

基于时空网络的汽车零部件干线运输 调拨策略优化模型

李智昊, 宋 瑞

(北京交通大学 综合交通运输大数据应用技术交通运输行业重点实验室, 北京 100044)

摘 要: 针对运输车辆在整车厂卸载后的“回空现象”, 本文构建了时空网络描述各城市集散中心和整车厂的零部件调拨过程, 以运输、库存和总成本最低为目标建立零部件调拨策略优化模型, 并借助企业实际数据进行算例分析。结果表明: 相较于现有调拨方案, 优化后的方案减少了零部件回程运输的资源浪费, 提高了车辆的利用率, 显著降低了总成本。

关键词: 汽车零部件; 干线运输; 时空网络; 调拨策略

中图分类号: U294 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2026)01-0150-08

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240592

Convection allocation algorithm for trunk transportation of auto parts based on spatiotemporal network

LI Zhi-hao, SONG Rui

(Key Laboratory of Transport Industry of Big Data Appalication Technologies for Comprehensive Transport, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To address the “empty-backhaul” problem that occurs after delivery vehicles unload at vehicle-assembly plants, this paper constructs a space-time network to depict the parts-allocation processes among city distribution centers and assembly plants. An optimization model for parts-allocation strategies is developed with the objectives of minimizing transportation, inventory, and total costs, and a numerical example is solved using real enterprise data. The results show that, compared with the existing allocation plan, the optimized solution reduces the resource waste caused by empty return hauls, improves vehicle utilization, and significantly lowers total cost.

Key words: auto parts; trunk transportation; spatiotemporal network; allocation strategy

0 引 言

作为全球最大的汽车市场之一, 中国的汽车产业链日益庞大且复杂, 其中零部件供应物流环

节是影响整个供应链效率的关键要素。然而, 零部件的运输过程往往面临供需不均衡、空间分布不均和生产计划不协调等问题, 导致集装箱使用效率低下和“回空现象”频发^[1]。当前, 我国汽车

收稿日期: 2024-04-23.

基金项目: 国家自然科学基金项目(62076023).

作者简介: 李智昊(1979-), 男, 高级工程师, 博士研究生. 研究方向: 交通运输规划与管理. E-mail: 5080323@qq.com

通信作者: 宋瑞(1971-), 女, 教授, 博士. 研究方向: 交通运输规划与管理, 运输与物流技术. E-mail: rsong@bjtu.edu.cn

行业普遍采用基于经验的单线调拨模式,即将供应商处满箱的零部件汇聚到当地的集散中心,再配送至异地的整车厂,交付完毕后,车辆需要返回原集散中心,这一过程往往导致车辆在返途中出现空载的情况,引发了效率低下的“回空现象”^[2],造成资源浪费和物流成本增加。若能实行对流统一调配,即卸货后优先将空集装箱发往本市集散中心进行调配集货,将有效提高车辆利用率,减少资源浪费。

汽车零部件调拨问题作为物流与供应链管理领域的重要分支,受到学术界和工业界的长期关注。早期研究主要集中在基础的库存管理和运输问题上,这些研究为后续更复杂的调拨策略奠定了基础,但主要关注点是单一仓库或单一运输模式,没有考虑整个供应链网络。Misra^[3]以单位时间内的调运费最低为目标,建立铁路集装箱零部件运输优化模型。Hiraki等^[4]分析了汽车零部件时间序列需求结构的特点,基于拉式订购系统的概念,提出了面向海外市场的零部件的生产订购系统。王吉生等^[5]综合考虑中心站箱流集疏和集卡调度的特点,将车辆路径理论应用于公铁联运集装箱的集疏问题,构建了多车程集卡集疏调度优化模型。石红国等^[6]针对集装箱供需不确定的问题,考虑运达时间的约束,建立了集装箱空箱随机机会模型。Jiang^[7]揭示了铁路集装箱空箱调度的原因及特点,以运输成本最低为目标函数建立空箱调度整数规划模型,并通过算例求解结果,验证了模型的有效性。

随着研究的不断深入,学者们开始将动态调度、时空网络融入对问题的分析和求解中。Crainic等^[8]考虑集装箱的不同类型,建立动态网络调度优化模型,并使用禁忌搜索算法进行求解。李玉等^[9]针对信息不对称、生产信息透明度低等问题,提出了一种基于数字孪生的自动化集装箱码头多AGV动态调度方法。李莉^[10]以Supply-hub作为供应链运作的协调中心,建立以协同度最大和供应成本最低的多目标优化模型,重点研究供应商的动态优化选择问题。李俊等^[11]为满足汽车零部件中异型件的运输需求,以集装箱空间利用率最大化为目标,构建了单元集装箱装载决策问题的0-1整数规划模型。代燕^[12]将船联网技术与MIL-KRUN循环取货模式相结合,设计了一种船舶运输调度系统,旨在降低零部件的运

输成本和缩短运输时间,提高运输效率。He等^[13]将零部件调运路线视为一个网络,以供应链网络中总服务成本最小化为目标,建立多层次集装箱供应链网络优化模型,并使用启发式算法求解。Chao等^[14]基于时空网络研究了亚洲主要港口间的冷藏集装箱零部件调运问题。Hao等^[15]对集装箱多式联运的动态规划问题进行研究,组合优化了运输路线和运输模式。针对汽车零部件物流特点,朱爽等^[16]建立零部件物流运输网络优化模型,采用模拟退火的思想对遗传算子参数进行自适应的改进方法,输出零部件物流运输时空网络最优选址方案。最优的时空网络布局是建立零部件运输调拨策略优化模型的有效前提。汪金莲^[17]研究了零部件入厂物流的循环取货路径规划模型,并采用禁忌搜索算法进行模型求解,禁忌搜索算法具有良好的寻优性。其在考虑库存约束及多频次运输的特征下,输出了最优取货路径及运行频次,但其仅考虑汽车物流中的循环取货路径规划,未研究干线运输情况。

当前关于汽车零部件调拨问题的研究大多关注运输和物流层面的问题,如库存管理和运输调度优化,而对生产企业的内部运作与外部物流之间的协同效应研究相对较少,尤其是对多条供应链统一调配方面的系统性研究较少。在汽车企业实际生产运作中,由于供应链上的零部件供应商和整车厂对配送时间、用箱种类以及数量有严格的要求,大批量的零部件需在供应商、集散中心和整车厂构成的网络中流动。如何在集散中心与整车厂之间高效、准确地调拨零部件,制订合理的组织调拨方案,在汽车零部件运输管理过程中尤为关键。因此,本文针对城市间集散中心与整车厂之间的零部件调度问题,基于多条供应链的统一调配,建立了时空网络调拨策略优化模型,为企业调拨方案的制订提供参考。

1 问题描述

异地零部件的现有调拨策略如图1(a)所示。以城市A、B为例,零部件在城市A、B的供应链上进行单线调拨。A市供应商使用集装箱装满汽车零部件后,由A市集散中心发往B市整车厂,运输车辆卸下零部件后返回A市集散中心;同样,B市供应商和集散中心也会向A市整车厂运输满箱的零部件,卸载后的空集装箱同样要返回B市集

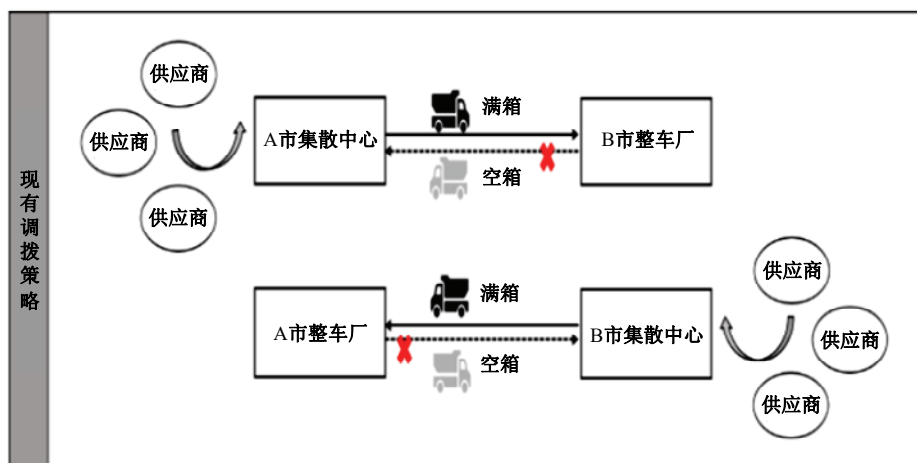
散中心。现有的调拨策略导致零部件在 A、B 市之间进行了两次不必要的往返运输,不仅增加了运输成本,也降低了车辆和集装箱的利用率。

本文提出的异地零部件调拨优化策略进行了如下调整:以城市 A、B 为例,调拨优化策略如图 1(b)所示。首先,由 A 市集散中心向 B 市整车厂发送满载的零部件集装箱,在 B 市整车厂完成卸货后,空集装箱直接转运至 B 市集散中心,随后集散中心将空集装箱分配给本地供应商进行集货,变为满箱件后再运往 A 市整车厂。在该过程中,如果本市集散中心出现零部件短缺或剩余,则采取适当的决策在集散中心之间进行调拨。对于 B 市集散中心剩余的空集装箱,可选择就地存储或者转运至其他有需求的城市集散中心,反之同理。

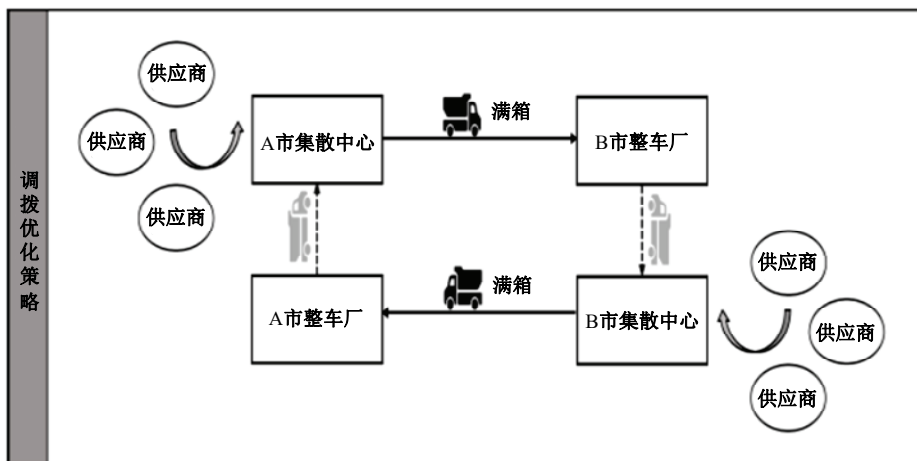
设 T 为计划周期的长度,在供应链网络中有 N 类零部件需要被调拨。为确保供应商和整车厂能够按计划进行生产,各地集散中心在计划周期

内每天都要对零部件进行供需匹配,保证零部件及时完成调拨。每个集散中心的存储容量上限为 D ,按计划暂存于集散中心而延迟运输的零部件将占据储存空间,从而产生库存成本。同时,在不同集散中心间进行横向转运的车辆也有最大载重限制 W 。当零部件供应不足时,需调用各地集散中心的安全库存,而补充安全库存也将产生额外的零部件生产成本。

在优化策略中,本地整车厂对零部件的需求优先由本地供应商生产的零部件满足,无法满足的部分再从其他城市调拨。零部件的剩余或缺由供应商供货计划与整车厂生产计划之差决定。从各城市来看,当生产计划 $<$ 供应时,该城市有零部件富余;当生产计划 $>$ 供应时,该城市有零部件缺口,需要从其他城市调拨零部件满足需求。从各类零部件的总量来看,当各城市对某类零部件的总供应量 $>$ 总需求量时,需求得以完全满足;当



(a) 异地零部件的现有调拨策略



(b) 异地零部件调拨优化策略

图 1 零部件调拨策略示意图

Fig. 1 Diagram of parts allocation strategy

总供应量<总需求量时,动用各城市当地集散中心的安全库存予以供应,转化为产需平衡问题。为便于调拨决策,安全库存的供应量在生产计划期初就全部提供。

2 模型构建

时空网络(Time-space network)建模方法是对现有的物理空间运输网络附加上一层时间维度进行拓展,将时间相关约束吸收进决策变量中,通过增加决策变量来减少约束条件,进而简化数学模型,便于求解复杂的动态网络流规划问题。本文针对异地零部件调拨问题,考虑零部件在整个周期内的动态空间变化过程,基于时空网络构建异地零部件调拨策略优化模型。

构造时空网络 $G=(V,A)$,其中 V 为时空节点集合,由位置节点 i 和时间节点 a 的组合 (i,a) 表示一个时空节点。边集 A 包含了节点之间所有可能的弧,用四元组 (i,a,j,b) 表示,每个弧连接了一个时空起点 (i,a) 和一个时空终点 (j,b) 。弧可分为任务弧、滞留弧两种,任务弧代表零部件在两个城市的集散中心之间的横向转载。滞留弧表示零部件在某地的集散中心滞留了一段时间,未发生位置移动,其中 i 和 j 是相同的。使用 c_{ij} 来表示边 $(i,j) \in A$ 对应的成本,其中 $i \neq j$ 表示运输成本, $i = j$ 表示库存成本。此外,定义了一个 0,1 决策变量 x_{iajb}^n ,当 (i,a,j,b) 弧有第 n 种零部件的货物流时为 1;反之则为 0。

异地零部件调拨的成本包括零部件运输成本、库存成本和生产成本。其中,集散中心间点对点运输产生运输成本。库存成本是由集散中心零部件的滞留造成的,可由单位时间内单位零部件的库存成本来衡量。生产成本是计划期末安全库存零部件缺口数量与厂家生产单位零部件的生产成本的乘积。

在实际情况下,调用安全库存不产生额外成本,但为确保优先调用供应商生产的零部件而非安全库存,本文设定一个较大的启用成本,该成本远大于运输和库存成本。在计划周期结束时,将对安全库存的不足部分进行统计,并由供应商生产相应零部件以补齐这些缺口,这一过程将产生额外的零部件生产成本。

以总成本最小为目标,建立异地零部件调拨模型:

$$\min Z = \sum_{n \in N, (i,a,j,b) \in A, j \neq i} x_{iajb}^n C_{ij} + \sum_{n \in N, (i,a,j,b) \in A, j = i} q_{iajb}^n C_{ij} (b-a) + \quad (1)$$

$$\sum_{n \in N, i \in P, j \in P, a, b \in T, a < b} \delta * q_{iajb}^n \quad (2)$$

$$\sum_{j \in B, b \in T, b > 0} q_{iajb}^n = Q_{ia}^n, \forall n \in N, i \in B \quad (3)$$

$$\sum_{j \in B, b \in T, b > a} q_{iajb}^n - \sum_{j \in B, b \in T, b < a} q_{jbia}^n = Q_{ia}^n, \quad (4)$$

$$\forall n \in N, i \in B, 0 < a < T$$

$$q_{iajb}^n \leq M x_{iajb}^n, \forall n \in N, \forall i, j \in B, \forall a, b \in T \quad (5)$$

$$\sum_{n \in N} q_{iajb}^n \leq W \sum_{n \in N} x_{iajb}^n, \forall i \in B, j \in B/\{i\}, a \in T, b > a \quad (6)$$

$$\sum_{n \in N} \left(\sum_{r=1}^a \sum_{j \in B/\{i\}, t \in T, t > r} q_{jitr}^n - \sum_{r=1}^a \sum_{j \in B/\{i\}, t \in T, t < r} q_{ijtr}^n \right) \leq D_i, \forall i \in P, a \in T \quad (7)$$

$$x_{iajb}^n = \{0, 1\}, \forall n \in N, i, j \in B, a, b \in T \quad (8)$$

式中: P 为各城市整车厂集合; P' 为各城市集散中心集合; B 为节点集合, $B = P \cup P'$; T 为零部件调拨计划期,天; i, j 为地点节点, $i, j \in \{1, 2, \dots, B\}$; a, b 为时间节点, $a, b \in \{0, 1, \dots, T\}$; V 为时空点集合 (i,a) ; A 为弧的集合 (i,a,j,b) ; N 为零部件种类集合; W 为车辆的最大容量,箱; δ 为厂家单位零部件生产成本,元; Q_{ia}^n 为城市 i 在第 a 天对第 n 种零部件的需求量,是该城市整车厂当天生产计划生产所需的零部件与该城市当地供应商供货需求的零部件的差值; D_i 为城市 i 的最大库存容量,箱; M 为无穷大的数,用于约束决策变量的关系。 x_{iajb}^n 为若 (i,a,j,b) 弧有第 n 种零部件的货物流时,则为 1,否则为 0; q_{iajb}^n 为在 (i,a,j,b) 弧上第 n 种零部件的货物流流量,箱。

目标函数(1)表示总成本最低,包括运输成本、库存成本和生产成本。运输成本与库存成本根据时空网络中弧的定义计算,生产成本为计划期末安全库存零部件调出数量与单位零部件生产成本的乘积;约束条件(2)~(4)表示零部件的时空轨迹应满足的流量平衡约束。其中,约束(2)表示计划期初,零部件流出流量等于此时零部件的需求量;约束(3)表示计划期末,零部件流入流量不低于此时零部件的需求量;约束(4)表示计划期中,零部件流出和流入流量的差值等于此时零部件的需求量;约束(5)表示 x_{iajb}^n 和 q_{iajb}^n 的关系,只

有当时空弧上的零部件流量大于 0 时, x_{iajb}^n 才能取 1, 否则为 0; 约束(6)是车辆容量约束。约束(7)是零部件库存容量约束。约束(8)表示决策变量 x_{iajb}^n 取值为 0-1 变量, 若 (i, a, j, b) 弧上有第 n 种零部件的货物流时, 则为 1; 否则为 0。

3 算例分析

3.1 算例介绍

以长春、天津和上海 3 个城市的某整车厂和集散中心为例, 进行算例分析。表 1 为各城市间的运输成本, 其中零部件在长春-天津的运输成本为 4 元/车, 长春-长春'表示调用零部件安全库存所需的 50 元启动成本。零部件在长春、天津和上海的滞留库存成本分别为 1、2 和 1 元/箱。表 2 为各城市整车厂的生产计划及供应商的供应情况, 生产计划数量是整车厂在一天内生产所需满箱零部件的箱数, 供应量是零件供应商一天内能够提供的满箱零部件箱数。假设共有两种零部件, 分别记为 $n=1$ 和 $n=2$, 针对 3 天的计划周期制定调拨方案, 在时间标记上, $a=0$ 代表周期开始时, $a=1$ 代表第 1 天末, $a=0\sim 1$ 为第 1 天。

现有策略的调拨方案如表 3 所示。 i 为零部件的发出城市, a 为零部件发出时间, j 为零部件的到达城市, b 为零部件到达时间, q 为运输零

表 1 运输成本

Table 1 Transportation cost 元/车						
	长春	天津	上海	长春'	天津'	上海'
长春	/	4	14	50	4+50	14+50
天津	4	/	12	4+50	50	12+50
上海	14	12	/	14+50	12+50	50
长春'	50	4+50	14+50	0	4+50	14+50
天津'	4+50	50	12+50	4+50	0	12+50
上海'	14+50	12+50	50	14+50	12+50	0

表 2 生产计划和供应量(单位:箱)

Table 2 Production plan and supply quantity(in boxes)						
$n=1$	$a=0\sim 1$:第 1 天		$a=1\sim 2$:第 2 天		$a=2\sim 3$:第 3 天	
	生产计划	供应量	生产计划	供应量	生产计划	供应量
长春	0	3	3	1	0	3
天津	0	1	2	6	4	0
上海	5	0	0	7	0	1
$n=2$	$a=0\sim 1$:第 1 天		$a=1\sim 2$:第 2 天		$a=2\sim 3$:第 3 天	
	生产计划	供应量	生产计划	供应量	生产计划	供应量
长春	1	0	1	1	0	2
天津	4	0	3	0	1	2
上海	2	1	2	3	3	2

表 3 现有策略的调拨方案

Table 3 Allocation plan for existing strategies						
$n=1$:供>需	i	a	j	b	q (运输量)	成本
零部件运输	天津	0	上海	1	5	12
	上海	1	天津	2	5+2=7	12
	天津	1	长春	2	3	4
	天津	2	上海	3	2	12
	长春	2	天津	3	3+4=7	4
	天津	3	长春	4	4	4
零部件库存	长春	0	长春	2	3	3×1×2
成本= $q\times c\times t$	天津	2	天津	3	5	5×2×1
$n=2$:供<需	i	a	j	b	q (运输量)	成本
零部件运输	天津	0	长春	1	1	4
	长春	1	天津	2	1+6=7	7
	天津	1	上海	2	1	6
	上海	1	长春	2	1	14
	长春	2	天津	3	3	4
	上海	2	天津	3	2+1=3	12
	长春	2	上海	3	1	14
	天津	3	上海	4	1	12
零部件库存	长春	0	长春	1	1	1×1×1
成本= $q\times c\times t$	上海	0	上海	1	3	3×1×1
	上海	1	上海	2	2	2×1×1

件的数量。方案中有零部件在城市之间调运, 产生运输成本; 有零部件在城市存储, 产生库存成本。 $a=3\sim 4$ (第 4 天)只计算零部件回程运输成本。

方案的第 1 行表示, 0 时刻从天津运出 5 个零部件, 1 时刻运到上海, 天津-上海的运输成本为 12 元。方案第 7 行(第 1 类零部件库存的第 1 行)表示 3 个零部件, 从 0 时刻到 2 时刻滞留在长春, 库存成本为 6 元。

3.2 参数设置

使用 CPLEX 12.6 完成模型的代码编写, 计算机环境包括 Ryzen 7-5800U 处理器和 16 GB RAM。算例的初始参数设置如表 4 所示。

3.3 求解结果

根据本文的调拨优化策略, 本地整车厂对零

表 4 初始参数设置

Table 4 Initial parameter settings	
参数	数值
P	3
N	2
T	3
W	10
D_i	$D_i \in \{20, 20, 20\}$
δ	0.1

部件的需求优先由本地供应商生产的零部件满足,无法满足的部分再从其他城市调拨。故表 5 中,零部件供需量是表 2 中生产计划和供应商需求之差。当生产计划<供应时,该城市有零部件富余;当生产计划>供应时,该城市有零部件缺口,需要从其他城市调拨零部件满足需求。

表 5 零部件供需量

Table 5 Supply and demand of diagram of parts

$n=1$: 供>需	$a=0$ (期初)	$a=1$ (第 1 天末)	$a=2$ (第 2 天末)	$a=3$ (第 3 天末)
长春	3	0	2	-1
天津	1	0	-4	0
上海	0	5	-2	-3
长春'	10	0	0	0
天津'	10	0	0	0
上海'	10	0	0	0

$n=2$: 供<需	$a=0$ (期初)	$a=1$ (第 1 天末)	$a=2$ (第 2 天末)	$a=3$ (第 3 天末)
长春	1	2	2	0
天津	0	4	7	6
上海	3	4	3	4
长春'	6	0	0	0
天津'	6	0	0	0
上海'	6	0	0	0

从零部件种类总量来看,三地对第 1 类零部件的总供应量>总需求量,需求得以完全满足。三地对第 2 类零部件的总供应量<总需求量,零部件需求缺口为 6。三地集散中心对零部件有安全库存储存。城市各储存第 1 类零部件 10 个,第 2 类零部件 6 个。针对无法被满足的需求部分,动用三地集散中心的安全库存予以供应,化为产需平衡问题。安全库存的供应量在生产计划期初就全部提供,便于调拨决策。调用安全库存只产生城市之间的运输成本,但为了确保优先调用供应商生产的零部件供应而非安全库存,增加一个较高的启用成本 50 元。

采用禁忌搜索算法,在领域搜索的基础上,通过设置禁忌表对已搜索结果进行记录,避免陷入局部最优解,获取初始可行解。同时调用 CPLEX12.6 求解器,设置初始参数如表 4 所示,获取模型可行解,从而输出的优化调拨方案如表 6 所示。 i 为零部件的发出城市; a 为零部件发出时间; j 为零部件的到达城市; b 为零部件到达时间; q 为运输零部件的数量。方案第 1 行表示 0 时

刻从长春运出 3 个零部件,2 时刻运到天津,长春-天津的运输成本为 4 元。方案第 2 行表示 2 个零部件,从 2 时刻到 3 时刻滞留在长春,库存成本为 2 元。

表 6 优化策略的调拨方案

Table 6 Optimization strategy allocation plan

$n=1$:供>需	i	a	j	b	q (运输量)	成本
零部件运输	长春	0	天津	2	3	4
	长春	2	长春	3	2	$2\times 1\times 1$
	天津	0	天津	2	1	$1\times 2\times 2$
	上海	1	上海	2	5	$5\times 1\times 1$
	上海	2	上海	3	3	$3\times 1\times 1$
	长春'	0	长春'	3	10	0
零部件库存 成本= $q\times c\times t$	天津'	0	天津'	3	10	0
	上海'	0	上海'	3	10	0

$n=2$:供<需	i	a	j	b	q (运输量)	成本
零部件运输	长春	1	天津	2	3	4
	长春	2	天津	3	2	4
	天津	2	上海	3	4	12
	天津'	0	天津	1	6	50
零部件库存 成本= $q\times c\times t$	长春	0	长春	1	1	$1\times 1\times 1$
	天津	1	天津	2	2	$2\times 2\times 1$
	上海	0	上海	3	2	$2\times 1\times 3$
	上海	0	上海	2	1	$1\times 1\times 2$
	长春'	0	长春'	3	6	0
	上海'	0	上海'	3	6	0

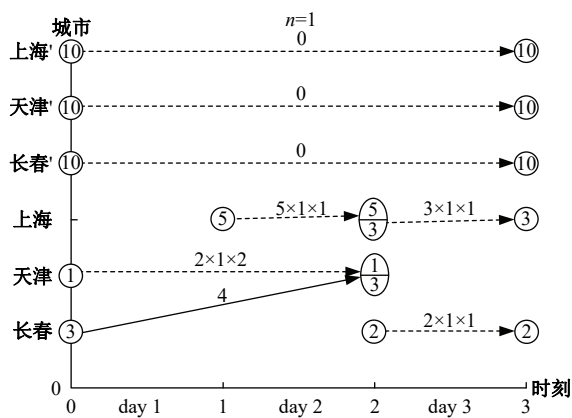
调拨方案的示意图见图 2,按照零部件类别分别绘制。时空网络中横轴表示时间节点,纵轴表示零部件所处的位置(各地集散中心);时空网络图中一个节点的含义为某时刻某批零部件所处的位置;弧表示零部件位置的转移和滞留状态,圆圈内的数字是零部件运输量或库存量;实线弧表示发生了零部件调运,产生运输成本;虚线弧表示发生了零部件滞留,产生库存成本。

3.4 调拨方案对比

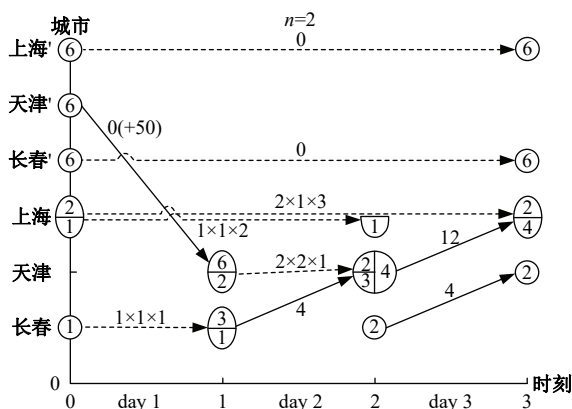
与原方案相比,优化调拨策略的方案减少了 3 次长春-天津、2 次长春-上海、5 次天津-上海的运输任务,减少了 1 天长春的库存任务,增加了 2 天天津、3 天上海的库存任务。

优化的调拨方案成本等于零部件运输成本+零部件库存成本+补齐安全库存的零部件生产成本。针对安全库存缺口的零部件生产成本,方案中天津第 2 类零部件的 6 个安全库存全部被调拨,零部件生产厂家需要以 0.1 元/个的费用生产 6 个第 2 类零部件,以补齐天津的安全库存,即零部件生产成本为 0.6。故优化的调拨方案成本为

101.6 元。然而在实际情况中,调用安全库存不产生额外的 50 元启用成本,扣除之后实际总成本为 51.6 元。



(a) 1类零部件的优化调拨方案



(b) 2类零部件的优化调拨方案

图 2 两类零部件优化调拨方案

Fig. 2 Diagram of parts of two types allocation strategy

对比现有调拨策略方案的成本,如表 7 所示,可以发现本文的异地零部件优化调拨策略方案,第 1 类和第 2 类零部件的调拨成本分别节约了 71.9% 和 60.2%,总成本节约了 64.6%,不仅降

表 7 优化策略的调拨方案

Table 7 Optimization strategy allocation plan

		现有调拨方案 成本/元	优化后的调拨方案 成本/元
$n=1$	运输成本	48	4
	库存成本	16	14
	生产成本	0	0
	总成本	64	18
$n=2$	运输成本	76	20
	库存成本	6	13
	生产成本	0	0.6
	总成本	82	32.6
总成本	总成本	146	51.6

低了运输的零部件回程成本,并且当本地整车厂卸货后的剩余零部件能够满足供应商集货零部件时,不发生零部件在城市之间的转运。

4 结束语

针对汽车整车厂和零部件供应商对零部件的供应和需求存在时空差异的问题,本文以零部件的运输、库存和生产成本最小化为优化目标,考虑车辆容量约束和城市集散中心库存容量约束,利用时空网络建立了异地零部件调拨模型,并进行了算例研究,结果表明所设计的优化模型具备可行性。理论成果可为指导大型制造企业的零部件调度实际作业提供借鉴,在大幅节约物流成本、提高运输车辆利用率的同时,有助于企业制造实力的综合提升,保证制造行业的持续积极发展。在本研究中,零部件调拨方案为固定的 OD 对,未考虑配送的路径问题、异构车辆问题,未来可以进一步将这些约束条件考虑进模型中。此外,整车厂的生产计划与零部件供应商的供货计划相对固定且已知,未来还将进一步探讨在物联网环境下异地零部件调拨的实时调整优化问题。

参考文献:

- [1] 靳志宏,邢磊,蔡佳芯,等. 集装箱零部件调运问题研究综述[J]. 大连海事大学学报, 2021, 47(1): 52-60, 110.
Jin Zhi-hong, Xing Lei, Cai Jia-xin, et al. A review of research on container parts and components transportation[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2021, 47(1): 52-60, 110.
- [2] 潘常虹,范厚明. 我国大型集装箱班轮公司空箱调运问题分析[J]. 物流技术, 2010, 29(17): 16-18.
Pan Chang-hong, Fan Hou-ming. Analysis of the empty container allocation by the large-scale container liner companies in China[J]. Logistics Technology, 2010, 29(17): 16-18.
- [3] Misra S C. Linear programming of empty wagon disposition[J]. Rail Internet, 1972, 7(3): 151-158.
- [4] Hiraki S, Ishii K, Katayama H. Designing of a production ordering system for automobile repair parts [J]. International Journal of Production Economics, 1999(60,61): 289-294.
- [5] 王吉生,朱安格,唐金丽. 集装箱甩挂运输调度优化[J]. 中国储运, 2022, 4: 163-164.
Wang Ji-sheng, Zhu An-ge, Tang Jin-li. Scheduling

- optimization of container dumping transportation[J]. China Storage and Transportation, 2022, 4: 163-164.
- [6] 石红国,高明瑶.带时间窗约束的集装箱空箱调运随机机会约束模型研究[J].铁道运输与经济,2020,42(2):87-92.
- Shi Hong-guo, Gao Ming-yao. Research on stochastic chance constraint model of empty container transfer with time window constraint[J]. Railway Transportation and Economy, 2020, 42(2): 87-92.
- [7] Jiang D. Research on railway empty container disposition based on the integer linear programming method [C]//International Conference of Logistics Engineering and Management, Chengdu, China, 2012: 332-337.
- [8] Crainic T G, Gendreau M, Dejax P. Modelling the container fleet management problem using a stochastic dynamic approach[J]. Operational Research, 2003(5): 473-483.
- [9] 李玉,高银萍,凌强.基于数字孪生的自动化集装箱码头多AGV动态调度[J].计算机集成制造系统,2023,29(12):4175-4190.
- Li Yu, Gao Yin-ping, Lin Qiang. Dynamic scheduling of multiple AGVs in automated container terminals based on digital twins[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(12): 4175-4190.
- [10] 李莉.基于Supply-hub的物流服务供应链供应商动态优化选择研究[D].武汉:武汉理工大学物流工程学院,2019.
- Li Li. Research on dynamic optimization selection of logistics service supplychain suppliers based on Supply-hub[D]. Wuhan: School of Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, 2019.
- [11] 李俊,尹晶,张煜.汽车零部件多式联运组合式单元集装箱装载优化模型与算法[J].交通信息与安全,2023,41(5):127-137.
- Li Jun, Yin Jing, Zhang Yu. Optimization model and algorithm for loading of combined unit containers for multimodal transportation of automotive parts[J]. Transportation Information and Safety, 2023, 41(5): 127-137.
- [12] 代燕.基于船联网的MILK-RUN船舶运输调度系统研究[J].舰船科学技术,2017,39(22):28-30.
- Dai Yan. Research on MILK-RUN ship transportation scheduling system based on ship networking[J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(22): 28-30.
- [13] He J L, Huang Y F, Chang D F. Simulation-based heuristic method for container supply chain network optimization[J]. Advanced Engineering Informatics, 2015, 29(3): 339-354.
- [14] Chao S L, Chen C C. Applying a time-space network to reposition reefer containers among major asian ports[J]. Research in Transportation Business & Management, 2015(17): 65-71.
- [15] Hao C L, Yue Y X. Optimization on combination of transport routes and modes on dynamic programming for a container multimodal transport system[J]. Procedia Engineering, 2016(137): 383-388.
- [16] 朱爽,王东.汽车零部件物流网络优化设计与实现[J].计算机工程,2011,37(12):258-261.
- Zhu Shuang, Wang Dong. Optimization design and implementation of automotive parts logistics network [J]. Computer Engineering, 2011, 37(12): 258-261.
- [17] 汪金莲.汽车制造厂零部件入厂物流循环取货运输路线规划和优化算法的研究[D].上海:上海交通大学机械与动力工程学院,2010.
- Wang Jin-lian. Research on the planning and optimization algorithm of logistics recycling and pickup transportation route for automotive manufacturing plant parts[D]. Shanghai: School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 2010.