

文章编号: 1006-5911(2010)12-2630-05

# 基于时间窗的自动导引车无碰撞路径规划

贺丽娜, 楼佩煌, 钱晓明, 刘 冉

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘 要:** 针对柔性制造系统中自动导引车的无碰撞路径规划问题, 结合预先规划算法和实时规划算法的优点, 提出基于先验决策的自动导引车无碰撞路径规划方法。将 Dijkstra 算法和时间窗原理相结合, 顺序规划各个自动导引车的路径。在已规划自动导引车路径的基础上, 运用基于 Dijkstra 的算法继续规划下一自动导引车, 实现自动导引车的无碰撞路径规划。该算法能有效避免死锁及碰撞, 并保证最优化路径, 能快速响应新的任务, 在动态环境下具有较好的柔性。结合实例说明了该算法的实现过程, 并证明了该方法具有较好的鲁棒性和柔性, 同时能提高系统效率。

**关键词:** 自动导引车; 路径规划; 无碰撞; 时间窗; 柔性制造系统

**中图分类号:** TP24

**文献标志码:** A

## Conflict-free automated guided vehicles routing based on time window

HE Li-na, LOU Pei-huang, QIAN Xiao-ming, LIU Ran

(College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,  
Nanjing 210016, China)

**Abstract:** To solve conflict-free path planning problem for the Automated Guided Vehicles (AGV) in flexible manufacturing system, by combining advantages of pre-planning algorithm and real-time planning algorithm, a conflict-free AGV routing based on performance-based structural policy was proposed, in which Dijkstra algorithm and time window principle were combined. Every AGV path was scheduled in order. Based on the planned AGV paths, conflict-free routing was achieved by employing the Dijkstra algorithm in the next AGV routing. This algorithm effectively avoided deadlocks and guaranteed optimal path. It responded to new assignment rapidly with better flexibility in dynamic environment. Finally, the algorithm was performed with practical case, which proved to have better robustness, flexibility and efficiency.

**Key words:** automated guided vehicles; routing; conflict-free; time window; flexible manufacturing system

## 0 引言

随着物流技术的广泛应用, 自动导引车(Automated Guided Vehicle, AGV)已被越来越多地应用于柔性制造系统和港口集装箱运输中。AGV 路径规划是 AGV 系统设计的关键之一, 当任务与小车的分配好之后, 规划出一条路径, 使得 AGV 从起

点无碰撞地顺利到达终点, 且用时最短。路径规划的好坏直接影响整个系统的效率。单个任务执行的时间越长, 完成的任务量就越少。国内外学者对路径规划做了许多研究。QIU 等<sup>[1]</sup>综述了整个路径规划和调度的算法; 刘国栋<sup>[2]</sup>针对多 AGV 调度系统提出了一种两阶段动态路径规划策略; KIM 等<sup>[3]</sup>提出一种基于 Dijkstra 的最短路径算法;

收稿日期: 2010-07-10; 修订日期: 2010-08-23。Received 10 July 2010; accepted 23 Aug. 2010.

基金项目: 江苏省精密与微细制造技术重点实验室基金资助项目(JSPM200701); 江苏省自动化装备工程技术研究中心基金资助项目(BM2006806)。**Foundation items:** Project supported by the Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro Manufacturing Technology Fund, China(No. JSPM200701), and the Jiangsu Research Center for Automation Equipment Engineering Fund, China(No.

FISHER<sup>[4]</sup> 提出利用拉格朗日松弛启发式算法来解决基于时间窗的路径规划问题。许多学者都是基于理论的研究及仿真, 而 AGV 的实际应用是在复杂环境下的决策过程, 因此对调度方法鲁棒性的研究显得尤为重要。本文提出的基于先验决策的 AGV 无碰撞路径规划, 把 Dijkstra 算法和时间窗原理相结合, 顺序规划各个 AGV 的路径, 每个 AGV 都是在已规划 AGV 的基础上, 运用基于 Dijkstra 的算法继续规划, 继而实现 AGV 的无碰撞路径规划。

### 1 多 AGV 系统环境生成

本文中的环境是基于图论表示, 采用有向图  $G = (N, A)$ , 其中:  $N = \{n_1, n_2, n_3, \dots, n_n\}$  表示一系列节点,  $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_m\}$  表示一系列有权重的边, 节点表示上下工位点, 边权重代表各个点之间有效路径的长度。做如下规定:

- (1) 每个边代表双向的单行道, AGV 可以前后双向行驶, 即 AGV 不必旋转 180° 朝相反方向行驶。
- (2) 小车行驶时速度保持恒定, 本实例中速度为 30 m/min, 即  $v = 0.5 \text{ m/s}$ 。
- (3) 小车的负载容量为 1 (任务), 即接到任务指令后, 当且仅当完成此任务后才能接受下一指令, 执行下一个任务。
- (4) 小车在同一时间只能占用一个弧段。
- (5) 为保障 AGV 的安全, 这里定义一个最小安全车距  $L_s$ , 由 AGV 的车身长度和速度确定, 即在 (车身长度 + 2 倍安全车距) 形成的方形区域内, 只允许有一辆 AGV。

### 2 多 AGV 路径规划

#### 2.1 多 AGV 路径规划算法

假设有  $k$  辆小车需要规划路径, 每个小车已经分配好任务, 即给出起始点和终点, 先离线根据 Dijkstra 算法对每个 AGV 规划出最短路径, 根据每个任务完成时间的长短, 对  $k$  个小车的任务从大到小排序,  $m_1 > m_2 > m_3 > m_4 > m_5 > m_6 > \dots > m_k$ , 首先对用时最长的 AGV1 采用 Dijkstra 算法进行无碰撞的路径规划, 根据 AGV1 进入和离开各个节点的时间, 得出 AGV1 的时间窗, 在保证和 AGV1 无碰撞的前提下, 规划花费时间仅次于 AGV1 的 AGV2, 即在 AGV1 的空闲时间窗上规划 AGV2, 即得 AGV2 的无碰撞规划路径。同理, AGV3 的规划

是在保证与 AGV1, AGV2 无碰撞的前提下规划最短路径, 在规划第  $k$  条路径时, 在保证不与前  $k - 1$  辆小车碰撞的前提下, 规划最短路径, 重复执行上述过程, 直到规划完所有 AGV。

如图 1 所示为建立的环境模型, 图 2 是与其相对应的时间窗模型, 引入变量:  $r_i^j$  表示第  $i$  个节点上的第  $j$  个被占用时间窗;  $f_m^n$  表示第  $m$  个节点的第  $n$  个空闲时间窗。

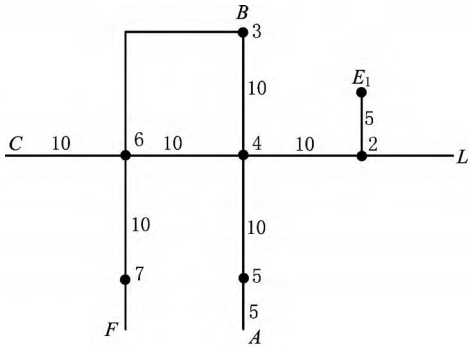


图1 多AGV调度环境模型

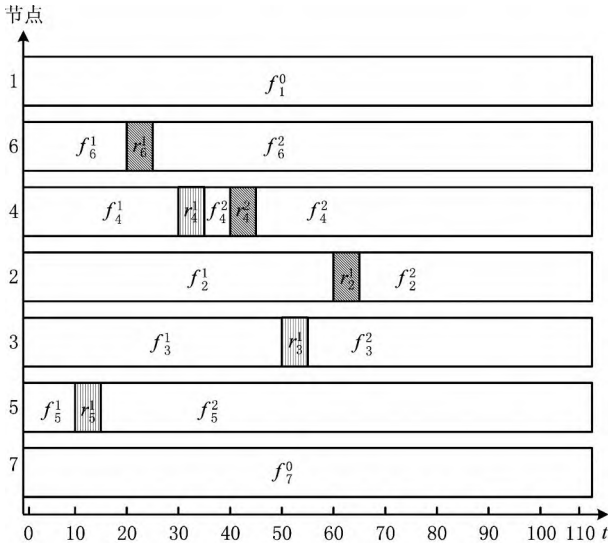


图2 相对应的时间窗模型

AGV1 从 C 点经节点 6、节点 4 和节点 2, 到达目标点 D, 相应节点的保留时间窗为  $r_6^1, r_4^2, r_2^1$ 。AGV2 从起始点 A 经节点 4 和节点 3, 到达目标点 B; 相应的节点保留时间窗为  $r_4^3, r_3^1$ 。现有一 AGV3, 起始点在 E 点, 目标点为 F 点, 需要对 AGV3 规划一条不与 AGV1, AGV2 产生冲突的从起始点 E 到目标点 F 的无碰撞路径。各个节点之间的距离已标注在图上, 单位为 m。

#### 2.2 算法前置处理

规划 AGV3 所使用的算法是基于改进的 Dijk-

stra 算法, 在实施算法之前还需前置处理——检测  $f_i^m$  到  $f_j^n$  的可行性:

(1) 检验空间上是否可行 若  $i, j$  两点存在可行的物理路径, 则继续执行下一步, 否则直接跳出程序。

(2) 检验时间上的可行性 引入两个变数:  $T_{arr}(f_i^p, f_j^q)$  表示从  $i$  点到达  $j$  点的时间,  $T_{arr}(f_i^p, f_j^q) = L(f_i^p) + t_{ij} + t_j$ ,  $L(f_i^p)$  表示能在  $f_i^p$  空闲时间窗内到达  $i$  点的时间,  $t_{ij}$  即  $i, j$  点之间弧段的行走时间。  $T_{ent}$  表示基于  $f_i^p$  从  $i$  点出发能进入到  $j$  点的时间,  $T_{ent} = \max\{T_{arr}, a_j^q\}$ , 其中  $a_j^q$  为  $f_j^q = [a_j^q, b_j^q]$  中的  $a_j^q$ 。如果  $T_{ent} > b_j^q - t_j$ ; 则时间上不可行, 跳出循环, 否则继续执行下一步。

(3) 检查有无潜在的冲突 潜在的冲突分为两种: ① 冲突为相向冲突, 如图 3 所示, 两辆 AGV 在同一路段沿相反方向运行; ④冲突为因速度不同引发的冲突, 如图 4 所示, 两车沿同一方向以不同的速度运行在同一路段, 后一 AGV 赶超前一 AGV。针对这两种冲突, 可以通过检验相应的时间窗来预测这两种冲突。如果对应时间窗是图 5、图 6 所示的情形时, 两种冲突就会发生。

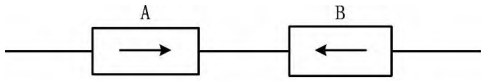


图3 冲突类型1——相向冲突

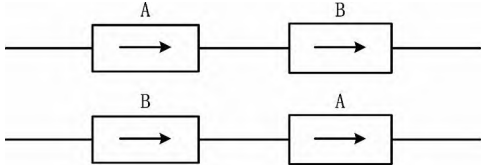


图4 冲突类型2——赶超冲突

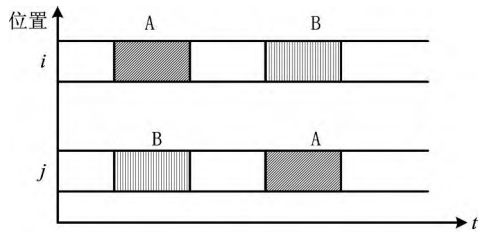


图5 冲突类型1所对应的时间窗

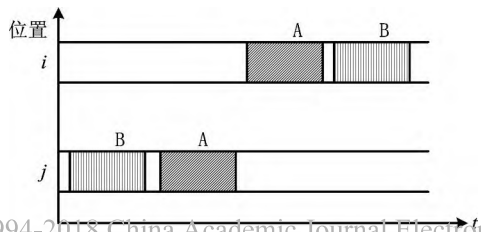


图6 冲突类型2所对应的时间窗

2 3 多 AGV 无碰撞路径规划算法过程

假设 3 个集合: 由前  $i - 1$  辆已规划 AGV 得到的时间窗集合, 设为  $F$  集; 计算过的符合无碰撞条件的空时间窗为  $T$  集合;  $U$  集合表示在剩下  $F - T$  集合中, 距离  $T$  集合中元素最近的时间窗;  $P$  集合中存放的是相应节点的前继节点, 如  $P(f_2^1) = f_1^0$ , 表示节点 2 的前置节点为节点 1。

(1) 初始化, 小车起始点所占的时间窗设为  $f_s^0$ , 取值为  $t_{now}$ , 初始时  $T$  集合为  $f_s^0$ ,  $P$  集合为空。

(2) 对每一个  $f_j^q \in F - T$ :

1) 对  $f_i^p \in T$ , 分别计算从  $i$  点到  $j$  点的  $T_{arr}$  和  $T_{ent}$ ; 考察  $ij$  两点空间、时间及有无潜在碰撞的可能性。

2) 对集合  $T$  中的时间窗  $f_i^k$ , 令  $T_{min} = \min\{T_{ent}\}$ 。

3) 对于  $f_j^q$ , 如果  $L(f_j^q) > T_{min}$ , 则  $L(f_j^q) = T_{min}$ ,  $P(f_j^q) = f_i^p$ 。

4)  $f_j^q$  加入集合  $U$ 。

(3) 在集合  $U$  中, 取  $U$  集合中的最小值加入到  $T$  集合。

(4) 检验目标节点是否在  $T$  集合中, 如果目标节点在  $T$  集合中, 则继续往下执行; 否则, 返回(2)。

(5) 整理路径, 由最后目标节点开始, 依据  $P(f_j^q) = f_i^p$  依次推出前置节点, 直到起始节点。

图 1 所示的环境模型, 在已有两辆 AGV 的情形下, 运用上述算法规划第 3 辆 AGV, 主要计算数据以表格方式列于表 1。

表 1 实例数据

循环	$L$	$T$	$P$
1	0	$f_1^0$	$F_1^0$
2	$L(f_2^1) = L(f_1^0) + t_{12} = 10$ $L(f_2^2) = 60$ $L(f_4^1) = \infty$	$f_2^1 f_1^0$	$P(f_2^1) = f_1^0$
3	$L(f_4^2) = 34$ $L(f_4^3) = 44$ $L(f_3^2) = L(f_5^2) = L(f_6^2) = 54$	$f_4^2 f_4^1 f_1^0$	$P(f_4^2) = f_4^1$
4	$L(f_4^3) = 44$ $L(f_6^1) = \infty$ $L(f_3^3) = L(f_6^2) = 64$ $L(f_3^2) = 62$	$f_4^3 f_4^2 f_2^1 f_1^0$	$P(f_4^3) = f_4^2$
5		$f_3^2 f_4^3 f_4^2 f_2^1 f_1^0$	$P(f_3^2) = f_4^2$
6	$L(f_6^2) = 44 + 20 = 64$	$f_6^2 f_3^2 f_4^3 f_4^2 f_2^1 f_1^0$	$P(f_6^2) = f_4^3$
7	$L(f_9^1) = 64 + 20 = 84$	$f_9^1 f_6^2 f_3^2 f_4^3 f_4^2 f_2^1 f_1^0$	$P(f_9^1) = f_6^2$

往前递推得出 AGV3 的行使顺序  $f_1^0 f_2^1 f_4^2 f_3^3 f_6^2 f_7^0$ , 图 7 为对应的时间窗。

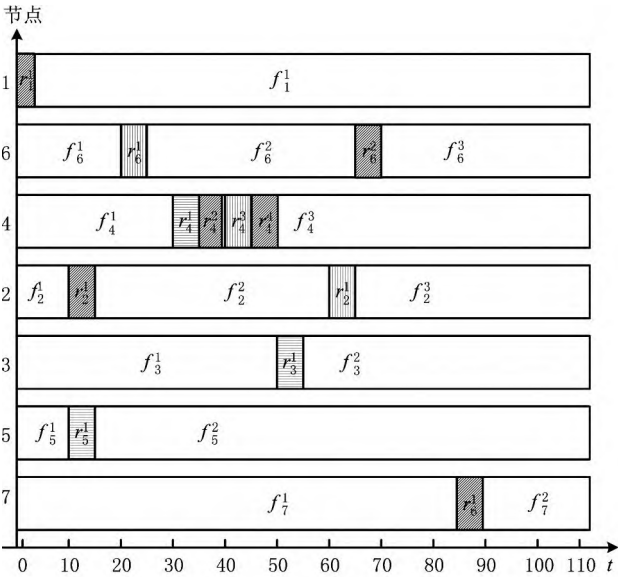


图7 AGV3对应的时间窗图

基于时间窗算法的正确执行的前提, 是每个 AGV 按照规定的时间到达和离开相应节点。如果有任一 AGV 因突发情况未能在规定时间到达相应位置, 则可能会导致发生潜在的冲突。在多 AGV 系统的动态环境中, 由于环境的不稳定, 会有很多意外情况发生, 如避障装置检测到前方的移动障碍物而自动停车、电池耗尽而没有动力导致的停车, 这些都属于动态环境中的意外情况, 无法避免。导致 AGV 发生延迟未能在既定时间到达或离开, 碰撞就有可能发生, 所以在实际多 AGV 路径规划中必须考虑这种偶然性因素。针对这种情况, 引入一些标记符号:  $N_v(i)$  表示  $N$  节点的经过的第  $i$  个节点;  $V_n(j)$  表示对于  $V$  车来说经过的第  $j$  个节点。

当  $V$  运行到节点  $N$  时, 检查  $N$  点是否是  $V$  的第  $i$  个运行的节点; 对于节点  $N$  来说, 检查  $V$  车是否是第  $j$  个通过此节点的车, 如果两者都满足, 则允许通过, 否则考虑如下情况:

(1) 对于节点  $N$ , 若  $V$  不是第  $i$  个通过的小车, 即前第  $i-1$  个小车没有按时到达, 则考察第  $i-1$  个小车  $U$  所在位置是否在和第  $i$  个  $V$  车的公共节点之外, 若是, 则调换公共节点上两 AGV 的先后通过顺序; 否则, 考虑下一种情况。

(2) 考察  $V$  车对应的被  $U$  车占用的路径的下一节点, 设为  $M$  节点, 则局部运用 Dijkstra 算法。规划  $N$  节点到  $M$  节点的联通路程, 若无可连通路程, 则保持  $V$  在原地不动。

2 4 基于算法的仿真实验验证

本文基于 VC++ 6.0 仿真平台, 对上述算法进行实验验证, 仿真平台由图形监控系统和控制系统两部分组成, 实验人员可以根据图形监控系统反馈的信息发送的相应控制命令来控制 AGV。图 8 所示为仿真平台界面, 系统界面分为左右两栏, 左栏为辅助参数输出窗口兼控制面板区, 可以手动添加 AGV, 并设置其相应属性, AGV 状态监控区可以根据下拉框选择所需监控的 AGV, 查看其状态属性; 右栏为 view 类, 是根据地图信息构建的监控画面。系统为每台 AGV 创建定时器, 在响应定时器消息的同时实时显示 AGV 的位置、状态信息和任务执行情况。系统用矩形标志 AGV, 矩形 AGV1, 从  $C$  点运行至  $D$  点; 矩形 AGV2, 从  $A$  点运行至  $B$  点; 矩形 AGV3, 从  $E$  点运行至  $F$  点。AGV 行驶走过的轨迹线用粗线标志, 具体如图 8 所示。

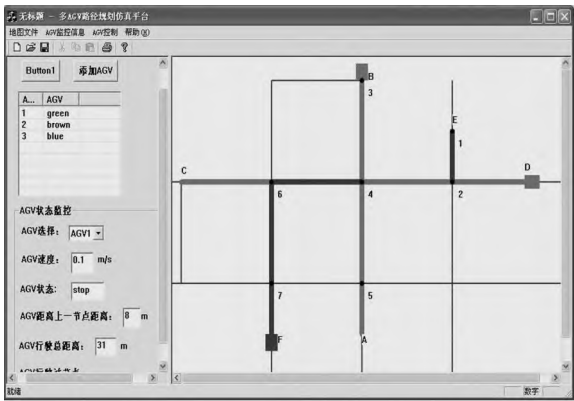


图8 多AGV路径规划仿真平台

为方便起见, 以各 AGV 的起始点字母代表 AGV, 如表 2 所示。在没有突发事件的情况下, 节点 4 上 AGV 的通过顺序为 A-E-C-E, 当 E 车第一次行驶至节点 4 后, 在节点 3 和 4 所在弧段上停留, 等到  $f_3^3$  后第二次到达节点 4。对于节点 4, E 车应该是第 3 个通过的 AGV。在动态环境下, 仿真系统设定 C 车出现意外状况, 没能在既定时间内到达 4 号节点, 则 E 车成为第 2 个到达节点 4 的 AGV。若 C 车未到达节点 6 就突发故障中途停车, 没有影响到 E 车的既定路线, 则只需实时调整相应节点的 AGV 通过顺序, 节点 4 的通过顺序调整为 A-E-C, 节点 6 的通过顺序调整为 E-C。若 C 车运行到节点 6, 4 之间意外停车, 则对于 E 车来说, 由于节点 6 为 E 车已规划的路径节点, 若按照既定路线行驶, 则碰撞冲突必然发生。在这种情况下, 对于 AGV 启用局部 Dijkstra 算法, 以 AGV 当前所在节点和被堵的下一节点为起点和终

点,在此例中,对 E 车进行起始点为 4、终点为 6 的局部 Dijkstra 算法,考查有无其他的可连通路径。如图 9 所示,算法搜索出节点 4 和 6 之间的另一条联通路径 4-3-6,如表 2 所示,相应节点的顺序也做临时调整。在 C 车遇突发情况停车时,E 车经过节点 3,6,7 到达指定目标节点 F。

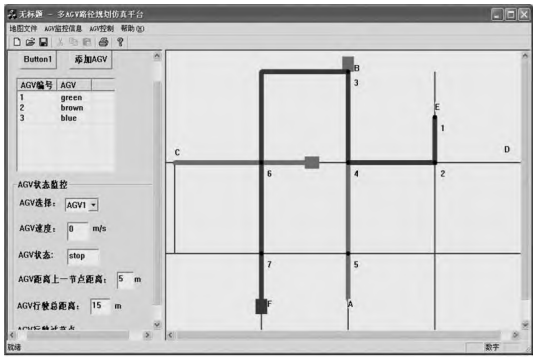


图9 多AGV路径规划动态环境

表 2 相应节点的通过顺序

节点	修改前顺序	修改后顺序
6	C-E	E-C
4	A-E-C-E	A-C-E
2	E-C	E-C

3 结束语

针对柔性制造系统中的多 AGV 调度,提出一种基于先验决策的防碰撞路径规划方法。第一阶段,结合 Dijkstra 算法和时间窗原理,顺序规划各个 AGV 路径,减少计算复杂度,同时保证了 AGV 的无碰撞路径,又能快速响应新的任务,具有较好的柔性。该方法是建立在各个 AGV 没有外界干扰、无突发情况、在既定时间到达和离开相应节点条件下,有一定的局限性。因此在第二阶段,考虑在动态环境的不稳定情况下,通过实时改变 AGV 通过节点的优先级,调整相应节点的 AGV 通过顺序,更新 AGV 规划路径,实现多 AGV 动态环境下的路径规划。通过实例证明了 AGV 数量较小时该方法的可行性,但在 AGV 数量增多的情况下,本算法还有待进一步改进。

作者简介:

贺丽娜(1986-),女,江苏丹阳人,硕士研究生,研究方向:柔性制造技术、现代集成制造技术,E-mail: hln6610320@sina.com;  
楼佩煌(1962-),男,浙江诸暨人,教授,博士生导师,研究方向:柔性制造技术、现代集成制造、创新设计理论、制造装备技术;  
钱晓明(1976-),男,江苏无锡人,副教授,研究方向:柔性制造技术、计算机集成制造技术;  
刘 冉(1983-),女,江苏宿迁人,博士研究生,研究方向:企业信息化、优化设计。

参考文献:

[1] QIU Ling, HSU Wenjing. Scheduling and routing algorithms for AGVS: a survey [J]. International Journal of Production Research, 2002, 40(3): 745-760.

[2] LIU Guodong, QU Daokui, ZHANG Lei. Two-stage dynamic path planning for multiple AGV scheduling systems [J]. Robot, 2005, 27(3): 210-214 (in Chinese). [刘国栋,曲道奎,张雷.多 AGV 调度系统中两阶段动态路径规划[J].机器人, 2005, 27(3): 210-214.]

[3] KIM C W, TANCHOCO J M A. Conflict-free shortest time Bi-directional AGV routing [J]. International Journal of Production Research, 1991, 29(12): 2377-2391.

[4] FISHER M L, JÖRNSTEN K O, MADSEN O B G, et al. Vehicle routing with time windows: two optimization algorithms [J]. Operations Research, 1997, 45(3): 488-492.

[5] SMO LIC-ROCAK N, BOGDAN S, KOVACIC Z, et al. Time windows based dynamic routing in multi-AGV systems [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2010, 7(1): 151-155.

[6] MAZA S. A performance-based structural policy for conflict-free routing of Bi-directional automated guided vehicles [J]. Computers in Industry, 2005, 56(7): 719-733.

[7] LI Xiaomeng, YANG Yupu, XU Xiaoming. Multiagent AGV dispatching system using multilevel decision methods [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2002, 36(8): 1146-1149 (in Chinese). [李晓萌,杨煜普,许晓鸣.基于多级决策的多智能体自动导航车调度系统[J].上海交通大学学报, 2002, 36(8): 1146-1149.]

[8] LANGEVIN A, LAUZON D. Dispatching, routing, and scheduling of two automated guided vehicle in a flexible manufacturing system [J]. The International of Flexible Manufacturing Systems, 1996, 8(3): 247-262.

[9] GENDREAU M, GUERTIN F. Parallel tabu search for real-time vehicle routing and dispatching [J]. Transportation Science, 1999, 33(4): 381-389.

[10] MAZA S, CASTAGNA P. Robust conflict-free AGV routing in bi-directional network [C]//Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Washington, D. C., USA: IEEE, 2001, 2: 761-764.

[11] BOBANAC V, BOGDAN S. Routing and scheduling in multi-AGV systems based on dynamic banker algorithm [C]//Proceedings of the 16th Mediterranean Conference on Control and Automation. Washington, D. C., USA: IEEE, 2008, 25-27: 1168-1173.

[12] OBOTH C, BATTAR. Dynamic conflict-free routing of automated guided vehicles [J]. International Journal of Production Research, 1999, 37(9): 2004-2019.