

基于速度控制的自动化码头 AGV 无冲突路径规划

仲美稣 杨勇生 周亚民

(上海海事大学物流科学与工程研究院 上海 201306)

摘要 随着劳动力成本的上升,提高码头效率成为港口发展的关键。自动引导车(AGV)是自动化码头水平运输的主要设备,但其作业过程中的冲突、拥堵、等待等问题日益突出,降低了码头的运作效率。以最小化 AGV 在岸桥和场桥之间的行驶距离为目标建模,选择最优行驶路径。通过检测 AGV 的重叠率和冲突时间,遵循先到先服务的原则,采用速度控制策略,实现 AGV 无冲突路径规划。仿真实验表明,该方法能有效降低 AGV 冲突的概率,减少岸桥和场桥设备的等待时间,提高 AGV 的作业效率,实现作业成本的最小化。

关键词 自动化码头,速度控制,AGV 冲突,路径规划

中图分类号 U693 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2019.07.047

Free-conflict AGV Path Planning in Automated Terminals Based on Speed Control

ZHONG Mei-su YANG Yong-sheng ZHOU Ya-min

(Institute of Logistics Science & Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract With the increase of labor cost, improving the efficiency of terminal has been the key in development of ports. Automatic guided Vehicles (AGV), as the main equipment of automated terminals in horizontal transportation, the problems of conflict, congestion and waiting have been more serious, which greatly reducing the operation efficiency of the terminals. This paper modeled with the minimum driving distance of AGV between the QCs and YCs, to choose the optimal path. By testing the overlapping rate and the conflict time, and using the speed control strategy, which follow the rule of first come first service, the path planning of free-conflict AGV is achieved. The simulation results show that this method can reduce the probability of AGV conflict effectively, decrease the waiting time of QCs and YCs, improve the operation efficiency of AGV, and minimize the total cost of operation.

Keywords Automated terminals, Speed control, AGV conflict, Path planning

1 引言

自动导引小车(Automatic Guided Vehicles, AGV)是衔接岸桥和堆场的重要设备,是当前自动化集装箱码头水平运输的主要方式^[1]。在人力作业成本持续上升、船舶大型化、港口智能化的影响下,AGV 的作业效率不仅受码头环境的影响,同时也受路径规划、设备调度等因素的影响。其作业过程中的设备等待、冲突、死锁等问题也日益突出,成为自动化码头现阶段亟待解决的问题。

在自动化码头装卸作业过程中,AGV 的路径规划问题直接影响整个码头装卸作业的时间,尤其是当任务量增大时,需要增加 AGV 进行作业,必然导致行驶路径的重叠,从而增加 AGV 冲突的可能性,进而造成拥堵,导致排队等待等问题。AGV 冲突会导致单次作业时间增长,作业成本增加,可能会影响一条或多条作业路,进而影响整个集装箱装卸作业面的作业效率。近年来,通过对岸桥和场桥进行研究,其作业时间是向着相对恒定的趋势发展^[2-3],AGV 到达岸桥或箱区

发生延误,增加了装卸设备的等待时间,从而进一步增加作业成本^[4]。因此,合理规划 AGV 的行驶路径,优化解决 AGV 冲突问题,不仅可以减少 AGV 的运输成本,也可以提高整个自动化码头的作业效率。

2 文献综述

AGV 在自动化生产中的应用逐渐增多,对其路径规划的研究主要分为两类:静态路径规划和动态路径规划。Ghasemzadeh 等^[5]在静态网状图的基础上提出了一种避免路网拥堵的多 AGV 路径搜索方法。Chiew 等^[6]提出了一种避免拥堵和死锁的双调回归排序多车路径方法,然而,这种方法获得的优化路径距离可能较长。Gawrilow 等^[7]以仿真图中每条边通过的最大任务量最小为目标建立了带时间窗的多 AGV 静态路径模型。钟建琳等^[8]将 AGV 运输系统划分为若干串联的子系统,运用 A* 算法和 Dijkstra 算法进行求解,比较求解结果可知,A* 算法优于 Dijkstra 算法。李伟光等^[9]针对 AGV 的路径规划问题,进一步改进了 A* 算法,考虑到

收到日期:2018-06-02 返修日期:2018-09-12 本文受国家自然科学基金(61540045),上海市科技委员会(16040501500,17595810300,18295801100)资助。

仲美稣(1991-),女,博士生,主要研究方向为物流工程与管理,E-mail:zhongmeisu@163.com;杨勇生(1965-),男,博士,教授,主要研究方向为物流工程与管理,E-mail:yangy_smu@126.com(通信作者);周亚民(1990-),男,博士生,主要研究方向为物流工程与管理。

AGV 的转弯因素,该算法通过删除边的方法来求解 k 次最短路径,实例仿真证明了其可行性。因此,关于静态路径规划的研究,主要是基于静态路网的稳定性,以总行驶距离最小为目标对 AGV 进行路径规划。

动态路径规划更多的是根据环境的不确定因素构建多目标的路径规划模型,能够不断调整 AGV 的最优路径。Nishi 等^[10]提出将 AGV 任务调度和无冲突路径规划结合起来,建立混合整数双层规划模型,利用遗传算法实现 AGV 的动态无冲突路径规划。泰应鹏等^[11]提出了一种基于时间窗模型的 AGV 动态路径规划方法,利用了 A* 启发式算法,同时考虑了避碰冲突,通过仿真实验表明了该算法的适用性和鲁棒性。朱龙彪等^[12]将 Dijkstra 算法和时间窗法有效结合,提出了一种基于动态时间窗的 AGV 路径规划方法。通过设定 AGV 优先级解决了 AGV 柔性差、易出现死锁和冲突等问题,有效提高了 AGV 的智能化水平和整体运行效率。王辉等^[13]引入了动态自适应调整策略,提出了一种改进的基于粒子群和遗传的混合算法,不断地实时调整和更新优化规划处最优的路径,通过仿真实验证明了该混合算法的可行性和有效性。

在自动化集装箱码头 AGV 运输的过程中,AGV 根据分配的任务来执行指令,整个自动化集装箱码头处于无人作业状态。而码头的实际 AGV 运输效率与预期差距较大,作业中冲突、死锁等问题经常发生。目前关于 AGV 无冲突路径规划的研究较多,但都不是针对自动化集装箱码头进行的研究,关于柔性制造系统、移动机器人和路面车辆的冲突避碰的研究相对较多。例如,Umar 等^[14]针对 AGV 的路径干涉问题,提出了基于任务优先级的遗传算法,用于检测和避免 AGV 冲突。Liu 等^[15]以多 AGV 任务的完成时间最短为目标,构建了路径规划模型,同时考虑行驶速度来进行避碰和定位的约束,并通过仿真证明了模型可有效避免 AGV 的拥堵和碰撞。李惠光等^[16]为了提高自动化工厂中 AGV 的工作效率,提出了一种基于多参数时间窗和路径表的分步控制算法。利用改进的 Dijkstra 算法对每个 AGV 的最优路径和最小运行时间进行求解,提高了系统的实时性。通过实例证明,该控制算法可以保持系统的稳定性,提高 AGV 的工作效率。苏霞等^[17]针对柔性制造系统中 AGV 路径规划的问题,建立了一种不断更新路径节点的时间模型,其利用 A* 算法对潜在的冲突进行检测,避免了潜在的碰撞和冲突,从而有效地获得了最短路径。吴鸿敏等^[18]研究了一种协调无冲突的运动规划方法,结合运动序列优先级将离线规划的解耦法进行动态调整,实现了多机器人无冲突协调路径规划。综上,目前已有许多关于多 AGV 无冲突路径规划的研究,但是还没有关于通过速度控制实现自动化集装箱码头 AGV 无冲突路径规划的研究。

3 问题描述

在自动化集装箱码头,AGV 作业不是单独的部分。在整个集装箱作业中,每一个作业都是环环相扣、前后影响的。AGV 作业的主要步骤如下:1)接收集装箱作业指令;2)根据

作业指令的装箱位置,规划合理的 AGV 路径,前往装箱位置;3)与装卸设备联合作业,将集装箱装至 AGV,完成一次装箱作业;4)根据卸箱位置,规划合理的行驶路径,将集装箱运至卸箱位置;5)将箱子从 AGV 上卸下,完成一次装卸箱作业,接收下一作业指令。

根据自动化集装箱码头构建集装箱作业图,如图 1 所示。其中,A,B,C,D 分别表示作业于集装箱船的 4 台岸桥, $a-h$ 分别表示存放集装箱的 8 个箱区。4 条海侧作业路为同向、单向作业路,中间两条路为作业路,两侧为行驶道路,路宽为 5m;缓冲区为双向作业路,长 30m,宽 8m;4 条路侧行驶道路为单向作业路,路宽 5m;进箱区作业路长 50m。整个船舶作业面横长 368m,纵深 110m(不包括船舶长度和堆场箱区的长度)。

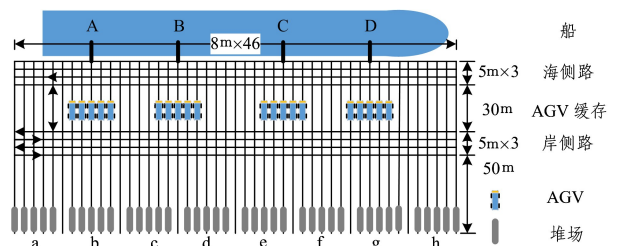


图 1 自动化码头作业图

Fig. 1 Operation of automated container terminals

在每次行驶前,AGV 会依据当前路况来规划路径,在实际的运作中,仍旧会遇到一定的设备冲突问题,导致 AGV 排队等待或装卸设备等待等问题,对作业效率有一定程度的影响。水平运输中存在的主要冲突类型如图 2 所示。

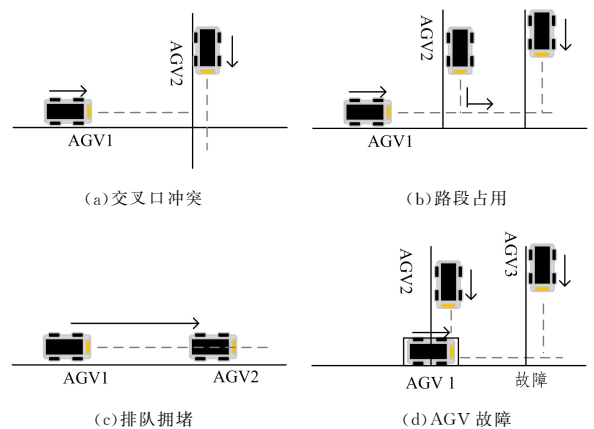


图 2 主要的 AGV 冲突类型

Fig. 2 Main types of AGV conflict

1) 交叉口冲突

如图 2(a)所示,AGV1 与 AGV2 在交叉路口相遇,AGV1 申请路径失败,等在当前行驶位置,待 AGV2 通过路段并释放后,重新申请这一路口。

2) 路段占用

如图 2(b)所示,AGV1 申请行驶路段后,AGV2 和 AGV3 先后从缓冲区前往高速行驶区,申请路径均失败,等在当前行驶位置,待 AGV1 释放路段后,再重新申请。AGV3 须等待 AGV1 和 AGV2 均离开并释放路径后,才能申请到行驶路段。

3) 排队拥堵

如图 2(c) 所示, AGV1 在申请行驶路段时, 由于同路段前方 AGV2 在等待, 导致申请失败, AGV1 进入队列等待, 此时 AGV1 与 AGV2 保持安全避碰距离。当等待 AGV 数量过多时, 与该路径交叉的其他路径中的 AGV 会申请失败, 进而导致整条作业路甚至整个码头作业瘫痪。

4) AGV 故障

如图 2(d) 所示, AGV1 发生了故障, 停在行驶位置。AGV1 的故障位置与 AGV2 的作业路存在重叠, 因此 AGV2 继续前进会导致 AGV2 申请路段失败而且在当前行驶位置等待, 进而导致后续 AGV 排队, 装卸设备会产生较大的等待成本。

3.1 假设

1) 装卸任务既定, 集装箱装卸的位置已知(岸桥和箱区), 岸桥、箱区的位置已知, 集装箱的数量已知;

2) 不考虑 AGV 在箱区的排队情况, 箱区轨道吊能够及时作业, 不考虑集装箱堆存的具体箱位(包括船和堆场);

3) 岸桥装卸一个标准集装箱的作业时间服从(150 s, 180 s)的随机分布, AGV 在箱区支架放箱的时间服从(40 s, 60 s)的随机分布;

4) 赋权有向图 $G = (N, W)$ 表示 AGV 路网布局^[19], $W_{r,(i,j)} = (n_i + n_j)$ 表示路径 r 上第 i 个节点到第 j 个节点的边。

3.2 参数

1) 参数集合

Q : 岸桥装卸位置(节点)的集合, $Q = (1, 2, \dots, q_a)$, 数量为 a 。

B : 箱区轨道吊装卸位置(节点)集合, $B = (1, 2, \dots, b_b)$, 数量为 b 。

P_v : AGV 行驶区域的路径节点集合, $P_v = (1, 2, \dots, p_c)$, 路径节点的数量为 c 。

P_v' : AGV 缓存区的节点集合。

N : 所有作业位置的集合, $N = Q \cup B \cup P_v$, 作业点数量为 $a + b + c$; $i, j \in N$, 是集合 N 中的节点编号。

N_r : 路径 r 经过的所有节点的集合。

s : 路径 r 的起始位置。

e : 路径 r 的终点位置。

v_0 : AGV 的行驶速度。

v_1 : AGV 的最低行驶速度。

α : AGV 的加速度。

V : AGV 作业的集合, $V = (1, 2, \dots, v_k)$, AGV 数量为 k 。

L : AGV 的长度。

L_s : 两台 AGV 之间的最小安全距离。

l_s : 两台 AGV 之间, 一台申请路段失败后减速以避免让另一台 AGV 的行驶距离。

L' : AGV 在路径中开始调整速度的点到冲突节点的距离。

n_t : 所规划的 AGV 行驶路径中的转弯次数。

P_{lock} : AGV 申请的下一行驶路径的长度。

O_s, O_f : 虚拟的开始位置和结束位置。

∂ : AGV 通过节点 i 和节点 j 之后到达的下一节点的编号。

2) 决策变量

d_{ij} : 行驶区域中, 作业点 i 和节点 j 之间的距离。

d_{ij}^b : AGV 缓存区中节点 i 和节点 j 之间的距离。

$num(N_r)$: 路径 r 经过的所有节点的数量。

n_{ri} : 路径 r 中第 i 个节点的编号, $1 < n_{ri} < num(N_r)$ 。

$C_{(r_1, r_2)}$: 路径 r_1 和路径 r_2 中重叠路段的节点集合, $r_1, r_2 \in R$ 。

$num(C_{(r_1, r_2)})$: 路径 r_1 和路径 r_2 中重叠节点的个数。

c_{rh} : 路径 r 中重叠位置的节点编号, $1 < c_{rh} < num(C_{(r_1, r_2)})$ 。

u_{rh} : 路径 r 中重叠路段节点 c_{rh} 在该路径所有节点集合 N_r 中的位置。

p_{rk} : 路径 r 中第 k 台 AGV 的优先级。

e_{rks} : 路径 r 中第 k 台 AGV 在起始位置 s 的时间。

t_{rkh} : 路径 r 中第 k 台 AGV 到达重叠路段第 h 个重叠节点的时间。

t_{rke} : 路径 r 中第 k 台 AGV 到达终点 e 的时间。

t_{rk}^k : 路径 r 中第 k 台 AGV 到达重叠路段的时间。

T_{rk} : AGV 从接收作业指令到完成任务的时间。

$x_{ij}^{v_k}$: 若 AGV 从节点 i 到节点 j , 则 $x_{ij}^{v_k} = 1$; 否则, $x_{ij}^{v_k} = 0$ 。

3.3 数学模型

本文建立的模型以 AGV 在岸桥和场桥之间运输集装箱的行驶距离最小化为目标, 从计划前的 AGV 路径中选择最优路径。为了避免 AGV 冲突, 遵循先到先得的原则, 采用速度控制策略来检测 AGV 行驶路径中的重叠率和冲突时间。这个问题的数学规划模型表达如下:

目标函数:

$$f = \min \sum_{v_k \in V} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{ij}^{v_k} d_{ij}$$

约束:

$$\sum_{v_k \in V} \sum_{i \in N} x_{ij}^{v_k} = 1, j \in N \quad (1)$$

$$\sum_{v_k \in V} \sum_{j \in N} x_{ij}^{v_k} = 1, i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N} x_{O_s i}^{v_k} = 1, v_k \in V \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N} x_{j O_f}^{v_k} = 1, v_k \in V \quad (4)$$

$$d_{ij} \neq d_{ji}, i, j \in (N - p_v') \quad (5)$$

$$d_{ij}^b = d_{ji}^b, i, j \in p_v' \quad (6)$$

$$|d_{i,j} + d_{j,\partial}| > \sqrt{(x_i - x_\partial)^2 + (y_i - y_\partial)^2} \quad (7)$$

$$Overlap Rate = \frac{\text{Number of overlapped nodes}}{\text{Number of AGV nodes}} \times 100\% \quad (8)$$

式(1)表示 AGV v_k 通过节点 i , 只有一个后续路径节点 j 。式(2)表示 AGV v_k 到达节点 j , 只有一个前序节点 i 。式(3)约束 AGV v_k 从虚拟起点开始每次作业。式(4)约束 AGV v_k 完成一次作业回到虚拟终点。式(5)定义 AGV 在海侧/陆侧的为单向导引路径。式(6)定义 AGV 在缓存区的为双向导引路径。式(7)判断 AGV 通过节点 i 和节点 j 之后到达下一节点时是否转弯。依据曼哈顿距离和欧拉距离计算方法对行驶路径中的转弯情况进行判断。曼哈顿距离计算方法为: AGV 从节点 i 通过节点 j 到达节点 ∂ 的距离值为 $d_{i,\partial} = |x_i - x_\partial| + |y_i - y_\partial|$ ^[20]; 欧拉距离计算方法为: AGV 从节点 i 通过节点 j 到达节点 ∂ 的距离值为

$d_{i,\delta} = \sqrt{(x_i - x_\delta)^2 + (y_i - y_\delta)^2}$ ^[21]。在 AGV 的路网中,当 AGV 从节点 i 通过节点 j 到达节点 δ 时,若 $|x_i - x_\delta| + |y_i - y_\delta| = \sqrt{(x_i - x_\delta)^2 + (y_i - y_\delta)^2}$, 则 AGV 不转弯,直行通过下一节点;若 $|x_i - x_\delta| + |y_i - y_\delta| > \sqrt{(x_i - x_\delta)^2 + (y_i - y_\delta)^2}$, 则 AGV 在节点 j 处转弯前往下一节点 δ 。式(8)定义重叠率,重叠率表示重叠路段占总路段的概率。

在预规划路径模型的基础上,当 AGV 在岸桥和箱区之间作业时,在不同路径间存在重叠路段的情况下,若一台 AGV 在重叠节点处申请路径失败,说明重叠路段暂时被另一台 AGV 占用或申请,即冲突;若 AGV 继续前行,则可能发生路径间的冲突,如图 3 所示。

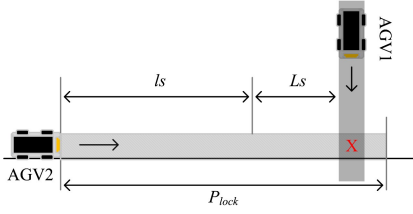


图3 AGV 冲突控制示意图

Fig. 3 Control of AGV conflict

式(9)定义了 P_{lock} 为 AGV2 申请的下一行驶路径的长度; L_s 为 AGV1 与 AGV2 应保持的安全行驶距离; l_s 为 AGV2 申请路段失败后,需要减速避让 AGV1 的行驶距离。AGV2 在申请下一行驶路段时,部分路段已被 AGV1 申请或占用,此时 AGV2 申请路段失败,则 AGV2 通过减速不断缩短其申请路径的长度,并与 AGV1 保持安全距离向前行驶。当该路段被释放时,即 AGV2 与 AGV1 的安全距离大于 L_s 时,AGV2 可以申请通过。

$$P_{lock} = (v_0^2 - v_1^2) / (2 \cdot a) + L_s \quad (9)$$

$$C_{(r_1, r_2)} = N_{r_1} \cap N_{r_2} \quad (10)$$

$$t_{rc}^k = |t_{r_1 c}^{k_1} - t_{r_2 c}^{k_2}| \leq \lceil [(L + L_s) / v_0^{min(t_{r_1 c}^{k_1}, t_{r_2 c}^{k_2})}] \rceil \quad (11)$$

$$t_{r_1 k_1 c_h} > t_{r_2 k_2 c_h} \rightarrow P_{r_1 k_1} < P_{r_2 k_2} \quad (12)$$

式(10)根据已规划的两条 AGV 路径中的重叠节点,预判 AGV 在行驶中是否存在冲突的可能性。式(11)判断 AGV 在重叠路段是否存在时间冲突,若在重叠路段存在时间冲突,则说明 AGV 在该路段冲突。将 AGV 所要申请的下一行驶路段转化为时间函数,比较两台 AGV 匀速到达重叠节点的时间差,后到达重叠节点的 AGV2 与先到达重叠节点的 AGV1 始终保持安全距离。若两台 AGV 通过节点的时间差少于 AGV1 顺利通过并与 AGV2 保持安全距离的时间,则说明 AGV2 申请路径失败,记为一次冲突。当检测到路径中存在或可能存在 AGV 冲突时,判断冲突路段的 AGV 作业优先级,并针对冲突情况进行具体的控制和解决。式(12)基于排队论中先到先服务的策略,对冲突 AGV 申请路段的先后顺序进行判断。先申请到路段或正在占用路段的 AGV 优先级高,申请路段失败的 AGV 优先级低。此时,优先级低的 AGV 减速,等待优先级高的 AGV 先通行。

在自动化码头的实际作业中,当 AGV 重载与空载时,其速度存在一定的变化。在求解 AGV 路径冲突问题时,结合实际情况,式(13)一式(15)分别对 AGV 的行驶速度、加速度及减速度变化分空载、重载进行设定。

$$v_0 = \begin{cases} v_0^F, & \text{AGV 重载} \\ v_0^X, & \text{AGV 空载} \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{if } a > 0, a = \begin{cases} a_+^F, & \text{AGV 重载} \\ a_+^X, & \text{AGV 空载} \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{if } a < 0, a = \begin{cases} a_-^F, & \text{AGV 重载} \\ a_-^X, & \text{AGV 空载} \end{cases} \quad (15)$$

式(16)表示在冲突情况下,优先级低的 AGV 从 v_0 减速到 v_1 的距离 L_s ,也是 AGV 从 v_1 加速回到 v_0 的行驶距离;式(17)表示在路径 r_1 中 AGV 从距离冲突节点 L' 时开始减速,然后以 v_1 匀速行驶到达冲突节点时,路径 r_2 中 AGV 完全通过冲突节点,并与路径 r_1 中 AGV 保持安全距离 L_s ;式(18)一式(19)是关于速度控制时间的约束,AGV 到达冲突节点前减速行驶的时间为 t_1 ,通过冲突节点后以 a 为加速度加速回到 v_0 所需的时间为 t_2 ;式(20)一式(22)分别表示在速度控制策略下,AGV 减速到达冲突节点、加速离开前一个冲突节点和到达第 h 个冲突节点的时间;其中 $2 < h < num$ ($C_{(r_1, r_2)}$);式(23)表示速度控制策略下,AGV 到达终点位置的时间 $T'_{r_1 k}$ 。

$$L_s = \frac{v_0^2 - v_1^2}{2a} \quad (16)$$

$$\frac{L + L_s + P_{lock}}{v_0} = \frac{L + L'}{v_0} + \frac{v_0 - v_1}{a} \quad (17)$$

$$t_1 = \frac{L + L_s'}{v_0} \quad (18)$$

$$t_2 = \frac{v_0 - v_1}{a} \quad (19)$$

$$t'_{r_1 k_1 c_1} = t_{r_1 c_1} + t_1 + (W_{r(s, c_h)} - L') / v_0 \quad (20)$$

$$t'_{r_1 k_1 c_2} = t_{r_1 k_1 c_1} + (W_{r(c_1, c_2)} - l_s) / v_0 + t_2 \quad (21)$$

$$\begin{aligned} t'_{r_1 k_1 c_h} &= t_{r_1 k_1 c_2} + \sum_{i=2}^{c_h} \sum_{j=2}^{c_h} W_{r(i, j)} / v_0 \\ &= t_{r_1 k_1 c_h} + \sum_{i=2}^{c_h} \sum_{j=2}^{c_h} (n_{r_1 i} \cdot n_{r_1 j}) / v_0 \end{aligned} \quad (22)$$

$$\min T'_{r_1 k} = t_{r_1 k c} - \frac{L_s' + L_s}{v_0} + t_1 + t_2 \quad (23)$$

4 模型求解

4.1 Dijkstra 算法与 DFS 算法

Dijkstra 算法和深度优先搜索 (Depth First Search, DFS) 算法都属于图论算法^[22],可以有效地用于求解最短路径问题。DFS 算法是基于递归原理,以初始位置为顶点,搜索其相邻节点,并记录每个节点的状态,通过不断迭代更新节点位置找到优化的路径节点,但其可能不是最优解^[23]。由于没有最优解约束,因此该算法需要遍历所有节点,求解的速度较慢。

然而,Dijkstra 算法从起始位置记录每个节点的最短路径,剔除具有较大值的路径节点^[24]。它能快速得到最优解,尤其是在大规模节点问题中。我们将 Dijkstra 算法与 DFS 算法 (Dijkstra-DFS) 相结合来解决自动化码头的路径规划问题,新算法对于大规模的路径节点问题是非常有效的。

目前国内外的自动化集装箱码头的水平运输路径的规划主要以磁钉为引导,采用磁钉对 AGV 进行导航和定位。针对磁钉规则性布局,Dijkstra 算法能够有效、合理地规划 AGV 路径。但结合 AGV 在实际作业中的转弯因素可知,其解并不一定是最优解。对此,通过结合 DFS 算法来获得转弯次数

最少的最优路径,其算法的流程图如图4所示。

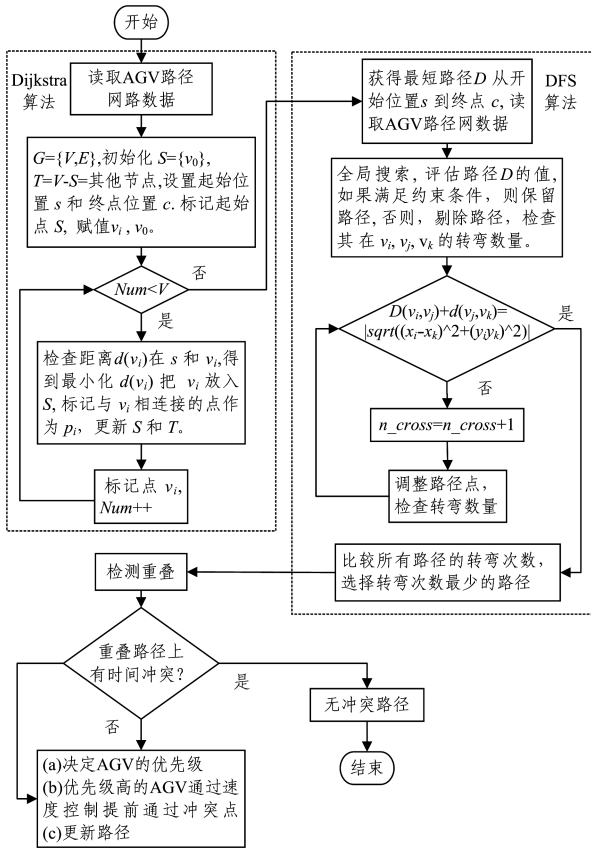


图4 Dijkstra-DFS算法的流程图
Fig. 4 Flow chart of Dijkstra-DFS

4.2 程序

针对AGV的无冲突路径规划主要分为3个部分:1)规划AGV路径,得出AGV在各岸桥-箱区间的行驶路径;2)检测AGV在行驶路径中的重叠路段及与其他AGV行驶路径的重叠情况,若检测出AGV申请下一行驶路段失败,则说明AGV之间可能发生冲突;3)利用AGV速度控制策略避免AGV在行驶路径上的冲突。

检查冲突的步骤如下:

步骤1 判断路径的冲突节点,由于节点集的路径 r_1 和路径 r_2 的节点集 B, C 是重叠节点集合, $C \in B$, 如果 C 是空集,则 r_1 和 r_2 之间没有冲突的路径,否则,可能存在有冲突的路径。

步骤2 根据AGV的行驶时间和速度计算路径节点的行驶计划,检测AGV在两条路径上的时间。如果AGV在不同路径下通过重叠节点的时差小于AGV安全距离的时间,则会产生冲突。

步骤3 采用速度控制策略解决路径冲突问题,根据AGV申请行驶路段是否成功,来判断发生路径冲突时AGV的优先级。

a)未申请成功的路径的AGV优先级较低,从 L_s 开始减速至安全距离,然后达到 v_1 的速度后再保持匀速。

b)优先级高的AGV加速通过冲突节点;

c)低优先级的AGV加速回到 v_0 ,再保持匀速。

步骤4 更新AGV行驶的时间,检测所有AGV在路径上的冲突。如果AGV在路径中有冲突(包括重叠和相交的

时间),则返回到步骤2,直到路径和路径之间没有冲突,以实现自由冲突路径规划。

5 算例分析

基于自动化集装箱码头的实际情况,首先利用Dijkstra-DFS算法得到AGV最优路径,然后检测和控制AGV在行驶中的冲突情况。仿真实验是在Windows 64位操作系统环境下的Matlab2018a中进行的。在本算例中,选择A,B,C3台岸桥,其对应c,e,a3个箱区分别进行卸船作业,每台岸桥作业100个集装箱,共作业300个集装箱。每条作业路中AGV的数量固定且只行驶于该作业路。当有AGV在岸桥处作业时,后续AGV排队等待。整个作业连续,即不中断。依据AGV作业位置规划AGV行驶路径,如图5所示。

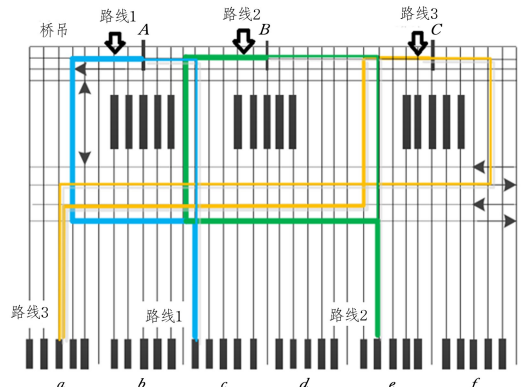


图5 AGV的行驶路径
Fig. 5 Driving path of AGV

如图5所示,预规划的AGV行驶路径从岸桥到箱区和从箱区到岸桥,其中路线1为岸桥A到箱c的作业路,路线2为岸桥B到箱e的作业路,路线3为岸桥C到箱a的作业路。对AGV运输作业进行冲突检测,然后检测所有路径的路段重叠情况。当AGV在每条作业路单独作业时,AGV之间不发生冲突。但当两条不同的AGV行驶路径存在重叠路段时,AGV发生冲突的概率大大提升。根据每条作业路中路段的重叠情况,对可能发生AGV冲突的路段进行检测,如表1所列。

表1 每条路径的重叠

Table 1 Overlap of each operation path

No.	AGV _(QC,YC)	Overlapping nodes	Theoperation number of overlaps path
1	C-a	77-73-72-295-286- 285-332-379	A-c,c-A, B-e,e-B
	a-C	379-332-285-239-247- 248-261-77	A-c,c-A, B-e,e-B
2	A-c	56-239-286- 341-389	a-C,C-a, B-e
	C-A	389-342-295-248- 60-59-56	a-C,C-a, B-e
3	B-e	65-60-59-247-294- 341-355-402	A-c,c-A, a-C,C-a,
	e-B	402-355-261- 73-72-65	a-C, C-a

参照自动化集装箱码头的设备情况,设定相关参数值如下:AGV的长度L为15m;两台AGV间的安全距离L_s为

4 m;当AGV重载时,其速度 v_0 为3 m/s,加速度和减速度均为 $a=0.5\text{ m/s}^2$;当AGV空载时,其速度 v_0 为6 m/s,加速度和减速度均为 $a=1.0\text{ m/s}^2$,AGV的最小速度 $v_1=0\text{ m/s}$ 。

对3台岸桥各作业100个箱子进行仿真模拟,通过AGV路径重叠-时间检测,依据式(9)一式(11)对AGV申请下一路段的行驶时间进行检测,得出AGV在各重叠路径中发生冲突的情况,如表2和图6所示。AGV发生冲突的次数与所在作业路一一对应。在同一时间段内,多台AGV到达同一个重叠位置时,冲突记为多次。

表2 AGV冲突的数量

Table 2 Number of AGV conflict

QCs	1(C-a)	2(A-c)	3(B-e)
Overlap nodes/ Number of conflict	4/27	—	5/24
	5/24	5/15	—
Total	51	42	39

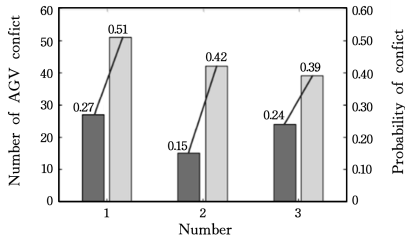


图6 AGV冲突在每条路径中的分布

Fig. 6 AGV conflict distribution in each path

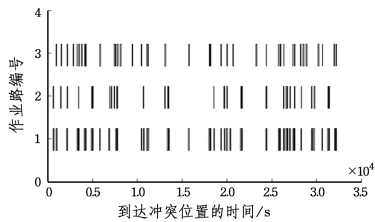


图7 在路径中AGV冲突的时间

Fig. 7 Time of AGV conflict in each path

3台岸桥各作业100个任务,作业路1共发生51次AGV冲突,冲突比例高达51%;作业路2共发生42次AGV冲突,冲突比例达42%;作业路3共发生39次AGV冲突,冲突比例达39%。其中,作业路1与作业路2存在4处路段重叠,冲突率为27%,作业路1与作业路3存在5处路段重叠,冲突率为24%;作业路2与作业路3存在5处路段重叠,冲突率为15%。由于岸桥和箱区轨道吊的作业效率相对守恒,本文不考虑AGV在岸桥和箱区作业时的AGV等待,作业路1、作业路2和作业路3各自路径内不存在AGV冲突。

结合表2和图7可知,当作业路1只与作业路2存在路段重叠时,发生AGV冲突27次;当作业路增加到3条时,作业路1中的AGV不仅与作业路2中的AGV发生冲突,还与作业路3中的AGV在行驶中发生冲突,冲突率由27%增加到51%。同理,作业路2中AGV的冲突率由15%增加到42%,作业路3中AGV的冲突率由24%增加到39%。通过速度策略控制AGV到达冲突位点的时间。根据AGV申请路段的优先级对重叠路段的冲突AGV进行速度控制,以避

免AGV在重叠路段冲突。

当发生冲突时,申请行驶路段失败的AGV优先级较低。在图6中,作业路1中AGV发生冲突的次数较多,速度变化也较大,这是因为作业路1与作业路2、作业路3均存在重叠位点,存在发生冲突的可能性。若一台AGV在一次作业任务中发生多次冲突,则其速度变化的时间就不断增加。

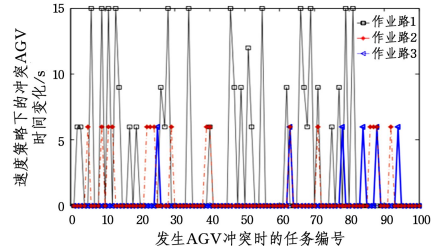


图8 各作业路中AGV冲突的速度控制

Fig. 8 Speed control of AGV conflict in each path

优先级低的AGV通过控制速度减速前行,延长了到达冲突位置的时间,直到优先级高的前一台AGV以正常速度离开冲突节点,从而避免两台AGV之间发生冲突。作业路中同一台AGV发生多次冲突时,则需多次等待。

图8展示了各作业路中AGV冲突的速度控制情况,可以看出:虽然作业路1与作业路2和作业路3均有路段重叠,但作业路1中AGV冲突次数最多,速度变化最复杂。在同一岸桥下的集装箱作业中,由于岸桥作业时间相对守恒,AGV在岸桥作业时可能会产生排队等待现象,但同一作业路中AGV冲突概率较小,其冲突的概率是与作业路数量呈同向增长的关系。随着任务量的增多,岸桥数量增加,作业路增加,各路径之间AGV重叠数量增加,发生冲突的概率也加大,不同作业路之间可能存在多次AGV冲突的概率也不断增加。

结束语 本文研究了自动化集装箱码头的AGV无冲突路径规划问题。首先,我们找出了行驶路径中AGV产生冲突的原因。由于在水平运输中未能成功申请下一行驶路径,AGV发生冲突,基于AGV的优先级,采用速度控制策略构建模型,然后使用Dijkstra-DFS算法获得最优路径。其次,对自动终端的AGV路径进行分段时间冲突测试,重叠部分采用速度控制策略进行控制。优先级较低的AGV通过减速,避免与优先级较高的AGV冲突,优先级较高的AGV可以优先通过冲突路段,即加速释放冲突路面。AGV在申请下一个驾驶区之前不需要停车,避免了车辆启动和停止的影响。最后,通过大量的仿真实验证明了基于速度控制的模型的有效性。该模型能有效解决AGV冲突问题,保证其安全运行,能最大限度地降低冲突对整个AGV运行效率的影响。实验表明:AGV的速度控制策略是一种有效的冲突控制方法,具有较高的实用性,可用于自动化集装箱码头AGV路径规划的实际生产操作。本文没有考虑AGV故障的冲突问题,今后可以进一步研究当一个AGV发生故障时,如何确保其他AGV在没有冲突和死锁的情况下正常运行。

参考文献

[1] FAZLOLLAHTABAR H, SAIDI-MEHRABAD M. Autono-

- mous Guided Vehicles; Methods and Models for Optimal Path Planning [M]. Springer Publishing Company, Incorporated, 2015.
- [2] WU Y, LUO J, ZHANG D, et al. An integrated programming model for storage management and vehicle scheduling at container terminals [J]. *Research in Transportation Economics*, 2013, 42(1): 13-27.
- [3] LUO J, WU Y. Modelling of dual-cycle strategy for container storage and vehicle scheduling problems at automated container terminals [J]. *Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review*, 2015, 79(7): 49-64.
- [4] HUO K G, ZHANG Y Q, HU Z H. Research on multi-load AGV scheduling of automated container terminals [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2016, 56(3): 244-251. (in Chinese)
霍凯歌, 张亚琦, 胡志华. 自动化集装箱码头多载 AGV 调度问题研究[J]. *大连理工大学学报*, 2016, 56(3): 244-251.
- [5] GHASEMZADEH H, BEHRANGI E, AZGOMI M A. Conflict-free scheduling and routing of automated guided vehicles in mesh topologies [J]. *Robotics & Autonomous Systems*, 2009, 57(6/7): 738-748.
- [6] CHIEW K, QIN S. Scheduling and Routing of AMOs in an Intelligent Transport System [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2009, 10(3): 547-552.
- [7] GAWRILOW E, KLIMM M, MÖHRING R H, et al. Conflict-free vehicle routing [J]. *Euro Journal on Transportation & Logistics*, 2012, 1(1/2): 87-111.
- [8] ZHONG J L, MASLOWSKI A. Path planning of AGV transportation subsystem in manufacturing environment [J]. *Mechanical Design and Manufacturing*, 2010, 48(2): 237-239. (in Chinese)
钟建琳, MASLOWSKI A. 制造环境中 AGV 运输子系统的路径规划[J]. *机械设计与制造*, 2010, 48(2): 237-239.
- [9] LI W G, SU X. AGV path planning based on improved A* algorithm [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2015, 38(10): 33-36. (in Chinese)
李伟光, 苏霞. 基于改进 A* 算法的 AGV 路径规划[J]. *现代制造工程*, 2015, 38(10): 33-36.
- [10] NISHI T, HIRANAKA Y, GROSSMANN I E. A bilevel decomposition algorithm for simultaneous production scheduling and conflict-free routing for automated guided vehicles [J]. *Computers & Operations Research*, 2011, 38(5): 876-888.
- [11] TAI Y P, XING K X, LIN Y G, et al. Research on multi-AGV path planning methods [J]. *Computer Science*, 2017, 44(S2): 84-87. (in Chinese)
秦应鹏, 邢科新, 林叶贵, 等. 多 AGV 路径规划方法研究[J]. *计算机科学*, 2017, 44(S2): 84-87.
- [12] ZHU L B, WANG H, WANG J L, et al. Research on parking system path planning based on dynamic time window [J]. *Journal of Engineering Design*, 2017, 24(4): 440-448. (in Chinese)
朱龙彪, 王辉, 王景良, 等. 基于动态时间窗的泊车系统路径规划研究[J]. *工程设计学报*, 2017, 24(4): 440-448.
- [13] WANG H, ZHU L B, ZHU T C, et al. Research on parking system path planning based on particle swarm genetic algorithm [J]. *Journal of Engineering Design*, 2016, 23(2): 195-200. (in Chinese)
王辉, 朱龙彪, 朱天成, 等. 基于粒子群遗传算法的泊车系统路径规划研究[J]. *工程设计学报*, 2016, 23(2): 195-200.
- [14] UMAR U A, ARIFFIN M K A, ISMAIL N, et al. Priority-Based Genetic Algorithm for Conflict-Free Automated Guided Vehicle Routing [J]. *Procedia Engineering*, 2012, 50(9): 732-739.
- [15] LIU D K, WU X, KULATUNGA A K, et al. Motion Coordination of Multiple Autonomous Vehicles in Dynamic and Strictly Constrained Environments [C] // 2006 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems. IEEE, 2006: 1-6.
- [16] LI H G, JIA J C, LENG C H. Multi-AGV path planning based on step control algorithm [J]. *Control Engineering*, 2010, 17(S2): 93-96. (in Chinese)
李惠光, 贾建成, 冷春辉. 基于分步控制算法的多 AGV 路径规划[J]. *控制工程*, 2010, 17(S2): 93-96.
- [17] SU X, LI W G. Path planning of automatic pilot vehicle in FMS [J]. *Mechanical Design and Manufacturing*, 2015, 53(1): 201-203. (in Chinese)
苏霞, 李伟光. FMS 中自动导引车路径规划[J]. *机械设计与制造*, 2015, 53(1): 201-203.
- [18] WU H M, SU M J, GUAN Y S, et al. Noncollision motion planning for multi-robot with dynamic operation sequence adjustment [J]. *Robot*, 2016, 38(6): 651-658. (in Chinese)
吴鸿敏, 苏满佳, 管贻生, 等. 动态调整操作序列的多机器人无碰撞运动规划[J]. *机器人*, 2016, 38(6): 651-658.
- [19] BAR-YEHUDA R, MORAN S. On approximation problems related to the independent set and vertex cover problems [J]. *Discrete Applied Mathematics*, 1984, 9(1): 1-10.
- [20] KE J J, HU J Z. Fault feature extraction algorithm based on Manhattan distance and random neighborhood embedding [J]. *Computer Application Research*, 2015, 32(10): 2992-2995. (in Chinese)
柯佳佳, 胡建中. 基于 Manhattan 距离与随机邻域嵌入的故障特征提取算法[J]. *计算机应用研究*, 2015, 32(10): 2992-2995.
- [21] CHEN F W, ZHAO X H, ZHOU J Z. Euler formula [D]. *Mathematical Journal*, 2005, 25(4): 355-357. (in Chinese)
陈方维, 赵雪华, 周家足. 类似的 Euler 公式[J]. *数学杂志*, 2005, 25(4): 355-357.
- [22] 王海英. 图论算法及其 MATLAB 实现 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.
- [23] GENG J, CAI B G, WANG J, et al. Research on the traversal algorithm of railway station yard based on deep priority search [J]. *Journal of Railway Science*, 2012, 34(4): 51-56. (in Chinese)
耿杰, 蔡伯根, 王剑, 等. 基于深度优先搜索的铁路站场遍历算法研究[J]. *铁道学报*, 2012, 34(4): 51-56.
- [24] LIU J M, MA S F, MA S Q. Dynamic shortest circuit calculation method based on improved Dijkstra algorithm [J]. *Systems Engineering Theory and Practice*, 2011, 31(6): 1153-1157. (in Chinese)
刘建美, 马寿峰, 马帅奇. 基于改进的 Dijkstra 算法的动态最短路计算方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2011, 31(6): 1153-1157.