

集装箱码头装卸运输路径轨迹规划研究

王洋洋, 朱 瑾

(上海海事大学物流科学与工程研究院, 上海 201306)

摘要: 集装箱码头装卸运输路径轨迹规划研究的目的是为了实现 AGV 的无碰撞轨迹规划。能效调度是 AGV 在执行集装箱任务过程中不可忽略的重要因素, AGV 的能效调度会影响 AGV 的实际作业轨迹, 因此集装箱码头装卸运输路径轨迹规划研究的难点技术之一是如何协调 AGV 的能效调度与 AGV 的轨迹规划以实现 AGV 的无碰撞轨迹。针对上述问题, 提出了一种实现 AGV 无碰撞轨迹规划的两阶段能效法。在考虑静止障碍与移动障碍的情况下, 采用分层控制结构来协调 AGV 的能效调度与 AGV 的轨迹规划, 以最小化 AGV 作业加速度累积和为目标, 建立 AGV 轨迹规划问题的混合整数线性规划模型。通过设计 AGV 的作业时间窗, 得到了两个 AGV 的无碰撞作业轨迹。通过仿真, 得到两个 AGV 作业的相对距离和各自的能耗。仿真结果验证了所提方法对协调 AGV 能效调度与 AGV 轨迹规划来实现 AGV 无碰撞轨迹规划的有效性。

关键词: 自动化集装箱码头; 轨迹规划; 碰撞规避; 混合整数线性规划

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** B

Research on Trajectory Planning of Handling and Transportation Path in Container Terminals

WANG Yang-yang, ZHU Jin

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

ABSTRACT: The research on trajectory planning of handling and transportation path in container terminals is to achieve AGV collision-free trajectory planning. Energy-efficient scheduling is an important factor that AGV cannot be neglected in the process of completing container jobs. AGV energy-efficient scheduling will affect the actual operation trajectory of AGV. Therefore, one of the most difficult techniques to research on trajectory planning of handling and transportation path in container terminals is how to coordinate AGV energy-efficient scheduling and AGV trajectory planning to achieve AGV collision-free trajectory. In order to solve this problem, a two-level energy-efficient method to achieve AGV collision-free trajectory planning is proposed. Considering static obstacle and moving obstacle, the hierarchical controller is used to coordinate the energy-efficient scheduling of AGV and the trajectory planning, and the objective of minimizing the cumulative acceleration of AGV operation is to formulate mixed integer linear programming model of AGV trajectory planning problem. Then by designing the job time window of the AGV, a collision-free job trajectory of two AGVs is obtained. By simulation, the relative distance between two AGVs and energy usage of two AGVs between quayside and stacking area are obtained. The simulation results illustrate the effectiveness of the proposed method to achieve AGV collision-free trajectory by coordinating the AGV energy-efficient scheduling and AGV trajectory planning.

KEYWORDS: Automated container terminal; Trajectory planning; Collision avoidance; Mixed-integer linear programming

1 引言

集装箱码头 AGV 的主要研究方向之一就是 AGV 的轨

迹规划问题。在自动化集装箱码头, 自动导引小车 (AGV) 分别与岸桥 (QC) 和场桥 (YC) 负责岸侧和堆区集装箱的装卸运输。与 QC 和 YC 相比, 因为 AGV 的二维轨迹需要与 QC 和 YC 相互作用才能完成任务, 这使得 AGV 的动态行为变得更加复杂。因此, AGV 无碰撞轨迹是集装箱码头 AGV 作业调度和轨迹规划的一个重要方面。

目前集装箱码头 AGV 的作业过程通常忽略 AGV 的轨

基金项目: 上海市浦江人才计划 (16PJCO43); 上海市教委科研创新项目 (15ZZ078)

收稿日期: 2017-12-19 修回日期: 2018-01-18

迹规划问题^[1],AGV 的轨迹规划问题属于集装箱码头路径规划的优化问题,AGV 在执行任务的过程中,碰撞冲突是不可忽略的,在集装箱码头的研究过程中,很多文献也研究了 AGV 的轨迹规划问题^[2]。世界上第一个自动化集装箱码头荷兰鹿特丹港 ECT 码头于 1993 年投入运营,此后德国汉堡港 CTA 码头等^[3]自动化码头相继建成,国内外学者围绕自动化码头 AGV 轨迹规划做了相关的研究。文献[4]基于离散事件动态和连续时间动态提出了滚动时域状态监测控制器,以最小化 AGV、QC 和 ASC 的在调度和重调度过程中的能耗最小为目标函数,采用事件驱动能效算法求解模型,但文献[4]未考虑 AGV 的碰撞约束。文献[5-6]提出离散事件动态和连续时间动态模型,以最后一个集装箱离开船舶的时间最短为目标函数,将 AGV 与 QC 和 ASC 的作业过程视为混合流水车间调度,采用启发式算法为所有任务分配各自的最优路径及调度方案,但文献[5-6]只考虑静止障碍,未考虑移动障碍。文献[7]与文献[8-9]都是运用混合启发式算法对带时间窗的车辆路径问题进行研究,最终达到行驶距离最小化,但文献[7][8][9]没有考虑 AGV 的能效调度问题。文献[10]以最小化所有 AGV 总行驶距离和单个 AGV 行驶路径为双路径约束,采用改进的遗传算法可以缩短所有 AGV 的总行驶距离以及单个 AGV 的行驶距离,但文献[10]未考虑能效调度。文献[11]针对 AGV 路径规划的问题,提出了 A* 和 D* Lite 启发式算法,文献[11]未考虑 AGV 的二维模型。文献[12]研究了多 AGV 堆场系统和改进的具有两阶段交通调度方案,结合数字地图分别考虑 AGV 的在线和离线阶段的路径规划,并设计启发式算法求解 AGV 的无碰撞轨迹,文献[12]未考虑动态障碍模型。文献[13]以最小化作业延迟时间为目标,将 AGV 的路径规划问题视为具有优先约束(TSPP-PC)旅行商问题,提出一种基于精确算法的启发式算法进行求解。上述文献[10-13]都未同时对静止障碍和移动障碍进行具体建模分析以及并未考虑 AGV 能效调度与 AGV 轨迹规划之间的相互作用。因 AGV 的能效调度广泛存在于集装箱码头岸桥、场桥和 AGV 装卸运输集装箱作业过程中,且一般是不可忽略的重要方面,所以考虑 AGV 能效调度与 AGV 的轨迹规划相互作用对 AGV 无碰撞轨迹规划方法的研究是必要且具有实际意义的。

针对上述问题,提出一种集装箱码头装卸运输路径轨迹规划方法。本文首先建立 AGV 的动态模型以及静止障碍和移动障碍两种障碍规避的约束模型,然后建立关于 AGV 最短时间优化问题的混合整数线性规划模型;再采用分层控制结构来协调 AGV 能效调度与 AGV 轨迹规划,由状态监测控制器向阶段控制器发送请求,获取每个任务的最小完工时间,确定各个任务的操作时间窗并将其发送给阶段控制器,再由阶段控制器将时间窗发送给特定的 AGV 本地控制器,然后由各个 AGV 本地控制器在接收到时间窗约束时间后,通过求解 AGV 的最短时间优化问题来实现 AGV 的无碰撞轨迹;最后通过仿真进行实验分析。实验结果表明,所提方

法对协调 AGV 能效调度与 AGV 轨迹规划相互作用实现 AGV 无碰撞轨迹的有效性,因此有必要采用一种两阶段能效法来解决集装箱码头装卸运输路径轨迹规划问题。

2 集装箱码头装卸运输系统模型

根据自动化集装箱码头装卸设备的特点,当两种设备进行集装箱的交接时,连续时间动态即设备的位置和速度由离散事件驱动,并且随着离散事件动态变化而变化,所以运输集装箱的过程可以由离散事件动态驱动和连续时间动态的组合来表示。因此与 QC 和 YC 相比,AGV 负责岸桥与堆区集装箱的来回运输,这使得 AGV 的轨迹规划更加复杂且两个 AGV 之间可能发生相互碰撞,所以本文主要研究 AGV 的数学模型。

2.1 AGV 的数学模型

为了更加清晰的描述 AGV 的数学模型,表征 AGV 的位置、速度等信息,本文采用点-质量模型来描述 AGV 二维空间的动态行为 $\forall k$

$$\begin{bmatrix} r_p(k+1) \\ v_p(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_2 & \Delta T I_2 \\ 0_2 & I_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_p(k) \\ v_p(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.5(\Delta T)^2 I_2 \\ \Delta T I_2 \end{bmatrix} u_p(k) \quad (1)$$

式中 AGV_p 的位置是 $r_p(k) = [r_p^x(k) \ r_p^y(k)]^T$,速度和加速度分别是 $v_p(k) = [v_p^x(k) \ v_p^y(k)]^T$, $\mu_p(k) = [\mu_p^x(k) \ \mu_p^y(k)]^T$ ($u_p(k) \in R^2$), I_2 是 2×2 的单位矩阵, ΔT 是时间间隔。

为避免非线性不等式对计算时间的影响,这里最大速度和加速度约束均采用线性多边形等式约束。速度和加速度的约束条件为式(2)和(3)

$$(\forall p \in [1 \dots n], \forall m \in [1 \dots M]) \\ v_p^x(k) \sin(\frac{2\pi m}{M}) + v_p^y(k) \cos(\frac{2\pi m}{M}) \leq v_{\max} \quad (2)$$

$$u_p^x(k) \sin(\frac{2\pi m}{M}) + u_p^y(k) \cos(\frac{2\pi m}{M}) \leq u_{\max} \quad (3)$$

其中 v_{\max} 和 u_{\max} 分别是速度和加速度的上限值, M 是任意数,这里取 $M = 10$ 。

2.2 碰撞障碍的数学模型

为了直观的观察和分析可能发生的碰撞,本文考虑两种类型的碰撞。一种是与静止障碍发生的碰撞。另一种是两台 AGV 在集装箱作业过程中发生的相互碰撞。为了安全地规避这两种碰撞,假设 AGV 占据一个矩形安全区域,该矩形区域的安全距离是 d ,区域面积为 $2d \times 2d$,如图 1。

2.2.1 静止障碍的数学模型

本文考虑的静止障碍是场桥的两条轨道区域,如图 2。图 2(a) 为堆栈附近的两个静止障碍区域。图 2(b) 给出了图 2(a) 的其中一个矩形静止障碍区坐标示意图。矩形区域可以由左下角坐标($s^{low \ x} \ s^{low \ y}$)和右上角坐标($s^{high \ x} \ s^{high \ y}$)表示。为避开静止障碍区域, AGV_p 的位置必须总是在该矩形区域的外面。满足该碰撞规避要求的约束条件如下:

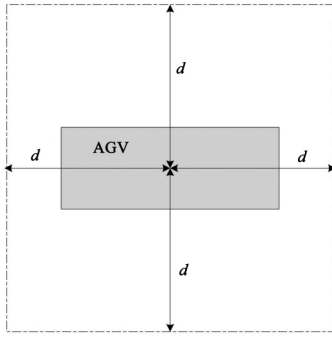


图1 单个 AGV 的安全区域

$$\begin{aligned} r_p^x(k) &\leq s^{low\ x} - d \\ \text{or } r_p^x(k) &\geq s^{high\ x} + d \\ \text{or } r_p^y(k) &\leq s^{low\ y} - d \\ \text{or } r_p^y(k) &\geq s^{high\ y} + d \end{aligned} \quad (4)$$

其中 d 是单个 AGV 区域的安全距离。引入二进制变量, 式 (4) 可以改写成如下标准优化问题的形式

$$\begin{aligned} r_p^x(k) &\leq s^{low\ x} - d + Rb_{in\ 1}(k) \\ r_p^x(k) &\geq s^{high\ x} + d - Rb_{in\ 2}(k) \\ r_p^y(k) &\leq s^{low\ y} - d + Rb_{in\ 3}(k) \\ r_p^y(k) &\geq s^{high\ y} + d - Rb_{in\ 4}(k) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\sum_{\tau=1}^4 b_{in\ \tau}(k) \leq 3, \forall p \in [1, \dots, n] \quad (6)$$

其中 R 是一个很大的正实数 $b_{in\ \tau} \in \{0, 1\}$ ($\tau = \{1, 2, 3, 4\}$)。等式 (5) 和 (6) 保证了等式 (4) 中至少有一个等式是成立的, 这样就保证了 AGV 在静止障碍区的外面。

2.2.2 移动障碍的数学模型

当多个 AGV 运输集装箱到不同终点位置时, 需要考虑这些 AGV 之间可能发生的碰撞。在每段时间间隔里, 除了 AGV p_1 和 AGV p_2 的坐标 (x, y) 彼此不同以外 ($p_1 \neq p_2$), 两者间还要保持一段最小安全距离。由以上提到的 d 是单个 AGV 区域的安全距离, 则 $2d$ 是两台 AGV 之间的安全距离。所以该约束条件如下

$$\begin{aligned} (\forall p_1, p_2 \in [1, \dots, n], p_1 \neq p_2) \\ ||r_{p_1}^x(k) - r_{p_2}^x(k)|| \geq 2d \quad \text{or} \quad ||r_{p_1}^y(k) - r_{p_2}^y(k)|| \geq 2d \end{aligned} \quad (7)$$

为得到标准优化模型, 引入二进制变量, 改写式 (7) 如下

$$\begin{aligned} r_{p_1}^x(k) &\leq r_{p_2}^x(k) - 2d + Rb_{m\ 1}(k) \\ r_{p_1}^x(k) &\geq r_{p_2}^x(k) + 2d - Rb_{m\ 2}(k) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} r_{p_1}^y(k) &\leq r_{p_2}^y(k) - 2d + Rb_{m\ 3}(k) \\ r_{p_1}^y(k) &\geq r_{p_2}^y(k) + 2d - Rb_{m\ 4}(k) \end{aligned} \quad (9)$$

其中 R 是足够大的正实数 $b_{m\ \tau} \in \{0, 1\}$ ($\tau = \{1, 2, 3, 4\}$)。

式 (8) 和式 (9) 保证式 (7) 是成立的。

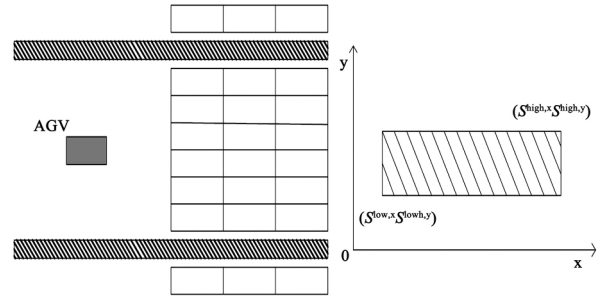


图2 静止障碍区域示意图

2.3 集装箱码头装卸运输轨迹规划控制难点

AGV 在给定的时间窗内完成指定集装箱任务所需的能耗称为能效调度, 能效调度是集装箱码头 AGV 运输路径轨迹规划中必须考虑的因素之一, 当任务与 AGV 分配好之后, AGV 需要从起点尽可能快地且无碰撞地顺利到达终点, AGV 所需能耗的多少也就直接影响集 AGV 的实际作业轨迹。与 QC 和 YC 相比, 由于 AGV 的二维轨迹需要与 QC 和 YC 相互作用才能完成集装箱任务的装载与卸载, 这使得 AGV 的动态行为变得更加复杂。

由于不同类型的设备之间相互作用, 一种设备可能需要等待另一种设备, 此时设备需要一定的等待时间。然而, 对于 AGV 一个给定的行驶距离, 当 AGV 的完工时间增加时可以通过减少等待时间从而 AGV 的能耗可以减少, 进而影响 AGV 的运输路径规划, 因此集装箱码头装卸运输路径轨迹规划研究的难点技术之一是如何设置一种控制方法协调 AGV 的能效调度与 AGV 的轨迹规划来实现 AGV 的无碰撞轨迹规划。

3 基于分层控制器的两阶能效法

针对如何协调 AGV 的能效调度与 AGV 的轨迹规划以实现 AGV 的无碰撞轨迹问题, 本文设计了一种基于分层控制器的两阶能效法来进行处理, 如图 3。当两种设备进行集装箱的交接时, 连续时间动态即设备的位置和速度由离散事件驱动, 并且随着离散事件动态变化而变化, 所以运输集装箱的过程可以由离散事件动态驱动和连续时间动态的组合来表示, 因此 AGV 集装箱运输过程可分为两个层次。该分层控制器有三个部分组成: 状态监测控制器, 阶段控制器以及本地设备控制器, 其中状态监测控制器和阶段控制器属于高层控制器, 本地控制器属于低层控制器。状态监测控制器用于确定 AGV 的能效调度, 阶段控制器用于分配每个操作任务的时间窗给 AGV 的本地控制器, 单个本地控制器通过计算最小能耗来确定 AGV 的轨迹规划。由于 AGV 可能发生相互碰撞, 即移动障碍, 所以本文详细说明 AGV 在该方法中的作业步骤。该方法具体步骤如下:

步骤一: 阶段控制器发送最小时间 s_j^1 发送集装箱 j 最小完工时间 s_j^1 从岸侧运送至堆区; 然后在执行完集装箱 j 运输

后,再发送最小时间 s_j^2 从堆区返回至岸侧;

步骤二: 状态监测控制器计算出所有操作的时间表,并将集装箱 j 的时间窗 $[t_j^{1s}, t_j^{1e}]$ 和 $[t_j^{2s}, t_j^{2e}]$ 传输给 AGV 阶段控制器。 t_j^{1s} 和 t_j^{1e} 是集装箱 j 从岸侧到堆栈区运输的开始时间和结束时间; t_j^{2s} 和 t_j^{2e} 是集装箱 j 从堆栈区到岸侧返回的开始时间和结束时间;

步骤三: 阶段控制器将时间窗 $[t_{ij}^{1s}, t_{ij}^{1e}]$ 和 $[t_{ij}^{2s}, t_{ij}^{2e}]$ 分配给特定的 AGVi 的本地设备控制器 $i = 1, 2, \dots, n$ 。 t_{ij}^{1s} 和 t_{ij}^{1e} 表示运送集装箱 j 的 AGVi 从岸侧移动至堆区的开始时间和结束时间; t_{ij}^{2s} 和 t_{ij}^{2e} 表示运输集装箱 j 的 AGVi 从堆区空载返回至岸侧的开始时间和结束时间;

步骤四: 单个设备控制器接受阶段控制器发送的时间窗并根据最小能耗确定 AGV 的运输路径轨迹规划。

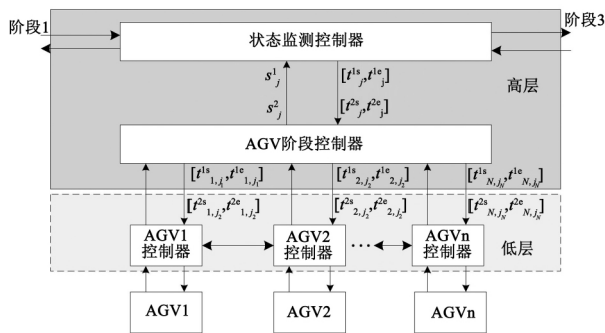


图3 分层控制器

3.1 最小时间计算

在最小时间计算问题中,要求 AGV_p 尽可能快的从起点位置 $r_{p,0} (r_p(0) = r_{p,0})$ 到达终点位置 $r_{p,f} = [r_{p,f}^x, r_{p,f}^y]^T$ 。假定 T 是给定时间窗的长度,在已知的时间间隔 $[0, \dots, T-1]$ 内, AGV 只有在特定时刻才能达到目标位置 $r_{p,f}$ 且由时刻 k 一个二进制变量所决定的。该约束条件如下: $\forall p \in [1, \dots, n]$

$$\begin{aligned} r_p^x(k) - r_{p,f}^x &\leq R(1 - b_p(k)) \\ r_p^x(k) - r_{p,f}^x &\geq -R(1 - b_p(k)) \\ r_p^y(k) - r_{p,f}^y &\leq R(1 - b_p(k)) \\ r_p^y(k) - r_{p,f}^y &\geq -R(1 - b_p(k)) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^{T-1} b_p(k) = 1, \forall k \in [1, \dots, T-1] \quad (11)$$

其中 $b_p(k) \in \{0, 1\}$ 是一个二进制变量 R 是一个足够大的正实数约束仅当 $b_p(k) = 1$ 的时,式(10)是成立的。式(10)和式(11)约束当 $b_p(k) = 1$ 时,保证 AGV 由起点位置 $r_{p,0}$ 到目标位置 $r_{p,f}$ 。

这里假定 $t(k)$ 是从 0 时刻到时刻 $k (t(k) = k)$ 的时间差,那么当 $b(k) = 1$ 时 $t(k) b(k)$ 就是操作的完成时间。因此,根据不同的位置 r_f , 运输集装箱 j 的最小时间可以通过最小化总完成时间得到

$$\min_{u, b} \sum_{k=1}^{T-1} t(k) b_p(k) = 1 \quad (12)$$

约束条件: 式(1) ~ (5) (10) 和(11)。

其中 $\mu = [u(0), u(1), \dots, u(T-1)]^T$ 和 $b = [b_p(0), b_p(1), \dots, b_p(T-1)]^T$ 分别表示优化问题(6)中的连续决策变量和二进制决策变量。式(11)的目标函数值就是运输集装箱 j 的最小时间,即 s_j^1 和 s_j^2 。

3.2 最小能耗计算

通过减少 AGV 在运输集装箱过程中的加速度累积和来实现 AGV 从原点到终点的无碰撞轨迹。因此,考虑到 AGV 动态模型和碰撞障碍模型,最小能耗优化问题的混合整数规划模型可以写成如下: $\forall p \in [1, \dots, n]$

$$\min_{u, b} \lambda_{eng} \sum_{k=0}^{T-1} (|u_p^x(k)| + |u_p^y(k)|) \quad (13)$$

约束条件: 式(1) ~ (9)。

其中 $\mu = [u(0), u(1), \dots, u(T-1)]^T$ 连续决策变量, $b = [b_p(0), b_p(1), \dots, b_p(T-1)]^T$ 二进制决策变量 λ_{eng} 为很小的惩罚系数。

4 实验结果与分析

为了验证本文两阶能效法在集装箱码头装卸运输路径轨迹规划研究中的有效性,需要设置集装箱码头相关参数,通过仿真给出 AGV 的无碰撞轨迹图,以及两个 AGV 随时间变化的相对距离和各自的能耗情况,并在考虑移动障碍和未考虑移动障碍两种情况下,对比两个 AGV 的相对距离。

4.1 实验参数设置

本仿真中,考虑自动化码集装箱头具有 1 个集装箱船舶 3 个岸桥和 3 个堆区。整体码头布局示意图,如图 4。为了便于仿真,该码头的特点如下:

- 1) 最远集装箱与 QC 交付点的距离是 100m;
- 2) 岸侧运输区面积为 100m × 200m;
- 3) 每个堆区的长度为 36 标准箱,宽度为 10 标准箱,高度为 6 标准箱;
- 4) AGV 的最大速度为 $v_{max} = 6\text{m/s}$, AGV 的最大加速度为 $u_{max} = 1\text{m/s}^2$;
- 5) AGV 的安全区域长度为 $2d$, 且 $d = 5\text{m}$, 时间间隔 $\Delta t = 15\text{s}$;
- 6) 每个 AGV 一次只能运输一个标准集装箱;
- 7) 每个 AGV 可以在运输区自由移动;
- 8) 每个堆区仅由一台场桥在作业;

选择 1 个 QC、2 个 AGV、3 个 YC 以及 3 个堆区来对 AGV 的轨迹规划效果进行评估。考虑 8 个进口集装箱同时从岸侧运输到 3 个堆区。由状态监测控制器发送的每个进口集装箱的时间窗见表 1。比如表 1 中的时间窗 [50s, 85s] 表示 AGV1 从岸侧运输集装箱移动至 1 号堆区的开始时间和到达 1 号堆区的结束时间分别是 50s 和 85s。还给出了两个 AGV 的终点堆区和移动方向以及两个 AGV 到达不同终点堆区的离开时间和到达时间。入栈移动表示 AGV 从岸侧移动至堆区,同时出栈移动表示 AGV 从堆区移动至岸侧。

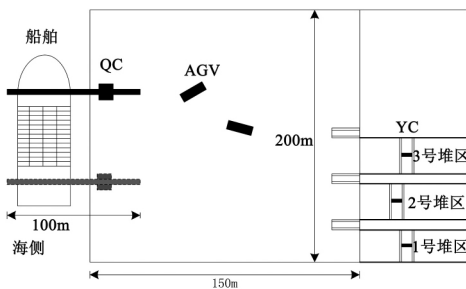


图4 自动化集装箱码头算例布局

表1 AGV1 和 AGV2 的时间窗

AGV	堆区	入栈	出栈
AGV1	1号	[50s, 85s]	[85s, 150s]
	2号	[150s, 180s]	[180s, 250s]
	1号	[250s, 295s]	[295s, 365s]
	1号	[365s, 400s]	[400s, 480s]
AGV2	3号	[100s, 125s]	[125s, 210s]
	3号	[210s, 230s]	[230s, 315s]
	3号	[315s, 340s]	[340s, 410s]
	2号	[410s, 450s]	[450s, 480s]

4.2 仿真结果分析

本文仿真中,采用 Matlab 中的 YALMIP 工具箱包含的线性规划求解算法并结合 GUROBI 求解器对模型进行求解。得到的 AGV 无碰撞作业轨迹图,如图 5。由图 5 可看出两个 AGV 随着二维轨迹的移动,两个 AGV 的移动轨迹并未发生交叉,只是覆盖原有的轨迹,说明成功避开了静止障碍。

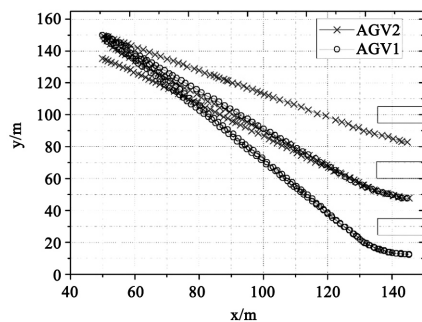


图5 两 AGV 无碰撞轨迹图

为说明移动障碍的规避效果,两个 AGV 的进出栈时间表见表 2。根据时间表,可知未考虑移动障碍时 AGV 的移动轨迹和考虑移动障碍时 AGV 的移动轨迹。两个 AGV 在这两种情况下从 0~80 秒时间间隔内相对距离的变化,如图 6 和图 7。从图 6 可看出,两个 AGV 的相对距离在 50s 到 70s 之间已经小于约束的距离 10m,这意味着未考虑移动障碍约束的两个 AGV 在 50s 到 70s 的时间间隔内已经发生了碰撞。

图 7 可看出 AGV 的相对距离始终大于约束的距离 10m,即安全地规避了移动障碍。

结合图 5 和图 7 可以看出,AGV 在最小化能效调度的情况下,成功地避开了移动和静止障碍,这说明本文所提分层控制结构的有效性。

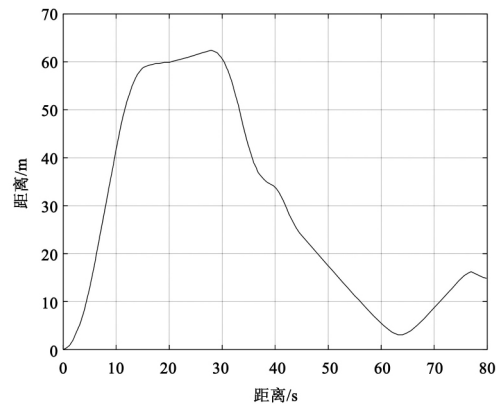


图6 未考虑移动障碍约束时两个 AGV 的相对距离 (AGV2 在 10s 后开始移动)

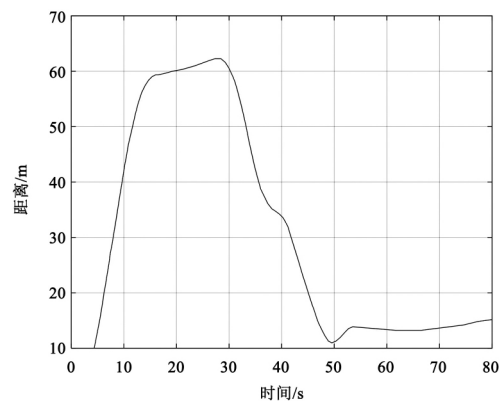


图7 考虑移动障碍约束时两个 AGV 的相对距离 (AGV2 在 10s 后开始移动)

表2 两个 AGV 进出栈时间表

AGV 数	堆区	入栈	出栈
1	1号	[0s, 35s]	[35s, 80s]
2	2号	[10s, 40s]	[40s, 80s]

表3 AGV1 的能耗

堆栈数	入栈	出栈
1	16.4	7.6
2	16.6	5.5
1	16.4	7.1
1	16.4	6.5

表4 AGV2 的能耗

堆栈数	入栈	出栈
3	16.8	4.3
3	16.8	4.1
3	16.8	4.7
2	16.6	12.0

当 AGV 在岸侧和堆区之间作业时,两者的能耗情况见表3和4,由表3和表4可看出 AGV1 和 2 入栈过程的能耗明显高于出栈过程的能耗。这是因为入栈过程 AGV 需要保持高效率将集装箱从岸桥运输至堆区,且必须完全减速以规避静止障碍和移动障碍,而出栈过程 AGV 需要低速从堆区返回至岸桥以确保低能耗,这样 AGV 入栈相比出栈有更多的加速和减速的过程,所以入栈能耗要高于出栈能耗。

当堆栈数相同时,AGV 的入栈能耗也对应相同,这说明本文所提的两阶能效法对 AGV 的轨迹规划是有效的,而且出栈时 AGV 能耗远小于入栈能耗,这说明考虑最小化 AGV 能耗时,通过分层控制器实现了 AGV 的无碰撞运输路径轨迹规划,即说明本文所提的两阶能效法有效地协调了 AGV 的能效调度和 AGV 的轨迹规划,同时实现了 AGV 的无碰撞轨迹规划。

5 结束语

本文以自动化集装箱码头的 AGV 作为研究对象,提出一种基于分层控制器的两阶能效法。在考虑两种碰撞障碍的情况下,采用分层控制器来协调 AGV 的能效调度与 AGV 轨迹规划,以最小化 AGV 作业加速度累积和为目标,建立混合整数线性规划模型。通过设计 AGV 的作业时间窗,得到了两个 AGV 的无碰撞作业轨迹。通过仿真,得到两个 AGV 随时间变化的相对距离以及各自的能耗,得出本文所提方法对集装箱码头 AGV 的运输路径轨迹规划问题有一定的借鉴作用。

参考文献:

- [1] Chen Lu, Andre. Integrated scheduling of crane handling and truck transportation in a maritime container terminal[J]. European Journal of Operational Research, 2013, 225(1): 142-152.
- [2] N Kaveshgar, N Huynh. Integrated quay crane and yard truck scheduling for unloading inbound containers[J]. International Journal of Production Economics, 2015, 159(3): 168-177.

- [3] J Xin, R R Negenborn, G Lodewijks. Energy-aware control for automated container terminal using integrated flow shop scheduling and optimal control[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2014, 44: 214-230.
- [4] J Xin, R R Negenborn, G Lodewijks. Event-driven receding horizon control for energy-efficient container handling[J]. Control Engineering Practice, 2015, 39: 45-55.
- [5] F Corman, et al. Optimal scheduling and routing of free-range AGVs at large scale automated container terminals[J]. Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 2016, 44(3).
- [6] F Corman, et al. Optimizing hybrid operations at large-scale automated container terminals[C]. International Conference on MODELS and Technologies for Intelligent Transportation Systems. IEEE, 2015: 1656-69.
- [7] I Kucukoglu, N OzturkZ. An advanced hybrid meta-heuristic algorithm for the vehicle routing problem with backhauls and time windows[J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 86(C): 60-68.
- [8] C Koc, et al. A hybrid evolutionary algorithm for heterogeneous fleet vehicle routing problems with time windows[J]. Computers & Operations Research, 2015, 64(C): 11-27.
- [9] A K Beheshti, S R Hejazi, M Alinaghian. The vehicle routing problem with multiple prioritized time windows: A case study[J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 90(C): 402-413.
- [10] Z Han, et al. Multi-AGV path planning with double-path constraints by using an improved genetic algorithm[J]. Plos One, 2017, 12(7): e0181747.
- [11] D H Kim, N T Hai, W Y Joe. A Guide to Selecting Path Planning Algorithm for Automated Guided Vehicle (AGV) [C]. International Conference on Advanced Engineering Theory & Applications, 2017: 587-596.
- [12] J Liu, et al. Path scheduling for multi-AGV system based on two-staged traffic scheduling scheme and genetic algorithm[J]. Journal of Computational Methods in Sciences & Engineering, 2015, 15(2): 163-169.
- [13] L Xu, et al. Exact and Heuristic Algorithms for Routing AGV on Path with Precedence Constraints[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, (2016-7-31), 2016: 1-8.

【作者简介】

王洋洋(1993-) 男(汉族),安徽芜湖人,硕士研究生,主要研究领域为自动化港口建模与优化;

朱瑾(1980-) 女(汉族),湖北武汉人,博士,硕士生导师,副教授,主要研究领域为港航自动化。

