

doi: 10.3969/j.issn.1000-2162.2018.04.017

面向集装箱码头重载车辆排队系统的碳排放仿真研究

李兵兵¹, 于 尧², 肖中新^{1*}, 葛颖恩²

(1. 安徽省环境监测中心站, 安徽 合肥 230071; 2. 上海海事大学 交通运输学院, 上海 201306)

摘 要: 在我国, 道路交通污染已成为大气环境污染的主要来源之一。相比于小型车辆, 重载车辆的排放污染往往更加严重。以集装箱卡车为例, 集卡车辆在港口、码头等处排队通过闸口的过程中会排放大量的 HC、CO 等污染物, 这些排放的气体会严重加剧所在区域的大气污染。因此, 在深入剖析集装箱码头闸口排队系统的基础上, 构建 $M/G/S/\infty/\infty/FCFS$ 排队系统模型, 并结合我国集卡车辆排放标准, 采用 MOVES 模型, 对上海港集卡车辆排队过程中的碳排放进行仿真研究, 解析连续速度变化下, CO_2 、CO 以及 THC 等碳排放污染的变化趋势与内在关联, 研究成果可为低碳交通管理提供重要的决策依据。

关键词: 低碳; 排队论; 碳排放仿真; MOVES 模型

中图分类号: U491.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-2162(2018)04-0103-06

Simulation of carbon emission for heavy-duty vehicle queuing system of container port

LI Bingbing¹, YU Yao², XIAO Zhongxin^{1*}, GE Ying'en¹

(1. Anhui Environmental Monitoring Center Station, Hefei 230071, China;

2. College of Transport and Communications, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In China, road traffic pollution has become one of the main sources of atmospheric pollution. The heavy-duty vehicles often load tens of tons, and single one exhaust pollution is several times heavier than light-load vehicle. For example, container trucks as one type of heavy vehicles, often seriously aggravate the regional air pollution by its exhaust emission in the process of queue waiting in the port or terminal. Based on the analysis of the queue queuing system of container terminal, in this paper the MOVES model was used to simulate the carbon emissions during the queuing process of the Shanghai Port. Furthermore, the $M/G/S/\infty/\infty/FCFS$ queuing model was proposed to analyze the trend and intrinsic relationship of the three types of carbon emissions, such as CO_2 , CO and THC under continuous speed change. The research results could provide important decision-making basis for low-carbon traffic management.

Keywords: low-carbon; queue length theory; carbon emission simulation; MOVES

随着我国货运交通的快速发展, 重型车辆在公路物流运输中所占比例日益增加。上海港作为全球吞

收稿日期: 2017-06-08

基金项目: 安徽省环境保护厅公益项目(2015-003)

作者简介: 李兵兵(1977-), 男, 安徽桐城人, 安徽省环境监测中心站工程师; * 肖中新(通信作者), 安徽省环境监测中心站高级工程师, E-mail: 345160355@qq.com.

吐量排名第一的港口^[1],其集装箱的运输与转运需求巨大.而在满足货运需求的同时,大量的集装箱卡车(以下简称集卡)所排放的尾气对港口乃至临近腹地区域都产生了严重的环境污染.单辆集卡的尾气排放几乎相当于30辆轻型车辆排放总和^[2],因此探讨如何降低港口区域集卡车辆的碳排放,真正实现“资源节约、环境友好型交通发展”^[3]非常必要.

码头闸口是审验、分配(堆场备位)集卡车辆进出的关键环节,同时也是造成集卡车辆排队的交通瓶颈.相比于行驶状态,集卡车辆在闸口排队等候过程中,会排放出更多的碳氢化物(THC)和碳氧化物(CO_x).根据洛杉矶港调查报告(2012)可知,全港年度 CO_2 排放总量为 $8.57 \times 10^5 \text{ t}$,其中集卡车辆碳排放量为 $3.72 \times 10^5 \text{ t}$,占 CO_2 排放总量的比例达43.4%^[4].为解决高效的港口运作与集卡车辆污染排放之间的矛盾,达到降低港口的总能耗与碳排放总量下降的目标,亟须对码头能耗的关键环节,即码头闸口集卡排队时的碳排放量进行控制.因此,明确闸口集卡排队过程的内在演化规律,解析集卡车辆的碳排放规律已成为集装箱码头亟待解决的问题.

1 现有研究趋势

1.1 集装箱码头闸口排队

集装箱码头闸口是码头与港区道路的连接节点,是外部集卡转运集装箱进出堆场必经的作业通道.现有研究多集中在以提高闸口作业能力、缩短集卡车辆等待时间为目的的优化问题领域.如国外一些学者提出了采取预约制以降低闸口拥堵的方法^[5-7],并证明了预约的实施可有效降低集卡排队的数量;Guan等^[8]则从排队论角度出发,利用 $M/E_k/c$ 排队模型计算集卡排队的平均队长,并构建了优化模型;此外,曾庆成、许巧莉等^[9-10]也分别建立了排队网络模型,以此估算集卡车辆在闸口需要排队等待的时间.而刘翠莲等^[11]采用排队论方法提出了 $M/G/S/\infty/\infty/\text{FCFS}$ 排队系统模型,并对闸口流程进行了优化,该排队系统模型表示为集卡车辆的到达服从泊松分布(Poisson),服务时间服从一般随机分布,服务台数为 S 且满足先到先服务的规则,符合当前码头预约制下集卡车辆排队规律.但上述研究多以总的时间成本最小或总费用最小为目标函数进行优化,尚未从低碳约束的角度出发以碳排放总量最小进行研究.

1.2 碳排放仿真研究方法

董岗和王文渊等^[12-13]曾基于对国内外减排措施的分析,提出了集装箱码头碳排放量理论计算公式,但缺少集卡车辆的碳排放量化方法,且所提出的理论模型与实际有较大的差异;而卢毅勤等^[14]则兼顾 CO_2 排放和集卡多目标调度两个目的,给出了多目标优化模型,但未对集卡车辆在闸口阶段的实际等待和低速行驶过程中的碳排放情况进行考量.综上,这些研究为码头集卡车辆碳排放的仿真和计算提供了坚实的理论依据.笔者基于上述研究成果,首次面向码头闸口关键环节,采用MOVES仿真手段,对集卡车辆在排队过程中的碳排放进行仿真,并深入剖析实际排队规则下不同速度区与碳排放二者间的交互关系.

2 码头闸口作业流程分析

闸口集卡车辆排队主要分为进入闸口的排队等待、出闸口的排队等待两部分.依据码头闸口服务规则以及集卡在码头闸口系统的排队被服务过程,可将其归为典型的多级排队网络,如图1所示.

在图1所示的排队网络中,集卡车辆到港后等待进入闸口,若入闸口通道空闲则接受服务,通道忙碌则进入队列1按先到先服务(first come first served, 简称FCFS)规则排队等待.闸口服务完毕后,集卡车辆进入码头堆场进行装卸作业.随后集卡车辆进入出闸口通道,同理,若出闸口通道空闲则立即接受服务,否则进入队列2按FCFS规则排队等待.集卡车辆在出闸口通道接受服务完毕后驶离闸口,从而退出整个闸口系统,至此面向该车辆的闸口系统服务完毕.在该流程中,若闸口出/入通道忙碌,极易造成码头服务效率下降,成为影响码头通过能力的瓶颈;并且由于排队车辆处在怠速状态,大量未经完全燃烧的污染气体会产生严重的污染,而这种状态在现行的闸口预约制下较为常见.此外,由于集卡车辆送箱和提箱不同作业过程中存在差异,因此服务时间更符合一般随机分布,即满足 $M/G/S/\infty/\infty/\text{FCFS}$ 排队规则.

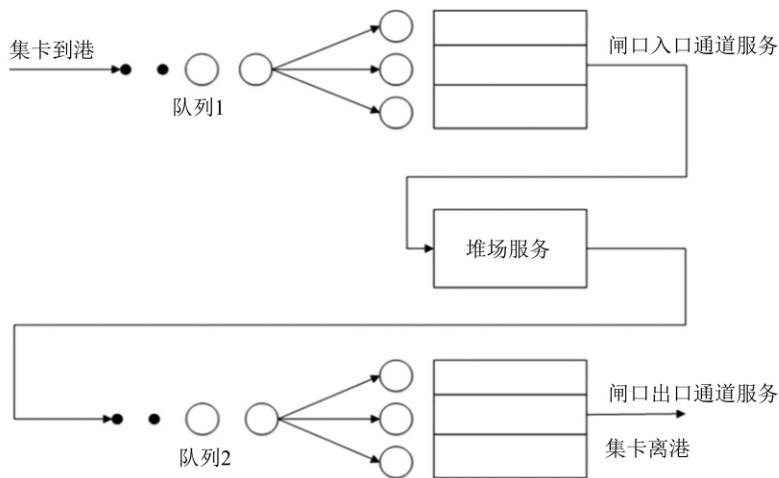


图1 集卡车辆码头闸口作业流程

笔者以上海港集装箱码头闸口为研究对象,通过观测、调查及统计得到,该闸口共有 24 条通道,并满足 $M/G/24/\infty/\infty/FCFS$ 的排队系统,其闸口作业流程符合图 1 所示标准集卡车辆作业流程,详细数据如表 1 所示。根据实测数据,构建该码头的闸口集卡车辆排队模型,并基于排队论模型要素(输入过程、排队规则和服务机构),对所提出的码头集卡车辆闸口排队系统做出以下服务规则的制定:

- (1) 集卡是闸口作业系统中的“顾客”,数量无限制;
- (2) 集卡车辆到达闸口是独立的、随机性的事件,满足到达时间间隔独立要求;
- (3) 集卡车辆到达服从 FCFS 规则,闸口系统处于实时等待状态;
- (4) 码头的闸口通道(24 条)作业相互独立,每条通道的服务能力一样,并且每条通道每次只能服务一辆集卡;
- (5) 集卡到达闸口的时间间隔与集卡在通道接受服务时间两者相互独立;
- (6) 闸口系统运行时间长,可达到稳态。

表1 上海港集装箱某头闸口排队系统关键参数

类 别	参 数			
	平均队长/辆	平均等待队长/辆	平均停留时间/min	平均等待时间/min
交箱作业	166	165	27.73	29.55
提箱作业	75	74	20.18	19.90

由表 1 可知,所构建的闸口服务系统满足多服务台等待机制,且交箱作业和提箱作业都存在车辆排队情况。其中交箱作业中的平均队长约为提箱作业中平均队长的 2.2 倍;交箱作业中的平均停留时间和平均等待时间均高于提箱作业,可知集卡车辆到达闸口的排队等待比装卸后出闸口排队等待的时间更长;由于进港集卡车辆的重载箱率比出港要高,因此进港排队阶段的碳排放污染更为严重。因此,解析集卡车辆在闸口排队等待过程中的碳排放变化率,是有效制定策略、控制港区碳排放的重要依据。

3 MOVES 仿真模型参数修正

MOVES^[15] 是美国环保署(EPA)开发的一款可用于机动车辆污染排放测算的新一代仿真模型。相比于 MOBILE、CMEM 以及 COPERT 等软件在应用过程中难以对微观环境进行定义,导致仿真结果与我国道路和车辆的实际情况不相符、结论难以应用等,MOVES 则提供了国家、区域和项目级 3 种层次,分别从宏观、中观、微观的层次对机动车排放进行仿真测算,并可根据我国道路和车辆属性等实际情况进行情景设置,极大地提高了排放测算结果的真实性。

考虑到 MOVES 中车辆的运行工况和基本排放率仅针对美国本土区域,且我国在车型划分、道路状态等方面与美国有较大的差异,因此结合《中国能源统计年检 2010》和《2006 IPCC Guidelines for Nation-

al Greenhouse Gas Inventories》^[16-17], 分别对柴油和汽油相关燃烧系数进行修订, 如表 2 所示.

表 2 我国不同燃油类型下碳排放系数

燃油 类型	低位热值/ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	单位热值含碳量/ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碳氧化率/ %	碳转化 系数	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$)	碳排放量/ ($\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$)
汽油	43 070	1.89×10^{-5}	98	3 2/3	0.74	2.16
柴油	42 652	2.02×10^{-5}	98	3 2/3	0.86	2.66

4 算例分析

将表 1 和表 2 作为 MOVES 仿真环境输入参数; 仿真时长设置为 1 h (9:00—10:00), 温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 华氏 $77\text{ }^{\circ}\text{F}$, 相对湿度 72%. 到港车辆车型为组合长途集装箱卡车 (combination long-haul truck) 和组合短途集装箱卡车 (combination short-haul truck), 燃料为汽油, 其对应的标准平均车速 bin 值范围为 $9.28 \sim 114.7\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 由于该研究面向集装箱码头闸口, 所以选取集卡车辆速度区间为 $9.28 \sim 60.28\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. 分别对 CO_2 、 CO 、 THC 三种碳排放化合物以及能耗进行仿真分析, 结果如图 2 所示.

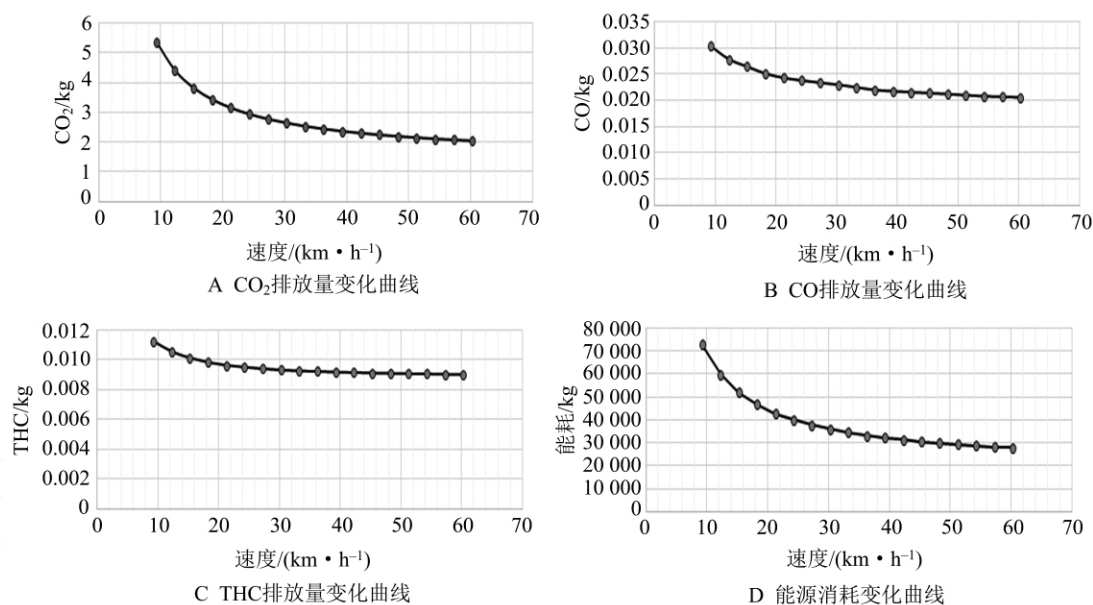


图 2 $60\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下速度区间内集卡车辆单车碳排放变化

由图 2 可知, 速度对集卡车辆的排放有着较大的影响. 当速度小于或等于 $9.28\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 车辆能耗较大, 相应地 CO_2 、 CO 和 THC 等污染物的排放量也处于最高位. 但随着速度的递增, CO_2 、 CO 和 THC 等污染物排放量呈现了一个单调的递减趋势, 能源消耗也相应下降; 尤其当速度从 0 增加至 $15.28\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 碳污染排放量和能源消耗下降梯度明显, 当速度高于 $15.28\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 碳污染排放量下降趋势趋于平稳. 各污染物的排放增长率如图 3 所示.

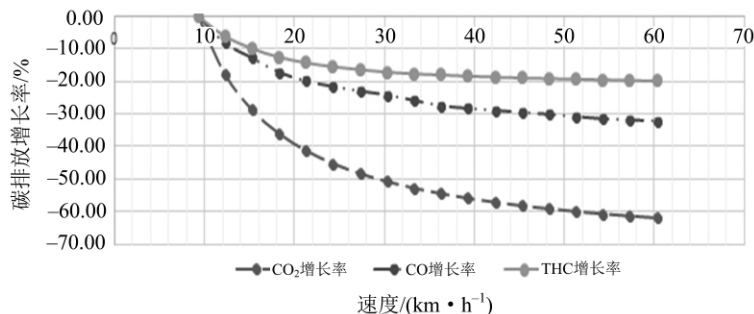


图 3 碳排放污染增长率变化曲线

由图3可以看出,随着平均速度的增加, CO_2 、 CO 、 THC 相对于基础排放量,增长率分别达到了 -61.93% 、 -32.10% 、 -19.88% 。整体分析可知,在低速范围内(速度小于等于 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)集卡车辆的碳排放总量更大,但是随着平均速度逐渐提高,各污染物排放增长率显著降低,该研究所取速度区间范围较小,随着后期速度持续增加,污染物的排放量最终并不是持续降低的,如图4所示。

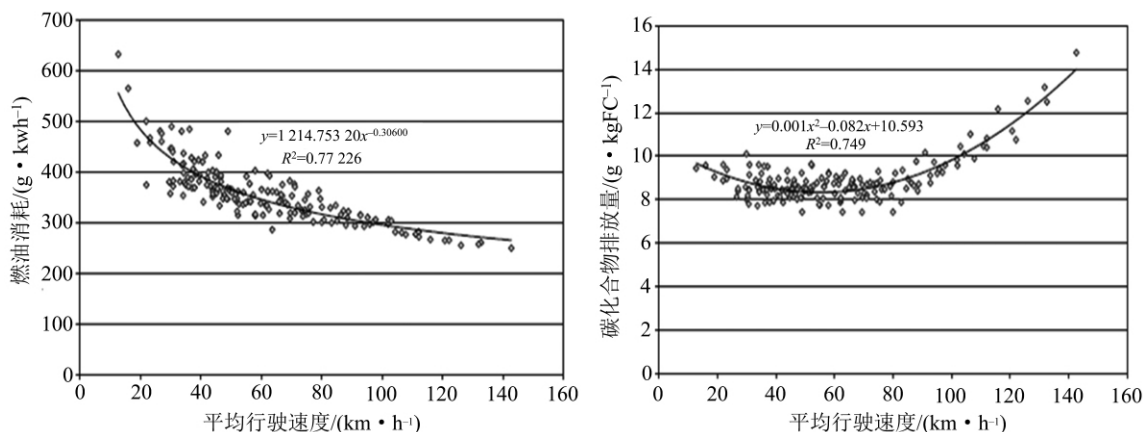


图4 不同速度区间下集卡车辆的燃料消耗与碳排放污染量

由图4可知,随着通过闸口期间平均速度的提升,总的碳排放污染量呈现先降低后增高的趋势,当集卡车辆速度高于 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,碳排放污染有显著增加,但总的燃油消耗量依旧维持单调递减的变化趋势。因此,当重载车辆属性不变的前提下,速度是影响其尾气排放的重要因素。

5 结束语

笔者以集装箱重载卡车为例,对集卡车辆进出港口/码头闸口过程中的碳排放变化情况进行了分析。首先考虑集卡车辆在闸口排队等待的实际情况,基于排队理论,以上海港码头闸道数据为基础,对平均队长、平均等待队长、平均停留时间以及平均等待时间4个指标进行解析,构建了 $M/G/24/\infty/\infty/\text{FCFS}$ 排队系统;并结合MOVES仿真模型,对重载车辆在该排队系统下的 CO_2 、 CO 、 THC 三种碳排放化合物以及燃油能耗进行了仿真分析,得到不同速度区间下上述4种指标的变化趋势。可知集卡车辆平均行驶速度低于 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,其各项碳排放污染呈单调递减变化,当速度高于 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,碳排放总量出现翻转,呈现增加的变化趋势,表明当重载车辆属性不变的情况下,速度是影响其尾气排放的重要因素。

参考文献:

- [1] LEE P T W, LUN Y H V, LAI K, et al. Maritime logistics and port connectivity in the globalised economy [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 95: 323-325.
- [2] BISHOP G A, HOTTOR-RAGUINDIN R, STEDMAN D H, et al. On-road heavy-duty vehicle emissions monitoring system [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49 (3): 1639-1645.
- [3] 吴娇蓉, 陈法安, 朱启政, 等. 综合交通运输体系五年发展规划编制解析 [J]. 城市交通, 2015 (6): 1-8.
- [4] HUDDA N, FRUIN S, DELFINO R J, et al. Efficient determination of vehicle emission factors by fuel use category using on-road measurements: downward trends on Los Angeles freight corridor I-710 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13 (1): 347-357.
- [5] MORAIS P, LORD E. Terminal appointment system study [R]. Canada Csa Final Report, 2006: 134-140.
- [6] GIULIANO G, O'BRIEN T. 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.
- [7] 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.

- [8] GUAN C Q, LIU R F. Container terminal gate appointment system optimization [J]. Maritime Economics & Logistics, 2009, 11 (4): 378-398.
- [9] 曾庆成, 张笑菊, 陈文浩, 等. 基于 BCMP 排队网络的码头集卡预约优化模型 [J]. 系统工程学报, 2013, 28 (5): 592-599.
- [10] 许巧莉, 孙丽君, 胡祥培, 等. 非平稳到达的码头集卡预约优化模型 [J]. 大连理工大学学报, 2014, 54 (5): 589-596.
- [11] 刘翠莲, 计明军, 郁艸兰, 等. 集装箱码头闸口作业系统通过能力研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11 (4): 117-123.
- [12] 董岗, 陈飞燕. 国内外港口集卡减排的典型措施及对上海的借鉴 [J]. 航运经济与管理, 2012 (19): 4-7.
- [13] 王文渊, 张颖超, 唐国磊, 等. 港口集装箱装卸作业的碳排放量计算方法 [J]. 港工技术, 2013, 50 (4): 6-10.
- [14] 卢毅勤, 杨斌, 黄有方. 兼顾碳排放和效率的集卡调度多目标优化 [J]. 计算机仿真, 2015, 32 (6): 386-389.
- [15] LIU H B, WANG Y Q, CHEN X H, et al. Vehicle emission and near-road air quality modeling in Shanghai, China, based on taxi GPS data and MOVES revised emission inventory [J]. Transportation Research Board, 2013, 2340: 33-48.
- [16] 国家统计局工业交通统计司. 中国能源统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [17] HIRAISHI T, KRUG T, TANABE K, et al. 2013 supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: wetlands [R]. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Switzerland, 2014, Chapter 3: 198-199.

(责任编辑 于 敏)

