

# 面向主机厂的汽车零部件供应库存-运输集成优化

唐丽敏, 邹奕奕, 孙 菊

(大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116000)

**摘要:** 在“多供应商、单配送中心、单主机厂”的汽车零部件供应网络中, 为解决由第三方物流(TPL)服务商在主机厂生产需求信息驱动下主导供应物流活动的库存-运输集成优化问题, 构建汽车零部件库存-运输集成优化模型, 确定集货运输阶段的取货频次、循环取货路径以及送货阶段的零部件分组方法与送货次数等策略, 分析验证了模型的可行性与有效性, 同时可减少二氧化碳排放。

**关键词:** 汽车零部件; 库存-运输集成问题; 多车型; 碳排放

**中图分类号:** F426

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1007-7375(2020)06-0068-07

## Auto Parts Supply Inventory for OEMs-transportation Integration Optimization

TANG Limin, ZOU Yiyi, SUN Ju

(School of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116000, China)

**Abstract:** In the "multi-supplier, single distribution center, single OEM" auto parts supply network, in order to solve the inventory-transportation integrated optimization problems of the third-party logistics (TPL) service provider, driven by the OEM's production demand information in leading the supply logistics activities, an auto parts inventory-transportation integrated optimization model is constructed, determining the frequency of pickup in the collection and transportation phase, the circular pickup route, and the component grouping method and delivery times of the delivery phase. The feasibility of the model has been verified in both performance and effectiveness, as well as in reducing carbon dioxide emissions.

**Key words:** automotive parts; inventory-transportation integration; multi-type vehicle; carbon emission

我国面向主机厂的汽车零部件供应物流目前存在资源利用效率较低而物流成本较高的现象<sup>[1]</sup>。因此, 相关企业一直在努力改进供应物流模式以降低成本。基于汽车零部件供应物流成本分析, 发现库存成本、运输成本所占比例较高, 且二者之间存在一定的效益悖反现象。在实现主机厂持续生产的前提下, 制定合理有效的库存与运输集成策略对减少零部件供应成本具有重要作用。此外, 在供应物流活动中降低碳排放也是实现低碳发展所需要的。

Shukla等<sup>[2]</sup>在“单供应商-单零售商”的供应物流网络中考虑客户随机需求, 并基于此构建了库存-运输联合规划模型。为有效利用运输资源Chuah等<sup>[3]</sup>在研究分析库存-运输联合问题时, 采取“循环取货”模式, 进而构建Milk-Run模式下整合规划模

型。Chen等<sup>[4]</sup>基于“多供应商-单制造商”供应物流网络, 构建循环取货优化模型, 并设计蚁群算法进行算例求解。徐友良等<sup>[5]</sup>以总成本最低为目标函数, 构建了“单供应商-多需求点”网络下的库存-运输集成优化模型, 并采用遗传算法求解。王旭等<sup>[6]</sup>考虑在集货运输阶段加入循环取货策略, 通过构建双层规划模型, 利用分层迭代算法进行求解, 对不同模式下的库存-运输成本进行对比。万嘉栋<sup>[7]</sup>通过构建“多供应商-单需求点”网络下的带有线边仓库最大存储限制的车辆路径优化模型并设计了求解算法。郑硕等<sup>[8]</sup>以总成本最低为目标, 构建“多供应商-多制造商”的产品入厂物流模型, 并通过模拟退火算法求解。郭荣<sup>[9]</sup>基于对供应过程中需求时间窗的考虑, 在库存成本函数中加入了惩罚变量, 从而构建

收稿日期: 2019-07-03

作者简介: 唐丽敏(1963-), 女, 辽宁省人, 教授, 博士, 主要研究方向为航运经济、物流系统规划。

以成本最低为目标函数的规划模型, 并利用遗传算法进行求解。汤中明<sup>[10]</sup>基于对集中控制VMI & TPL模式下原材料库存-运输联合优化问题的分析, 通过构建模型可实现为供应商及TPL制定补货策略与设计车辆路径方案。裴志超<sup>[11]</sup>基于对客户需求时间窗的考虑, 添加车辆容积等车载限制条件, 构建库存-运输联合规划模型, 并设计遗传算法进行求解。胡峥<sup>[12]</sup>将各种零部件进行相应分类, 并通过建立以库存-运输过程中总成本最低为目标的优化模型, 进而对比TPL模式与传统VMI & TPL模式下的成本。王宇翔<sup>[13]</sup>考虑到原材料供应过程中的应急响应速度、供应商准时交货期与准时交货率等因素的影响, 通过将这3类因素添加进CPFR供应链管理方式下的供应商评估系统, 建立库存-运输的双层规划模型。张富金等<sup>[14]</sup>考虑直接组合策略, 构建以供应物流成本最低为目标的短驳联合运输规划模型, 并设计遗传算法进行求解。李开成等<sup>[15]</sup>在短驳运输过程中利用间接组合方式, 通过设计启发式算法对所构建的运输规划模型进行求解。

综上, 围绕主机厂零部件供应物流优化问题, 学者们开展了大量研究。目前尚缺乏从供应商处集货、配送中心存储、面向主机厂送货等多阶段物流活动的整合优化。本文以第三方物流企业(third-party logistics, TPL)为研究视角, 面向供应链上游的零部件供应商和下游的主机厂, 在主机厂生产需求信息的驱动下, 通过构建模型优化设计汽车零部件供应库存-运输方案, 确定集货运输阶段多供应商至单配送中心之间的取货频次、循环取货路径, 以及面向主机厂的送货阶段(因配送中心距离主机厂很近, 这一阶段又称为短驳运输阶段)零部件的分组方法与短驳次数等策略, 同时考虑降低碳排放。

## 1 问题描述

在“多供应商、单配送中心、单主机厂”的供应物流网络下, 每间隔一定的补货周期, 主机厂需要汇总制造部门对零部件的生产需求, 并将补货的主机厂看板指令发送至配送中心, 而配送中心依据接收的看板指令, 拉动短驳运输。此外, 配送中心依据自身存储情况, 将补货的配送中心看板指令发送至对应供应商, 供应商依据接收到的看板指令进行供货准备, 实现集货运输。供应物流如图1所示。

短驳运输阶段, 由TPL依据接收到的主机厂关

于各种汽车零部件进行补货的看板指令, 将配送中心内的多种汽车零部件直接装车并运送到主机厂。此时, 完成一次主机厂的补货操作。

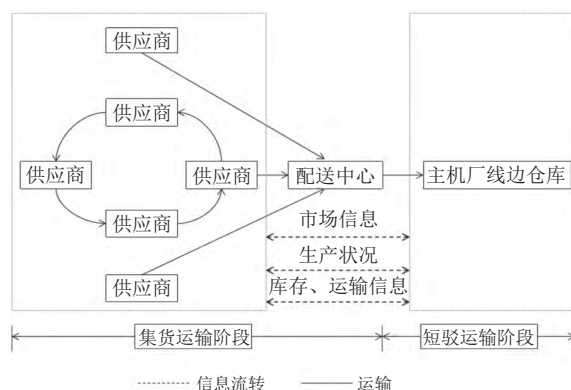


图1 供应物流示意图

Figure 1 Schematic diagram of supply logistics

集货运输阶段, 由TPL依据配送中心内汽车零部件的库存消耗情况以及所需各供应商的地理位置等相关信息, 优化循环取货线路, 同时需要派遣一定数量的车辆自配送中心起, 依次到达规划线路上的各供应商, 并将自不同供应商处补充得到的汽车零部件装载于取货车辆并运送到配送中心存储。此时, 完成一次配送中心取货操作。

本文建立以供应物流过程中总成本最低为目标函数的汽车零部件库存-运输集成优化模型, 并添加对多种车辆类型承载体积与重量、路径长度及消耗时间、整个计划期内零部件供应商有效作业时间、主机厂最大线边库存量等的限制, 通过求解得出成本最小的优化方案。其中, 在短驳运输阶段, 汽车进行零部件分组, 并根据分组状况明确组合内每种零部件的运输量以及每组运输所需车型; 在集货运输阶段得到优化后的循环取货线路、每一条线路上的取货频率以及所有供应商的取货批量。

模型建立基于以下假设。

- 1) 只考虑每一供应商提供一种汽车零部件的情况;
- 2) 只考虑零部件标准化包装处理后的整体质量和体积;
- 3) 各个供应商可以满足主机厂的生产需求, 不考虑缺货情况;
- 4) 在计划期内, 每一供应商的有效工作时间固定且一致;
- 5) TPL可以选择多种车型进行短驳运输服务;
- 6) 在运输过程中, 各个类型的车辆匀速行驶;

7) 在计划期内, 配送中心内出、入库操作成本只与零部件出、入库次数相关;

8) 供应物流网络内主机厂与供应商处的平均库存等于看板指令下补货数量的1/2与其自身安全库存量之和。

## 2 模型建立

### 2.1 符号说明

模型所需参数主要包括已知参数与决策变量。其中, 短驳运输阶段, 汽车零部件分组集合设为 $J$ ,  $J$ 代表汽车零部件最大可分组数; 零部件供应商集合为 $I$ ,  $I$ 集合涵盖 $J$ 集合;  $j$ 代表单个分组号,  $j=(1, 2, \dots, J)$ ; TPL所拥有车辆类型的集合为 $K$ ,  $k=(1, 2, \dots, K)$ 。集货运输阶段, 汽车零部件供应商集合为 $I$ ; 路径集合为 $R$ ;  $S_i$ 代表汽车零部件供应商,  $i=(1, 2, \dots, I)$ ; 将 $I$ 个供应商规划至 $R$ 条路径上,  $I$ 集合涵盖 $R$ 集合;  $r$ 代表一条路径,  $r=(1, 2, \dots, R)$ 。  $T$ 代表整个计划期, 可设置为主机厂的一个生产周期。其他参数设置如下。

1) 已知参数。

①集货运输阶段。

$V_{\max}$ 为运输车辆最大可装载体积( $\text{m}^3$ );

$W_{\max}$ 为运输车辆最大可装载质量( $\text{t}$ );

$L_i$ 为运输车辆的综合耗油率( $\text{L/km}$ );

$t^{ii'}$ 为车辆在供应商( $i, i'$ )之间的运输时间( $\text{h}$ );

$t^0$ 为车辆在供应商 $i$ 与配送中心之间的运输时间( $\text{h}$ );

$t^0$ 为运输车辆在每一供应商与配送中心处的消耗时间( $\text{h}$ );

$T^v$ 为每条线路上最长可消耗时间( $\text{h}$ );

$TA$ 为计划期 $T$ 内, 每一供应商的有效工作时间( $\text{h}$ );

$d^{ii'}$ 为供应商 $i$ 至供应商 $i'$ 的运输距离( $\text{km}$ );

$d^0$ 为供应商 $i$ 至配送中心的运输距离( $\text{km}$ );

$d^v$ 为每条线路上最长可行驶距离( $\text{km}$ );

$C_{r_i}$ 为线路 $r$ 上运输车辆的固定发车成本(元);

$C_{r_u}$ 为线路 $r$ 上车辆单位运输成本(元);

$C_{\text{fw}}^0$ 为配送中心的入库操作成本(元);

$SI_s^i$ 为每一供应商处零部件 $i$ 的安全库存量(托);

$SI_w^i$ 为单配送中心处零部件 $i$ 的安全库存量(托);

$SI_m^i$ 为主机厂处零部件 $i$ 的安全库存量(托);

$C_s^i$ 为在供应商 $S$ 处储存零部件 $i$ 的单位持有成

本(元);

$C_w^i$ 为在配送中心处储存零部件 $i$ 的单位持有成本(元);

$C_m^i$ 为在主机厂处储存零部件 $i$ 的单位持有成本(元)。

②短驳运输阶段。

$V_k$ 为第 $k$ 种类型运输车辆最大可承载体积( $\text{m}^3$ );

$W_k$ 为第 $k$ 种类型运输车辆最大可装载质量( $\text{t}$ );

$L_k$ 为第 $k$ 种类型运输车辆的综合耗油率( $\text{L/km}$ );

$C_{\text{fw}}^i$ 为配送中心的出、入库操作成本(元);

$C_k$ 为第 $k$ 种类型运输车辆的固定发车成本(元);

$d_{\text{wm}}$ 为配送中心到主机厂的运输距离( $\text{km}$ );

$G_{\max}$ 为在计划期内短驳运输过程允许的最大短驳次数;

$QI_m^i$ 为主机厂线边仓库允许零部件 $i$ 的最大存储量(托)。

③集货、短驳运输阶段共用的参数。

$D^i$ 为计划期内, 主机厂对零部件 $i$ 的需求量(托);

$v$ 为车辆匀速行驶时的速度( $\text{km/h}$ );

$V^i$ 为零部件 $i$ 的单托体积( $\text{m}^3$ );

$W^i$ 为零部件 $i$ 的单托质量( $\text{t}$ );

$E$ 为燃油转化为 $\text{CO}_2$ 的因数( $\text{kg/L}$ );

$A$ 为定额的碳税税率(元/ $\text{kg}$ )。

2) 决策变量。

①集货运输阶段。

$y_{ir}$ 为0-1变量, 若在线路 $r$ 上访问供应商 $i$ 则为1, 否则为0;

$z_{ikr}$ 为0-1变量, 若在线路 $r$ 上可实现供应商( $i, k$ )之间的运输则为1, 否则为0;

$q_i^i$ 为计划期内配送中心至供应商 $S_i$ 处的补货批量;

$f_r$ 为计划期内, 路径 $r$ 上的循环次数;

$t_r$ 为路径 $r$ 上耗费的时间;

$d_r$ 为路径 $r$ 上的行驶里程。

②短驳运输阶段。

$x_{ij}$ 为0-1变量, 若零部件 $i$ 被分配在 $j$ 组中则为1, 否则为0;

$y_{jk}$ 为0-1变量, 若通过第 $k$ 种类型的运输车辆运输零部件分组 $j$ 则为1, 否则为0;

$q_i^i$ 为计划期内主机厂对零部件 $i$ 的补货数量;

$g_j$ 为计划期内零部件分组 $j$ 的短驳次数。

### 2.2 模型构建

综上所述, 构建汽车零部件库存-运输集成优

化模型如下。

$$Z = \min TC = \min (TIC + TTC + TOC + TCC) =$$

$$\min \left[ \sum_i \left\{ C_s^i \left( SI_s^i + \frac{q_w^i}{2} \right) + C_m^i \left( SI_m^i + \frac{q_m^i}{2} \right) + C_w^i \left( SI_w^i + \frac{q_w^i - q_m^i}{2} \right) \right\} + \right.$$

$$\sum_r f_r (C_{rt} + C_{ru} d_r) + \sum_k \sum_j C_k g_j y_{jk} + \sum_r f_r C_{rw}^0 + \sum_j g_j C_{fw}^1 +$$

$$\left. \left( \sum_r f_r d_r L_1 + \sum_k \sum_j 2 g_j y_{jk} L_k d_{wm} \right) AE \right]. \quad (1)$$

约束条件

$$q_w^i = \frac{D^i}{\sum_r y_{ir} f_r}, \forall i \in [1, I]; \quad (2)$$

$$f_r \leq TA/t_r, \forall r \in [1, R]; \quad (3)$$

$$\sum_i y_{ir} q_w^i V^i \leq V_{\max}; \quad (4)$$

$$\sum_i y_{ir} q_w^i W^i \leq W_{\max}; \quad (5)$$

$$t_r = \sum_{i=0}^I \sum_{k=0}^I z_{ikr} t^{ii'} + t^0 \leq T^v, \forall r \in [1, R]; \quad (6)$$

$$d_r = \sum_{i=0}^I \sum_{k=0}^I z_{ikr} d^{ik} \leq d^v, \forall r \in [1, R]; \quad (7)$$

$$\sum_r y_{ir} = 1, \forall i \in [1, I]; \quad (8)$$

$$y_{ir} = \sum_{k=0}^I z_{ikr}, \forall r \in [1, R], \forall i \in [1, I]; \quad (9)$$

$$y_{kr} = \sum_{i=0}^I z_{ikr}, \forall r \in [1, R], \forall k \in [1, I]; \quad (10)$$

$$\sum_{r=1}^R z_{iir} = 0, \forall i \in [0, I]; \quad (11)$$

$$\sum_{r=1}^R \sum_{i=0}^I z_{ikr} = 1, \forall k \in [1, I]; \quad (12)$$

$$\sum_{r=1}^R \sum_{k=0}^I z_{ikr} = 1, \forall i \in [1, I]; \quad (13)$$

$$\sum_{r=1}^R \sum_{k=1}^I z_{0kr} = \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^I z_{i0r}; \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^I z_{i0r} = \sum_{k=1}^I z_{0kr} = 1, \forall r \in [1, R]; \quad (15)$$

$$z_{ikr} + z_{kir} \leq 1, \forall r \in [1, R], \forall i, k \in [1, I]; \quad (16)$$

$$q_m^i = \frac{D^i}{\sum_j x_{ij} g_j}, \forall i \in [1, I]; \quad (17)$$

$$\sum_j x_{ij} = 1, \forall i \in [1, I]; \quad (18)$$

$$\sum_i x_{ij} q_m^i V^i + M(y_{jk} - 1) \leq V_k, \forall j \in [1, J], \forall k \in [1, K]; \quad (19)$$

$$\sum_i x_{ij} q_m^i W^i + M(y_{jk} - 1) \leq W_k, \forall j \in [1, J], \forall k \in [1, K]; \quad (20)$$

$$\sum_k y_{jk} = 1, \forall j \in [1, J]; \quad (21)$$

$$SI_m^i + \frac{q_m^i}{2} \leq QI_m^i, \forall i \in [1, I]; \quad (22)$$

$$g_j \leq G_{\max}; \quad (23)$$

$$x_{ij}, y_{ir}, y_{jk}, z_{ikr} \in \{0, 1\}; \quad (24)$$

$$f_r, g_j \in N^+. \quad (25)$$

其中, 式(1)为所建目标函数, 即求解最小供应物流成本, 包括库存成本、运输成本、配送中心操作成本与碳排放成本4项; 式(2)表示集货运输阶段, 任意取货线路上取货周期固定, 且要求同一条线路上的配送中心取货频率一致; 式(3)要求整个计划期内多个汽车零部件供应商的有效工作时间有限且一致, 进而对任意线路上车辆消耗时间以及循环次数进行限制; 式(4)、式(5)表示在集货运输阶段对所供车辆的最大装载体积与质量进行约束; 式(6)、式(7)表示在循环取货阶段对线路消耗时间与运输长度进行约束; 式(8)表示计划期内一个汽车零部件供应商在集货运输过程中只可选择一条线路进行供货作业; 式(9)、式(10)表示2个0-1变量之间的关系; 式(11)表示计划期内, 任一线路上的汽车零部件供应商与配送中心在集货运输阶段皆不可进行自我访问; 式(12)、式(13)表示在集货运输阶段, 只有一个供应商或是配送中心被访问后才可以访问线路上的其他供应商, 且被访问的只可以是另一个供应商或

回到配送中心；式(14)表示计划期内配送中心在集货运输过程中汽车零部件出、入库流量均衡；式(15)表示计划期内，任意线路在集货运输过程中只可安排一辆车到达各供应商处进行取货作业；式(16)表示货运输阶段的任意线路上，运输车辆在供应商之间只可以单向行驶；式(17)表示一个汽车零部件分组中的补货频率应当一致；式(18)表示一种汽车零部件仅可以被安排在一个分组中；式(19)、式(20)表示短驳运输过程所提供的多种类型车辆允许的最大承载体积与质量进行相应的约束，式中 $M$ 表示一个极值；式(21)表示每一组合仅可通过一种车型进行运输；式(22)表示对主机厂线边仓库允许的最高存储量进行约束；式(23)表示在短驳运输阶段，任意汽车零部件分组的短驳次数不可大于一辆车在整个规划周期内最高可实现的运输次数；式(24)为0-1变量约束；式(25)为正整数约束。

### 3 算例分析

#### 3.1 数据代表

##### 1) 生产企业相关数据。

本文以1个月为算例分析的规划期，根据所搜集到的2019年1月DZ汽车变速器制造公司(以下简称DZ厂)有关生产数据资料进行分析并设计方案。DZ厂按3班工作制度运作，1月份有效工作时间为600 h，生产数量可达201 025托。DZ厂内设置2 h的安全库存量，但因受线边仓库容量限制，最高可存放6 h的储存量。

##### 2) 供应商及零部件相关数据。

目前规划区域内共有10家供应商可实现自营送货至配送中心，对43种汽车零部件进行补货，本文设定任意供应商只供应一种汽车零部件。相关供应商与零部件信息见表1。供应物流网络中的各供应商及配送中心的地理位置以平面坐标代表，其中，配送中心设置为(60,60)。供应物流网络中单位直线距离为3 km，节点之间的运输距离依据搜集的供应商平面坐标计算得出。本文假定车辆在集货运输过程中以60 km/h沿优化线路匀速行驶，根据地理位置可求得各个节点之间的运输时间(见表2)。

##### 3) TPL相关数据。

在集货运输阶段，考虑各个汽车零部件供应商货物打包、装卸条件以及道路状况等多种因素的影响，本文利用12.5 m的厢式货车在设计线路上进行

取货操作，标注最高可承载量为30 t，最高可承载体积为40 m<sup>3</sup>，综合耗油率为0.233 L/km；设置车辆的固定发车成本以及单位运输距离的可变成本分别为250元/车、5元/(车·km)。在短驳运输阶段，由于配送中心和DZ厂之间运输路径较短，通常采用包车的形式运输，本文选取4种类型厢式货车(12.5 m、9.6 m、7.2 m、5.8 m)进行补货。相关车辆数据如表3所示。

表1 供应商及零部件信息

Table 1 Supplier and parts information

供应商编号	地理位置坐标/km	单托体积/m <sup>3</sup>	单托重量/t	周期内的需求/托
1	(35,38)	0.262	0.426	1 795
2	(63,89)	1.059	0.316	1 047
3	(38,41)	0.818	0.295	1 197
4	(58,33)	0.176	0.310	2 871
5	(66,84)	0.479	0.716	1 675
6	(58,87)	0.441	0.525	1 571
7	(60,90)	0.334	0.414	914
8	(61,31)	0.446	0.141	2 932
9	(82,62)	0.434	0.323	8 950
10	(65,36)	0.195	0.333	2 792

表2 各节点之间的运输时间表

Table 2 Transportation schedule between nodes

节点	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$	$S_{10}$
$S_0$	0	1.7	1.5	1.5	1.4	1.2	1.4	1.5	1.5	1.1	1.2
$S_1$	1.7	0.0	2.9	0.2	1.2	2.8	2.7	2.9	1.3	2.6	1.5
$S_2$	1.5	2.9	0.0	2.7	2.8	0.3	0.3	0.2	2.9	1.7	2.7
$S_3$	1.5	0.2	2.7	0.0	1.1	2.6	2.5	2.7	1.3	2.4	1.4
$S_4$	1.4	1.2	2.8	1.1	0.0	2.6	2.7	2.9	0.2	1.9	0.4
$S_5$	1.2	2.8	0.3	2.6	2.6	0.0	0.4	0.4	2.7	1.4	2.4
$S_6$	1.4	2.7	0.3	2.5	2.7	0.4	0.0	0.2	2.8	1.7	2.6
$S_7$	1.5	2.9	0.2	2.7	2.9	0.4	0.2	0.0	3.0	1.8	2.7
$S_8$	1.5	1.3	2.9	1.3	0.2	2.7	2.8	3.0	0.0	1.9	0.3
$S_9$	1.1	2.6	1.7	2.4	1.9	1.4	1.7	1.8	1.9	0.0	1.6
$S_{10}$	1.2	1.5	2.7	1.4	0.4	2.4	2.6	2.7	0.3	1.6	0.0

表3 车辆信息表

Table 3 Vehicle information

车型/m	载重量/t	载容量/m <sup>3</sup>	油耗率/(L·km <sup>-1</sup> )	包车价格/(元·次 <sup>-1</sup> )
12.5	30	40	0.233	250
9.6	20	30	0.211	200
7.2	15	25	0.196	180
5.8	10	20	0.169	160

本文假设配送中心内出、入库操作成本仅由汽车零部件出、入库次数决定, 这一成本设置为50元/次。在配送中心具备16 h安全存储量的基础上, 假定各个汽车零部件供应商在整个计划期内可实现DZ厂柔性生产的要求, 可不设置安全存储量。在周期 $T$ 内, DZ厂、供应商以及配送中心各自对于汽车零部件的单位存储成本的比例设定为10:2:5。相关碳排放成本化处理参数包括运输过程中车辆燃油消耗转化为 $\text{CO}_2$ 的因数 $E$ 和碳税税率 $A$ 。 $E$ 和 $A$ 分别按照2.91 kg/L、134元/kg进行计算。

利用LINGO 11.0软件对模型进行求解。

### 3.2 结果分析

目前, DZ厂采用“VMI & TPL”供应物流模式。在这一模式下, 汽车零部件供应商为主导者, TPL为运输作业者, 两者分别负责对供应过程中的库存与运输进行管理优化, 其中TPL在集货阶段不进行零部件集并运输。

而用本文提出的“TPL供应物流模式”优化后, 得到最优解下的循环取货路径以及短驳分组方案, 如表4~5所示。表中编号1~10为供应商, 编号11为配送中心。集货运输阶段以及短驳运输阶段的成本之和(即供应物流成本)最低为412 892元; 同时, 碳排放也得到降低, 成本降低情况和减排效果如图2~3所示。

表4 循环取货路径

Table 4 Cycle pickup path

路径	方案	循环次数	最优解/元
1	11—3—1—11	38	358 052
2	11—4—8—10—11	75	
3	11—9—11	98	
4	11—6—7—2—5—11	92	

表5 零部件分组以及每组选用车型情况

Table 5 Grouping of parts and models of each group selected

组号	方案	短驳次数	选用车型/m	最优解/元
3	1, 6, 9	66	12.5	54 840
10	2, 3, 4, 5, 7, 8, 10	150	9.6	

由此可见, 在主机厂生产需求信息驱动下, 由TPL主导供应物流活动, 采取循环取货方式, 可以更好地利用运输资源, 优化运输方案, 实现进一步降低供应物流成本和减少碳排放的目标。

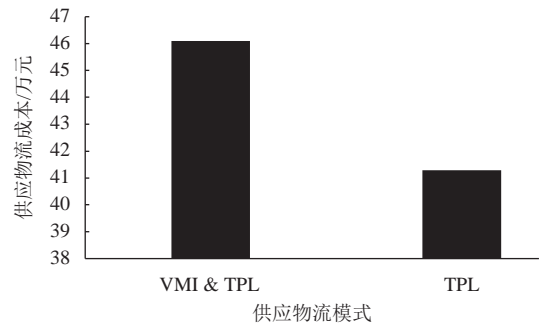


图2 2种模式下供应物流成本对比

Figure 2 Logistics cost comparison of the two schemes

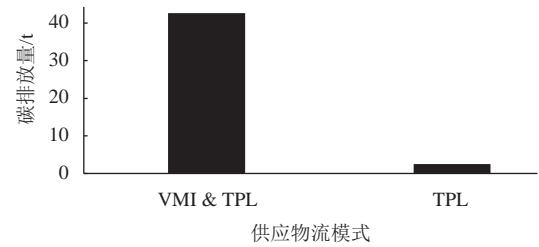


图3 2种模式下碳排放量对比

Figure 3 The carbon emissions of the two schemes in comparison

### 3.3 单车型与多车型对比分析

比较不同单车型与多种车型在短驳运输阶段的运输成本, 进而得到多车型的影响效果, 如图4所示。

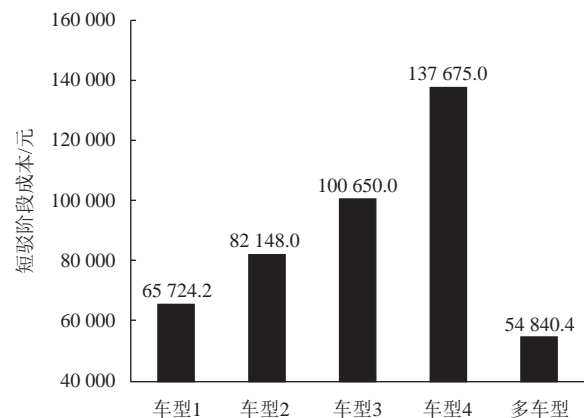


图4 单车型与多车型对比图

Figure 4 Comparison of single and multiple models

与选择单车型相比, 在短驳运输阶段利用多车型进行补货作业可分别降低16.5%、33.2%、45.5%、60.2%的成本。因此, 在短驳运输阶段采用多种类型车辆能够实现供应物流成本的进一步降低。

## 4 结论

相比于既有的库存-运输集成优化模型, 本文在建模时添加了供应商有效工作时间以及主机厂内线边库存量等多种约束, 并利用碳税将碳排放进行成本化处理后纳入到目标成本中, 经过比较分析, 选择在短驳运输过程中选用多车型为主机厂补货。主要结论如下。

1) 在“供应商-配送中心-主机厂”这一供应物流网络中通过对库存与运输的集成优化, 可以实现资源的有效配置, 减少供应物流成本, 同时降低碳排放。

2) 供应链管理强调多方协作, 本文以TPL作为资源整合者, 同时兼顾供应商的有效工作时间和主机厂内线边仓库最大库存量限制, 因此, 构建的模型和求得的循环取货次数和短驳运输策略更具实用意义; 同时在短驳运输阶段选取多车型进行补货作业能够实现供应物流成本的进一步降低。

### 参考文献:

- [1] 何金梅, 封智勇, 叶志敏. 浅析我国汽车零部件供应物流模式[J]. 物流工程与管理, 2010, 32(7): 62-63.  
HE Jinmei, FENG Zhiyong, YE Zhimin. Analysis on the supply logistics model of automobile part[J]. Logistics Engineering and Management, 2010, 32(7): 62-63.
- [2] SHUKLA N, TIWARI M K, CEGLAREK D. Genetic-algorithms-based algorithm portfolio for inventory routing problem with stochastic demand[J]. International Journal of Production Research, 2013, 51(1): 118-137.
- [3] CHUAH K H, YINGLING J C. Analyzing inventory/transportation cost tradeoffs for milkrun parts delivery systems to large JIT assembly plants[C/OL]. (2001-01-26). <https://doi.org/10.4271/2001-01-2600>.
- [4] CHEN Z, SARKER B R. An integrated optimal inventory lot-sizing and vehicle-routing model for a multisupplier single-assembler system with JIT delivery[J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(17): 5086-5114.
- [5] 徐友良, 周阳. VMI模式下库存与运输集成优化研究[J]. 铁道运输与经济, 2017, 39(3): 26-31.  
XU Youliang, ZHOU Yang. Study on integrated optimization of inventory and transportation under VMI mode[J]. Railway Transport and Economy, 2017, 39(3): 26-31.
- [6] 王旭, 施朝春, 葛显龙. 基于Milk Run模式的库存运输整合优化[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(4): 852-857.  
WANG Xu, SHI Chaochun, GE Xianlong. Inventory-transportation integrated optimization based on Milk Run mode[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(4): 852-857.
- [7] 万嘉栋. 基于循环配送的入厂物流成本控制研究——以H企业为例[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.  
WAN Jiadong. Research on the cost control of automobile parts supply logistics based on milkrun system—a case of H company[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
- [8] 郑硕, 蔺宇. 基于模拟退火的n-n入厂物流运输方案规划[J]. 工业工程, 2017, 20(2): 86-90.  
ZHENG Shuo, LIN Yu. N-n inbound logistic transportation planning based on improved simulated annealing algorithm[J]. Industrial Engineering Journal, 2017, 20(2): 86-90.
- [9] 郭荣. Milk Run模式下汽车零部件配送的多周期ITIO问题研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.  
GUO Rong. Research on multi-period ITIO problem in automotive parts delivery based on milk-run[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
- [10] 汤中明. 集中控制VMI & TPL模式下的库存运输集成问题[J]. 工业工程, 2013, 16(2): 19-25.  
TANG Zhongming. Inventory routing problem in VMI & TPL supply chain under centralized control[J]. Industrial Engineering Journal, 2013, 16(2): 19-25.
- [11] 裴志超. 带时间窗和库存约束的汽车零部件循环取货路径优化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.  
PEI Zhichao. Study on vehicle routing problem of automobile parts milk-run with time windows and inventory constrained[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [12] 胡峥. TPL主导的供应模式下库存运输集成优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.  
HU Zheng. Integrated optimization of inventory and transportation in the TPL led supply mode[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [13] 王宇翔. 基于运输—库存因素的汽车零部件供应物流综合优化研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2016.  
WANG Yuxiang. Research on comprehensive optimization of automotive parts inbound logistics based on transportation and stock factors[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2016.
- [14] 张富金, 张珂, 孙慧, 等. JIT供应物流的短驳合并运输集成优化研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2014, 29(1): 83-88.  
ZHANG Fujin, ZHANG Ke, SUN Hui, et al. Optimization of short split merged transportation problems about inbound logistics[J]. Journal of Qingdao University (Engineering & Technology Edition), 2014, 29(1): 83-88.
- [15] 李开成, 张纪会, 郑伟博. 制造业入厂物流短驳合并运输问题的优化研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2015, 30(4): 105-109.  
LI Kaicheng, ZHANG Jihui, ZHENG Weibo. Optimization of short split merged transportation problems about inbound logistics of manufacturing industry[J]. Journal of Qingdao University (Engineering & Technology Edition), 2015, 30(4): 105-109.

(责任编辑: 刘敏仪)