

基于三层双向闭环作业网络的重空车流组织优化策略

李冰[†], 胡松林, 轩华, 徐春秋, 王薛苑

(郑州大学 管理工程学院, 郑州 450001)

摘要: 剖析三层双向闭环作业网络的作业机理,在此基础上建立以成本最小化为目标函数的数学规划模型. 该问题属于NP问题,利用求解混合整数规划的传统割平面法(MIP-CPM法)求解效率不高. 对此,设计基于三区段分步编码的改进遗传(简称IGA-3SC法)求解策略:给出解的三区段分步编码方案,构建基于三区段基因位取值的初始解生成机制,确定基于遗传操作的解更新过程,最终形成IGA-3SC求解策略. 设计不同规模的仿真实验,对两种方法进行数值研究. 数值仿真分析表明,IGA-3SC求解策略总体性能优于传统MIP-CPM方法,可以得到比MIP-CPM求解方法更高质量的解,在计算速度上也有较好表现.

关键词: 闭环作业网络; 车流组织; 数学规划; 割平面法; 遗传算法

中图分类号: N945; TP11

文献标志码: A

Optimization strategy of heavy and empty wagon flow organization based on three level bidirectional closed loop operation network

LI Bing[†], HU Song-lin, XUAN Hua, XU Chun-qiu, WANG Xue-yuan

(School of Management Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The operation mechanism of the three level bidirectional closed loop operation network is analyzed. Then, the problem is formulated as a mathematical programming model with the objective function of minimizing cost. Because of the problem belonging to the NP problem, the traditional cutting plane method(MIP-CPM) for solving the mix integer programming model is not efficient to be used. Therefore, the improved genetic algorithm with three segment coding(IGA-3SC) strategy is presented. The three segment coding strategy is provided. The initial solution generation mechanism with the value of the three segment gene site is given. The update process based on genetic operations is explored, and the IGA-3SC solution strategy is finally obtained. The simulation experiments on different scales are used to study the two methods. The numerical simulation results show that the overall performance of the IGA-3SC strategy is better than the traditional MIP-CPM method. The IGA-3SC solution method can get higher quality solution than the MIP-CPM solution method. The computing speed of the IGA-3SC solution strategy is also better performance than that of the MIP-CPM method.

Keywords: closed loop operation network; wagon flow organization; mathematical programming; cutting plane method; genetic algorithm

0 引言

货物运输生产是社会经济系统中一个不可或缺的重要环节. 近年来,物流运输业的迅速发展和应用需求增加了货物运输组织优化调度研究工作的迫切性. 货物运输组织优化调度是一项融合技术与管理的复杂系统工程,相关研究主要集中在独立运输车队资源调度、独立运输生产作业协调、运输生产网络问

题等方面.

近年来,关于独立运输车队资源调度方面的研究开展较多,主要集中在以下3个方面.

1) 车辆调配研究:侯玉梅等^[1]研究了带软时间窗约束的整车物流配送车辆调配问题;杨珍花等^[2]研究了不同车型组合下冷藏车多车型混合车队调配问题;Battarra等^[3]研究了基于集群客户服务的车辆

收稿日期: 2017-02-10; 修回日期: 2017-07-02.

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1604150); 教育部人文社会科学研究基金项目(15YJC630148); 郑州大学优秀青年教师发展基金项目(1421326092).

责任编委: 刘士新.

作者简介: 李冰(1976—)男,教授,博士,从事物流优化与控制等研究; 胡松林(1991—),男,硕士生,从事物流优化与控制的研究.

[†]通讯作者. E-mail: lbing@zzu.edu.cn

分配及路线问题;Zhang等^[4]研究内陆空箱堆场-港口-港口、内陆空箱堆场-港口-客户、内陆空箱堆场-客户-客户之间的拖车运输问题,构建了基于DAOV图的混合整数非线性规划模型,并给出了WPB求解策略;张瑞友等^[5]进一步研究以低碳为目标的集装箱拖车运输问题,建立了具有双时间窗约束的混合整数非线性规划模型,并设计了基于时间窗离散化的求解算法。

2)最佳规模配置研究: Xia等^[6]将燃料消耗量最省作为目标,研究了班轮运输中船队规模、速度配置和货运量分配的集成处理问题;Koc等^[7]研究了一类带时间要求的多车型车队最佳规模配置与路线安排问题,其目标是车队购置费用和使用费用最小化;Park等^[8]研究了一类集装箱船队最佳规模配置问题。

3)车队综合管理研究:李坤等^[9]研究集装箱堆放位置空间分配及车辆安排问题,给出了两阶段禁忌搜索处理方法;Tierney等^[10]研究班轮运输中的船队管理问题,提出了模拟退火解决方法;李冰等^[11-12]研究变周期动态车队调度问题,设计了参数诱导算法求解动态车队调度问题。

运输生产作业过程协调问题,主要集中在以下两个方面。

1)装卸作业研究:陶莎等^[13]以批量作业完成时间为目标,研究单元化三级作业链的集成作业问题,并在此基础上提出了三层嵌套解决策略;张睿等^[14]研究了集装箱码头同贝同步装卸作业组织模式,通过优化堆场的集装箱装船顺序,降低堆场场桥的翻箱时间进而减少船舶在港时间;Benavent等^[15]研究了一类先进先出规则的装卸货作业问题。

2)作业综合调配研究:邵乾虔等^[16]研究了以最小化翻箱数量和场桥堆存作业移动距离为目标的场桥作业调配问题;Meng等^[17]研究了运筹学和计算机模拟方法在集装箱货运船舶作业调配方面的应用;Meisel等^[18]研究了海港集装箱码头的泊位和起重机分配问题;李冰等^[19]研究了站内作业协调与站间车队调度的协同问题。

关于运输生产网络问题,潘国强等^[20]将综合运输网转化为层次型网络,高层次网络用于长途运输、低层次网络用于短途运输,并选取某省城际综合运输网作为研究对象,构建了城际综合运输网三阶段路径结构模型;Zhu等^[21]研究铁路货物运输网络问题,构造了循环三层时空运输网络,并给出了一整套处理方案;黄英艺等^[22]研究结合路段(边)重要度及运输

有向性特征的级联失效问题,探讨了货物运输网络上由于边的失效所引发的级联失效影响;李冰等^[23]构建了决策时隙区间内最优分配网络,给出了基于时隙区间滑动的全过程时间限制车流组织协调优化方法。

综上所述,目前所开展的相关研究多聚焦于独立运输车队资源、独立运输生产作业及独立运输生产网络的优化问题,而忽略了三者的协调联动、协同融合。基于上述考虑,本文从站内作业协调与站间车队调度协同优化的角度出发,研究一类基于三层闭环作业网络的重空车流双向组织优化问题,构建问题模型,设计基于遗传机制的IGA-3SC求解策略,并与传统数学规划求解方法进行比对,从而验证文中所提出方法的可行性和有效性。本文将从理论上拓展并丰富物流运输生产调度研究范畴,进一步深化物流运输生产调度理论的研究领域。

1 作业机理解析

1.1 货物作业车组成

路网中的货物作业车包括重车和空车,重车即载货车辆,空车即排空车辆。车流调整是货物运输调度工作的重要内容,包括重车调整(组织重车)和空车调整。

重车调整是车流调整工作的重点,因为在货物运用车中,重车占有很大比重。重车的流向和数量,即重车流结构,决定着各区段的行车量、空车流的结构以及车站的卸车任务。重车调整是整个车流调整工作的基础。

空车调整是为了合理分布运用车辆和保证装车需要而进行的车流调整。空车调整往往是为了其他货运站装车的需要而进行的,对路网车辆分布有着重大影响,因此必须从整体利益出发。卸空车数指标既是反映货车运用的数量指标,又是反映卸车任务多少的运输工作数量指标。确定卸空车计划是十分重要的,保证卸车任务的完成不仅可以加速货物送达,而且还能避免重车挤压,加速货车周转。重车卸后才可产生空车,因而卸车任务的完成又是完成排空任务和装车任务的重要条件。

1.2 三级双向闭环作业网络组建

三级双向闭环物流作业网络由装车站、技术站和卸车站共同组成。货物在装车站完成装车作业后,进入技术站进行货运检查、货票填制、票据交接、核对现车、上燃料、上水、车辆检查、车辆整备等各项技术作业,然后发往卸车站。到达卸车站并完成卸车任务后,根据排空车作业计划,将排空车由卸车站送往技术站,并进行集结、清扫、洗刷、检查、整备等各项

技术作业,然后发往装车站.

1.3 技术站作业机理解析

技术站在三级双向作业网络中承担较多的作业任务,通常配置有三类作业系统:重车作业系统、空车作业系统和双重作业系统.重车作业系统主要进行重车的货运检查及整备,车辆技术检修,核对现车,办理票据交接,办理货物的承运、保管和交付,计算和核收运输费用等作业.空车作业系统主要进行排空车的技术检查、车底外部清除泥垢、车辆内部清扫洗刷、车辆上燃料、车辆上水等作业.双重作业系统主要进行上述两项技术作业.

使用技术站作业系统会产生如下作业成本:

1) 正常作业成本:重车或排空车到达技术站时,作业系统正处于正常工作状态,此时所产生的作业成本.

2) 休假作业成本:重车或排空车到达技术站时,作业系统处于休假状态,即作业人员正在放假,作业设备已经停机,此时启动作业系统需要花费一定的时间和费用,从而会产生额外的作业成本.

3) 整备作业成本:重车或排空车到达技术站时,作业系统处于例行停机整备状态,即作业设备正在进行例行检查维护,此时启动作业系统需要花费较长的时间,待所有作业设备完成全部例行检查维护工作后方能投入使用,此时会产生较大的作业成本.

2 模型构建

2.1 问题约定

模型的假设条件如下:

- 1) 各装车站、技术站、卸车站间距离已知;
- 2) 各卸车站每周期重车卸车量和排空车数满足随机分布;
- 3) 正向满载重车发送和逆向排空车发送必须在当期完成;
- 4) 技术站作业设施的处理能力有最大限制,装车站发送能力没有限制;
- 5) 装车站、技术站、卸车站间的单位运费已知,且与运量、运距成线性关系;
- 6) 重车技术作业利用技术站内重车作业系统和双重作业系统完成;排空车技术作业利用技术站内排空车作业系统和双重作业系统完成.

2.2 参数与变量

1) 三级双向物流网络.

\bar{A} 为装车站集合,记为 $\bar{A} = \{1, 2, \dots, A\}$,装车站总规模为 A ;

\bar{B} 为技术站集合,记为 $\bar{B} = \{1, 2, \dots, B\}$,技术

站总规模为 B ;

\bar{C} 为卸车站集合,记为 $\bar{C} = \{1, 2, \dots, C\}$,卸车站总规模为 C ;

\bar{H} 为调度周期集合,记为 $\bar{H} = \{1, 2, \dots, H\}$,调度周期内共有 H 个调度时段.

2) 参数.

p_{ch} 为调度时段 h 卸车站 c 需要完成的卸车任务量, $c \in \bar{C}, h \in \bar{H}$;

q_{ch} 为调度时段 h 卸车站 c 需要移交的排空车任务量, $c \in \bar{C}, h \in \bar{H}$;

$\alpha_{bh}^{\text{forward}}$ 为调度时段 h 技术站 b 内重车作业系统的作业能力, $b \in \bar{B}, h \in \bar{H}$;

$\beta_{bh}^{\text{reverse}}$ 为调度时段 h 技术站 b 内空车作业系统的作业能力, $b \in \bar{B}, h \in \bar{H}$;

$\gamma_{bh}^{\text{forward}}$ 为调度时段 h 技术站 b 内双重作业系统的重车处理能力, $b \in \bar{B}, h \in \bar{H}$;

$\gamma_{bh}^{\text{reverse}}$ 为调度时段 h 技术站 b 内双重作业系统的排空车处理能力, $b \in \bar{B}, h \in \bar{H}$;

w_{abch} 为调度时段 h 重车由装车站 a 经技术站 b 到达卸车站 c 的单位车辆运输成本, $a \in \bar{A}, b \in \bar{B}, c \in \bar{C}, h \in \bar{H}$;

π_{cbah} 为调度时段 h 排空车由卸车站 c 经技术站 b 到达装车站 a 的单位车辆运输成本, $a \in \bar{A}, b \in \bar{B}, c \in \bar{C}, h \in \bar{H}$;

α_{bh} 为调度时段 h 技术站 b 重车作业系统的正常作业成本, $b \in \bar{B}, h \in \bar{H}$;

$\alpha_{bh}^{\text{open}}$ 为调度时段 h 技术站 b 重车作业系统的休假作业成本, $b \in \bar{B}, h \in \bar{H}$;

$\alpha_{bh}^{\text{close}}$ 为调度时段 h 技术站 b 重车作业系统的整备作业成本, $b \in \bar{B}, h \in \bar{H}$;

β_{bh} 为调度时段 h 技术站 b 空车作业系统的正常作业成本, $b \in \bar{B}, h \in \bar{H}$;

β_{bh}^{open} 为调度时段 h 技术站 b 空车作业系统的休假作业成本, $b \in \bar{B}, h \in \bar{H}$;

$\beta_{bh}^{\text{close}}$ 为调度时段 h 技术站 b 空车作业系统的整备作业成本, $b \in \bar{B}, h \in \bar{H}$;

γ_{bh} 为调度时段 h 技术站 b 双重作业系统的正常作业成本, $b \in \bar{B}, h \in \bar{H}$;

$\gamma_{bh}^{\text{open}}$ 为调度时段 h 技术站 b 双重作业系统的休假作业成本, $b \in \bar{B}, h \in \bar{H}$;

$\gamma_{bh}^{\text{close}}$ 为调度时段 h 技术站 b 双重作业系统的整备作业成本, $b \in \bar{B}, h \in \bar{H}$.

3) 决策变量.

u_{abch} 为调度数段 h 由装车站 a 经技术站 b 到达卸车站 c 的重车数, $a \in \bar{A}, b \in \bar{B}, c \in \bar{C}, h \in \bar{H}$.

v_{cbah} 为调度时段 h 由卸车站 c 经技术站 b 到达装车站 a 的排空车数, $a \in \bar{A}, b \in \bar{B}, c \in \bar{C}, h \in \bar{H}$.

$$x_{bh} = \begin{cases} 1, & \text{调度时段 } h \text{ 技术站 } b \text{ 开启重车作业系统;} \\ 0, & \text{调度时段 } h \text{ 技术站 } b \text{ 关闭重车作业系统.} \end{cases}$$

$$y_{bh} = \begin{cases} 1, & \text{调度时段 } h \text{ 技术站 } b \text{ 开启空车作业系统;} \\ 0, & \text{调度时段 } h \text{ 技术站 } b \text{ 关闭空车作业系统.} \end{cases}$$

$$z_{bh} = \begin{cases} 1, & \text{调度时段 } h \text{ 技术站 } b \text{ 开启双重作业系统;} \\ 0, & \text{调度时段 } h \text{ 技术站 } b \text{ 关闭双重作业系统.} \end{cases}$$

2.3 模型构建

以成本最小化为目标, 构建数学模型如下:

$$\begin{aligned} \min C = & \sum_{h \in \bar{H}} \sum_{a \in \bar{A}} \sum_{b \in \bar{B}} \sum_{c \in \bar{C}} (u_{abch} u_{abch} + \pi_{cbah} v_{cbah}) \times \\ & \sum_{h \in \bar{H}} \sum_{b \in \bar{B}} (\alpha_{bh} x_{bh} + \beta_{bh} y_{bh} + \gamma_{bh} z_{bh}) + \\ & \sum_{h \in \bar{H}} [\alpha_{bh}^{\text{open}} (1 - x_{b(h-1)}) x_{bh} + \\ & \alpha_{bh}^{\text{close}} x_{b(h-1)} (1 - x_{bh})] + \\ & \sum_{h \in \bar{H}} [\beta_{bh}^{\text{open}} (1 - y_{b(h-1)}) y_{bh} + \\ & \beta_{bh}^{\text{close}} y_{b(h-1)} (1 - y_{bh})] + \\ & \sum_{h \in \bar{H}} [\gamma_{bh}^{\text{open}} (1 - z_{b(h-1)}) z_{bh} + \gamma_{bh}^{\text{close}} z_{b(h-1)} (1 - z_{bh})]. \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \sum_{a \in \bar{A}} \sum_{b \in \bar{B}} u_{abch} \geq p_{ch}, \quad \forall c \in \bar{C}, h \in \bar{H}; \quad (2)$$

$$\sum_{a \in \bar{A}} \sum_{b \in \bar{B}} u_{abch} \leq \alpha_{bh}^{\text{forward}} x_{bh} + \gamma_{bh}^{\text{forward}} z_{bh}, \quad \forall c \in \bar{C}, h \in \bar{H}; \quad (3)$$

$$\sum_{a \in \bar{A}} \sum_{b \in \bar{B}} v_{cbah} \geq p_{ch}, \quad \forall c \in \bar{C}, h \in \bar{H}; \quad (4)$$

$$\sum_{a \in \bar{A}} \sum_{b \in \bar{B}} v_{cbah} \leq \beta_{bh}^{\text{reverse}} x_{bh} + \gamma_{bh}^{\text{reverse}} z_{bh}, \quad \forall c \in \bar{C}, h \in \bar{H}; \quad (5)$$

$$u_{abch} \geq 0, \quad \forall a \in \bar{A}, b \in \bar{B}, c \in \bar{C}, h \in \bar{H}; \quad (6)$$

$$v_{cbah} \geq 0, \quad \forall a \in \bar{A}, b \in \bar{B}, c \in \bar{C}, h \in \bar{H}; \quad (7)$$

$$x_{bh} + y_{bh} + z_{bh} \leq 1, \quad \forall b \in \bar{B}, h \in \bar{H}; \quad (8)$$

$$x_{bh} \in 0, 1, \quad \forall b \in \bar{B}, h \in \bar{H}; \quad (9)$$

$$y_{bh} \in 0, 1, \quad \forall b \in \bar{B}, h \in \bar{H}; \quad (10)$$

$$z_{bh} \in 0, 1, \quad \forall b \in \bar{B}, h \in \bar{H}. \quad (11)$$

式(1)为目标函数, 表示重车运输成本、排空车运输成本、技术站作业成本(正常作业成本、休假作业成本和整备作业成本)之和最小化. 式(2)~(11)为约束条件. 其中: 约束(2)保证卸车站按时完成重车卸车任务量; 约束(3)保证重车运量不超过技术站作业能力; 约束(4)保证排空车量超过卸车站返回的空车数量; 约束(5)保证卸车站按时完成排空车移交任务量; 约束(6)表示满载重车流径路上的重车数; 约束(7)表示排空车流径路上的排空车数; 约束(8)表示任一调度时段技术站同时开启作业系统的只能有一种; 约束(9)~(11)表示对作业系统是否开启.

3 基于三区段分步编码的IGA-3SC求解策略

该模型属于混合整数规划(MIP)模型, 为典型的NP问题, 利用求解整数线性规划的传统割平面法(MIP-CPM法)很难求解且效率不高. 根据问题特点, 本文设计三区段分步编码方案, 给出基于三区段基因位取值的初始解生成机制, 设计基于遗传操作的解更新过程, 从而形成问题的三区段分布编码改进遗传求解策略(IGA-3SC).

3.1 解的三区段分步编码方案

因该问题属于三阶段分步决策问题, 针对模型解的结构特点, 设计三区段分步编码方案如下.

Step 1 基于重车流组织的一区段编码方案.

设计编码的第一区段用于表示从装车站出发经由技术站到达卸车站的重车流组织方案, 如图1(a)所示. 该区段采取自然数编码, 由 $A \cdot B \cdot C$ 个基因数位组成, 在整个解编码中该区段位于第 $1 - A \cdot B \cdot C$ 基因位, 表示 $A \cdot B \cdot C$ 条重车流径路上的重车数.

Step 1.1 1·1·1基因位编码. 该基因位表示从装车站1出发, 经由技术站1到达卸车站1的满载重车径路. 在该重车径路上, 选择装车站1装车, 经由技术站1安排重车技术作业, 最终到达卸车站1进行卸车.

Step 1.2 $a \cdot b \cdot c$ 基因位编码. 该基因位表示从装车站 a 出发, 经由技术站 b 到达卸车站 c 的满载重车径路. 在该重车径路上, 选择装车站 a 装车, 经由技术站 b 安排重车技术作业, 最终到达卸车站 c 进行卸车. 这里 $a \in \bar{A}, b \in \bar{B}, c \in \bar{C}$.

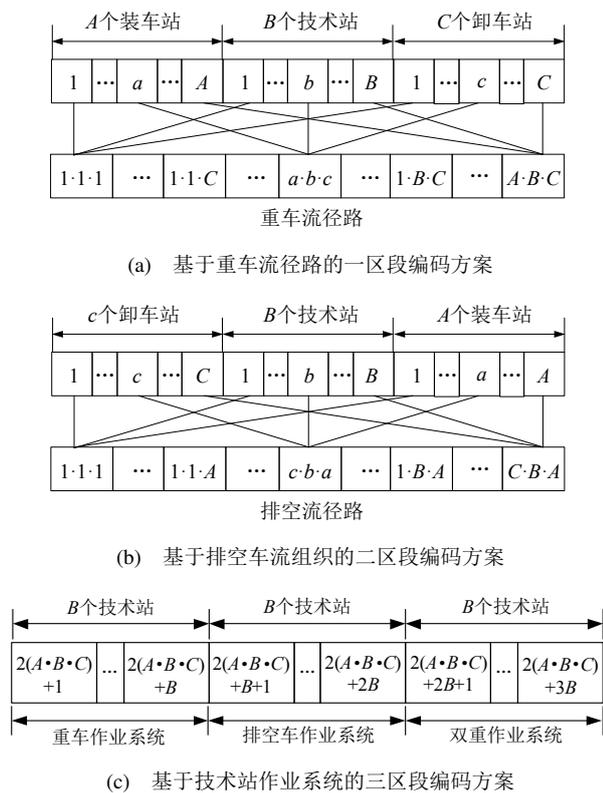


图1 解的三区段分步编码方案

Step 1.3 $A \cdot B \cdot C$ 基因位编码. 该基因位表示从装车站A出发, 经由技术站B到达卸车站C的满载重车径路. 在该重车径路上, 选择装车站A装车, 经由技术站B安排重车技术作业, 最终到达卸车站C进行卸车.

Step 2 基于排空车流组织的二区段编码方案.

设计编码的第二区段用于表示从卸车站经由技术站到达装车站的排空车流组织, 如图1(b)所示. 该区段采取自然数编码, 由 $A \cdot B \cdot C$ 个基因数位组成, 在整个解编码中该区段位于第 $A \cdot B \cdot C + 1 - 2(A \cdot B \cdot C)$ 基因位, 表示 $C \cdot B \cdot A$ 条排空车流径路上的排空车数.

Step 2.1 $1 \cdot 1 \cdot 1$ 基因位编码. 该基因位表示从卸车站1出发, 经由技术站1到达装车站1的排空车流径路. 在该排空车径路上, 选择卸车站1返回排空车, 经由技术站1安排排空车技术作业, 最终到达装车站1进行装车.

Step 2.2 $c \cdot a \cdot b$ 基因位编码. 该基因位表示从卸车站c出发, 经由技术站a到达装车站b的排空车流径路. 在该排空车径路上, 选择卸车站c返回排空车, 经由技术站b安排排空车技术作业, 最终到达装车站a进行装车. 这里 $c \in \bar{C}, b \in \bar{B}, a \in \bar{A}$.

Step 2.3 $C \cdot B \cdot A$ 基因位编码. 该基因位表示从卸车站C出发, 经由技术站B到达装车站A的排空车流径路. 在该排空车径路上, 选择卸车站C返回排空车, 经由技术站B安排排空车技术作业, 最终到达装

车站A进行装车.

Step 3 基于技术站作业系统的三区段编码方案.

设计编码的第三区段用于表示各技术站内重车作业系统、空车作业系统、双重作业系统三类作业系统的配置方案, 如图1(c)所示. 该区段采取0-1编码, 由 $3B$ 个基因位组成, 在整个解编码中该区段位于第 $2(A \cdot B \cdot C) + 1 - 2(A \cdot B \cdot C) + 3B$ 基因位, 表示 $3B$ 个技术站作业系统配置方案.

Step 3.1 $2(A \cdot B \cdot C) + 1 - 2(A \cdot B \cdot C) + B$ 基因位编码. 该基因位表示第 $1 - B$ 个技术站内重车作业系统配置情况, 0表示关闭, 1表示开启.

Step 3.2 $2(A \cdot B \cdot C) + B + 1 - 2(A \cdot B \cdot C) + 2B$ 基因位编码. 该基因位表示第 $1 - B$ 个技术站内排空车作业系统配置情况, 0表示关闭, 1表示开启.

Step 3.3 $2(A \cdot B \cdot C) + 2B + 1 - 2(A \cdot B \cdot C) + 3B$ 基因位. 该基因位表示第 $1 - B$ 个技术站内双重作业系统配置情况, 0表示关闭, 1表示开启.

3.2 基于三区段基因位取值的初始解生成机制

针对三区段编码方案, 设计三区段基因位取值方法作为问题初始解, 设置方法如下.

Step 1 一区段基因位取值($1 - A \cdot B \cdot C$ 基因位).

该基因位分区为解编码的一区段, 取值方案如图2(a)所示. 该区段表示从装车站a出发, 经由技术站b到达卸车站c的重车数, 这里记为 $\lambda_{a \cdot b \cdot c}, a \in \bar{A}, b \in \bar{B}, c \in \bar{C}$. 显然, 满载重车流径路 $a \cdot b \cdot c$ 上的重车数不应高于途中技术站b的重车作业能力, 且不应大于目的卸车站c需要完成的卸车任务. 因此, 依据途中技术站b内重车作业系统作业能力 $\alpha_{bh}^{\text{forward}}$ 、双重作业系统的重车处理能力 $\gamma_{bh}^{\text{forward}}$ 、目的卸车站c需要完成的卸车任务量 p_{ch} , 可得满载重车流径路 $a \cdot b \cdot c$ 上的重车数取值 $\lambda_{a \cdot b \cdot c}$, 即

$$\lambda_{a \cdot b \cdot c} \leq \min(\alpha_{bh}^{\text{forward}} + \gamma_{bh}^{\text{forward}}, p_{ch}), \quad \forall a \in \bar{A}, b \in \bar{B}, c \in \bar{C}, h \in \bar{H}. \quad (12)$$

Step 2 二区段基因位取值($A \cdot B \cdot C + 1 - 2(A \cdot B \cdot C)$ 基因位).

该基因位分区为解编码的一区段, 取值方案如图2(b)所示. 该区段表示从卸车站c出发, 经由技术站b到达装车站a的排空车数, 这里记为 $\theta_{c \cdot b \cdot a}, c \in \bar{C}, b \in \bar{B}, a \in \bar{A}$. 显然, 排空车流径路 $c \cdot b \cdot a$ 上的排空车数不应高于途中技术站b的排空车作业能力, 且不应大于目的卸车站c需要移交的排空车任务量. 因此, 依据途中技术站b内排空车作业系统作业能力 $\beta_{bh}^{\text{reverse}}$ 、

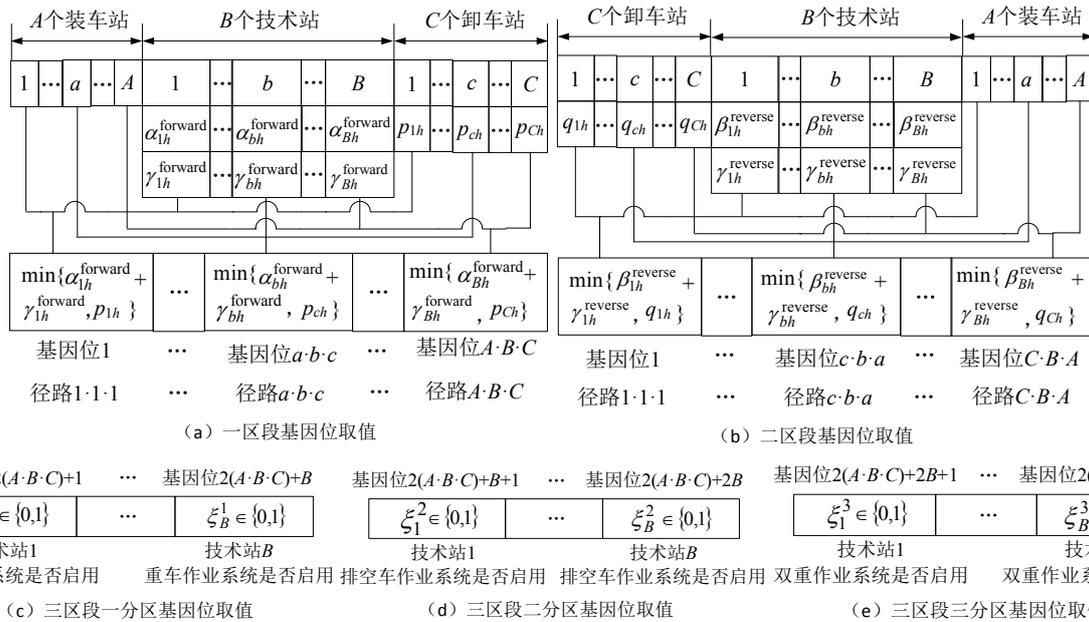


图2 三区段基因位取值

双重作业系统的排空车处理能力 $\gamma_{bh}^{reverse}$ 、目的卸车站 c 需要移交的排空车任务量 q_{ch} ,可得排空车流径路 $c \cdot b \cdot a$ 上的排空车数取值 $\theta_{c \cdot b \cdot a}$,即

$$\theta_{c \cdot b \cdot a} \leq \min(\beta_{bh}^{reverse} + \gamma_{bh}^{reverse}, q_{ch}), \quad \forall a \in \bar{A}, b \in \bar{B}, c \in \bar{C}, h \in \bar{H}. \quad (13)$$

Step 3 三区段基因位取值 $(2(A \cdot B \cdot C) + 1 - 2(A \cdot B \cdot C) + 3B)$ 基因位).

Step 3.1 $2(A \cdot B \cdot C) + 1 - 2(A \cdot B \cdot C) + B$ 基因位分区取值(三区段一分区).

该基因位分区为解编码的三区段一分区,对应各技术站 b 内重车作业系统的配置方案,0表示关闭,1表示开启.依次设置该分区内各基因位的取值 $\{\xi_b^1 | b = 1, 2, \dots, B\}$.显然 $\xi_b^1 \in \{0, 1\}, \forall b \in \bar{B}$.三区段一分区基因位取值如图2(c)所示.

Step 3.2 $2(A \cdot B \cdot C) + 1 - 2(A \cdot B \cdot C) + 2B$ 基因位分区取值(三区段二分区).

该基因位分区为解编码的三区段二分区,对应各技术站 b 内排空车作业系统的配置方案,0表示关闭,1表示开启.依次设置该分区内各基因位的取值 $\{\xi_b^2 | b = 1, 2, \dots, B\}$.显然 $\xi_b^2 \in \{0, 1\}, \forall b \in \bar{B}$.三区段二分区基因位取值如图2(d)所示.

Step 3.3 $2(A \cdot B \cdot C) + 1 - 2(A \cdot B \cdot C) + 3B$ 基因位分区取值(三区段三分区).

该基因位分区为解编码的三区段三分区,对应各技术站 b 内双重作业系统的配置方案,0表示关闭,1表示开启.依次设置该分区内各基因位的取值 $\{\xi_b^3 | b = 1, 2, \dots, B\}$.显然 $\xi_b^3 \in \{0, 1\}, \forall b \in \bar{B}$.三区段三分区基因位取值如图2(e)所示.

3.3 基于遗传操作的解更新过程设计

1) 解的双重筛选机制设计.

利用混合整数规划模型的约束条件(2)~(11)进行解的初步筛选;对于筛选出的可行解集,利用目标函数(1)进行二次筛选;引入轮盘赌规则,依据计算出的运输与作业总成本,对较低总成本的解方案给予较大的选择概率.

2) 三区段随机位同步交叉机制.

三区段随机位同步交叉机制的具体操作步骤如下.

Step 1 从上一代解群体中随机选择两个解.

Step 2 一区段随机位同步交叉:在一区段选择满载重车流径路 $a \cdot b \cdot c$ 基因位进行交叉,这里 $a \in \bar{A}, b \in \bar{B}, c \in \bar{C}$.如图3(a)所示.

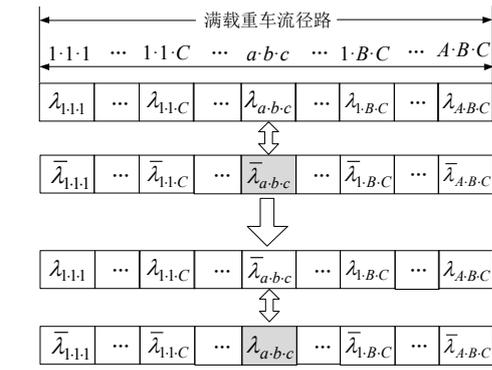
Step 3 二区段随机位同步交叉:在二区段选择满载重车流径路 $c \cdot b \cdot a$ 基因位进行交叉,这里 $c \in \bar{C}, b \in \bar{B}, a \in \bar{A}$.如图3(b)所示.

Step 4 三区段三分区随机位同步交叉:在一分区选择基因位 b_1 进行交叉;在二分区选择基因位 b_2 进行交叉;在三分区选择基因位 b_3 进行交叉.如图3(c)所示.

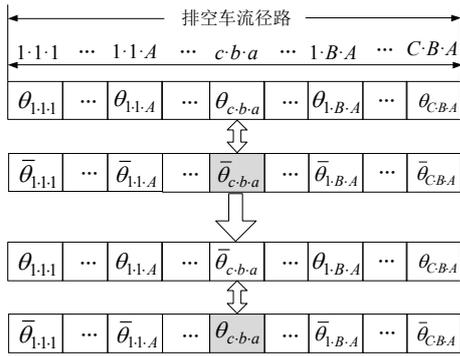
3) 三区段随机位同步变异机制

三区段随机位同步变异机制的具体操作步骤如下.

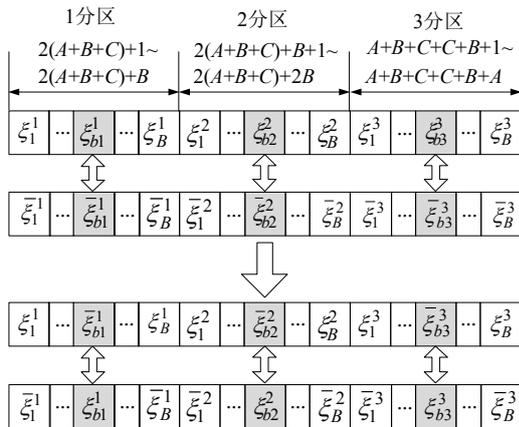
Step 1 一区段基因位取值变异:在一区段选择满载重车流径路 $a \cdot b \cdot c$ 基因位,对该基因位取值 $\lambda_{a \cdot b \cdot c}$ 进行变异处理,变异值记为 $\tilde{\lambda}_{a \cdot b \cdot c}, \tilde{\lambda}_{a \cdot b \cdot c} = \lambda_{a \cdot b \cdot c} \pm \epsilon,$



(a) 一区段随机位同步交叉



(b) 二区段随机位同步交叉



(c) 三区段三分区随机位同步交叉

图3 三区段基因位同步交叉

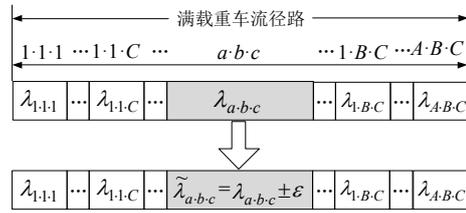
ϵ 为一非常小的数值,这里 $a \in \bar{A}, b \in \bar{B}, c \in \bar{C}$. 如图4(a)所示.

Step 2 二区段基因位取值变异: 在一区段选择排空车流径路 $c \cdot b \cdot a$ 基因位,对该基因位取值 $\theta_{a \cdot b \cdot c}$ 进行变异处理,变异值记为 $\tilde{\theta}_{a \cdot b \cdot c}, \tilde{\theta}_{a \cdot b \cdot c} = \theta_{a \cdot b \cdot c} \pm \sigma, \sigma$ 为一非常小的数值,这里 $c \in \bar{C}, b \in \bar{B}, a \in \bar{A}$. 如图4(b)所示.

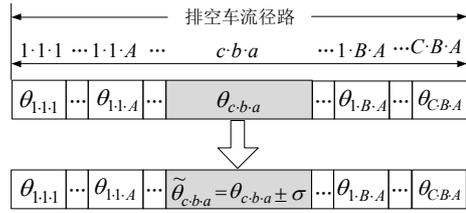
Step 3 三区段基因位取值变异: 在三区段3个分区各随机选择一个基因位,对3个基因位取值 $\xi_{b1}^1, \xi_{b2}^2, \xi_{b3}^3$ 进行变异处理,变异值记为 $\tilde{\xi}_{b1}^1, \tilde{\xi}_{b2}^2, \tilde{\xi}_{b3}^3$. 变异值取值如下式所示:

$$\begin{cases} \tilde{\xi}_{bi}^i = 0, \forall \xi_{bi}^i = 1, i \in 1, 2, 3; \\ \tilde{\xi}_{bi}^i = 1, \forall \xi_{bi}^i = 0, i \in 1, 2, 3. \end{cases} \quad (14)$$

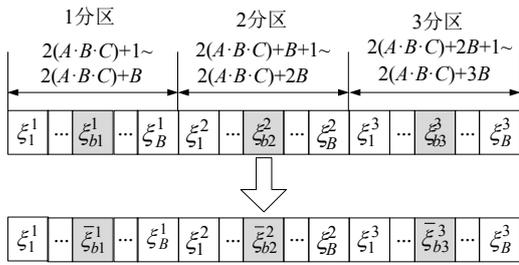
三区段三分区基因位取值变异如图4(c)所示.



(a) 一区段基因位变异



(b) 二区段基因位变异



(c) 三区段三分区基因位变异

图4 三区段基因位同步变异

4 仿真实验与数值研究

4.1 实验设计

根据中等规模货运站日均装卸车作业量的经验数据,设计如下实验方案:卸车站需要完成的卸车任务量 p_{ch} 均服从 [95, 120] 之间的均匀分布,需要移交的排空车任务量 q_{ch} 均服从 [25, 40] 的均匀分布;技术站中正向满载重车作业系统处理能力 $\alpha_{bh}^{forward}$ 服从 [270, 360] 的均匀分布,逆向排空车作业系统处理能力 $\beta_{bh}^{reverse}$ 服从 [80, 120] 的均匀分布,双重作业系统的重车处理能力 $\gamma_{bh}^{forward}$ 服从 [370, 480] 的均匀分布,双重作业系统的排空车处理能力 $\gamma_{bh}^{reverse}$ 服从 [120, 200] 的均匀分布;重车单位车辆运输成本 w_{abch} 服从 [20, 25] 的均匀分布,排空车单位车辆运输成本 π_{cbah} 服从 [10, 15] 的均匀分布;技术站重车作业系统的正常作业成本 α_{bh} 、休假作业成本 α_{bh}^{open} 、整備作业成本 α_{bh}^{close} 服从 [1 500, 2 000] 的均匀分布;技术站排空车作业系统的正常作业成本 β_{bh} 、休假作业成本 β_{bh}^{open} 、整備作业成本 β_{bh}^{close} 服从 [2 000, 2 400] 的均匀分布;技术站双重作业系统的正常作业成本 γ_{bh} 、

休假作业成本 γ_{bh}^{open} 、整備作业成本 γ_{bh}^{close} 服从[2 500, 3 200]的均匀分布。

利用 Matlab 2014 对 IGA-3SC 求解策略(三区段分布编码改进遗传求解策略)和 MIP-CPM 求解策略(传统混合整数规划割平面法)进行编程,在英特尔酷睿 i5-5200CPU(2.2 GHz) 微机上运行. 针对 IGA-3SC 求解策略,选取算法基本参数:群体规模取 30,迭代次数取 100,交叉概率取 0.7,变异率取 0.02. 分别利用 IGA-3SC 求解策略和 MIP-CPM 策略对不同大小规模的算例进行全周期测试,并对求解结果进行对比分析.

4.2 全周期测试结果比对

为进行算法的全方位对比分析,设计 6 种不同规模的仿真实验,实验规模设置如下.

实验 1: 装车站规模为 1、技术站规模为 3、卸车站规模为 6;

实验 2: 装车站规模为 2、技术站规模为 3、卸车站规模为 9;

实验 3: 装车站规模为 3、技术站规模为 6、卸车站规模为 12;

实验 4: 装车站规模为 8、技术站规模为 10、卸车站规模为 16;

实验 5: 装车站规模为 12、技术站规模为 10、卸车站规模为 20;

实验 6: 装车站规模为 15、技术站规模为 12、卸车站规模为 25.

图 5 是这 6 种规模下两种算法运行之后得到的目标函数值对比图.

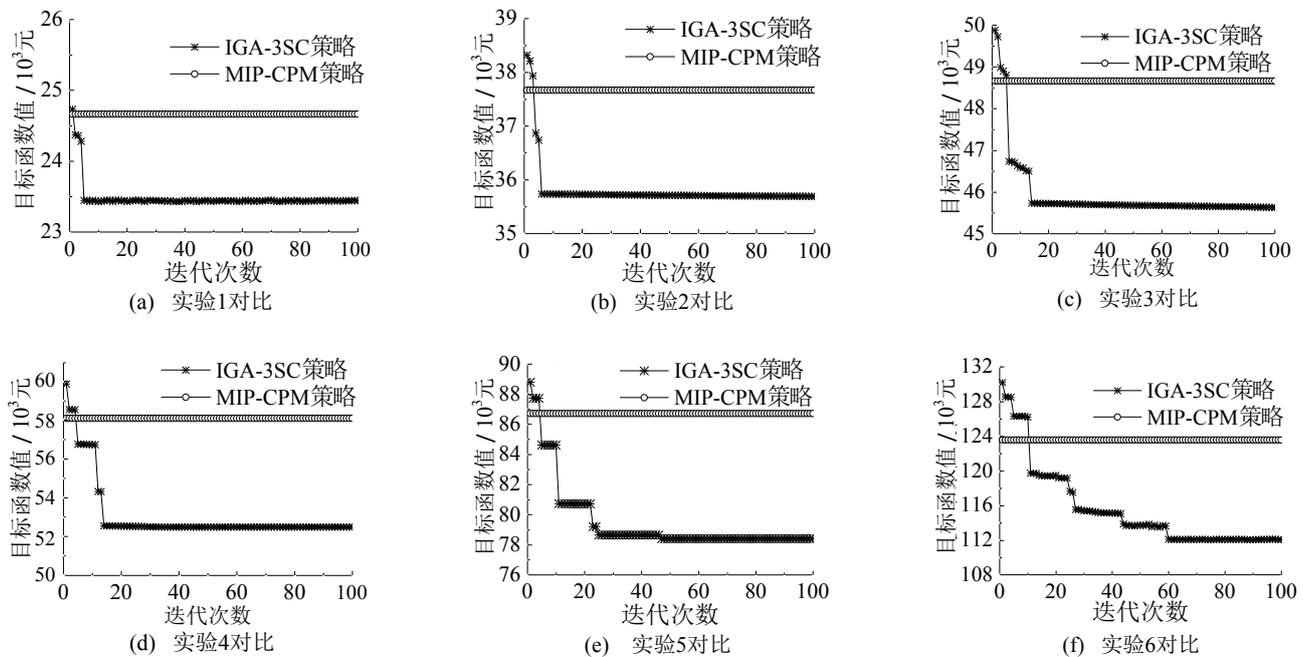


图 5 6 种不同规模仿真实验的目标函数值对比图

由实验 1~实验 6 的实验数据对比图可以看出以下几点:

1) 因 MIP-CPM 算法为传统数学规划算法,非迭代算法,故在实验对比图中表现为恒值;而 IGA-3SC 算法为启发式迭代算法,随着迭代次数增加,IGA-3SC 的求解优越性逐渐显现.

2) 实验 1 和实验 2 由于规模较小,经 10 次迭代后,函数值趋于稳定;随着规模增大,实验 3 和实验 4 需经 20 次迭代,函数值趋于稳定;对于规模更大的实验 5 和实验 6,需经过 50 代和 60 代的迭代运算,函数值趋于稳定. 由此可知,问题规模越大,IGA-3SC 算法达到稳定解所需的迭代次数越多.

3) 本文提出的 IGA-3SC 求解策略比传统的 MIP-CPM 方法具有更大的优越性,虽然在小规模情况下所提出算法的优越性不是很明显,但是随着规模的不断扩大,IGA-3SC 的优势性越来越显著,比传统 CPM 算法能得到更优的解,可以降低 6%~10% 的成本.

4.3 求解质量与作业网络规模的关系

将作业网络设定为不同规模,分别利用 IGA-3SC 求解策略和 MIP-CPM 方法进行求解,并对其求解质量进行比对. 可以发现,随着三层双向闭环作业网络规模的增加,解的差别呈现扩大趋势,即作业网络规模越大,IGA-3SC 的优越性越明显,如表 1 所示.

表1 不同规模仿真对比数据表

问题规模(装车站数× 技术站数×卸车站数)	IGA-3SC策略 目标函数值/元	MIP-CPM方法 目标函数值/元	目标函数 差/元
1×3×6	23 429	24 665	1 236
2×3×9	35 736	37 667	1 931
3×6×12	45 627	48 662	3 035
8×10×16	52 390	58 096	5 706
12×10×20	78 410	86 724	8 314
15×12×25	112 110	123 573	11 463
18×12×30	135 620	149 568	13 948
20×15×30	142 170	160 643	18 473
25×15×30	165 371	187 397	22 026
25×15×35	190 352	217 990	27 638
25×20×35	223 751	256 698	32 947
30×20×35	257 867	297 041	39 174

4.4 求解质量与计算机运行时间的关系

对6种不同规模的三层双向闭环作业网络,分别利用IGA-3SC求解策略和传统MIP-CPM求解方法进行求解,记录计算机运行时间,如表2所示。

表2 不同规模仿真对比数据表

问题规模(装车站数× 技术站数×卸车站数)	IGA-3SC策略 计算时间/s	MIP-CPM方法 计算时间/s	运行时间 差/s
1×3×6	620	280.8	339.2
2×3×9	765.6	270.7	494.9
3×6×12	1 105.8	358.6	747.2
8×10×16	1 758.1	587.1	1 171
12×10×20	2 004.8	660.1	1 344.7
15×12×25	2 302.4	724.5	1 577.9
18×12×30	2 820.4	981.7	1 838.7
20×15×30	3 081.3	1 241.5	1 839.8
25×15×30	3 635	1 428.5	2 206.5
25×15×35	4 402.7	1 357.7	3 045
25×20×35	5 160.2	1 683.2	3 477
30×20×35	5 873.6	1 924.8	3 948.8

5 结论

本文研究了三层双向闭环作业网络的重空车流组织优化问题. 首先剖析三层双向闭环作业网络的作业机理,在此基础上建立了问题的数学规划模型. 该问题属于NP问题,利用求解混合整数规划模型的传统割平面方法效率不高;然后,设计基于三区段分步编码的改进遗传求解策略,给出了解的三区段分步编码方案,并设计了基于三区段基因位取值的初始解生成机制,确定了基于遗传操作的解更新过程;最后形成了IGA-3SC求解策略. 针对所提出的求解策

略进行数值实验研究. 数值仿真分析表明,IGA-3SC求解策略总体性能优于传统MIP-CPM求解方法,可以得到比MIP-CPM求解方法更高质量的解,在计算速度上也有较好的表现.

参考文献(References)

[1] 侯玉梅, 贾震环, 田歆, 等. 带软时间窗整车物流配送路径优化研究[J]. 系统工程学报, 2015, 30(2): 240-250.
(Hou Y M, Jia Z H, Tian X, et al. With soft time windows vehicle logistics distribution path optimization[J]. J of Systems Engineering, 2015, 30(2): 240-250.)

[2] 杨珍花, 赖平仲, 汤洋, 等. 冷藏车多车型混合配送调度优化[J]. 系统工程, 2015, 33(10): 28-36.
(Yang Z H, Lai P Z, Tang Y, et al. Multi-vehicle type mixed refrigerated vehicle distribution scheduling optimization[J]. System Engineering, 2015, 33(10): 28-36.)

[3] Battarra M, Erdogan G, Vigo D. Exact algorithms for the clustered vehicle routing problem[J]. Operations Research, 2014, 62(1): 58-71.

[4] Zhang R Y, Lu J C, Wang D W. Container drayage problem with flexible orders and its near real-time solution strategies[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2014, 61(1): 235-251.

[5] 张瑞友, 张辉, 黄敏. 以低碳为目标的集装箱拖车运输问题及其时间窗离散化算法[J]. 控制与决策, 2016, 31(4): 717-722.
(Zhang R Y, Zhang H, Huang M. Container drayage transportation problem with objective of low carbons and its time window discretization based solution method[J]. Control and Decision, 2016, 31(4): 717-722.)

[6] Xia J, Li K X, Ma H, et al. Joint planning of fleet deployment, speed optimization, and cargo allocation for liner shipping[J]. Transportation Science, 2015, 49(4): 922-938.

[7] Koç Ç, Bekta T, Jabali O, et al. The fleet size and mix location-routing problem with time windows: Formulations and a heuristic algorithm[J]. European J of Operational Research, 2016, 248(1): 33-51.

[8] Park S, Kim D S. Container fleet-sizing for part transportation and storage in a two-level supply chain[J]. J of the Operational Research Society, 2015, 66(9): 1442-1453.

[9] 李坤, 唐立新, 陈树发. 多集装箱堆场空间分配与车辆调度集成问题的建模与优化[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(1): 115-121.
(Li K, Tang L X, Chen S F. Modeling and optimization of spatial distribution and vehicle scheduling problem in

- multi container yard[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2014, 34(1): 115-121.)
- [10] Tierney K, Áskelsdóttir B, Jensen R M, et al. Solving the liner shipping fleet repositioning problem with cargo flows[J]. *Transportation Science*, 2015, 49(3): 652-674.
- [11] 李冰, 轩华, 李静. 允许存储的变周期随机动态车队调度双层模型交替求解策略[J]. *控制与决策*, 2015, 30(5): 807-814.
(Li B, Xuan H, Li J. The alternating solution strategies of bi-level programming model for the stochastic dynamic fleet scheduling problem with variable period and storage properties[J]. *Control and Decision*, 2015, 30(5): 807-814.)
- [12] 李冰, 李静, 轩华. 基于参数诱导的随机动态车队调度求解策略[J]. *系统工程学报*, 2016, 31(4): 545-556.
(Li B, Li J, Xuan H. Solving strategies for the stochastic dynamic fleet scheduling problem based on leading of parameters[J]. *J of Systems Engineering*, 2016, 31(4): 545-556.)
- [13] 陶莎, 胡志华. 单元化三级装卸搬运作业链集成优化的三层进化算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(8): 1971-1985.
(Tao S, Hu Z H. Three layer evolutionary algorithm for integrated optimization of modular three stage loading and unloading operations[J]. *System Engineering—Theory & Practice*, 2014, 34(8): 1971-1985.)
- [14] 张睿, 靳志法, 邢曦文, 等. 同贝同步模式下的集装箱装卸作业调度优化[J]. *系统工程学报*, 2014, 29(6): 833-844.
(Zhang R, Jin Z F, Xing X W, et al. Optimization of container loading and unloading scheduling based on synchronous model[J]. *J of Systems Engineering*, 2014, 29(6): 833-844.)
- [15] Benavent E, Landete M, Mota E, et al. The multiple vehicle pickup and delivery problem with LIFO constraints[J]. *European J of Operational Research*, 2015, 243(3): 752-762.
- [16] 邵乾虔, 徐奇, 边展, 等. 考虑了交箱时间不确定性的场桥堆存作业优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(2): 394-405.
(Shao Q Q, Xu Q, Bian Z, et al. Considering the container delivery time uncertain field bridge piling operation optimization[J]. *System Engineering—Theory & Practice*, 2015, 35(2): 394-405.)
- [17] Meng Q, Wang S, Andersson H, et al. Containership routing and scheduling in liner shipping: Overview and future research directions[J]. *Transportation Science*, 2014, 48(2): 265-280.
- [18] Meisel F, Bierwirth C. A framework for integrated berth allocation and crane operations planning in seaport container terminals[J]. *Transportation Science*, 2013, 47(2): 131-147.
- [19] 李冰, 轩华. 嵌入作业协调的随机动态车队调度求解策略[J]. *控制与决策*, 2017, 32(1): 71-78.
(Li B, Xuan H. Solving strategy for stochastic dynamic fleet scheduling with station operation coordination[J]. *Control and Decision*, 2017, 32(1): 71-78.)
- [20] 潘国强, 胡俊逸, 洪敏. 面向综合运输网络的复杂供应链问题建模与耦合求解算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(11): 3041-3053.
(Pan G Q, Hu J Y, Hong M. Modeling and coupling solving algorithm for complex supply chain problem based on integrated transportation network[J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2015, 21(11): 3041-3053.)
- [21] Zhu E D, Crainic T G, Michel G. Scheduled service network design for freight rail transportation[J]. *Operations Research*, 2014, 62(2): 383-400.
- [22] 黄英艺, 金淳, 荣莉莉. 考虑运输有向性的物流网络级联失效模型[J]. *系统管理学报*, 2015, 24(5): 756-761.
(Huang Y Y, Jin C, Rong L L. Model for cascading failures of logistics network considering transportation directions[J]. *J of System Management*, 2015, 24(5): 756-761.)
- [23] 李冰, 轩华, 李静, 等. 基于时隙区间滑动的全过程时间限制车流组织协调优化[J]. *运筹与管理*, 2016, 25(4): 69-77.
(Li B, Xuan H, Li J, et al. The coordinated optimization of car flow organization with whole-procedure time limited based on sliding slot interval[J]. *Operations Research and Management Science*, 2016, 25(4): 69-77.)

(责任编辑: 李君玲)