



近港集疏运道路货运集卡分时畅行策略仿真*

陆森嘉¹, 陈昊洋¹, 张婧卿², 涂辉招¹

(1. 同济大学交通运输工程学院, 上海 201804; 2. 上海国际港务(集团)股份有限公司, 上海 200080)

摘要: 随着国际贸易的快速发展, 各大港口集装箱吞吐量快速增长。集装箱吞吐量的快速上升使得各大港口集疏运能力出现瓶颈, 导致集疏运道路产生交通拥堵及交通事故等问题。针对上述问题, 结合洋山港区集疏运道路环境、港外集疏运中心建设方案等因素, 提出集卡预约系统、智能集卡编队等分时畅行策略。基于洋山港区集疏运道路现状进行远期流量预测, 模拟了远期流量场景和专用车道场景, 采用 SUMO 作为仿真软件对两类场景下分时畅行策略应用效果进行验证。仿真结果表明, 基于集卡预约系统策略, 远期流量场景能够实现高峰小时不均匀系数降低 25%, 达到了较好的削峰填谷效果; 基于智能集卡编队策略, 专用车道场景可实现单车道饱和状态下平均小时通行能力提升 98.1%, 有效提升了集疏运通道通行能力。

关键词: 港口集疏运问题; 集卡预约系统; 智能集卡编队; SUMO 交通仿真

中图分类号: U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)06-0171-08

Simulation of container trucks' time-sharing strategies applied on near-port collection and distribution roads

LU Miaojia¹, CHEN Haoyang¹, ZHANG Jingqing², TU Huizhao¹

(1. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Shanghai International Port (Group) Co., Ltd., Shanghai 200080, China)

Abstract: With the rapid development of international trade, the container handling capacity of major ports is growing rapidly. The rapid increase in container handling capacity has caused bottlenecks in the collection and distribution roads of the major ports, resulting in traffic congestion and accidents. This study proposes time-sharing strategies such as the container truck appointment system and intelligent container truck platooning combined with the collection and distribution road environment in Yangshan Port and the construction scheme of the collection and distribution center outside the port. In this study, the future traffic flow is predicted based on the current road conditions in Yangshan Port. Then, the long-term traffic flow scenario and the specialized lane scenario are simulated, and the SUMO is used as the simulation software to verify the effectiveness of time-sharing strategies in the two scenarios. The simulation results show that, based on the strategy of the container truck appointment system, the non-equilibrium factor in the peak hour can be reduced by 25% in the long-term traffic flow scenario, and the objective of peak-load shifting is achieved. Based on the intelligent container truck platooning strategy, the average hourly traffic capacity is increased by 98.1% in one single lane in the specialized lane scenario, and thus the traffic capacity of the collection and distribution roads can be effectively improved.

Keywords: port collection and distribution problems; container truck appointment system; intelligent container truck platooning; SUMO traffic simulation

收稿日期: 2022-08-17

*基金项目: 上海市科委科研项目 (20dz1203000); 上海市交通委课题 (JT2021-KY-004)

作者简介: 陆森嘉 (1990—), 女, 博士, 副研究员, 研究方向为港口物流、无人配送等。

随着国际贸易的快速发展,各大港口集装箱吞吐量快速增长,使得各大港口集疏运能力出现瓶颈,导致集疏运道路产生交通拥堵及交通事故等诸多问题。以上海洋山港为例,洋山港是上海国际航运中心的重要组成部分,2021年港区全年吞吐量达2 280万TEU,刷新开港以来记录。洋山港区集装箱吞吐量占上海港全港的48.5%,其中陆路集疏运比例占洋山港总运输量的50%。由于其位于小洋山岛上,陆路集疏运均必须经东海大桥与上海市连接。洋山港集疏港道路的交通特性和地理位置的特殊性使得集疏运通道具有集卡占比高、替代通道少、高峰较为集中的特点,从而引发了高峰期道路拥堵、集卡单程空载率高、交通事故多发且积极应对措施不足等问题。仅2021年8—12月,东海大桥发生重大以上交通事故5次,对港口正常的集疏港作业造成了严重影响^[1-2]。港口集疏运道路现存问题很大程度上制约了港口未来的发展,因此缓解近港集疏运道路问题、提高集疏运通道服务水平对大型港口的运营与发展具有十分重要的战略意义。

1 港口公路货运集卡分时畅行优化方法

目前国内外关于货运集卡分时畅行引导措施主要包括刚性引导与柔性引导两方向。根据港口实际情况,刚性引导包括智能集卡编队、港外集疏运中心建设等措施;柔性引导包括建立动态卡车预约系统等措施。

1.1 卡车预约系统

卡车预约系统(Truck Appointment System, TAS)是一个依赖时空概念的二维决策系统,Murty等^[3]是最早探求外部卡车到达时间安排的研究团队之一,他们在香港国际码头开发了一个以30 min为预约时间窗口的TAS系统,后续的研究主要包括:1)基于拥堵情况划分的时间窗口,鼓励集卡在预约时避开高峰期;2)基于等长的预约窗口,研究其带来的拥堵情况。

在基于拥堵情况划分的时间窗口方面,Giuliano等^[4]针对洛杉矶长滩港进行研究,分析了

预约系统在长滩港最初得到应用时带来的影响,此时预约系统仅鼓励司机在非高峰时段预约抵港,并得出在预约利用率仅40%时,预约系统对港口的卡车周转时间无明显影响。在划分为等长的预约窗口研究方面,Huynn^[5]通过统计每个时间窗口到达的卡车数量以研究港口的交通密度,Torkjazi等^[6]则通过平均分配港口作业时间研究了TAS对闸口与堆场拥堵的缓解效应。但在确定单位时间窗口的配额后,受司机行为、天气状况等诸多因素影响,窗口内每时每刻到达的卡车数量仍然不可预测。为了使优化配额以满足实际运行中不稳定的卡车到达需求,并使决策过程尽可能符合实际,曾庆成等^[7]试图缩短窗口长度,并使堆场服务系统对内外集卡同时服务,缩短了集卡闸口等待时间,但未考虑集卡失约情况。

以上学者基于港口内部作业、闸口排队以及内外集卡协作等多个方面对港口的卡车预约系统进行研究,但均未考虑集疏港道路的交通特性等因素。作为本文的研究对象,洋山港及其集疏运道路与其他港口存在很大的不同,作为洋山港区陆路集疏运的唯一通道,东海大桥的交通状况会对港区集疏运产生很大影响,因此在构建集卡预约系统时,应首先考虑集卡流量对东海大桥这一关键集疏运道路的影响,并考虑港内作业与服务能力,对按照预约时段到达的集卡车辆优先服务。

1.2 智能集卡编队

近年来,港口内部智能集卡成为港口提升自动化水平的方向。就国内而言,宁波舟山港、上海洋山港、青岛港、厦门港、深圳港等港口的内部智能集卡陆续投入应用^[8]。智能集卡通过协同自适应巡航控制(Cooperative Adaptive Cruise Control, CACC)完成智能集卡编队,从而提高交通效率^[9]、提高交通安全性^[10]、降低燃油损耗^[11]。Shladover等^[12]使用模拟平台AIMSUN研究6.5 km单车道高速公路上的CACC车辆发现,若CACC车辆的占比达到100%,高速公路单车道容量将会达到4 000辆/h;在不采用CACC车辆情况下,单车道容量仅为2 000辆/h,相比提升100%。Fernandes

等^[13]基于 SUMO 平台实现了自动驾驶汽车编队的仿真,研究了编队车辆的微观交通特性与合适的队列车辆间距。本文拟采用 SUMO 平台对洋山港区及其集疏运道路进行建模以模拟智能集卡编队流线以及验证智能集卡编队应用对道路通行能力带来的影响。

1.3 洋山港货运集卡分时畅行策略应用现状

洋山四期自动化码头已实施预约作业模式^[14],包括外集卡预约进港等措施,根据港内堆场作业情况、内外集卡协同作业情况等为外集卡提供相应的预约时段。但现有预约制度本质上只是为了提高作业效率,能够在高流量来临之前做好调度准备。

根据上海交通管理发布^[15],自2022年7月18日起,东海大桥实施自动驾驶测试专用车道管理措施。自动驾驶测试专用车道设置在东海大桥最外侧车道,专用时段为工作日10:00—13:00。现有编队策略以5辆集卡为1个编组,实现L4级别的自动驾驶,以探究自动驾驶车辆的管理、调度方法与自动驾驶场景下的道路通行效率。

除外集卡预约进港措施与编队自动驾驶措施之外,洋山港区拟利用陆端临港地区建设港外集疏运中心,在港口作业忙期或集疏运道路流量高峰期主要承担高峰期与特殊情况下外集卡的装卸与集装箱堆存作业以及智能集卡的编队整备作业,并在东海大桥车流量较小时通过智能集卡完成集装箱在集疏运中心与码头之间的运输过程。

1.4 洋山港货运集卡分时畅行总体策略

本文以提高近港集疏运道路通过能力和降低近港集疏运道路高峰不均衡系数为目标,探究集卡预约系统、智能集卡编队两种分时畅行策略对洋山港区集疏运的改善作用。基于 SUMO 模拟未来洋山港区陆路集疏运流量到达设计饱和状态下的远期流量场景以及专用车道场景,验证不同场景下两种策略的有效性。

2 洋山港区集疏运道路远期高峰日流量分析

本文研究区域主要集中在洋山港区以东海大桥为主的进出港集疏运道路,东海大桥作为连接

上海临港区域与大小洋山港区的唯一陆路通道,长久以来是洋山港区货运能力的瓶颈咽喉,集疏港交通占东海大桥总交通量的85%以上^[16]。本文所采用数据由洋山港区运营方与参与数据统计测试的运输企业提供,包括外集卡、现有内集卡进港闸口制卡数据与上海区域内卡车数据。本文针对近港集疏运道路进行数据提取,主要范围包括深水港物流园区(拟建集疏运中心所处地段)、洋山港海关查验区、东海大桥。

据上海市政设计研究院预测,2035年进港方向集卡高峰日交通量将达到1.9万辆,日交通量达到7.7万pcu。东海大桥设计承载能力为单向6000pcu,届时高峰期道路服务水平将达到三级,出现拥堵。基于以上高峰日集卡流量预测结果,结合2019年8月进港闸口集卡制卡数据进行模拟分配,以1.9万辆为高峰日交通量进行分配,分配结果见图1。

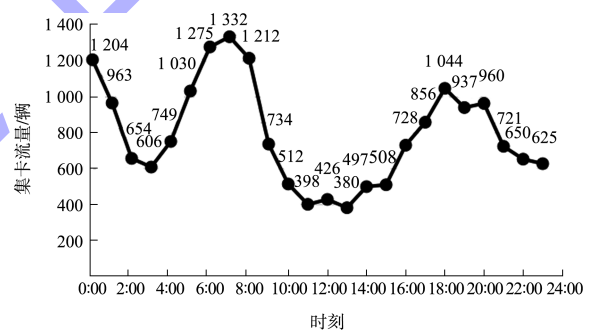


图1 远期高峰日集卡分时进港流量预测

进港流量峰值出现在6:00—8:00,分别为1275、1332、1212辆集卡,18:00—20:00的次高峰相比6:00—8:00高峰流量约低20%。集卡进港高峰小时的出现主要与发货方装车时间相关。上海港的货物主要来源于苏南和浙北地区。若集卡在晚上装车发货,则一般在第2天早上6:00—8:00进港;若集卡在白天装车发货(如苏州工业园区一般在下午装车发货),则一般在晚上18:00—20:00进港。

3 分时畅行策略仿真分析

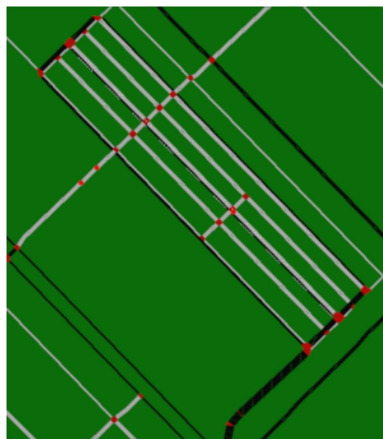
3.1 仿真环境搭建

采用 SUMO 对分时畅行策略进行仿真, SUMO

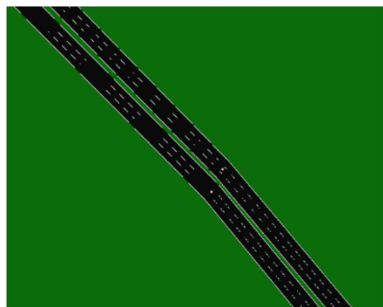
是一种微观的、基于时间间隔与驾驶行为的仿真建模工具，用于城市交通与公共交通运行的车辆建模。本文选择 IDM 模型作为跟驰模型，采用 SUMO 内置的 LC2013 模型作为换道模型。仿真场景采用 OpenStreetMap 抓取洋山港近港集疏运区域，包括入港海关查验与制卡区域、拟建集疏运中心、东海大桥 3 段。如图 2 所示，外集卡可通过海关查验与闸口区上东海大桥，智能集卡也可由集疏运中心出发由专用车道上东海大桥。以上车辆通过东海大桥路段进入洋山港港口内部区域。本文仿真车型主要参数见表 1^[17]。



a) 海关查验与闸门口



b) 集疏运中心



c) 东海大桥桥面

图 2 仿真交通路网

表 1 主要车辆参数

车辆类型	车身长度/ m	最小间隔/ m	最大速度/ (m·s ⁻¹)	最大加速度/ (m·s ⁻²)	最大制动加速度/ (m·s ⁻²)	驾驶瑕疵参数	期望车辆时间距离/s
集卡	16.5	2.5	33.33	1.0	1.5	0.5	2
普通车辆	5.0	2.5	33.33	2.6	4.5	0.5	1

3.2 现有流量仿真及结果验证

基于东海大桥交通组成并根据现有集卡交通全日分时流量进行仿真，车辆平均速度分布如图 3 所示。在仿真环境下，车辆的平均速度为 65.52 km/h，略高于现有统计结果 65.40 km/h。仿真的速度中位数为 65.41 km/h，与现有统计结果 64.90 km/h 相近。参与仿真的车辆平均速度有 90% 以上处于 60~70 km/h 的平稳运行区间。仿真结果表明，仿真模型的拟合效果较好，可用于分时畅行策略的仿真。

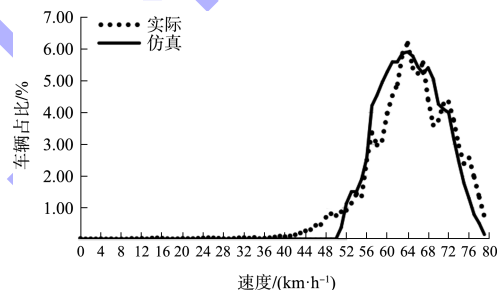


图 3 车辆平均速度分布对比

3.3 集卡预约系统策略

本策略假设所有进港的卡车都需预约且遵从系统分配的预约时间，每辆集卡每天只进港一次，不考虑由于车辆可能重复进港产生的两次或多次预约之间的时间窗要求，并且也不考虑集卡在进入码头区域后所需的装卸作业时间等参数，仅研究集卡通过查验区驶入东海大桥至下桥这一段行程过程。

本文所构建的预约模型考虑两方面的利益：一方面，港区要求远期高峰流量日下的分时段高峰流量不均衡系数能够降低 10% 以上；另一方面，集卡驾驶员希望行程时间尽可能短，并且系统所分配的预约时段不偏离其原本的进港意愿时段太多。远期高峰日流量 1.9 万辆集卡，高峰时段 1 332 辆集卡，依据式 (1) 得到高峰流量不均衡系

数为 168%。本文拟以降低高峰流量不均匀系数 25% 为目标, 依据式(1) 计算得高峰小时预约配额上限为 1 130 辆集卡。

$$\alpha = \frac{P_{\max}}{\sum p_i/H} \times 100\% \quad (1)$$

式中: α 为高峰流量不均衡系数; p_{\max} 为高峰小时流量; p_i 为分时流量; H 为全日营业小时数。在流量分配模型中, 计算集卡的行程时间损失需要获得每辆集卡的行程时间。本文采取近似拟合的方式, 通过在路网中输入不同大小的流量模拟不同时段下集卡车流的行程时间, 将单个集卡的行程时间归并为该集卡所属时段的行程时间中, 将该时段流量代入拟合函数求得近似的该时段时间损失, 作为单个集卡计算时间损失的依据。拟合函数为:

$$t_k = 32.661e^{0.0016q} \quad (2)$$

式中: t_k 为车辆的时间损失; q 为车辆被分配的预约时段的集卡流量。在得到以上预约配额与行程时间损失拟合函数的情况下, 提出集卡预约模型相关参数(表 2) 构建集卡预约模型。

表 2 预约模型参数含义

参数	含义	参数	含义
τ	时间窗口	τ_i	集卡 i 的期望到达时间窗口
i	集卡编号	n_τ	时间窗口 τ 内的预约分配车辆数
T	时间窗口集合, $T = \{1, 2, \dots, 24\}$	τ'_i	集卡 i 的预约分配时间窗口
I	集卡编号集合, $I = \{1, 2, \dots, n\}$	$c_{\text{deviation}}$	时段偏移惩罚率
n	日集卡流量	c_{tour}	行程时间惩罚率
c_τ	时间窗口 τ 内预约配额	t_τ	时间窗口 τ 内的平均时间损失

由于所构建的时间窗口是离散的, 因此定义一个二元决策变量 $x_{i,\tau}$ 以在该模型中作出决策, 该变量解释了特定集卡在某个时间窗口到达港区的情况, 描述为:

$$x_{i,\tau} = \begin{cases} 1 & (\text{集卡 } i \text{ 在时间窗口 } \tau \text{ 内有预约}) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (3)$$

基于该决策变量的构建, 对上述各参数的计算方法作以下补充, 式(4) 描述在时间窗口 τ 内的

预约分配车辆数等于在该时间窗口中有预约的集卡数量的总和:

$$n_\tau = \sum_{i \in I} x_{i,\tau} \quad (\forall \tau \in T) \quad (4)$$

式(5) 描述不同流量输入下仿真得到的行程时间损失, 统计得到回归函数作为计算每个时段平均时间损失的依据:

$$t_\tau = \frac{32.661e^{0.0016n_\tau}}{3600} \quad (\forall \tau \in T) \quad (5)$$

式(6) 描述集卡 i 的预约分配时间窗口, 由决策变量 $x_{i,\tau}$ 决定。对单一集卡 i 而言, 决策变量 $x_{i,\tau}$ 分为 24 个时段, 若集卡 i 在时段 τ 有预约, 则对应 $x_{i,\tau}$ 为 1, 若无, 则为 0。

$$\tau'_i = \sum_{\tau \in T} x_{i,\tau} \tau \quad (\forall i \in I) \quad (6)$$

作出以上补充后, 构建模型与约束如下:

$$\min f = c_{\text{deviation}} \sum_{i \in I} |\tau'_i - \tau_i| + c_{\text{tour}} \sum_{i \in I} \tau'_i t_{\tau'_i} \quad (7)$$

约束条件:

$$\sum_{\tau \in T} \sum_{i \in I} x_{i,\tau} = n \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I} x_{i,\tau} \leq c_\tau \quad (\forall \tau \in T) \quad (9)$$

$$x_{i,\tau} = 0 \text{ or } 1 \quad (\forall i \in I, \forall \tau \in T) \quad (10)$$

$$\sum_{\tau \in T} x_{i,\tau} = 1 \quad (\forall i \in I) \quad (11)$$

目标函数(7) 中, 左项为描述集卡到达时间与期望时间偏差带来的损失, $c_{\text{deviation}}$ 取文献[18] 中值为 0.124; 右项为描述集卡行程时间带来的损失, c_{tour} 取 0.976; 优化目标 $\min f$ 表示集卡到达时间与期望时间偏差带来的损失和集卡行程时间带来的损失两者加权求和最小。约束式(8) 描述所有时间窗口的预约分配车辆数之和等于当日集卡流量。约束式(9) 描述单个时间窗口内的预约分配车辆数受到该时间窗口预约配额的限制, 即被分配到该时间窗口内的集卡数之和不超过预约配额。约束式(10) 描述决策变量 $x_{i,\tau}$ 为 0~1 变量。约束式(11) 描述决策变量 $x_{i,\tau}$ 对单个集卡 i , 其和为 1, 即单个集卡 1 d 中只有一个预约分配时段。

对集卡预约模型在 Matlab 中调用 CPLEX 数学规划优化求解器进行求解, 并与分配前流量进行对比, 见图 4。

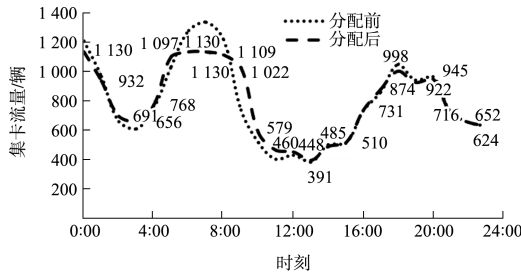


图4 预约分配前后分时段流量比较

分时段来看,模型对输入流量的分配主要集中在高峰期流量超过预约上限的部分,尤其对于出现流量极值的7:00这一时段,预约分配后每辆集卡的平均时间损失相较分配前降低26.43%,约50 s。整体来看,在正常行驶状态下,集卡总时间损失自583.34 车次·h降低至531.03 车次·h,在实现高峰流量不均匀情况改善下达到9.6%的时间损失改善(表3)。对港区而言,集卡预约系统策略实现了集卡分时进港的效果,降低了堆场设备高峰时段作业外集卡量,避免了之前外集卡作业高峰和内集卡装船作业交织时导致的对装船效率的影响。

但综合说来,通过预约实现调峰的效果对正常情况下集疏运系统的总时间损失改善不明显。

表3 预约与非预约远期流量场景仿真结果对比

场景	高峰不平衡系数/%	总时间损失/(车次·h ⁻¹)
非预约	168	583.34
预约	143	531.03
改善效果/%	-25	-9.6

3.4 智能集卡编队策略

本策略仿真探究理论情况下自动驾驶专用车道下的编队集卡通过能力。仿真场景设置为:车队作为港口内集卡,自港外集疏运中心二层通道出发,通过专用连接线连接至东海大桥,并采用专用单车道的形式享有独立路权,全程自集疏运中心出发至东海大桥下桥长达42 km。本策略采用SUMO V2X Communication Research (Platooning and CIM)项目^[19],实现车辆的自适应协同控制。采用的车辆与仿真参数设置来自于图森未来智能集卡在上海临港地区道路测试实际数据,见表4。

表4 编队自动驾驶仿真参数设置

驾驶员期望时间间隔 τ/s	编队状态下模拟驾驶员的期望时间间隔 $\tau(\text{编队})/s$	静止车辆之间最小间距 g/m	编队状态下静止车辆之间最小间距 $g(\text{编队})/m$	驾驶员瑕疵参数 σ	编队状态下驾驶员瑕疵参数 $\sigma(\text{编队})$	车辆加速度 $a/(m \cdot s^{-2})$	车辆制动力 $d/(m \cdot s^{-2})$	期望速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	车辆长度 l/m	编队容量上限 $l_p/\text{辆}$
3	0.5	2.5	0.5	0.5	0	1.7	2.5	20	16.5	6

在车辆运行状态趋于稳定时,以相关参数测算最大流量,车辆速度取期望速度。满编车队总长度为151.5 m,车队间距离为62.5 m,得到道路车辆密度为28.03 辆/km,理论通过能力为2 018.7 辆/h。为探究道路通过能力,本次仿真设置交通需求略大于理论流量上限,设定为2 100 辆集卡/h,以上文所述条件与环境下进行编队与非编队仿真。图5比较了编队与非编队集卡的速度分布。非编队仿真下,集卡的速度分布散布处于17.01~20.95 m/s,分布范围明显大于编队模式19.95~20.20 m/s,存在部分车辆运行速度明显低于平均速度,在交通系统中非常容易导致移动瓶颈的出现。检测器1、2的记录编队与非编队情况如表5所示。相较于编队仿真结果,非编队仿真平均小时流量大幅度降低,专用车道情况下平均

流量最大仅能达到745.5 辆/h,编队仿真流量较非编队仿真提高98.1%(表6)。由此可见,采用专用车道智能集卡编队的策略能够显著提高东海大桥通行能力。

表5 智能集卡编队与非编队仿真检测器记录数据

类别	检测器ID	线圈占用率/%	平均小时流量/(辆·h ⁻¹)	平均速度/(m·s ⁻¹)
编队	1	31.47	1 466.67	20.063
	2	32.83	1 487.47	20.054
	平均值	32.15	1 477.07	20.059
非编队	1	18.00	739.5	18.933
	2	18.18	751.6	18.955
	平均值	18.09	745.5	18.944

表6 智能集卡编队与非编队的特殊场景仿真结果

场景	实现流量/(辆·h ⁻¹)	平均速度/(m·s ⁻¹)
编队	1 477.17	20.059
非编队	745.5	18.944
改善效果/%	98.1	5.9

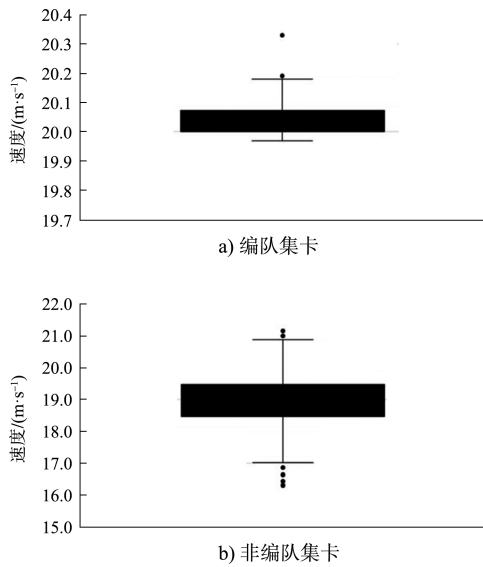


图5 编队与非编队集卡速度分布

在本仿真实例中,编队车辆期望车间距参数与前后车队之间期望间距参数分别采取了较为保守的0.5 s与3.0 s,分别对应车辆空间间距10 m与车队空间间距60 m。现有车联网通讯技术下,编队集装箱卡车之间最小可在75 km/h的速度下实现2 m的车间隔^[20],且车队间通讯距离也可相应缩短,因此在实际应用条件下,专用车道设定下的编队集卡小时交通流量相比于以上仿真结果可能仍存在较大提升空间。郝威等^[21]采用CACC专用车道的形式,在车间距参数设置为0.6 s时对自动驾驶通行能力进行测算,单车道人工驾驶车辆仿真结果为2 000辆/h,单车道自动驾驶车辆仿真结果为4 100辆/h,提升幅度约105%,与本研究的98.1%的通行能力提升效果一致。此外,随着车路协同技术的进步,智能集卡可以智慧车列(intelligent vehicle stream)的形式运行,模拟轨道交通系统的连接形式,以达到更高的道路交通流量负载。在实际运用中,出现交通事故以及道路维护等可用车道数量减少的情况下,应优先保证智能集卡编队的运行条件。

4 结论与展望

1) 远期流量场景下,应用集卡预约系统的分时畅行策略可实现高峰小时不均匀系数降低25%

且集卡总时间损失减小9.6%,达到了较好的削峰填谷效果。

2) 专用车道场景下,应用智能集卡编队的分时畅行策略,可实现单车道饱和状态下平均小时通行能力提升98.1%,有效提升了集疏运通道通行能力。

3) 本文提出的两种分时畅行策略,未来仍有需要深入研究的部分。由于港外集疏运中心仍在规划建设中,待其建设完成后,可根据建设与使用情况进一步对集卡预约系统与智能集卡编队的影响进行细化研究,例如智能电动集卡的环境效益分析、港外集疏运中心建设的投资回报比分析,并对外集卡进入集疏运中心收费等措施进行合理性论证等。

参考文献:

- [1] 昨晚东海大桥主桥面发生多车相撞事故. 新民网 [EB/OL]. (2021-11-17) [2022-05-21]. <http://newsxmb.xinmin.cn/shanghai/2021/11/17/32065068.html>
- [2] 东海大桥一土方车起火引发2公里拥堵幸无人员伤亡. 新民网. [EB/OL]. (2021-08-26) [2022-05-21]. <http://newsxmb.xinmin.cn/shanghai/2021/08/26/32015709.html>
- [3] MURTY K G, WAN Y W, LIU J Y, et al. Hongkong International Terminals gains elastic capacity using a data-intensive decision-support system [J]. *Interfaces*, 2005, 35(1): 61-75.
- [4] GIULIANO G, THOMAS O B. Reducing port-related truck emissions: The terminal gate appointment system at the Ports of Los Angeles and Long Beach [J]. *Transportation research, Part D. Transport and environment*, 2007, 12(7): 460-473.
- [5] HUYNH N N. Methodologies for reducing truck turn time at marine container terminals [M]. Texas: The University of Texas at Austin, 2005.
- [6] TORKJAZI M, HUYNH N, SHIRI S. Truck appointment systems considering impact to drayage truck tours [J]. *Transportation research (Part E). Logistics and transportation review*, 2018, 116(8): 208-228.

- [7] 曾庆成, 张笑菊, 张倩. 内外集卡协同服务的码头集卡预约优化模型[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(1): 115-122.
- [8] 梁嘉琪. 中国高等级自动驾驶港口应用研究报告[R]. 亿欧智库, 2020.
- [9] MAITI S, WINTER S, KULIK L. A conceptualization of vehicle platoons and platoon operations[J]. Transportation research, Part C. Emerging technologies, 2017, 80(7): 1-19.
- [10] RAHMAN M S, ABDEL-ATY M. Longitudinal safety evaluation of connected vehicles' platooning on expressways[J]. Accident analysis and prevention, 2018, 117(8): 381-391.
- [11] BONNET C, FRITZ H. Fuel consumption reduction in a platoon: Experimental results with two electronically coupled trucks at close spacing [R]. SAE technical paper, 2000.
- [12] SHLADOVER S E, SU D Y, LU X Y. Impacts of cooperative adaptive cruise control on freeway traffic flow [J]. Transportation research record, 2012, 2324(1): 63-70.
- [13] FERNANDES P, NUNES U. Platooning of autonomous vehicles with intervehicle communications in SUMO traffic simulator[C]//13th international IEEE conference on intelligent transportation systems, IEEE, 2010: 1313-1318.
- [14] 许特力. 洋山四期自动化码头外集卡预约进港优化措施[J]. 集装箱化, 2020, 31(Z1): 20-22.
- [15] 7月18日起东海大桥实施自动驾驶测试专用道管理措施. 上海市公安局[EB/OL]. (2022-07-14) [2022-07-28]. <https://gaj.sh.gov.cn/shga/wzXxfbGj/detail?pa=110ef360e4374a419d3b75034c9242f5ab85511d7df94df60b933f10d1fb9589>
- [16] 张波. 东海大桥车辆折算系数计算方法[J]. 交通与运输, 2020, 36(1): 96-99.
- [17] 许洋龙. 面向快速化建设的公路立交匝道最大纵坡设计[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [18] 丁一, 张成成. 集装箱码头送箱外集卡预约优化研究[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(19): 267-273.
- [19] Sraddon. SUMO V2X Communication Research (Platooning and CIM) [EB/OL]. (2022-01-06) [2022-07-13]. <https://github.com/sraddon/SUMO-V2X-Communication-Research-Platooning-and-CIM>
- [20] 卡车自动驾驶编队行驶研究报告. 北京卡达克科技中心有限公司[EB/OL]. (2020-07-13) [2022-05-21]. <https://www.shangyexinzi.com/article/2121402.html>.
- [21] 郝威, 俞海杰, 高志波, 等. 自动驾驶专用车道影响下的CACC车流管理策略[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 230-242.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第170页)

- [5] 司文静, 江福才, 刘钊, 等. 考虑多因素的沿海双向航道通过能力计算模型构建[J]. 船海工程, 2021, 50(4): 131-136.
- [6] 刘敬贤, 刘聪, 赵振, 等. 基于船种聚类的航道通过能力量化方法[J]. 交通信息与安全, 2017, 35(6): 46-53.
- [7] 王更, 许才广. 基于Flexsim的深圳港铜鼓航道通过能力仿真研究[J]. 水运工程, 2019(9): 181-185, 195.
- [8] 黄泰坤, 王元战, 李绍武, 等. 海港复式航道通过能力动态系统仿真[J]. 大连海事大学学报, 2015, 41(1): 20-26.
- [9] 周壮壮, 刘钊, 刘敬贤, 等. 基于四元船舶领域的船舶碰撞危险度模型[J/OL]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), [2022-06-21]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEV12pW9UrhTDCdPD668TevRMaD5JIIRejU2ijrScvmG2wS6pkphcdF8mb9LxqveDOMwCoA&uniplatform=NZKPT>.
- [10] 房卓, 左天立, 王达川, 等. 连云港港主航道远期适应性及通航标准[J]. 水运工程, 2017(10): 160-165, 185.
- [11] 苏华伟. 提高航道船舶进出港效率方法的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2019.

(本文编辑 赵娟)