文章编号: 1001-0920 (2016) 04-0717-06 DOI: 10.13195/j.kzyjc.2015.0086

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

张瑞友, 张 辉, 黄 敏

(东北大学 a. 信息科学与工程学院，b. 流程工业综合自动化国家重点实验室，沈阳 110004)

摘 要: 研究以低碳为目标的集装箱拖车运输问题. 该问题需同时调度隐含的运输资源和具有双重时间窗限制的运输任务. 基于扩展的确定的活动在顶点上 (DAOV) 的图建立该问题的具有双时间窗约束的混合整数非线性规划模型, 设计一个基于时间窗离散化的求解算法, 并将该模型转化为纯整数线性规划模型. 实验结果表明, 所提出的方法有很好的求解速度和精度, 与给定车辆行驶速度情形的对比进一步验证了所提出模型的有效性.

关键词: 碳排放；集装箱；拖车运输；确定的活动在顶点上的图；离散化算法

中图分类号: TP39；U169 **文献标志码:** A

Container drayage transportation problem with objective of low carbons and its time window discretization based solution method

ZHANG Rui-you, *ZHANG Hui*, *HUANG Min*

(a. College of Information Science and Engineering，b. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries，Northeastern University，Shenyang 110004，China．Correspondent：ZHANG Rui-you，E-mail: zhangruiyou@ise.neu.edu.cn)

Abstract: A container drayage transportation problem with the objective of low carbons is explored. This problem considers both the implicitly required repositioning of transportation resources and the transportation tasks with double time window constraints. Then, this problem is formulated as a mixed integer nonlinear programming model with two time window constraints based on an extended determined-activities-on-vertex(DAOV) graph. A time window discretization based method is designed, and the model is transferred to a pure integer linear programming model. Results of experiments show that the precision and speed of this solution method is acceptable. The comparison with the problems in which speeds are given validates the effectiveness of the proposed model.

Keywords: carbon emission；container；drayage transportation；determined-activities-on-vertex graph；discretization based method

0 引 言

运输业在全球总碳排放量中的占比为 14%, 而道路运输的碳排放量占整个运输业碳排放量的比重高达 70%[1]. 在给定车辆及车况的前提下, 车辆的碳排放量与车辆的燃油消耗成正比[2], 优化以低碳为目标的道路运输具有重要的环境和经济效益. 因此, 低碳运输近年来成为全球性的研究热点之一. 文献 [2-6] 分别以低碳为目标研究了车辆路径问题、集装箱多式联运问题, 以及集装箱拖车运输问题.

车辆的碳排放量与车辆的行驶路程、载重及行驶速度等因素有关. 即使车辆速度给定, 一般情况下, 路程最小的运输方案的车辆碳排放量也不是最小的, 文献 [2-3, 5-6] 的研究证实了这一点. 当以车辆总的碳排放量最小化为目标时, 车辆行驶速度对目标的影响是非单调的, 因此决策车辆行驶速度对降低车辆的碳排放量具有重要意义. Bauer 等[5]指出了将车辆的行

收稿日期: 2015-01-20；**修回日期:** 2015-10-12.

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(71325002, 61225012)；国家自然科学基金项目(71471034, 71071028, 71001019, 71501034)；中国博士后科学基金项目(2012M520642)；中央高校基本科研业务费专项基金项目(N140405003, N120404016)；流程工业综合自动化国家重点实验室基础科研业务费项目(2013ZCX11)；中国科学院沈阳自动化研究所网络化控制系统重点实验室项目(WLHKZ2014008).

作者简介: 张瑞友(1979−), 男, 副教授, 博士生导师, 从事复杂系统的建模与优化等研究；张辉(1987−), 男, 博士生, 从事物流系统的研究.

驶速度设为变量将会节约更多的 CO_2 排放量; Bektas 等[7]将燃油成本、碳税成本引入到车辆路径问题的目标中, 举例说明了车辆配送过程的碳排放量与车辆的总重量、速度、行程以及任务时间窗等一系列因素有关, 在此基础上, 将车辆的行驶速度考虑为决策变量, 建立了污染路径问题模型.

集装箱拖车运输是指在长距离的远洋或铁路运输开始之前或结束之后的距离相对较短的通常由卡车实现的运输环节. 与一般性的车辆路径问题不同, 在集装箱拖车运输中, 集装箱具有货物和运输资源的双重属性, 某些运输订单柔性给出, 并且运输任务具有双时间窗约束, 货物运输需要与空箱的调运联合进行优化. 根据所研究问题堆场功能的不同, 集装箱拖车运输可分为典型的两类. 一类问题定义的堆场为内陆空箱堆场, 运输任务在港口、客户、内陆堆场之间进行. 针对这类问题, Zhang 等[8]提出了一种 DAOV 图, 将集装箱拖车运输的任务以图表述, 将该问题转化为多旅行商问题进行求解; Kopfer 等[9]基于车辆路径和各任务间的重箱与空箱的逻辑关系, 考虑了拖车和挂车可分离情形, 建立了集装箱拖车运输问题的数学模型; Zhang 等[10]将集装箱拖车问题扩展到内陆空箱堆场-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. 另一类问题定义的堆场为港口堆场, 运输任务在港口与客户之间进行. 针对这类问题, Xue 等[11]建立了集装箱拖车运输的数学模型, 分析了拖车和挂车可分离时的装箱/卸货时间对运输效率的影响.

以上研究是在假设车辆行驶速度给定的情况下, 以拖车总运输时间或总运输距离为目标. 根据前文分析, 当研究目标为车辆的总碳排放量时, 由于影响目标的因素增多, 决策变量增加, 原有研究的模型和求解算法已不适用. 因此, 本文在 Zhang 等[10]的基础上, 以低碳为目标对集装箱拖车运输问题进行探索性研究. 考虑某拖车运输企业在某区域内具有单一内陆空箱堆场和多个港口, 运输任务具有双重时间窗的典型情形, 同时考虑顾客给出的运输任务以及隐含的运输资源的调运; 将决策车辆速度转换为决策车辆行驶时间, 通过对 DAOV 图进行扩展建立一个具有双时间窗约束的混合整数非线性规划模型; 设计一种基于时间窗离散化的求解算法, 从而将该模型转化为一个纯整数线性规划模型, 其决策变量能同时描述车辆路线和行驶速度. 最后通过数值实验验证了本文模型和算法的有效性.

1 以低碳为目标的集装箱拖车运输问题

某集装箱拖车运输企业在某区域内提供拖车运输服务. 该企业在该区域内拥有一个堆场, 用于停放集卡并堆放空集装箱. 初始时所有集卡停放于堆场, 完成计划期(通常为一个工作日)内其运输任务后返回堆场, 集卡的数量记为 K. 假设所有集卡以及所有的集装箱为同一型号, 任一时刻一辆集卡只能装载一个集装箱. 集卡的质量(包括拖车和挂车)记为 m_T, 空箱的质量记为 m_C.

Zhang 等[10]对集装箱拖车运输任务重箱与空箱之间的逻辑关系等进行了概括性地描述. 参考 Zhang 等[10]的问题描述, 运输服务以订单的形式给出, 一个订单包含一个集装箱的运输, 若一项运输任务包含多个集装箱的运输, 则将该任务拆为多个订单. 订单 $i=1,2,\cdots,N$ 包括一个出发地 O_i 和一个目的地 D_i, 其中 N 为订单总数. 订单 i 在其出发地的访问时间窗为 $[a_i^O,b_i^O](a_i^O\leqslant b_i^O)$, 在其目的地的访问时间窗为 $[a_i^D,b_i^D](a_i^D\leqslant b_i^D)$. 如果订单 i 在其出发地需要空箱, 则 $p_i^O=1$, 否则 $p_i^O=0$. 类似地, 如果订单 i 在其目的地释放空箱, 则 $p_i^D=1$, 否则 $p_i^D=0$. 订单 i 在其出发地和目的地的服务时间分别为 t_i^O 和 t_i^D. 订单中的信息在集卡出发前已知. 此外, 集卡装/卸一个集装箱的时间记为 t, 任意两地之间的距离记为 $l(\cdot,\cdot)$. 假设车辆在行驶过程中道路畅通, 即不考虑拥堵的情况下, 以低碳为目标的集装箱拖车运输问题即为: 优化各订单的访问集卡、访问顺序, 以及访问时集卡的行驶速度, 以最小的碳排放总量完成计划期内的所有订单.

2 数学模型

借鉴文献 [10] 的 DAOV 图并对其进行扩展, 建立以低碳为目标的集装箱拖车运输问题的数学模型.

2.1 碳排放量的计算

车辆行驶过程中的碳排放率主要取决于车辆的燃油消耗率. 根据文献 [7] 的分析, 当行驶速度大于 40 km/h 时, 车辆的燃油消耗率近似正比于发动机的牵引功率, 而发动机牵引功率 (W) 的计算公式为

$$P=mav+mgv\sin\theta+mgvf_r\cos\theta+0.5f_sS\rho v^3. \quad (1)$$

其中: m 为车辆总质量 (kg), a 为车辆加速度 (m/s^2), v 为车辆速度 (m/s), g 为重力加速度 (m/s^2), θ 为路面坡度, f_r 为车辆与路面之间的摩擦系数, f_s 为车辆与空气之间的摩擦系数, S 为车头截面积 (m^2), ρ 为空气密度 (kg/m^3).

因为车辆的碳排放量与车辆的燃油消耗量成正比, 而车辆的燃油消耗量与车辆发动机的有效功近似成正比, 由参考文献 [4,7] 可知, 车辆牵引力所做的功可以反应车辆的碳排放量. 假设车辆以均匀的速度 v_{ij} 在两地 i 与 j 之间的匀质道路上行驶, 发动机的有效功可以描述为

$$Q_{ij}\approx Pt_{ij}=Pd_{ij}/v_{ij}=$$
$$\alpha m_{ij}d_{ij}+\beta d_{ij}v_{ij}^2=\alpha m_{ij}d_{ij}+\beta(d_{ij}^3)/(t_{ij}^2). \quad (2)$$

其中: $V_{\min}\leqslant v_{ij}\leqslant V_{\max}$, $V_{\min}$ 为车辆速度下限, $V_{\max}$ 为车辆速度上限, m_{ij}、d_{ij}、v_{ij} 和 t_{ij} 分别为车辆的全重、在两地之间的距离、行驶速度和行驶时间; $\alpha=g\sin\theta_{ij}+gf_r\cos\theta_{ij}$ 和 $\beta=0.5f_sS\rho$ 分别为与路况相关的系数和与车型相关的系数.

2.2 扩展的 DAOV 图

令 $G = \{V, A\}$ 为非对称有向图. 其中: $V = \{0\} \bigcup V_N$ 为顶点集合, 顶点"0"为出发/返回顶点[10], V_N 为订单顶点的集合; $A = \{(i,j) \mid i = 0, j \in V_N;\ \text{or}\ i \in V_N, j \in V, i \neq j\}$ 为弧集合.

出发/返回顶点"0"表示集卡从堆场的最初出发和最终返回的顶点, 但不包括集卡在两个订单之间转换时返回堆场取/送空箱的活动, 其属性为集卡的数目. 订单顶点 $i \in V_N$ 与订单 $i = 1, 2, \cdots, N$ 一一对应, 表示完成该订单所需要的连续的确定的活动[10], 主要包括载有集装箱的集卡从订单 i 的出发地行驶到其目的地, 以及相关的装箱、开箱、装卸车等活动. 订单顶点的属性为订单的信息, 此外, 记 $d_i = l(O_i, D_i)$.

弧 $(i,j) \in A$ 表示顶点 i 向顶点 j 的转换[10], 主要包括集卡以载有空箱或不载有集装箱的方式行驶. 根据车辆全重以及行驶距离表达方式的不同, 集合 A 可以分为3部分: $A = A_1 \bigcup A_2 \bigcup A_3$.

$A_1 = \{(i,j) | (i,j) \in A; i = 0\ \text{or}\ j = 0\}$ 表示集卡最初从堆场出发或最终返回堆场的弧的集合. 弧 $(i,j) \in A_1$ 对应车辆的全重 m_{ij} 和行驶距离 d_{ij}, 即

$$m_{ij} = \begin{cases} m_T + m_C,\ p_j^O = 1\ \text{or}\ p_i^D = 1; \\ m_T,\ p_j^O = 0\ \text{or}\ p_i^D = 0. \end{cases} \tag{3}$$

$$d_{ij} = \begin{cases} l(D_i, 0),\ j = 0; \\ l(0, O_j),\ i = 0. \end{cases} \tag{4}$$

其中 $l(\cdot,\cdot)$ 中的"0"为堆场的位置, 下同.

$A_2 = \{(i,j) \mid i \in V_N, j \in V_N, p_i^D = p_j^O\}$ 表示订单顶点 i 向订单顶点 j 转换并且 $p_i^D = p_j^O$ 的弧的集合. 弧 $(i,j) \in A_2$ 中集卡不需要返回堆场提取或堆放空箱, 对应的 m_{ij} 和 d_{ij} 可计算如下:

$$m_{ij} = \begin{cases} m_T + m_C,\ p_i^D = p_j^O = 1; \\ m_T,\ p_i^D = p_j^O = 0. \end{cases} \tag{5}$$

$$d_{ij} = l(D_i, O_j). \tag{6}$$

$A_3 = \{(i,j) \mid i \in V_N, j \in V_N, p_i^D \neq p_j^O\}$ 表示订单顶点 i 向订单顶点 j 转换并且 $p_i^D \neq p_j^O$ 的弧的集合. 弧 $(i,j) \in A_3$ 中集卡需要返回堆场提取或堆放空箱. 以集卡返回堆场的时间点为分界, 可将这类弧上的活动划分为两个阶段, 这两个阶段对应集卡的全重, 记为 m'_{ij} 和 m''_{ij}, 可计算如下:

$$m'_{ij} = \begin{cases} m_T + m_C,\ p_i^D = 1\ \text{and}\ p_j^O = 0; \\ m_T,\ p_i^D = 0\ \text{and}\ p_j^O = 1. \end{cases} \tag{7}$$

$$m''_{ij} = \begin{cases} m_T,\ p_i^D = 1\ \text{and}\ p_j^O = 0; \\ m_T + m_C,\ p_i^D = 0\ \text{and}\ p_j^O = 1. \end{cases} \tag{8}$$

这两个阶段对应的行驶距离记为 d'_{ij} 和 d''_{ij}, 可通过下式计算得到:

$$d'_{ij} = l(D_i, 0), \tag{9}$$

$$d''_{ij} = l(0, O_j), \tag{10}$$

此外, 记

$$d_{ij} = d'_{ij} + d''_{ij}. \tag{11}$$

2.3 混合整数非线性规划模型

引入如下决策变量:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1,\ \text{弧}\ (i,j) \in A\ \text{被选择}; \\ 0,\ \text{否则}. \end{cases}$$

y_i^O 和 y_i^D 分别为集卡在顶点 $i \in V_N$ 的出发地和目的地的活动开始时间, t_i 为集卡在顶点 $i \in V_N$ 的出发地与目的地之间的行驶时间, t_{ij} 为弧 $(i,j) \in A$ 上集卡的行驶时间.

以低碳为目标的集装箱拖车运输问题可基于扩展的 DAOV 图描述为如下模型 1:

$$\begin{aligned} \min\ & \sum_{i \in V_N} \beta \frac{d_i^3}{t_i^2} + \sum_{(i,j) \in A_1 \cup A_2} \Big(\alpha d_{ij} m_{ij} + \beta \frac{d_{ij}^3}{t_{ij}^2}\Big) x_{ij} + \\ & \sum_{(i,j) \in A_3} \Big(\alpha d'_{ij} m'_{ij} + \alpha d''_{ij} m''_{ij} + \beta \frac{d_{ij}^3}{t_{ij}^2}\Big) x_{ij}. \end{aligned} \tag{12}$$

$$\text{s.t.}\ \sum_{j \in V_N} x_{0j} \leqslant K; \tag{13}$$

$$\sum_{j \in V} x_{ij} = \sum_{j \in V} x_{ji} = 1,\ \forall i \in V_N; \tag{14}$$

$$a_i^O \leqslant y_i^O \leqslant b_i^O,\ \forall i \in V_N; \tag{15}$$

$$a_i^D \leqslant y_i^D \leqslant b_i^D,\ \forall i \in V_N; \tag{16}$$

$$y_i^O + t_i^O + t_i \leqslant y_i^D,\ \forall i \in V_N; \tag{17}$$

$$y_i^D + T_i^D + t_{ij} - y_j^O \leqslant \Big(1 - x_{ij}\Big) M,\ \forall (i,j) \in A_2 \bigcup A_3; \tag{18}$$

$$\frac{d_i}{V_{\max}} \leqslant t_i \leqslant \frac{d_i}{V_{\min}},\ \forall i \in V_N; \tag{19}$$

$$\frac{d_{ij}}{V_{\max}} \leqslant t_{ij} \leqslant \frac{d_{ij}}{V_{\min}},\ \forall (i,j) \in A; \tag{20}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\},\ t_{ij} \in \boldsymbol{R},\ \forall (i,j) \in A; \tag{21}$$

$$y_i^O \in \boldsymbol{R},\ y_i^D \in \boldsymbol{R},\ t_i \in \boldsymbol{R},\ \forall i \in V_N. \tag{22}$$

其中: 目标函数 (12) 极小化碳排放总量, 以车辆的有效功表示, 其第 1 部分对应订单顶点上的碳排放量, 这里略去了与行驶时间无关的常数部分, 后两部分对应弧上的碳排放量; 约束 (13) 为集卡的数量限制; 约束 (14) 表示每个订单顶点必须被访问且只被访问一次; 约束 (15) 和 (16) 分别为订单顶点的出发地和目的地的时间窗约束, 而且集卡在同一顶点的出发地和目的地的活动开始时间还需满足约束 (17); 约束 (18) 为由同一辆集卡访问的两个相邻订单顶点的访问时间约束, M 为一个给定的足够大的常数, 且有

$$T_i^D = \begin{cases} t_i^D,\ \forall (i,j) \in A_2, \\ t_i^D + t,\ \forall (i,j) \in A_3, \end{cases} \tag{23}$$

注意到对于由同一辆集卡访问的顶点而言, 访问时间随访问顺序的增加而增加, 因此, 约束 (17) 和 (18) 共同消除了运输任务顶点集 V_C 内的回路, 保证所有回

路自顶点“0”出发, 并最终返回顶点“0”; 式(19)～(22)为决策变量的取值范围.

3 基于时间窗离散化的求解算法

连续型非线性规划模型在一定情形下可以通过离散化的方法得到近似的线性模型, 从而应用线性规划的方法和工具对其进行求解. 受文献[7,12-14]的启发, 本节基于时间窗离散化的方法对模型1进行转化. 以给定长度η分割模型1中的每一个时间窗, 分别得到若干个离散的时间点, 例如, 某订单i的出发地时间窗$[a_i^O, b_i^O]$可以离散为$a_i^O, a_i^O+\eta, a_i^O+2\eta, \cdots, a_i^O+\Big(\Big\lceil\dfrac{b_i^O-a_i^O}{\eta}\Big\rceil-1\Big)\eta, b_i^O$等共$\Big\lceil\dfrac{b_i^O-a_i^O}{\eta}\Big\rceil+1$个时间点, 其中$\lceil\cdot\rceil$为向上取整. 各订单出发地时间窗离散后的所有时间点编号集合记为O^s. 其中: 第$i\in O^s$个时间点对应的原订单编号为$\delta(i)$, 对应离散后的时间点为Y_i^O. 类似地, 各订单目的地时间窗离散后的所有时间点编号的集合记为D^s. 其中: 第$i\in D^s$个时间点对应的原订单编号为$\delta(i)$, 对应离散后的时间点为Y_i^D.

令$V_N^r=\{(i,j)\mid i\in O^s, j\in D^s, \delta(i)=\delta(j)\}$中的任一$(i,j)\in V_N^r$表示集卡在$Y_i^O$时刻从订单$\delta(i)\in V_N$的出发地开始活动, 在$Y_j^D$时刻到达其目的地. 集卡在$O_{\delta(i)}$与$D_{\delta(j)}$之间的行驶时间记为$Y_j^D-Y_i^O-t_{\delta(i)}^O$, 如果该时间在区间$\Big[\dfrac{d_{\delta(i)}}{V_{\max}}, \dfrac{d_{\delta(i)}}{V_{\min}}\Big]$内, 则可根据式(4)计算其相应的碳排放量; 如果该时间大于$\dfrac{d_{\delta(i)}}{V_{\min}}$, 则集卡需要以最低速度$V_{\min}$行驶, 以避免不必要的等待, 由式(3)计算其碳排放量; 如果该时间小于$\dfrac{d_{\delta(i)}}{V_{\max}}$, 则集卡即使以最大速度$V_{\max}$行驶, 仍不能在$Y_j^D$时刻之前抵达, 因而令其对应的碳排放量为$\infty$. 综上所述, $(i,j)\in V_N^r$对应的碳排放量可描述为

$$Q_{ij}=\begin{cases}\beta d_{\delta(i)}V_{\min}^2,\ \varDelta_{\rm DO}\geqslant\dfrac{d_{\delta(i)}}{V_{\min}};\\ \beta\dfrac{d_{\delta(i)}^2}{(\varDelta_{\rm DO})^2},\ \dfrac{d_{\delta(i)}}{V_{\max}}\leqslant\varDelta_{\rm DO}<\dfrac{d_{\delta(i)}}{V_{\min}};\\ \infty,\ \varDelta_{\rm DO}\leqslant\dfrac{d_{\delta(i)}}{V_{\max}}.\end{cases}\tag{24}$$

其中: 常量部分已略去, $\varDelta_{\rm DO}=Y_j^D-Y_i^O-t_{\delta(i)}^O$.

令$A_1^r=\{(i,j)\mid i=0, j\in O^s; \text{or } i\in D^s, j=0\}$中的任一$(i,j)\in A_1^r$表示集卡最初从堆场出发, 在$Y_j^O$时刻到达订单$\delta(j)\in V_N$的出发地; 或在$Y_i^D$时刻从订单$\delta(i)\in V_N$的目的地开始活动并最终返回堆场. 因为堆场无访问时间窗限制, 所以$(i,j)\in A_1^r$对应的碳排放量如下:

$$Q_{ij}=\begin{cases}\alpha d_{i,\delta(j)}m_{i,\delta(j)}+\beta d_{i,\delta(j)}V_{\min}^2,\ i=0,\ j\in O^s;\\ \alpha d_{\delta(i),j}m_{\delta(i),j}+\beta d_{\delta(i),j}V_{\min}^2,\ i\in D^s,\ j=0.\end{cases}\tag{25}$$

类似地, 令$A_2^r=\{(i,j)\mid i\in D^s, j\in O^s, \delta(i)\neq\delta(j), p_{\delta(i)}^D=p_{\delta(j)}^O\}$, $A_3^r=\{(i,j)\mid i\in D^s, j\in O^s, \delta(i)\neq\delta(j), p_{\delta(i)}^D\neq p_{\delta(j)}^O\}$.

$$Q_{ij}=\begin{cases}\alpha d_{\delta(i),\delta(j)}m_{\delta(i),\delta(j)}+\beta d_{\delta(i),\delta(j)}V_{\min}^2,\\ \qquad\varDelta_{\rm OD}\geqslant\dfrac{d_{\delta(i),\delta(j)}}{V_{\min}};\\ \alpha d_{\delta(i),\delta(j)}m_{\delta(i),\delta(j)}+\beta\dfrac{d_{\delta(i),\delta(j)}^3}{\varDelta_{\rm OD}^2},\\ \qquad\dfrac{d_{\delta(i),\delta(j)}}{V_{\max}}\leqslant\varDelta_{\rm OD}<\dfrac{d_{\delta(i),\delta(j)}}{V_{\min}};\\ \infty,\ \varDelta_{\rm OD}<\dfrac{d_{\delta(i),\delta(j)}}{V_{\max}},\end{cases}\tag{26}$$

其中$\varDelta_{\rm OD}=Y_j^O-Y_i^D-T_{\delta(i)}^D$.

任一$(i,j)\in A_2^r\bigcup A_3^r$表示集卡在$Y_i^D$时刻从订单$\delta(i)\in V_N$的目的地开始活动, 在$Y_j^O$时刻到达订单$\delta(j)\in V_N$的出发地. 集卡在$D_{\delta(i)}$与$O_{\delta(j)}$之间的行驶时间为$Y_j^O-Y_i^D-T_{\delta(i)}^D$, 类比式(24), $(i,j)\in A_2^r\bigcup A_3^r$上对应的碳排放量可描述为式(26). 引入决策变量

$$w_{ij}=\begin{cases}1,\ 选择(i,j)\in V_N^r;\\ 0,\ 其他.\end{cases}$$

$$x_{ij}=\begin{cases}1,\ 选择(i,j)\in A^r;\\ 0,\ 其他.\end{cases}$$

则模型1可描述为如下模型2:

$$\min\sum_{(i,j)\in V_N^r}Q_{ij}w_{ij}+\sum_{(i,j)\in A^r}Q_{ij}x_{ij}.\tag{27}$$

$$\text{s.t.}\ \sum_{j\in O^S}x_{0j}\leqslant K;\tag{28}$$

$$\sum_{\substack{j\in D^s\bigcup\{0\}\\ \delta(i)\neq\delta(j)}}x_{ji}=\sum_{\substack{j\in D^s\\ \delta(i)=\delta(j)}}w_{ij},\ \forall i\in O^s;\tag{29}$$

$$\sum_{\substack{j\in O^s\\ \delta(i)=\delta(j)}}w_{ji}=\sum_{\substack{j\in O^s\bigcup\{0\}\\ \delta(i)\neq\delta(j)}}x_{ij},\ \forall i\in D^s;\tag{30}$$

$$\sum_{\substack{i\in O^s\\ \delta(i)=\delta(j)=k}}\sum_{j\in D^s}w_{ij}=1,\ \forall k\in V_N;\tag{31}$$

$$\Big(Y_i^O+T_{\delta(i)}^O+\frac{d_{\delta(i)}}{V_{\max}}-Y_j^D\Big)w_{ij}\leqslant 0,\ \forall(i,j)\in V_N^r;\tag{32}$$

$$\Big(Y_i^D+T_{\delta(i)}^D+\frac{d_{\delta(i)\delta(j)}}{V_{\max}}-Y_j^O\Big)x_{ij}\leqslant 0,\quad\forall(i,j)\in A_2^r\bigcup A_3^r;\tag{33}$$

$$w_{ij}\in\{0,1\},\ \forall(i,j)\in V_N^r;\tag{34}$$

$$x_{ij}\in\{0,1\},\ \forall(i,j)\in A^r.\tag{35}$$

其中: 目标函数(27)对应式(12), 两者的第1部分相对应, 前者的第2部分对应后者的剩余部分; 约束(28)对应式(13); 约束(29)和(30)分别保证同一时刻进入和离开同一个地点的弧的数量相等; 约束(29)～(31)保证每个订单必须被访问且只被访问一次, 对应式(14); 约束(32)和(33)对应式(17)和(18); 约束(34)和(35)为决策变量的取值范围. 该模型为纯整数(0-1)线性规划模型.

4　实验与分析

4.1　实验设置

本节对建立的模型以及求解算法进行测试. 所有的实验均在英特尔酷睿 i7-2 600 四核 CPU (3.4 GHz), 8 GB 内存 (2.99 GB 可用), 32 位 Win 7 操作系统的个人计算机上运行, 其优化软件为 Lingo 11.0. 其中: 模型生成器的最大内存使用量设为 512 MB, 最长的求解时间设为 600 s, 输出水平设为 Terse. 根据中国重汽 ZZ4186N361MD1H 型集卡和挂车、集装箱的典型情形, 令 $m_T = 11\,\mathrm{t}$, $m_C = 3.9\,\mathrm{t}$, $S = 7\,\mathrm{m}^2$. 根据文献 [4, 7], 设 $\rho = 1.225\,\mathrm{kg/m}^3$, $f_s = 0.7$, 各路段的系数 $\theta = 0$, $f_r = 0.01$, $V_{\min} = 50\,\mathrm{km/h}$, $V_{\max} = 90\,\mathrm{km/h}$. 由于客户的位置和运输时间窗等数据涉及商业机密, 难以获得, 一般采用随机算例测试模型和算法. 这种方法能够满足验证模型和算法有效性的要求, 因此被广泛使用, 如文献 [3-4, 6-11, 13-14]. 参照文献 [10, 14] 等的生成方法, 应用 VBA 语言在 Excel 文件中生成订单的信息. 堆场、客户、港口等地点的横纵坐标在区间 [0, 150] (单位: km) 内随机生成, 装车/卸车时间为 5, 装箱/开箱时间在区间 [5, 60] 内随机生成, a_i^O 在区间 [0, 240] 内随机生成, 时间窗的宽度为区间 [1, 120] 中的随机数. 所有装/卸车时间、装箱/开箱时间和时间窗的单位均为 min, 精确到 1 min. p_i^O 和 p_i^D 取 1 的概率为 0.5, 生成为空箱订单的概率设为 0.1.

4.2　模型求解

首先, 随机生成 10 个不同规模的算例, 即算例 1 ～算例 10, 由文献 [10, 12, 14] 可知, 一个中小型车队每天处理的集装箱数量大约为 75 个, 故最大规模设为 100 个. 分别进行直接求解 (即采用全局求解器求解模型 1) 和时间窗离散化后求解 (即求解模型 2). 各算例的基本信息、直接求解的结果, 以及时间窗离散化算法中的参数和求解结果如表 1 所示.

表 1　直接求解与时间窗离散化求解对比

算例	规模	直接求解		时间离散化的方法							
					UC		OC		本文方法		
		$\mathit{\Gamma}_0$	π_0	η	$\mathit{\Gamma}_{\rm UC}$	$\pi_{\rm UC}$	$\mathit{\Gamma}_{\rm OC}$	$\pi_{\rm OC}$	$\mathit{\Gamma}_1$	π_1	Imp / %
1	5	1	325.22	1	8	324.79	12	325.66 (0.997 3)	10	325.22 (0.998 7)	0.14
2	10	8	792.30	1	16	792.29	16	792.59 (0.999 6)	19	792.30 (1.000 0)	0.04
3	15	47	979.71	2	11	979.70	11	981.11 (0.998 6)	14	979.71 (1.000 0)	0.14
4	20	96	1 382.69	2	17	1 381.59	18	1 384.06 (0.998 2)	25	1 382.77 (0.999 1)	0.09
5	25	428	1 700.32	3	15	1 698.35	15	1 702.18 (0.997 8)	19	1 700.33 (0.998 8)	0.11
6	30	600	NA	3	20	2 190.48	21	2 204.05 (0.993 8)	27	2 192.84 (0.998 9)	0.51
7	40	600	NA	5	14	3 173.39	14	3 221.64 (0.985 0)	21	3 207.70 (0.989 3)	0.43
8	50	600	NA	5	21	3 273.30	21	3 538.20 (0.925 1)	30	3 300.31 (0.991 8)	6.72
9	75	600	NA	7	21	5 040.23	22	5 196.67 (0.969 9)	33	5 074.10 (0.993 3)	2.36
10	100	600	NA	10	25	5 578.32	25	5 744.43 (0.971 1)	28	5 614.40 (0.993 6)	2.26

表 1 中: UC 为应用文献 [12,14] 离散方法松弛约束得到的模型, OC 为加强约束得到的模型; $\pi_{\rm UC}$ 为模型所求目标值的下限值, $\pi_{\rm OC}$ 为模型所求目标值的上限值 (单位: kWh); $\mathit{\Gamma}$ 为求解时间 (单位: s); $(\cdot)$ 内的值为目标值的下限值与该列所使用方法得到的目标值的比值, 比值越接近于 1 表示所求得解越好; Imp $= \dfrac{\pi_1 - \pi_{\rm OC}}{\pi_{\rm OC}} \times 100\%$ 表示在同等离散宽度条件下, 本文得到的最优解与使用文献 [12,14] 中的方法所得最优解相比的提高比例.

需要说明的是, 实验中定长的设置根据问题规模而定. 只要离散化时间窗后生成的模型所占内存不超出求解软件 Lingo 求解器的内存, 则定长设置得越短, 求解的精度越高[13]. 考虑到实际应用, 在本实验中设定长 $\eta \approx$ 订单规模/10 (单位: min). 因为定长设置过小, 求解规模受 Lingo 求解器内存的限制无法太大; 若定长设置过大, 则求解精度无法保证. 综上所述, 将定长最大设置为 10, 订单最大规模设置为 100. 可见, 当问题的规模比较小时, 直接求解可得各问题 (算例 1 ～算例 5) 的最优解; 当问题的规模比较大时, 即订单的数量大于 30, 直接求解的方法无法在 10 min 内给出问题的最优解, 事实上也未能给出可行解. 然而, 基于时间窗离散化的方法可以在很短的时间内 (基本不超过 30 s) 求得任何一个问题的近优解. 而且, 对于直接求解方法已经给出最优解的算例 (算例 1 ～算例 5), 时间窗离散化的方法给出的目标函数值与最优目

标值的偏差很小, 不足0.1%. 对于直接求解无法给出的最优解, 本文中的时间窗离散化方法与目标值的下限非常接近, gap $= 1 - \dfrac{\pi_{\mathrm{UC}}}{\pi_1}$ 最大为1.07%, 最小为0.11%. 可见, 本文中时间窗离散化的方法给出的解的精度很高, 基本上达到了理论上的最优解. 与文献[12,14]中离散方法相比, 在同样离散条件下, 本文中的离散方法所求得的结果有明显提高, 最高提高了6.72%. 上述结果表明了本算法的有效性.

4.3 与给定车辆行驶速度情形对比

本节将本文研究情形(车辆速度为决策变量)与给定车辆速度情形对比. 根据4.1节的设置重新生成10个中等规模的算例, 每个算例包含50个订单. 对于每一个订单, 分别按速度为决策变量的情形($V_{\min} = 50\,\mathrm{km/h}$, $V_{\max} = 90\,\mathrm{km/h}$)和给定速度的情形进行求解. 对于给定速度的情形, 如参考文献[4,7,11]等, 车辆的经济速度取如下3种不同值: 50 km/h, 60 km/h, 70 km/h. 采用时间窗离散化算法进行求解, 时间窗离散化宽度取5 min. 各情形下10个算例得到的目标函数值和实际使用车辆数的平均值如表2所示.

表 2 与给定车辆速度情形对比

评价指标	决策速度的情形	给定速度情形 km/h		
		50	60	70
目标均值/kWh	3 568.36	3 658.60	4 265.84	5 010.86
使用车辆均值	39.5	42.0	41.0	40.1

可见, 车辆速度为给定值时, 随着给定车辆速度的增加, 实际使用的车辆数目的平均值会下降, 然而目标函数值(碳排放量)的均值会随之上升. 相比之下, 在行驶速度为决策变量的情形下, 使用的车辆数目最小, 且碳排放量也最低. 原因是: 在这种情形下, 某些行驶路段会采取较低的速度而降低碳排放量, 而另外某些路段会采取较高的速度而减少车辆使用数目, 从而也在某种程度上避免了车辆的空驶. 上述分析进一步验证了本文所提出的模型和算法的有效性.

5 结 论

本文对一类以低碳为目标的集装箱拖车运输问题进行了研究. 通过对DAOV图进行扩展, 将该问题描述为一个混合整数非线性规划模型, 设计了一种基于时间窗离散化的求解算法. 实验表明: 所提出的方法能够在很短时间(大约0.5 min)内求得实际规模问题的近似最优解, 且该解与理论上的最优解的差距很小. 此外, 与给定车辆速度的情形对比进一步验证了所提出模型的有效性.

本文可以展开跟进研究, 例如考虑道路拥堵程度的影响、不同任务类型的优先权不同, 以及综合考虑环境成本与经济成本的运输等.

参考文献(References)

[1] Piecyk M I, McKinnon A C. Forecasting the carbon footprint of road freight transport in 2020[J]. Int J of Production Economics, 2010, 128(1): 31-42.

[2] Figliozzi M. Vehicle routing problem for emissions minimization[J]. Transportation Research Record: J of the Transportation Research Board, 2010, 2197: 1-7.

[3] Kopfer H W, Schönberger J, Kopfer H. Reducing greenhouse gas emissions of a heterogeneous vehicle fleet[J]. Flexible Services and Manufacturing J, 2014, 26(1/2): 221-248.

[4] 杨培颖, 唐加福, 于洋, 等. 面向最小碳排放量的接送机场服务的车辆路径与调度[J]. 自动化学报, 2013, 39(4): 424-432.
(Yang P Y, Tang J F, Yu Y, et al. Minimizing carbon emissions for vehicle routing and scheduling in picking up and delivering customers to airport service[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(4): 424-432.)

[5] Bauer J, Bektas T, Crainic T G. Minimizing greenhouse gas emissions in intermodal freight transport: An application to rail service design[J]. J of the Operational Research Society, 2010, 61(3): 530-542.

[6] Zhang H, Zhang R, Huang M, et al. Modeling and analyses of container drayage transportation problem with the objective of low carbons[C]. Proc of 27th Chinese Control and Decision Conf. Qingdao: IEEE Press, 2015: 4654-4658.

[7] Bektas T, Laporte G. The pollution-routing problem[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2011, 45(8): 1232-1250.

[8] Zhang R, Yun W Y, Moon I. A reactive tabu search algorithm for the multi-depot container truck transportation problem[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2009, 45(6): 904-914.

[9] Sterzik S, Kopfer H. A tabu search heuristic for the inland container transportation problem[J]. Computers & Operations Research, 2013, 40(4): 953-962.

[10] Zhang R, Lu J C, Wang D. 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.

[11] Xue Z, Zhang C, Lin W H, 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.

[12] Wang W F, Regan A C. Local truckload pickup and delivery with hard time window constraints[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2002, 36(2): 97-112.

[13] Fagerholt K, Laporte G, Norstad I. Reducing fuel emissions by optimizing speed on shipping routes[J]. J of the Operational Research Society, 2009, 61(3): 523-529.

[14] Zhang R, Yun W Y, Kopfer H. Heuristic-based truck scheduling for inland container transportation[J]. OR Spectrum, 2010, 32(3): 787-808.

(责任编辑: 闫 妍)