.9	3 186.4	3 207.3	3 268.6

5 结 语

(1) 甩挂运输调度优化的根本在于实际路网距离, 与路网中的节点息息相关。本文将任务与路网节点协同优化, 利用空挂任务的不确定性修补了系统内节点流量的不平衡度, 可为中国进一步推进甩挂运输的发展提供理论支撑与技术支持。

(2) 未来的研究将关注于运用铁路驮背运输来进行挂车调度, 并将在站点换挂的现实需求和列车实际到站时间与计划的偏差纳入优化研究范畴。

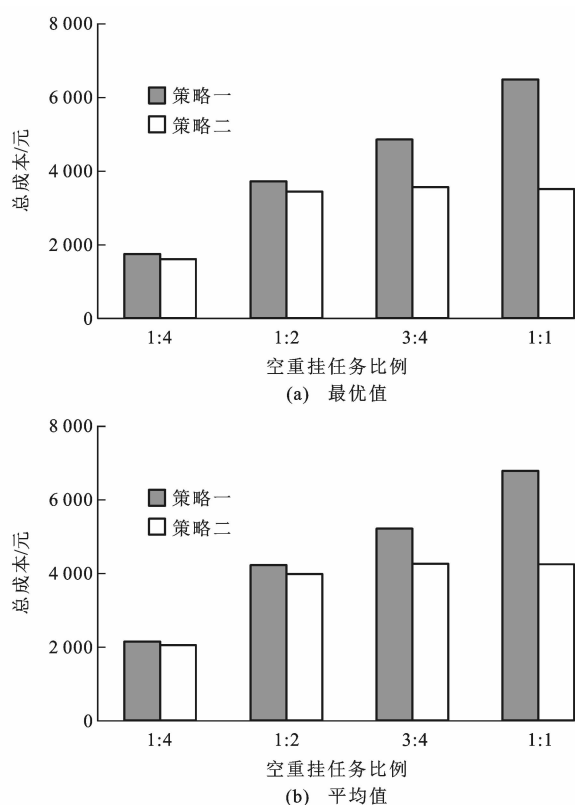


图 8 空重挂任务比例变化的求解结果

Fig. 8 Solving results with different ratios of empty-trailer tasks to heavy-trailer tasks

率较高。策略二基于重挂任务的不平衡度确定空挂任务, 继而根据所有任务的不平衡度安排整体调度方案, 在任务不平衡度不大的情况下其效果较优, 该策略可用于网络型甩挂运输模式中, 此模式下各节点间的货物流动频繁, 整个系统的任务不平衡度较低。

参考文献:

References:

- [1] CHAO I M. A tabu search method for the truck and trailer routing problem[J]. Computers and Operations Research, 2002, 29(1): 33-51.
- [2] 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.
- [3] 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.

- [4] 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.
- [5] VILLEGAS J G, PRINS C, PRODHON C, et al. GRASP/VND and multi-start evolutionary local search for the single truck and trailer routing problem with satellite depots[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2010, 23(5): 780-794.
- [6] VILLEGAS J G, PRINS C, PRODHON C, et al. A GRASP with evolutionary path relinking for the truck and trailer routing problem[J]. *Computers and Operations Research*, 2011, 38(9): 1319-1334.
- [7] VILLEGAS J G, PRINS C, PRODHON C, et al. A matheuristic for the truck and trailer routing problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 230(2): 231-244.
- [8] 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.
- [9] ZHANG Rui-you, LU J C, WANG Ding-wei. Container drayage problem with flexible orders and its near real-time solution strategies [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2014, 61: 235-251.
- [10] SCHEUERER S. A tabu search heuristic for the truck and trailer routing problem [J]. *Computers and Operations Research*, 2006, 33(4): 894-909.
- [11] MIRMOHAMMADSADDEGH S, AHMED S. Metaheuristic approaches for solving truck and trailer routing problems with stochastic demands; a case study in dairy industry [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 2015: 1-14.
- [12] 胡志华,陶 莎. 基于混合进化算法的甩挂配送问题[J]. *公路交通科技*, 2013, 30(5): 147-152.
HU Zhi-hua, TAO Sha. Distribution by trailer pick-up transport based on hybrid evolutionary algorithm[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2013, 30(5): 147-152. (in Chinese)
- [13] 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.
- [14] LEE L H, TAN K C, OU K, et al. Vehicle capacity planning system; a case study on vehicle routing problem with time windows[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Humans*, 2003, 33(2): 169-178.
- [15] XUE Zhao-jie, ZHANG Can-rong, LIN Wei-hua, et al. A tabu search heuristic for the local container drayage problem under a new operation mode[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2014, 62: 136-150.
- [16] XUE Zhao-jie, LIN Wei-hua, MIAO Li-xin, et al. Local container drayage problem with tractor and trailer operating in separable mode[J]. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2015, 27(2): 431-450.
- [17] XUE Zhao-jie, ZHANG Can-rong, YANG Peng, et al. A combinatorial benders' cuts algorithm for the local container drayage problem[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 2015: 1-7.
- [18] FRANCIS P, ZHANG Guang-ming, SMILOWITZ K. Improved modeling and solution methods for the multi-resource routing problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 180(3): 1045-1059.
- [19] CHENG Yao-rong, LIANG Bo, ZHOU Mei-hua. Optimization for vehicle scheduling in iron and steel works based on semi-trailer swap transport[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2010, 17(4): 873-879.
- [20] LI Hong-qi, LU Yue, ZHANG Jun, et al. Solving the tractor and semi-trailer routing problem based on a heuristic approach[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, 2012: 1-12.
- [21] 余 莉,林 桦,陈伯如. 网络型甩挂运输模式下的车辆调度问题[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2014, 12(2): 58-64.
YU Li, LIN Hua, CHEN Bo-ru. Research of vehicle scheduling problem of the network drop and pull transport[J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2014, 12(2): 58-64. (in Chinese)
- [22] 薛 亮,马健霄,余 伟. 甩挂运输具体应用分析[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2011, 11(5): 200-205.
XUE Liang, MA Jian-xiao, YU Wei. Application analysis of drop and pull transport[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2011, 11(5): 200-205. (in Chinese)
- [23] 钟慧玲,吴 聪,张冠湘,等. 内河港口甩挂运输组织中场站选址问题研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2013, 13(3): 126-131, 137.
ZHONG Hui-ling, WU Cong, ZHANG Guan-xiang, et al. Freight station location of inland port semi-trailer swap transport organization[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2013, 13(3): 126-131, 137. (in Chinese)
- [24] 胡志华,曹 杨,王云霞. 集装箱集散的空重箱循环甩挂调度方法[J]. *武汉理工大学学报*, 2012, 34(10): 68-73.
HU Zhi-hua, CAO Yang, WANG Yun-xia. Cyclic tractor-and-trailer scheduling for consolidation and distribution of loaded and empty containers[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2012, 34(10): 68-73. (in Chinese)
- [25] 胡志华. 集装箱码头间互拖的集卡甩挂运输调度问题[J]. *重庆交通大学学报: 自然科学版*, 2013, 32(2): 313-317.
HU Zhi-hua. Scheduling of container truck-and-trailer transport between two ports [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science*, 2013, 32(2): 313-317. (in Chinese)