

## 考虑阻塞的集装箱堆场集卡路径控制策略

李 东, 汪定伟, 刘黎黎

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

**摘要:** 针对集装箱堆场内作业车辆多, 道路狭窄且数量有限的特点, 提出了以道路资源为研究对象的思想, 并给出了基于欧拉方法的集卡路径控制策略. 详细论证了欧拉方法在集卡路径控制中的实现过程, 定义了欧拉因子、距离因子和路径选择因子, 使集卡能够从时间和空间两个方面预测堆场道路的畅通或阻塞趋势, 从而选择较畅通且距离较短的路线行驶. 实验表明, 该方法能有效提高堆场作业效率, 减少堆场作业时间.

**关键词:** 集装箱堆场; 欧拉方法; 路径; 阻塞

**中图分类号:** TP391.9      **文献标识码:** A

## Routing control strategy for vehicle congestion in a container terminal

LI Dong, WANG Ding-wei, LIU Li-li

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110004, China)

**Abstract:** When a small number of narrow paths are provided for many vehicles in a container yard, we put forward the idea of path-resource-oriented study, and introduce the Euler method for the routing control of vehicles. The Euler factor, distance factor and route-choosing factor are presented. By this method, we can predict paths in congestion and in passage-clear, so that a short and through path can be selected for the traveling vehicle. Experimental results show that both the congestion time and the total operational time can be reduced significantly.

**Key words:** container yard; Euler method; route; congestion

### 1 引言(Introduction)

集装箱堆场内作业车辆多, 道路狭窄且数量有限, 因此车辆如何选择行驶路径避免阻塞, 对于提高堆场作业效率十分重要. 传统的堆场, 出于安全考虑, 集卡路线往往是固定的, 这对堆场的道路资源是个浪费. 应用于集卡路径控制的算法大体可分为两类, 即集中控制算法<sup>[1]</sup>和分散算法<sup>[2]</sup>. 集中控制算法使车辆完全按照集中控制器的指令行走, 相对来讲, 分散算法有更好的应用性, 其特点是每辆车自行做出行驶路线的决策, 但是车辆不掌握全局的交通情况, 不可避免地会发生阻塞. 为提高集装箱调运效率而开展的研究较多<sup>[3]</sup>, 集卡的路径控制是一个研究方面. Liu和Jula<sup>[4]</sup>设计、制定了自动化港口中集卡的行走逻辑控制规则和交通规则. 还是Liu和Jula等<sup>[5]</sup>针对集装箱堆场的两种堆场布局, 制定了集卡在场内运送时发生冲突时的避让规则. Liu<sup>[6]</sup>还对比了4种车辆调度规则, 即最小排队、随机、最短距离和最长距离规则, 为车辆调度决策提供了参考.

Zeng等<sup>[7]</sup>将集装箱堆场道路划分为多个区域, 假设集卡在离散时间点到达道路节点, 以集卡所在的位置和速度作为要研究状态, 规定其行走路线, 并证明了集卡的行走路线不会发生冲突. 在这项工作的基础上, Qiu等<sup>[8]</sup>利用车辆路线不会冲突的特点, 提出了两种策略, 使集卡能够处理连续到达的任务. Ye等<sup>[9]</sup>建立了时间驱动的并行系统来研究集卡的路径控制与决策.

上述研究多以车辆为研究对象, 但其实质是解决对道路资源利用不善的问题. 由此, 本文提出新的研究思想, 即以集装箱堆场道路资源为研究对象, 研究怎样改善集卡对堆场道路の利用, 从而兼顾行驶路线较短并减少道路阻塞两方面因素, 达到提高堆场工作效率的目标. 该思想可以通过欧拉方法<sup>[10]</sup>实现.

### 2 欧拉方法及其应用思想(Euler method and its application idea)

#### 2.1 基本原理(Basic principle)

欧拉方法是以质点所运动的时空中, 空间点为研

研究对象, 研究经过固定空间点处的质点的物理量随时间和空间的变化的一种方法.

设 $B(x(t), y(t))$ 为表达2维空间中运动质点的物理量, 它是随着时间和位置而变化的量, 该物理量随时间和空间连续可导, 有

$$\frac{dB}{dt} = \frac{\partial B}{\partial t} + \frac{\partial B}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial B}{\partial y} \frac{dy}{dt}. \quad (1)$$

式中 $\frac{dx}{dt}$ ,  $\frac{dy}{dt}$ 分别为 $x, y$ 方向上的速度, 以 $u, v$ 表示, 则

$$\frac{dB}{dt} = \frac{\partial B}{\partial t} + u \frac{\partial B}{\partial x} + v \frac{\partial B}{\partial y}. \quad (2)$$

从式(2)可以看到, 全导数转化成了局地导数, 也就是说, 研究质点物理量在空间中随时间的变化情况可以转化为研究在空间中固定位置上, 经过该位置的质点的物理量的变化情况.

欧拉方法的优点是: 1) 在很多情况下, 采集经过固定空间点的质点的物理量要比连续跟踪运动的质点来获取其物理量容易; 2) 通过对各空间点处采集到的物理量的计算, 不仅可以掌握空间质点的总体运动状态, 而且能够得到质点的运动趋势, 从而对未来空间中质点的状态和分布做出预测.

### 2.2 应用思想(Application idea)

以道路资源为研究对象的思想的提出主要基于两方面考虑: 一方面, 欧拉方法是以空间中固定位置为研究对象, 研究经过该位置的质点的物理量的变化情况. 它有便于采集数据和具有预测性的优点; 另一方面, 现有的研究集卡路径的方法, 多以车辆为研究对象, 存在对道路资源利用不善的问题. 基于此, 提出以道路资源为研究对象的思想, 即将堆场道路划分为多个道路单元, 记录经过每个道路单元的集卡路流的物理量, 并根据该物理量给出集卡行驶路线的控制策略.

道路单元的选取以每个交叉路口及与其相连的长度为 $l$ 的道路 $z_1, z_2, z_3, z_4$ 为一个道路单元(如图1所示), 这样划分出的道路单元即对应了欧拉方法中的固定空间位置.

本文将式(2)中的物理量 $B$ 取为集卡的密度, 并定义一个道路单元内集卡的数量为集卡密度 $\rho$ (当某集卡的局部进入道路单元, 以分数表示其数量). 可见集卡密度是随时间空间连续可导的变量. 将横向道路取为 $x$ 轴, 以自左向右为正方向, 将纵向道路取为 $y$ 轴, 以自下向上为正方向. 则集卡密度对 $x$ 轴,  $y$ 轴的导数反映了集卡数量在横向和纵向道路上的分布情况.

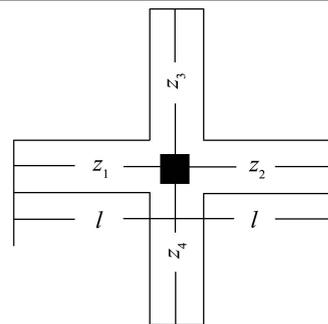


图 1 道路单元示意图

Fig. 1 Path unit

### 2.3 欧拉方法对阻塞的预测和判断(How to predict and judge congestion by Euler method)

集卡的速度为常量 $v$ , 则式(2)中 $x, y$ 方向车速皆为 $v$ , 当阻塞导致集卡不能前进时,  $v = 0$ , 式(2)改写为

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + v \left( \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial y} \right). \quad (3)$$

由导数的物理意义可知,  $\frac{d\rho}{dt}$ 能够反映集卡密度的变化及变化趋势, 这样集卡能提前预测阻塞情况(如表1), 选择畅通或阻塞不严重的行驶路径.

表 1 集卡流密度与堆场道路阻塞情况的关系

Table 1 Relation between vehicles density and traffic congestion

$\frac{d\rho}{dt}$	集卡流密度	道路状况
$\frac{d\rho}{dt} > 0$	变大	发生阻塞或阻塞更严重
$\frac{d\rho}{dt} = 0$	不变	畅通或阻塞无变化
$\frac{d\rho}{dt} < 0$	变小	阻塞减轻或无阻塞

## 3 欧拉方法在集卡路径控制中的实现(Attainment of Euler method in route control of vehicles)

### 3.1 3个因子的设计(Design of three factors)

1) 欧拉因子.

式(3)中的偏微分用差分近似计算, 即

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \approx \frac{\rho_{t_2} - \rho_{t_1}}{t_2 - t_1}. \quad (4)$$

式(4)中 $\rho_{t_i}$ 为 $t_i$ 时刻道路单元中的集卡的数量. 堆场中车辆只有 $x$ 和 $y$ 两个互为垂直的运动方向, 当车流沿 $x$ 方向运动时, 沿 $y$ 方向的车流密度变化为0, 即 $\frac{\partial \rho}{\partial y} = 0$ , 反之, 车辆沿 $y$ 方向运动时, 必有 $\frac{\partial \rho}{\partial x} = 0$ . 则当车流沿水平方向, 由道路单元 $a$ 向道路单元 $b$ 运

动时,

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial y} = \frac{\partial \rho}{\partial x} + 0 \approx \frac{\rho_b - \rho_a}{\Delta l}. \quad (5)$$

当车流沿y轴方向,由道路单元c向d运动时,有

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial y} = 0 + \frac{\partial \rho}{\partial y} \approx \frac{\rho_d - \rho_c}{\Delta h}. \quad (6)$$

$\Delta l$ 为沿x轴方向相邻的两个道路单元之间的距离, $\Delta h$ 为沿y轴方向相邻的两个道路单元之间的距离.

将 $\frac{d\rho}{dt}$ 称为欧拉因子,用E表示,将式(5)(6)分别代入式(3),则当车流沿水平方向由a向b运动时,对于道路单元b,可依下式计算欧拉因子:

$$E = \frac{\rho_{bt_2} - \rho_{bt_1}}{t_2 - t_1} + v \frac{\rho_b - \rho_a}{\Delta l}. \quad (7)$$

当车流沿y轴方向由c向d运动时,对于道路单元d,可依下式计算欧拉因子:

$$E = \frac{\rho_{dt_2} - \rho_{dt_1}}{t_2 - t_1} + v \frac{\rho_d - \rho_c}{\Delta h}, \quad (8)$$

式中 $\rho_{bt_i}$ 为 $t_i$ 时刻,道路单元b中集卡的数量.由式(8)可见,欧拉因子由两部分组成,一部分反映出集卡可能经过的道路单元的路况随时间的变化趋势;另一部分反映了集卡可能的前进方向上是趋于畅通还是阻塞.

2) 距离因子.

欧拉因子不能反映路线的长短,因此,集卡在选择行驶路径时,还要兼顾距离最短因素,称之为距离因子,以D表示,令

$$D = d/k. \quad (9)$$

式(9)中: $d$ 为经所选路径到达目的地的最短距离, $k$ 为调节系数,通过设置合适的 $k$ 值,使D与E的数量级相符.

3) 路径选择因子.

定义S为路径选择因子,使之能综合考虑欧拉因子和距离因子的作用,令

$$S = \alpha E + (1 - \alpha D). \quad (10)$$

式(10)中:称 $\alpha$ 为欧拉系数,通过对 $\alpha$ 的设置,可以调整欧拉因子和距离因子在道路选择决策中的权重,从而使路径选择因子适用于不同条件下(如堆场规模、作业量、集卡数量等),集卡路径的控制.

3.2 路径控制策略(Route control strategy)

本文的路径控制策略是,当集卡处于交叉路口时,计算所有相邻道路单元的路径选择因子,并选择路径选择因子最小的道路单元方向行驶,即对于所有相邻道路单元*i*,计算

$$S_i = \alpha E_i + (1 - \alpha) D_i, \quad (11)$$

$$i^* = \operatorname{argmin}_i S_i, \quad (12)$$

arg表示取达到极小值的自变量, $i^*$ 即为集卡选择的将要进入的道路单元.在本文的策略下,集卡能够从时间和空间两方面判断道路的使用情况的趋势,从而避开阻塞正在加剧的道路单元,选择行进方向上畅通的道路.

3.3 阻塞的处理(Dealing with congestion)

使用了欧拉方法并不能杜绝阻塞,当集卡发生阻塞时,规定如下优先权,优先权大的集卡在阻塞时先行<sup>[9]</sup>.

- 1) 阻塞时间越长的集卡被赋给的优先权值越大;
- 2) 优先权值随机增加,以免集卡都有相同权值;
- 3) 对于要求进入同一个区域也有相同优先权的集卡,随机改变它们的权值;
- 4) 集卡每次完成任务后,被重新赋优先权.

4 实验与分析(Simulation and analysis)

4.1 实验设置(Experiment settings)

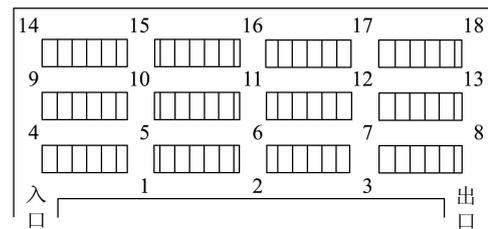


图2 堆场示意图

Fig. 2 Layout of container yard

表2 任务数量在各堆垛上的分布

Table 2 The number of tasks distributed on every stack

堆垛	任务量	堆垛	任务量	堆垛	任务量
1	50	5	88	9	56
2	92	6	59	10	48
3	60	7	56	11	44
4	57	8	52	12	38

以图2所示作业场所分别对本文提出的方法和Ye等的方法进行仿真.带条状矩形即为堆垛,各堆垛间即为堆场道路,1~18标识了18个道路单元.沿x轴方向相邻的两个道路单元的距离为6,沿y方向相邻的两个道路单元的距离为3.场内有700项任务需要集卡完成,700项任务在各堆垛的分布数量随机生成,如表2所示(堆垛按图2中从左到右,从上到下的顺序编号),对任务的完成顺序没有要求.集卡的

车速为1. 每项作业不包括行驶时间, 需50 s, 作业地点在每个堆垛的下方, 每个堆垛最多可同时为3辆集卡作业. 分别以10, 20, ..., 70辆集卡同时作业的情况运行仿真模型, 调节系数 $k = 6, t_2 - t_1 = 20$ .

### 4.2 欧拉系数的选取(Selection of Euler coefficient)

欧拉系数 $\alpha$ 的取值对路径选择有重要影响. 在堆场和任务确定的情况下,  $\alpha$ 的取值只与参与作业的集卡数量有关. 取不同的 $\alpha$ 值和集卡数量时, 完成任务所需时间如表3.

表 3 不同 $\alpha$ 和集卡数量时完成任务所需时间(s)

Table 3 Operating time with different  $\alpha$  and vehicle number

$\alpha$	10	20	30	40	50
0.0	27311	16253	11312	10287	10074
0.1	26693	16240	11010	9945	10021
0.2	26731	15245	10019	9806	9795
0.3	26742	14823	9279	8327	8302
0.4	26720	16522	8982	8180	8115
0.5	26709	17031	8324	7625	7656
0.6	26724	16640	8340	7375	9143
0.7	26726	15335	9132	7535	9176

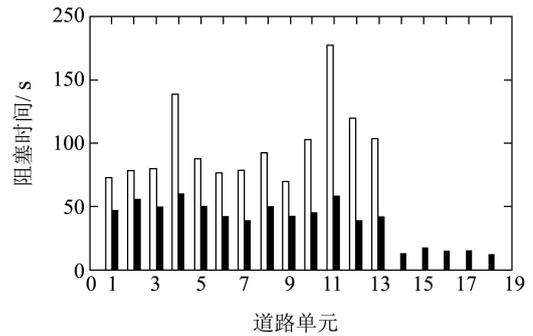
### 4.3 性能比较与分析(Performance analysis)

Ye等的策略是当前关于集装箱车辆路径选择的最好策略. 设 $N_x$ 为区域 $x$ 内集卡的数量,  $N_{Tx}$ 为区域 $x$ 内容纳集卡数量的阈值, 则,

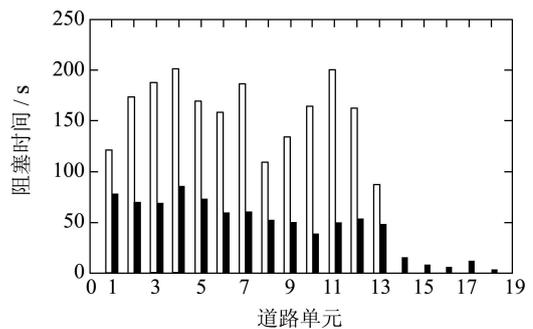
- 1) 若 $N_B \leq N_{TB}$ , 则集卡可以由区域A进入区域B;
- 2) 若 $N_B > N_{TB}$ , 且 $N_A/N_{TA} \leq N_B/N_{TB}$ , 则集卡可以由区域A进入区域B;
- 3) 除以上两种情况之外的其他情况, 集卡不能由区域A进入区域B.

这个策略能在一定程度上降低阻塞情况的发生, 但无预测性.

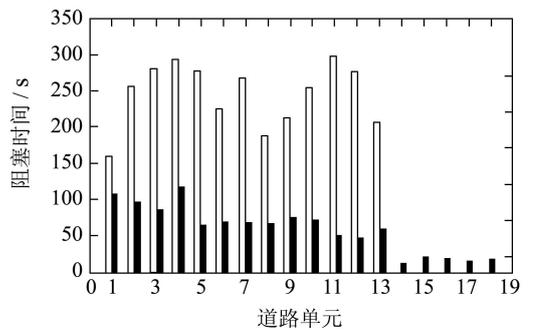
图3所示为有40辆集卡在场内作业时, 两种策略下各道路单元的阻塞时间, 白、黑柱分别对应了Ye的策略和本文所使用的基于欧拉方法的策略. 由图中可见, 基于欧拉方法的策略在1~13道路单元上的阻塞时间明显少于Ye等的策略. 在使用基于欧拉方法的策略时, 各道路单元的阻塞时间比较接近, 而使用Ye等的策略时, 各道路单元的阻塞时间相差较大. 说明基于欧拉方法的路径选择策略能够主动选择阻塞较少的路径行驶, 从而能使集卡流较均匀地分布到各条路线, 避免了某一道路单元陷入严重阻塞的情况的发生.



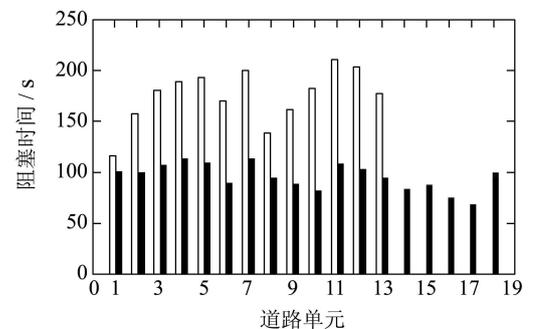
(a) 20车阻塞时间对比



(b) 30车阻塞时间对比



(c) 40车阻塞时间对比



(d) 50车阻塞时间对比

图 3 阻塞时间比较

Fig. 3 Comparing of congestion time

图4所示为两种策略下, 不同数量集卡完成所有任务所需的时间. 实、虚线分别为Ye等的策略和本文的策略. 当作业集卡数量少于20辆时, 两种策略

下,完成任务时间相差不大,因为这时场中集卡较少,阻塞不是很多,欧拉方法对阻塞的预测优势无法发挥.而当集卡数量达到30~50辆时,基于欧拉方法的策略要明显好于Ye等的策略,这时集卡较多,需要有更好的路径选择策略.当集卡数量进一步增加时,两种策略的效果又相差不大,因为此时,场中集卡太多,超过了堆场的容纳能力,即使使用欧拉方法也无法缓解阻塞.

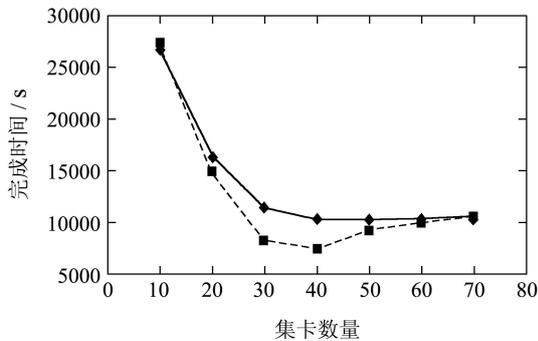


图4 完成任务时间比较

Fig. 4 Comparing of operating time

## 5 结论(Conclusion)

本文研究了集装箱堆场中,集卡路径的控制策略.提出了以道路资源为研究对象的思想,引入了欧拉方法,详述了欧拉方法在集装箱堆场集卡路径选择决策中的实现,使集卡能够预判堆场内道路的畅通或阻塞变化趋势.文中对欧拉系数的选取、在两种策略下堆场内的阻塞时间和完成任务时间进行了实验,实验表明,投入适当数量的集卡在场内作业时,使用本文的方法能够有效减少阻塞现象的发生,提高集卡作业效率,减少堆场作业时间.同时,将本文的方法与集装箱堆场其他作业环节联系起来,也是一个有意义的课题.

## 参考文献(References):

[1] YU X, HUANG S Y. A centralized routing algorithm for AGVs in container port[C] // *Proceedings of the 4th International Conference*

*on Computer Integrated Manufacturing*. Singapore: Springer, 1997: 589 – 600.

[2] SOH J T L, HSU W J, HUANG S Y, et al. Decentralized routing algorithms for automated guided vehicles[C] // *Proceedings of ACM Symposium of Applied Computing*. Philadelphia: ACM Press, 1996: 473 – 479.

[3] 陈璐, 奚立峰, 蔡建国, 等. 集装箱码头装卸作业的调度控制模型及算法设计[J]. *控制理论与应用*, 2006, 23(6): 873 – 878. (CHEN Lu, XI Lifeng, CAI Jianguo, et al. Integrated model and heuristic algorithms for the scheduling of container handling system in a maritime terminal[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(6): 873 – 878.)

[4] LIU C I, JULA H, IOANNOU P A. Design, simulation, and evaluation of automated container terminals[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2002, 3(3): 12 – 26.

[5] LIU C I, JULA H, VUKADINOVIC K, et al. Automated guided vehicle system for two container yard layouts[J]. *Transportation Research Part C*, 2004, 12(5): 349 – 368.

[6] LIU C I, IOANNOU P A. A comparison of different AGV dispatching rules in an automated container terminal[C] // *Proceedings of the IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. Singapore: Springer, 2002, 9: 880 – 885.

[7] ZENG J Y, HSU W J. Conflict-free routing of AGVs on the mesh topology based on a discrete-time model[C] // *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Taipei: IEEE, 2003, 9: 3510 – 3516.

[8] QIU L, HSU W J. Continuous scheduling of AGVs in a mesh-like path topology[C] // *Proceedings of Intelligent Vehicles Symposium*. New York: IEEE, 2003: 62 – 67.

[9] YE R, HSU W H, VEE V Y, et al. Parallel simulation of AGVs in container port operations[C] // *Proceedings of the 4th International Conference/ Exhibition on High Performance Computing in Asia-Pacific Region*. Kuala Lumpur: Wiley Publishing Inc, 2000: 1058 – 1063.

[10] 张鸿雁, 张志政, 王元. 流体力学[M]. 北京, 科学出版社, 2004: 16 – 17.

(ZHANG Hongyan, ZHANG Zhizheng, WANG Yuan. *Fluid Mechanics*[M]. Beijing: Science Press, 2004: 16 – 17.)

## 作者简介:

李东 (1974—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为铁路集装箱调运、基于仿真的优化方法, E-mail: Nlidong0300837@163.com;

汪定伟 (1948—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为进化计算、电子商务、多级库存、基于仿真的优化方法等;

刘黎黎 (1980—), 女, 博士研究生, 研究方向为动态进化计算.