

# 多 AGV 路径规划方法研究

泰应鹏 邢科新 林叶贵 张文安

(浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023)

**摘 要** 针对多自动导引车(Automated Guided Vehicle, AGV)在仓储物流中的路径规划问题,提出一种基于时间窗模型的动态路径规划方法,以实现多 AGV 的动态路径规划。首先,利用 A\* 算法启发式地为多个 AGV 规划路径;其次,计算 AGV 经过路径节点的时间,通过对时间窗的排布和更新解决了多 AGV 在路径规划中的碰撞冲突问题,而且通过动态地为多 AGV 分配优先级,提升了系统效率;最后,当路径中出现障碍物时,通过动态更改道路权重,重新进行路径规划,实现了实时避障。仿真实验结果表明,该算法在保证路径最优的条件下能有效避免碰撞冲突,完成无重复、无冲突的系统调度,不仅能提高系统效率,而且在动态环境下具有良好的适应性和鲁棒性。

**关键词** 自动导引车,路径规划,时间窗,无碰撞冲突,实时避障

**中图分类号** TP242 **文献标识码** A

## Research of Path Planning in Multi-AGV System

TAI Ying-peng XING Ke-xin LIN Ye-gui ZHANG Wen-an

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract** In this paper, a dynamic routing method based on time window model was presented for dealing with multi-AGV path planning problem in warehouse. Firstly, A\* algorithm is used for completing path routing of multiple AGV. Secondly, the time for AGV passing through the path node's is calculated. Multi-AGV conflict issues is solved by inserting the time window into path and updating time window. Furthermore, through dynamic allocation of priority for the multi-AGV, the efficiency of system is enhanced. Finally, when the obstacles are in the path, by dynamically changing the path weight, real-time obstacle avoidance is achieved. The simulation results show that the proposed algorithm can effectively avoid collision under the condition of optimal path, the method can not only improve the system efficiency, but also has good adaptability and robustness in dynamic environment.

**Keywords** Automated guided vehicle, Path planning, Time window, Conflict-free, Real time obstacle avoidance

## 1 引言

在仓储物流过程中,装载、卸载、运输等环节所耗费的时间占整个物流过程时间的绝大部分,从而导致物料运输费用在总成本中占比较高。而多 AGV 路径规划方法,对改善物流运输系统结构、降低物流运输成本、提升系统运行效率起着重要的作用,因此在仓储物流中具有巨大的应用价值。AGV 的路径规划<sup>[1]</sup>主要包括 3 方面的问题:1)确定从起点到目标点之间是否存在可行路径;2)规划出的路径必须是无阻塞、无冲突、无死锁的;3)规划出的路径应使得整个系统的运行效率达到最优。

针对 AGV 的路径规划问题,国内外学者做了很多研究。Oboth<sup>[2]</sup>提出了一种连续轨迹生成算法,其能够启发式地为多台 AGV 生成无碰撞最短路径。该方法简单易行,便于实施,但是作为一种静态的路径规划方法,其动态适应性差,实时性不足。为了克服静态路径规划的不足,Samia Maza 等人<sup>[3]</sup>先求解每个 AGV 的多条较短可达路径,然后根据系统

中每个 AGV 状态选择不同的路径,以实现多 AGV 的路径规划,但该方法计算量大,且不能保证路径最优。Möhring 和 Köhler<sup>[4]</sup>提出一种最短路径计算方法,在该算法中,目标是计算每个 AGV 的最短可行路径。该方法能保证从起点到终点存在可行路径,且能确保路径最优,但当系统发生连续的冲突时,容易陷入死锁。针对碰撞和死锁问题,Smolic-Rocak N 等<sup>[5]</sup>学者基于时间窗模型,采用动态路径规划,并通过该模型判断不同的 AGV 间是否有资源的竞争与碰撞冲突;贺丽娜等<sup>[6]</sup>也基于时间窗模型,规划每个 AGV 的运行路径及状态,实现了调度的顺利运行,但该方法着重于碰撞的预防,未考虑实时避障,且当发生连续碰撞冲突时存在系统效率较低等缺点。

本文针对多 AGV 动态路径规划中的一系列问题,给出了综合考虑路径代价以及系统效率的多 AGV 动态路径规划方法。用 A\* 算法顺序地为 AGV 规划路径,并通过加入时序的方法引入时间窗,以时间窗的排布和更新解决了多 AGV 的碰撞冲突问题;通过为 AGV 动态地分配优先级,优化了目

本文受国家自然科学基金(61573319, 61202203),浙江省杰出青年科学基金(LR16F030005)资助。

泰应鹏(1993—),男,硕士,主要研究方向为机器人技术;邢科新(1977—),男,博士,副教授,主要研究方向为机器人控制、机器人技术, E-mail: xkx@zjut.edu.cn(通信作者);林叶贵(1988—),男,博士,主要研究方向为机器人控制;张文安(1982—),男,博士,教授,主要研究方向为多传感器信息融合、网络化控制。

标函数,提升了系统效率;除此之外,当路径中出现障碍物时,动态地更改了道路的路径代价,并重新进行了路径规划,从而实现了动态环境下的实时避障。

## 2 问题描述

### 2.1 场景描述

本文基于仓储物流的应用背景进行研究。由于在仓储物流中需要把货物运输到指定地点,因此在环境中需要设置位置信息相互关联的节点<sup>[7]</sup>,为 AGV 的路径规划指明装载点或卸载点;同时,由于仓储物流中有物流成本,因此在路径规划中需要计算路径代价,鉴于此情况,本文采用拓扑建模法构建地图。

如图 1 所示,在有向连接网络  $G=(V,E)$  中, $V$  代表节点集合, $E$  代表边的集合,每条边可以表示为两个节点的有序元素对<sup>[8]</sup>。它的每一条边都有一个权值  $W$ ,本文中设置权值  $W$  为两个节点之间的曼哈顿距离,代表了路径代价。在描述车辆的运行路径时,可以用节点的有序集合来表示,节点的顺序指明了车辆的运行路径。基于本文的应用场景,提出如下规定:

(1) 车辆在任意一条边均可双向行驶,但每条边在同一时刻只允许通过一辆车;

(2) 车辆运行过程中速度保持不变,本实例中假定速度为 0.8m/s,车身长度为 0.4m,单一路径长度为 1.6m;

(3) 每辆自动导引车一次只能完成一个任务,接到调度指令时不能中途返回;

(4) 任意两相邻节点间的路径均可容纳小车车身,不存在一辆自动导引车同时占用两条路径的情况;

(5) 为防止车辆间意外碰撞,规定车辆间的最小安全距离,该距离由 AGV 的车身长度和速度确定。

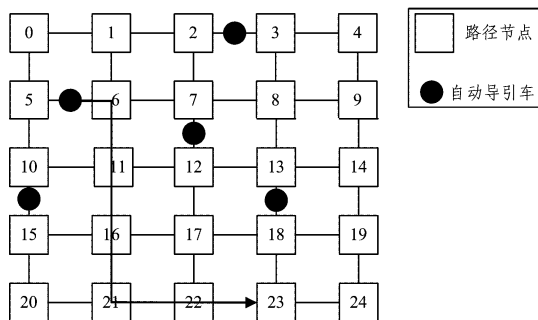


图 1 拓扑建模法构建的地图

### 2.2 冲突概述

针对单辆 AGV 的路径规划问题,通常会采用遗传算法、蚁群算法、粒子群算法、人工势场法等空间上求解全局最优解<sup>[10-11]</sup>;同时也可以加入时间窗,在时间和空间上求解最优解<sup>[12]</sup>。而 AGV 的冲突、死锁等问题只有在对多个 AGV 进行路径规划时才会发生。多 AGV 的碰撞冲突可囊括为节点冲突、相向冲突和追击冲突。由于本文中假定 AGV 的行驶速度保持不变,因此对于多个速度不同的 AGV 在行驶中造成的追击冲突,本文不予考虑。

#### 2.2.1 节点冲突

如图 2 所示,AGV1 与 AGV2 在交叉节点处的行驶方向不同,但两辆 AGV 同时到达同一节点,最终发生节点冲突,造成碰撞。

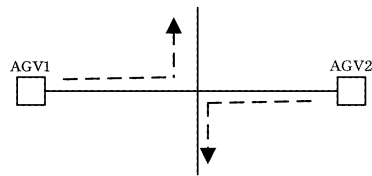


图 2 节点冲突

#### 2.2.2 相向冲突

如图 3 所示,两辆 AGV 相向行驶,由于每条路径只允许同时通行一台 AGV,因此两台 AGV 不能同时通过,否则会发生相向冲突,造成死锁。

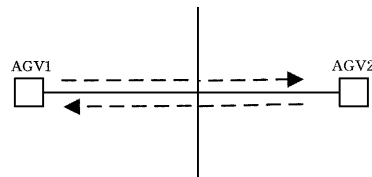


图 3 相向冲突

### 2.3 多 AGV 路径规划指标

针对多 AGV 的路径规划方法,常见的指标主要有:最短路径、最小化等待时间、最大化吞吐量、最小化队列长度等<sup>[13]</sup>。

本文基于仓储物流的应用背景,拟采用复合指标,即不仅要考虑路径的可行性,确保路径是无冲突、无死锁的,同时还应考虑系统的运行效率。指标的表示方法如下所示:

$$Z = \min\{k_p d_i + k_q u_i\} \quad (1)$$

其中, $k_p$  表示距离系数, $d_i$  表示第  $i$  辆车的运行距离; $k_q$  表示 AGV 利用率系数, $u_i$  表示 AGV 的利用率。 $u_i$  的计算方法如下:

$$u_i = \frac{t_r}{t_w + t_r} \quad (2)$$

其中, $t_r$  为 AGV 的实际行驶时间, $t_w$  为 AGV 的等待时间,则总的行驶时间  $t_s$  等于实际行驶时间  $t_r$  加上等待时间  $t_w$ ,即  $t_s = t_r + t_w$ 。由目标函数可知,多 AGV 的路径规划中,冲突次数越少,等待时间越少,系统的效率就越高。

## 3 多 AGV 路径规划

### 3.1 变量的定义

本文中为多 AGV 进行路径规划时,需要计算 AGV 通过某条单一路径的时间,其计算方法如下:

$$t_e = \frac{L + L_e}{v} \quad (3)$$

其中, $L$  表示 AGV 的车身长度, $L_e$  表示相邻两节点间的路径长度, $v$  表示 AGV 的速度。车辆在行驶过程中可能会出现打滑等情况,从而造成车辆间发生意外碰撞。因此,为了提高车辆在行驶过程中的容错能力,本文规定车辆的等待时间  $t_w = t_e$ 。

在有向连接网络  $G=(V,E)$  中,假设现在的任务个数为  $m$ ,每个任务的起点、终点都不同,那么起始点的集合可记为  $S\{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ ,相应的目标点的集合为  $\delta\{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m\}$ ,执行任务的车辆的集合为  $R\{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ 。假设自动导引车  $r_m$  从起点到终点所经过的节点个数为  $n$ ,则自动导引车  $r_m$  所对应节点集合为  ${}^m p = \{{}^m p_1, {}^m p_2, \dots, {}^m p_n\}$ ,其所对应的边的集合为  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_{n-1}\}$ ;其所对应的时间窗定义为  ${}^m T =$

$\{^m t_1, ^m t_2, \dots, ^m t_n\}$ 。那么,可将一个运输任务定义如下:

$$M_i = \{s_i, \delta_i, ^i p, t_s, \varphi_i\} \quad (4)$$

其中,  $t_s$  表示任务的开始时间,  $\varphi_i$  表示任务的优先级。

### 3.2 多 AGV 路径规划算法

本算法中,通过更新和排布时间窗使得 AGV 按设定好的顺序通过节点,则不会发生碰撞冲突。车辆进入边  $e_i$  的时间可通过如下公式计算得到:

$$^m t_{e_i} = \begin{cases} t_s, & i \in S \\ ^{out} t_{i-1}, & i \notin S \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知,若节点  $i$  为起始节点,则此时边  $e_i$  的长度为零且进入边  $e_i$  的时间为任务开始的时间;若  $i$  不是初始节点,则记 AGV 进入边  $e_i$  的时间为 AGV 离开边  $e_i$  所对应的前一节点的时间。AGV 离开节点  $i$  的时间窗为:

$$^{out} t_i = ^m t_{e_i} + t_e + t_w \quad (6)$$

在对多个 AGV 进行路径规划之后,需要判断 AGV 间的冲突类型,其判断方法是:当  $^m p_i = ^k p_i (m, k \in R)$  时,表明自动导引车  $r_m$  与自动导引车  $r_k$  的行驶路径中有相同的节点  $i$ 。此时,若  $^m t_i = ^k t_i$ ,表明进入节点  $i$  的时间相同,则节点冲突成立。如果  $^m p_i = ^k p_{i+1} (m, k \in R)$  且  $^m p_{i+1} = ^k p_i (m, k \in R)$ ,则表明自动导引车  $r_m$  与自动导引车  $r_k$  的行驶路径中可能存在相向冲突,此时若  $^m t_i = ^k t_i$ ,则表明相向冲突成立,反之则不成立。

由于多 AGV 在路径规划中会产生碰撞冲突,而当冲突发生时,选择哪辆 AGV 先通过节点,会影响系统效率。本文中的目标函数中不仅考虑了路径代价,还兼顾了系统效率,因此有必要为 AGV 排布优先级。AGV 优先级的计算方法如下:

步骤 1 分别计算每辆 AGV 与其他 AGV 中的相同节点的个数以及发生冲突的次数。

步骤 2 比较每个 AGV 与其他 AGV 冲突的次数,将冲突次数最多的 AGV 的优先级置为最低,而将冲突次数最少的 AGV 的优先级置为最高。

步骤 3 倘若有多辆 AGV 的冲突次数相同,则比较 AGV 与其他 AGV 相同节点的个数,相同节点个数多的 AGV 优先级设为高。

步骤 4 依次类推,更新 AGV 的优先级。

在步骤 2 中,通过让冲突次数最多的 AGV 进行等待,可以保障其他 AGV 的顺利行驶,从而提升系统的整体效率。而步骤 3 中,让相同节点个数多的 AGV 优先通过,这样就降低了因延时而使得相同节点变成冲突节点的概率,减少了冲突次数。

通过以上介绍,本文明确了时间窗的计算、冲突的判别以及优先级的计算方法,则多 AGV 路径规划方法的具体实现如下:

步骤 1 获取运输任务,得到运输任务的起点与终点信息,完成任务  $M_i = \{s_i, \delta_i, ^i p, t_s, \varphi_i\}$  的初始化(数值越小,优先级越高)。

步骤 2 当  $r_i \in M_i (i \neq 0)$ ,即当前有任务请求时,采用 A\* 算法依次求解当前任务的最短运输路径,直到当前任务为空。

步骤 3 计算各个 AGV 在各自节点的出入时间。

步骤 4 判断多 AGV 是否存在冲突,并计算 AGV 的优先级。

步骤 5 判断冲突类型,如果是节点冲突,则选择优先级较低的 AGV 进行延时等待,并利用式(6)更新优先级较低的 AGV 的后续节点的时间窗。如果是相向冲突,则选择优先级较低的 AGV 重新进行路径规划,求解次优路径,然后回到步骤 3。

步骤 6 再次判断各个 AGV 是否存在节点冲突和相向冲突,直到所有的冲突消失。

步骤 7 如果任务尚未结束时产生了新的任务请求,则回到步骤 1,而此时新任务的开始时间  $t_s$  应为尚未完成任务的 AGV 的行驶时间。

步骤 8 如果 AGV 在行驶途中检测到障碍物,则在有向连接网络  $G=(V, E)$  中,设置与障碍物节点相连接的边的路径代价为无穷大,即  $w=\infty$ ,并把 AGV 当前所在节点作为起始节点,回到步骤 2 重新进行路径规划。

## 4 仿真结果分析

### 4.1 仿真平台

本文选用 Visual C++6.0 作为仿真工具,在仿真平台下开发了一个显示界面,用于实时显示 AGV 路径规划结果;同时用户可在 AGV 行驶过程中新增调度任务,以检测算法的实时性;并可通过增设障碍物的方法,来检测本算法在对多 AGV 进行路径规划时的动态适应性以及在动态环境下的鲁棒性。仿真平台界面如图 4 所示。

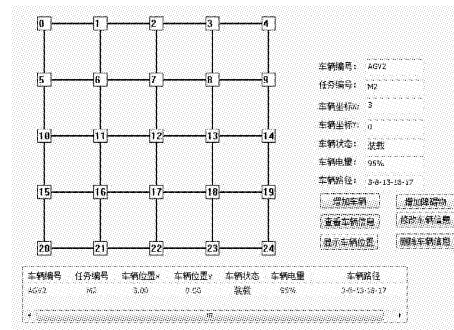


图 4 多 AGV 路径规划的仿真环境

### 4.2 结果分析

为了更直观地表达仿真效果,本文采用两种仿真模型进行对比:1)无冲突预防和有冲突预防下的路径规划结果;2)无障碍物和有障碍物下的路径规划结果。

针对第一种仿真模型,为了验证系统的防碰撞冲突及规避死锁的能力,随机生成 3 个任务请求,任务的初始化结果为:

$$M_1 = \{s_1, \delta_1, ^1 p, 0, 1\}, \text{其中 } s_1 = 7, \delta_1 = 23$$

$$M_2 = \{s_2, \delta_2, ^2 p, 0, 1\}, \text{其中 } s_2 = 15, \delta_2 = 14$$

$$M_3 = \{s_3, \delta_3, ^3 p, 0, 1\}, \text{其中 } s_3 = 6, \delta_3 = 22$$

图 5 给出多 AGV 在无碰撞预防下的路径规划。从图 5 中可看出,只采用 A\* 算法进行多 AGV 路径规划时,造成 AGV2 与 AGV3 在边  $e_{11,12}$  处发生相向冲突;而从图 6 可以看出,当 AGV2 与 AGV3 发生相向冲突时,采用基于时间窗的多 AGV 路径规划算法后,AGV3 重新进行了路径规划,此时 AGV2 与 AGV3 在边  $e_{11,12}$  无相向冲突发生,避免了死锁的发生。

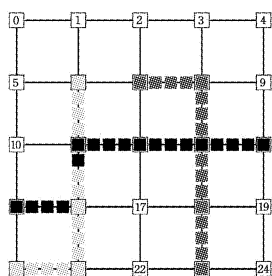


图 5 多 AGV 在无碰撞预防下的路径规划

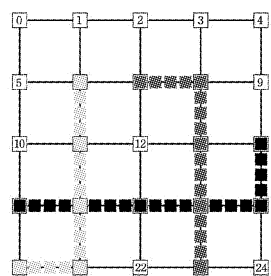


图 6 多 AGV 在防碰撞冲突下的路径规划

针对第二种仿真模型,为了检验系统的实时避障能力,以及当系统产生连续碰撞冲突时系统的动态适应性,重新分配 3 个任务,任务的初始化如下:

$$M_1 = \{s_1, \delta_1, {}^1p, 0, 1\}, \text{其中 } s_1 = 7, \delta_1 = 23$$

$$M_2 = \{s_2, \delta_2, {}^2p, 0, 1\}, \text{其中 } s_2 = 15, \delta_2 = 19$$

$$M_3 = \{s_3, \delta_3, {}^3p, 0, 1\}, \text{其中 } s_3 = 6, \delta_3 = 14$$

在没有障碍物时,路径规划的结果如图 7 所示;而如图 8 所示,当有障碍物时,AGV3 在进行路径规划时,动态更改了与障碍物相连接的路径的权重,并重新进行了路径规划,更新了运行路径,实现了实时避障。

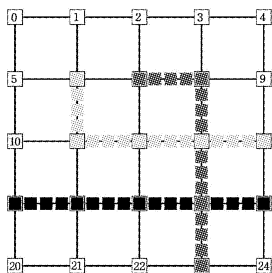


图 7 多 AGV 在没障碍下的路径规划

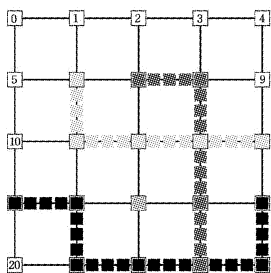


图 8 多 AGV 在有障碍下的路径规划

同时,在没有障碍物的情况下,由于 3 辆 AGV 在同一时刻接到了任务请求,因此在路径规划时本算法动态地调整了 AGV 的优先级。其路径规划结果如表 1 所列,相比于表 2,系统的运行效率有了很大提升。

表 1 动态分配 AGV 优先级时的路径规划结果

车辆编号	AGV1	AGV2	AGV3
优先级	1	2	3
路径	7-8-13-18-23	6-11-12-13-14	15-16-17-18-19
里程/m	8	8	8
行驶时间/s	10	10	10
等待时间/s	0	0	2.5
总的时间/s	10	10	12.5
车利用率/%	100	100	80
总利用率/%	93.3		

表 2 随意地分配优先级时的路径规划结果

车辆编号	AGV1	AGV2	AGV3
优先级	2	3	1
路径	7-8-13-18-23	6-11-12-13-14	15-16-17-18-19
里程/m	8	8	8
行驶时间/s	10	10	10
等待时间/s	2.5	2.5	0
总的时间/s	12.5	12.5	10
车利用率/%	80	80	100
总利用率/%	86.6		

**结束语** 本文针对多 AGV 路径规划问题,提出可基于时间窗模型进行动态路径规划。在多 AGV 动态路径规划中,不仅解决了多 AGV 的碰撞冲突问题,而且通过动态更改

AGV 优先级优化了调度序列,这样不仅保证了路径最优,而且提升了系统效率。除此之外,当路径中出现障碍物时,通过更改道路的路径代价,对 AGV 重新进行路径规划,实现了多 AGV 的实时避障,增强了系统的动态适应性,使得系统在复杂情况下具有更好的鲁棒性。仿真实验结果表明了算法的有效性可行性。

本文算法在进行多 AGV 路径规划时,采用拓扑建模法构建电子地图,且 AGV 在运行过程中可双向行驶。而针对不同的实际情况,其调度需求和路径特点可能不一样,如调度过程中,AGV 只能单向行驶或行驶路径中存有弯道等。随着仓储物流系统日趋复杂且规模不断增大,如何有效拓展 AGV 个数以及满足特殊调度需求是今后的研究方向。

## 参考文献

- [1] QIU L, HSU W J. Scheduling and routing algorithms for AGVs: a survey [J]. International Journal of Production Research, 2002, 40(3): 745-760.
- [2] OBOTH C, BATTAR, KARWAN M. Dynamic Conflict-Free Routing of Automated Guided Vehicles[J]. International Journal of Production Research, 1999, 37(9): 2003-2030.
- [3] SAMIA M, CASTAGNA P. Robust Conflict-Free Routing of Bi-Directional Automated Guided Vehicles Systems[J]. IEEE International Conference on Man and Cybernetics, 2002(10): 6-12.
- [4] MÖHRING R H, KÖHLER E, GAWRILOW E. Conflict-free real-time AGV routing[C]// Operations Research Proceedings 2004. Springer Berlin Heidelberg, 2005: 18-24.
- [5] SMOLIC-ROCAK N, BOGDAN S, KOVACIC Z, et al. Time Windows Based Dynamic Routing in Multiagv Systems[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2010, 7(1): 151-155.
- [6] 贺丽娜, 楼佩煌, 钱晓明. 基于时间窗的自动导引车无碰撞路径规划[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(12): 2630-2634.
- [7] BOGDAN S, KOVACIC Z. Time windows based dynamic routing in multi-agv systems[J]. Automation Science and Engineering, 2010, 7(1): 151-155.
- [8] MAZA S, CASTAGNA P. Conflict-free AGV routing in bi-directional network[C]// 2001 8th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2001. IEEE, 2001: 761-764.
- [9] KALINOVIC L, PETROVIC T, BOGDAN S, et al. Modified banker's algorithm for scheduling in multi-agv systems[J]. IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, 2011, 10(3): 346-351.
- [10] 周明秀, 程科, 汪正霞. 动态路径规划中的改进蚁群算法[J]. 计算机科学, 2013, 40(1): 314-316.
- [11] 徐飞. 基于改进人工势场法的机器人避障及路径规划研究[J]. 计算机科学, 2016, 43(12): 293-296.
- [12] 戚铭尧, 张金金, 任丽. 基于时空聚类的带时间窗车辆路径规划算法[J]. 计算机科学, 2014, 41(3): 218-222.
- [13] 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.
- [14] GHASEMZADEH H, BEHRANGI E, ABDOLLAHI A M. Conflict-free scheduling and routing of automated guided vehicles in mesh topologies[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2009, 57(6): 738-748.