

# 自动导引车系统防碰撞及死锁的形式化控制方法

罗继亮<sup>†</sup>, 张 奇

- (1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 福建省电机控制与系统优化调度工程技术研究中心, 福建 厦门 361021)

**摘 要:** 针对自动导引车系统中的协调控制问题, 提出一种基于有向图的控制程序自动化设计方法. 首先, 根据自动导引车系统的结构建立基于区域控制的有向图模型; 其次, 在部分可观的条件下, 定义扩充危险域的概念, 给出一种估计危险域中车辆数目的方法, 进而给出导引路径的防碰撞控制规范; 最后, 讨论系统发生死锁的两个条件, 给出相应的死锁控制方法, 并通过仿真实验验证了所提方法的有效性.

**关键词:** 自动导引车系统; 防碰撞; 死锁; 有向图

**中图分类号:** TP273      **文献标志码:** A

## Collision prevention and deadlock formal control method for automated guided vehicle system

LUO Ji-liang<sup>†</sup>, ZHANG Qi

- (1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2. Fujian Engineering Research Center of Motor Control and System Optimal Schedule, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** To solve the coordinate control problem in the automated guided vehicle system (AGVS), a method based on directed graph to design control programs automatically is proposed. Firstly, the directed graph model based on regional control is constructed by the structure of the AGVS. Then, the concept of extended dangerous region is defined under the condition of partial observation. A method for estimating the number of vehicles in a dangerous region is given, and a control strategy for collision prevention of the guide path is proposed. Finally, two conditions of deadlocks in AGVS are discussed, and a corresponding deadlock control method is given. The effectiveness of the proposed methods is verified by several simulation experiments.

**Keywords:** automated guided vehicle system; collision prevention; deadlock; directed graph

## 0 引 言

由多台自动导引车 (AGV) 组成的自动导引车系统 (AGVS) 在现代制造、仓储配送等领域有着广泛的应用<sup>[1]</sup>. 在 AGVS 的控制过程中需要解决任务调度、路径规划、防碰撞和死锁等问题<sup>[2-3]</sup>, 其中防碰撞问题一直是 AGVS 研究领域的一个难点. Asef-Vaziri 等<sup>[4]</sup>和 Elmekawy 等<sup>[5]</sup>分别基于单循环导引路径和串级配置导引路径的 AGVS 解决了防碰撞问题, 但运行效率较低. 为了提高系统的柔性, 双向导引路径网络模型被提出并得到了大量研究, 但是实现该系统的难度较大, 需要集中求解的问题较多, 且问题之间存在耦合<sup>[6-7]</sup>. 郭大宏等<sup>[8]</sup>针对 AGV 运行过程中可能出现的 3 种冲突, 提出了对应的防碰撞策略; 肖海宁等<sup>[9]</sup>

针对单向导引路径网络的 AGVS, 提出了一种车辆间的防碰撞方法, 并设计了系统的死锁控制策略. 除了 AGVS 的网状布局模型, 学者们在区域控制模型上也开展了大量研究. 朱枫等<sup>[10]</sup>基于区域控制模型研究了多机器人间的防碰撞问题, 但是会出现死锁的情况; Rezapour 等<sup>[11]</sup>对串联区域控制模型进行了改进, 但并未涉及系统的死锁问题; 白帅福等<sup>[12]</sup>利用分布式协调控制机制研究了 AGVS 混合区域模型中的冲突和死锁问题. 在物联网等技术的推动下, AGVS 的规模和结构复杂度将持续增长, 必然带来“维数灾难”的计算复杂性难题. 控制器设计、程序编写和调试的工作量繁巨, 并且难于保证控制程序的可靠性. 针对该问题, 出现了基于形式化模型的控制程

收稿日期: 2016-05-17; 修回日期: 2016-10-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61573158); 福建省自然科学基金项目 (2014J01241).

作者简介: 罗继亮 (1977-), 男, 教授, 博士, 从事离散事件系统和 Petri 网理论与应用等研究; 张奇 (1991-), 女, 硕士生, 从事自动导引车系统 (AGVS) 控制方法的研究.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: jlluo@hqu.edu.cn

序设计方法<sup>[13-14]</sup>. Luo等<sup>[15]</sup>以Petri网为工具,设计了AGVS的防碰撞控制器,但是并未给出系统的死锁控制方法.

本文针对电磁导引方式的AGVS,给出基于有向图的控制程序自动化设计方法,从闭环模型上保证控制程序的可靠性. 与文献[4-12]相比,本文给出的从模型到控制程序的自动化设计方法可以大幅缩短程序开发的周期,避免人工开发中的一些错误,保证程序的安全可靠性;与文献[15]相比,本文提出的方法放宽了应用条件,不再限制区域的输入和输出导引路径的个数,并且给出了系统的死锁控制方法. 值得指出的是,本文给出的防碰撞控制方法适用于部分可观的AGVS,即系统中的区域存在多条输入导引路径或输出导引路径,当观测到区域中的传感器信号由低电平变化为高电平时,只能获知有AGV进入了该区域,但是无法具体得知AGV是从哪条导引路径开到该区域;同理,当观测到传感器信号由高电平变化为低电平时,只能获知AGV离开了该区域,但是无法得知AGV是沿着哪条导引路径离开的. 所以,当AGVS是部分可观时,系统可能出现的状态将会随不可观事件的数量呈指数级增长<sup>[16]</sup>,防碰撞问题也变得更加棘手. 为此,本文提出扩充危险域的概念,给出一种可以估计危险域中车辆数目的方法,进而设计防碰撞控制器. 讨论了系统发生死锁的两个条件,即扩充危险域划分不合理和AGV数量安排过多所导致的死锁,并给出相应的死锁控制方法. 最后通过仿真实验对本文所提出的方法进行了验证.

### 1 问题描述

图1表示一个以电磁感应<sup>[17]</sup>为导引方式、采用单向导引路径的AGVS的结构示意图.

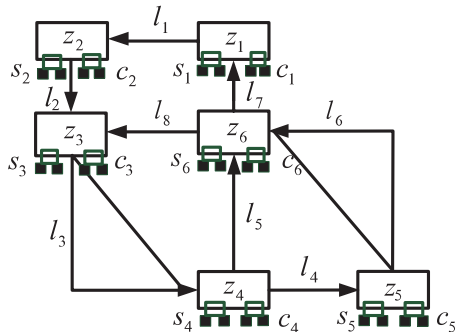


图1 AGVS结构

该系统采用区域控制的方法. 根据区域的用途可以分为加工站区域和物理区域. 加工站区域用于AGV装卸载货物,物理区域用于AGV做暂时停留. 每个区域都有对应的传感器和计数器. 传感器用来检测区域中是否有AGV,计数器用来记录经过区域的

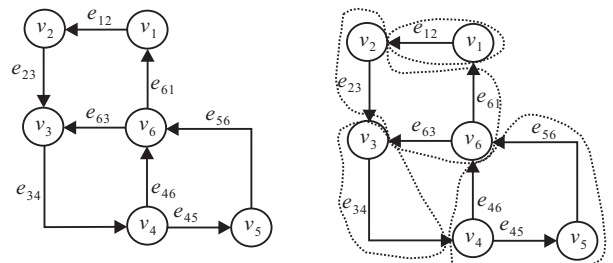
AGV数量. 当有AGV进入区域时,传感器的电平信号由低电平变化为高电平,计数器的计数值加1. 区域之间用导引路径连接,箭头方向为AGV的运行方向. 导引路径内铺设导线,当导线通电时,其周边产生电磁场,AGV通过接收到的电磁信号实现导引;当导线断电时,磁场消失,AGV无法通过电磁信号实现导引,此时导引路径禁止AGV通行. 图1中共有表示为 $z_1, z_2, \dots, z_6$ 的6个区域,表示为 $s_1, s_2, \dots, s_6$ 的6个传感器,表示为 $c_1, c_2, \dots, c_6$ 的6个计数器,表示为 $l_1, l_2, \dots, l_8$ 的8条导引路径. 当AGVS中有多辆AGV时,需要对各个导引路径进行通断电控制来防止车辆碰撞,并且需要考虑路径资源争夺而导致的系统死锁问题.

### 2 AGVS的防碰撞控制方法

AGVS可以用有向图 $G = (V, E)$ 来描述. 其中: $V = \{v_i | i \in Z^+\}$ 是结点的集合,结点表示AGVS中的区域; $E = \{e_{ij} | e_{ij} = (v_i, v_j), v_i, v_j \in V \text{ 且 } v_i \neq v_j\}$ 是边的集合,边表示导引路径,  $v_i$ 称为 $v_j$ 和 $e_{ij}$ 的输入结点,  $v_j$ 称为 $v_i$ 和 $e_{ij}$ 的输出结点,  $e_{ij}$ 称为 $v_j$ 的输入边,也称为 $v_i$ 的输出边.

注1 输入和输出结点分别对应输入和输出区域,输入和输出边分别对应输入和输出导引路径.

为此,得到图1中AGVS的有向图模型和扩充危险域的划分情况如图2所示.



(a) 有向图模型 (b) 扩充危险域的划分情况

图2 图1中AGVS的有向图模型及扩充危险域的划分情况

定义1 给定AGVS有向图中的一条边 $e$ ,  $e$ 的输出结点和该输出结点的输出边称为 $e$ 的危险域,记为 $D(e)$ .

由定义1可知,防止AGV碰撞的关键在于不能让任何导引路径的危险域中出现两辆及以上的AGV,否则可能导致碰撞. 根据现有条件,如何推测危险域中的AGV数量,下面将逐步给出扩充危险域的概念,并给出一种可以估计危险域中AGV数量的方法,从而解决AGVS的防碰撞问题.

定义2 给定AGVS的有向图中一条边 $e$ ,  $n_1 n_2 \dots n_i \dots n_k (i, k \in Z^+)$ 是一个结点序列,如果满足如

下3条,则将该结点序列称为 $e$ 的一条交替路径:1)序列中任何两个结点均不相同;2) $n_1$ 是 $e$ 的输出结点;3) $\forall i(1 \leq i \leq k-1)$ ,若 $i$ 是奇数,则存在一条由 $n_i$ 指向 $n_{i+1}$ 的边,若 $i$ 是偶数,则存在一条由 $n_{i+1}$ 指向 $n_i$ 的边.

**定义3** 给定 $e$ 的一条交替路径 $n_1 n_2 \cdots n_i \cdots n_k(i, k \in Z^+)$ .若 $i$ 是奇数,则 $n_i$ 对应的结点称为 $e$ 的一级结点;若 $i$ 是偶数,则 $n_i$ 对应的结点称为 $e$ 的二级结点. $e$ 的一级和二级结点集合分别记为 $F_1(e)$ 和 $F_2(e)$ .

**注2** 边的一级结点和二级结点分别对应导引路径的一级区域和二级区域.

以图2(a)中的 $e_{56}$ 为例,由定义2可知, $e_{56}$ 有两条交替路径 $v_6 v_1$ 和 $v_6 v_3 v_2$ ;由定义3可知, $F_1(e_{56}) = \{v_6, v_2\}$ , $F_2(e_{56}) = \{v_1, v_3\}$ .

为了快速找到任意边的一级和二级结点集合,下面给出算法1.

**算法1**  $F_1(e)$ 和 $F_2(e)$ 的生成算法.

输入:AGVS的有向图 $G = (V, E)$ 和一条边 $e$ ;

输出: $F_1(e)$ 和 $F_2(e)$ .

**Step 1:**令 $F_1(e) = F_1(e)_{\text{new}} \cup F_1(e)_{\text{old}}$ , $F_2(e) = F_2(e)_{\text{new}} \cup F_2(e)_{\text{old}}$ ;

**Step 2:**将 $e$ 的输出结点 $v$ 放入 $F_1(e)_{\text{old}}$ ;

**Step 3:**将 $v$ 的所有输出结点放入 $F_2(e)_{\text{new}}$ ;

**Step 4:**若 $F_2(e)_{\text{new}} \neq \emptyset$ ,则转**Step 5**,否则转**Step 7**;

**Step 5:**从 $F_2(e)_{\text{new}}$ 中任意取出一个 $v$ 并将其放入 $F_2(e)_{\text{old}}$ ;

**Step 6:**找出 $v$ 的所有输入结点,将 $F_1(e)$ 中没有的结点放入 $F_1(e)_{\text{new}}$ ,返回**Step 4**;

**Step 7:**若 $F_1(e)_{\text{new}} \neq \emptyset$ ,则转**Step 8**,否则退出算法;

**Step 8:**从 $F_1(e)_{\text{new}}$ 中任意取出一个 $v$ 并将其放入 $F_1(e)_{\text{old}}$ ;

**Step 9:**找出 $v$ 的所有输出结点,将 $F_2(e)$ 中没有的结点放入 $F_2(e)_{\text{new}}$ ,返回**Step 4**.

以图2(a)中的 $e_{56}$ 为例,将 $e_{56}$ 的输出结点 $v_6$ 放入 $F_1(e_{56})_{\text{old}}$ ;将 $v_6$ 的输出结点 $v_1$ 和 $v_3$ 放入 $F_2(e_{56})_{\text{new}}$ ;从 $F_2(e_{56})_{\text{new}}$ 中取出 $v_1$ 并放入 $F_2(e_{56})_{\text{old}}$ ,找出 $v_1$ 的输入结点 $v_6$ , $v_6$ 已经在 $F_1(e_{56})$ 中;再从 $F_2(e_{56})_{\text{new}}$ 中取出 $v_3$ 并放入 $F_2(e_{56})_{\text{old}}$ ,找出 $v_3$ 的输入结点 $v_2$ 和 $v_6$ ,将 $F_1(e_{56})$ 中没有的结点 $v_2$ 放入 $F_1(e_{56})_{\text{new}}$ ,此时有 $F_2(e_{56})_{\text{new}} = \emptyset$ ;从 $F_1(e_{56})_{\text{new}}$ 中取出 $v_2$ 并将其放入 $F_1(e_{56})_{\text{old}}$ ,找出 $v_2$ 的输出结点 $v_3$ ,因 $v_3$ 已在 $F_2(e_{56})$ 中且 $F_1(e_{56})_{\text{new}} = \emptyset$ ,算法结束.得到 $F_1(e_{56}) = \{v_6,$

$v_2\}$ , $F_2(e_{56}) = \{v_1, v_3\}$ .

按照算法1可以找到AGVS有向图模型中所有边的一级和二级结点集合.

**定义4** 给定AGVS有向图中的一条边 $e$ , $e$ 的一级结点和一级结点的输出边称为 $e$ 的扩充危险域,记为 $D'(e)$ .

以图2(a)中的 $e_{56}$ 为例, $e_{56}$ 的一级结点是 $v_6$ 和 $v_2$ , $v_6$ 的输出边是 $e_{61}$ 和 $e_{63}$ , $v_2$ 的输出边是 $e_{23}$ .由定义4可知, $v_2, v_6, e_{61}, e_{63}$ 和 $e_{23}$ 称为 $e_{56}$ 的扩充危险域,记为 $D'(e_{56})$ .同理可以找到其他边的扩充危险域.图2(a)中所有边的扩充危险域划分情况如图2(b)所示.

**引理1** 给定AGVS中任意一条导引路径 $e$ , $D'(e)$ 中的AGV数量为

$$N(e) = \sum_{v_x \in F_1(e)} [\delta(v_x)] - \sum_{v_y \in F_2(e)} [\delta(v_y) - m(v_y)]. \quad (1)$$

其中: $e$ 是有向图中对应于导引路径的边; $N(e)$ 是 $D'(e)$ 中的AGV数量; $F_1(e)$ 和 $F_2(e)$ 分别是 $e$ 的一级和二级结点集合; $\delta(v_x)$ 和 $\delta(v_y)$ 分别是经过区域 $v_x$ 和 $v_y$ 的AGV数量; $m(v_y)$ 表示初始情况下区域 $v_y$ 中是否有AGV,有AGV,则 $m(v_y) = 1$ ,否则 $m(v_y) = 0$ .

**证明** 由定义4可知,扩充危险域是由导引路径的一级区域和一级区域的输出导引路径组成,因此经过导引路径所有一级区域的AGV数量之和

$\sum_{v_x \in F_1(e)} [\delta(v_x)]$ 表示进入 $D'(e)$ 的AGV数量.从算法1

的**Step 2**、**Step 3**和**Step 8**、**Step 9**可以看出,一级区域的输出区域是二级区域,因此离开 $D'(e)$ 的AGV都进入了二级区域. $\delta(v_y)$ 是经过 $v_y$ 的AGV数量,其中包含了初始情况下 $v_y$ 中的AGV数 $m(v_y)$ ,因此 $[\delta(v_y) - m(v_y)]$ 是从 $D'(e)$ 进入 $v_y$ 的AGV数量.同理可知, $\sum_{v_y \in F_2(e)} [\delta(v_y) - m(v_y)]$ 是从 $D'(e)$ 进入所有

二级区域的AGV数量,即离开 $D'(e)$ 的AGV数量.所以, $D'(e)$ 中的AGV数量等于进入 $D'(e)$ 的AGV数量减去离开 $D'(e)$ 的AGV数量,即 $\sum_{v_x \in F_1(e)} [\delta(v_x)] -$

$$\sum_{v_y \in F_2(e)} [\delta(v_y) - m(v_y)]. \quad \square$$

**引理2** 给定AGVS中任意一条导引路径 $e$ , $D'(e)$ 中的AGV数量是 $D(e)$ 中可能出现的AGV数量的最大值.

**证明** 由定义1和定义4可知, $D(e) \subseteq D'(e)$ .因此,引理1计算出来的 $D'(e)$ 中的AGV数量可能全部或部分出现在 $D(e)$ 中.所以, $D'(e)$ 中的AGV数量是 $D(e)$ 中可能出现的AGV数量的最大值.  $\square$

**定理1** 给定AGVS中任意一条导引路径 $e$ ,它的

防碰撞控制规范为

$$e = [s(e) + e] \times \overline{\text{Sgn}(N(e))} \prod_{e' \in E_x(e)} \bar{e}' \times \prod_{e'' \in E_y(e)} \bar{e}'' \quad (2)$$

其中:  $e$ 、 $e'$  和  $e''$  分别是有向图中对应于导引路径的边, 如果某条导引路径是通电的, 则令表达式右边相应的  $e$ 、 $e'$  或  $e''$  等于 1, 否则等于 0, 如果  $e$  的输入区域中有 AGV, 则令  $s(e) = 1$ , 否则令  $s(e) = 0$ ;  $E_x(e)$  和  $E_y(e)$  分别是与  $e$  拥有相同输出和输入结点的边的集合;  $N(e)$  是  $D(e)$  中可能出现的 AGV 数量的最大值;  $\text{Sgn}(x) = \begin{cases} 0, & x = 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases}$ ; 当式(2)的计算结果等于 1 时, 允许导引路径  $e$  通电, 否则断电。

**证明** 由式(2)可知, 当且仅当  $\overline{\text{Sgn}(N(e))}$ 、 $[s(e) + e]$ 、 $\prod_{e' \in E_x(e)} \bar{e}'$  和  $\prod_{e'' \in E_y(e)} \bar{e}''$  都等于 1 时, 有  $e = 1$ , 才允许  $e$  通电. 若允许  $e$  通电, 则一定是  $e$  的输入区域中或  $e$  上有 AGV, 即要求  $[s(e) + e] = 1$ ; 当  $D(e)$  中有 AGV 时, 若允许  $e$  通电, 则  $e$  将导引 AGV 进入  $D(e)$ , 与  $D(e)$  中的 AGV 发生碰撞, 因此若允许  $e$  通电, 则  $D(e)$  中一定不能有 AGV, 即要求  $\overline{\text{Sgn}(N(e))} = 1$ ; 如果  $E_x(e)$  中有任意一条边对应的导引路径是通电的, 则它将导引 AGV 进入  $D(e)$ , 此时若允许  $e$  通电, 则  $e$  也将导引 AGV 进入  $D(e)$ , 从而发生碰撞, 因此若允许  $e$  通电, 则  $E_x(e)$  中所有边对应的导引路径都必须是断电的, 即要求  $\prod_{e' \in E_x(e)} \bar{e}' = 1$ ; 当  $e$  的输入区域中有 AGV 时, 若允许  $e$  通电, 则 AGV 不能选择其他的输出导引路径, 因此  $E_y(e)$  中所有边对应的导引路径都必须是断电的, 即要求  $\prod_{e'' \in E_y(e)} \bar{e}'' = 1$ . 所以, 按照式(2)控制  $e$  的通断电,  $D(e)$  中就不会出现两辆及以上的 AGV, 从而解决了防碰撞问题.  $\square$

下面给出 AGVS 的有向图模型到防碰撞控制程序的转换方法.

**算法2** 防碰撞程序的生成算法.

输入: AGVS 的有向图模型  $G = (V, E)$ 、传感器集合  $S$  和计数器集合  $C$ ;

输出: 梯形图.

Step 1: 1) for all  $s_i \in S$  do

$$2) m'_i = (s_i + m'_i) \times \bar{m}''_i, m''_i = (\bar{s}_i + m''_i) \times \bar{m}'_i.$$

等号左边的变量用线圈表示, 右边的变量  $x$  和  $\bar{x}$  分别用常开和常闭触点表示, 按照表达式的逻辑关系对各个触点、线圈进行连接并标记.

3) 将一个 MOVE 模块插入到 Step 1 的 2) 中第 1 个表达式的触点  $\bar{m}''_i$  与线圈  $m'_i$  之间, 令其 IN 端接数字 1, 将另一个 MOVE 模块插入到第 2 个表达式的触点

$\bar{m}'_i$  与线圈  $m''_i$  之间, 令其 IN 端接数字 0, 两个 MOVE 模块的 OUT 端连接同一个存储单元并标记.

4) end for

Step 2: 1) for all  $c_i \in C$  do

2) 将  $c_i$  用计数器模块表示并标记, 将 CU 端与常开触点  $s_i$  相连, CV 端连接一个存储单元并标记.

3) end for

Step 3: 1) for all  $e \in E$  do

2) 首尾连接  $n + m - 1$  个加模块和  $m$  个减模块, 其中  $m$  和  $n$  分别为  $e$  的一级和二级结点个数. 加输入端分别与  $e$  的一级结点在 Step 2 的 2) 中的存储单元和  $e$  的二级结点在 Step 1 的 3) 中存储单元连接; 减输入端分别与  $e$  的二级结点在 Step 2 的 2) 中存储单元连接, 最后一个减模块的 OUT 端连接一个存储单元并标记.

3) end for

Step 4: 1) for all  $e \in E$  do

$$2) e = \prod_{e' \in E_x(e)} \bar{e}' \times \prod_{e'' \in E_y(e)} \bar{e}'' \times [s(e) + e].$$

等号左边的变量用线圈表示, 右边的变量  $x$  和  $\bar{x}$  分别用常开和常闭触点表示, 按照表达式的逻辑关系对各个触点、线圈进行连接并标记.

3) 将一个比较模块插入到触点  $s(e)$  与线圈  $e$  之间, 比较端分别连接数字 0 和  $e$  在 Step 3 的 2) 中最后一个减模块的存储单元.

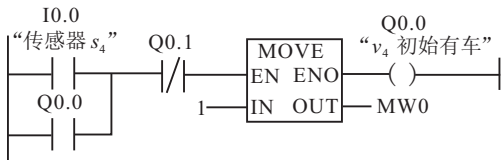
4) end for

算法 2 中的 Step 1 用来记录 AGVS 中每个区域初始情况下是否有 AGV, Step 2 用来记录经过每个区域的 AGV 数量, Step 3 用来计算扩充危险域中的 AGV 数量, Step 4 用来对每条导引路径进行通断电控制.

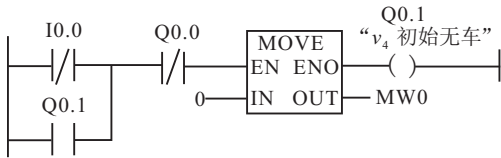
本文提出的防碰撞方法可以针对不同结构的 AGVS, 具有普遍适用性. 通过算法 2 可以开发出一套快速生成 AGVS 防碰撞程序的软件. 当现有 AGVS 的结构由于路径故障等原因发生变化时, 只需要修改相应的有向图模型, 把新得到的有向图模型作为算法的输入, 即可快速灵活地得到相应的控制程序, 保证系统高效安全地运行.

以图 2(a) 中的  $e_{63}$  为例,  $F_1(e_{63}) = \{v_3\}$ ,  $F_2(e_{63}) = \{v_4\}$ ,  $E_x(e_{63}) = \{e_{23}\}$ ,  $E_y(e_{63}) = \{e_{61}\}$ .  $D'(e_{63})$  中的 AGV 数量为  $N(e_{63}) = \delta(v_3) - [\delta(v_4) - m(v_4)]$ , 控制规范为  $e_{63} = [s(e_{63}) + e_{63}] \times \overline{\text{Sgn}(N(e_{63}))} \times \bar{e}_{23} \times \bar{e}_{61}$ . 按照此控制规范对  $e_{63}$  进行通断电控制,  $D(e_{63})$  中将不会发生 AGV 碰撞,  $e_{63}$  的梯形图控制程序如图 3 所示. 同理, 根据算法 2 对所有导引路径进行通断电控制, 即可达到 AGVS 的防碰撞目的.

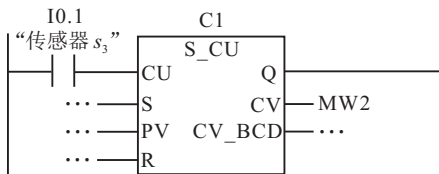
程序段1:如果区域 $v_4$ 初始情况下有AGV,则MW0存入1



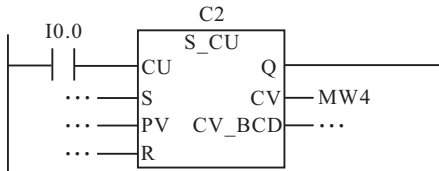
程序段2:如果区域 $v_4$ 初始情况下无AGV,则MW0存入0



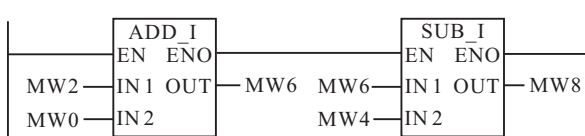
程序段3:MW2中记录经过区域 $v_3$ 的AGV数量



程序段4:MW4中记录经过区域 $v_4$ 的AGV数量



程序段5:MW8中记录经过区域 $D'(e_{63})$ 的AGV数量



程序段6:对导引路径 $e_{63}$ 进行通断电控制

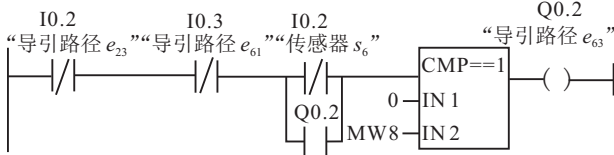


图3  $e_{63}$ 的梯形图控制程序

### 3 AGVS的死锁控制方法

在解决了AGVS防撞问题的基础上,还需要考虑路径资源争夺而导致的系统死锁问题.下面给出AGVS发生死锁的两个条件,并给予证明.

**定理2** 给定AGVS有向图中的一条边 $e$ ,如果 $D'(e)$ 中包含了 $e$ 的输入结点,则AGVS会发生死锁.

**证明** 如果 $D'(e)$ 中包含了 $e$ 的输入结点,则当AGV进入 $e$ 的输入区域且 $D'(e)$ 中没有其他AGV时,根据式(1)计算出 $N(e) = 1$ ,由式(2)可知, $e$ 是断电的.但实际情况 $D(e)$ 中并没有AGV, $e$ 是可以通电的,这种情况下却没有通电.如果AGVS中其余的导引路径也都是断电的,则AGVS将会发生死锁. □

**定理3** 如果AGV的数量不小于有向图模型中扩充危险域的个数,则AGVS会发生死锁.

**证明** 当AGV的数量不小于扩充危险域的个数

时,AGVS中有可能出现每个扩充危险域中至少有一辆AGV的情况,根据定理1,此时每条导引路径都是断电的,从而使AGVS发生死锁. □

为了避免AGVS发生死锁,下面给出算法3.

**算法3** AGVS的死锁控制算法.

输入:AGVS的有向图模型 $G = (V, E)$ 和AGV的数量 $n$ ;

输出:死锁控制方法.

**Step 1:** 在AGVS的有向图模型中划分出所有边的扩充危险域,并统计个数 $m$ ;

**Step 2:** 将输入结点包含在扩充危险域中的边放入集合 $E_1$ ;

**Step 3:** 若 $E_1 \neq \emptyset$ ,则转Step 4,否则转Step 7;

**Step 4:** 分别找出与 $E_1$ 中的边拥有相同输入结点的边放入集合 $E_2$ ;

**Step 5:** 分别对 $E_2$ 的边所对应的导引路径拆分,使其一分为二,并在中间加入一个新的物理区域;

**Step 6:** 修改有向图模型,返回Step 1;

**Step 7:** 若 $n$ 小于 $m$ ,则退出算法,否则转Step 8;

**Step 8:** 减少 $n$ 的值,使其小于 $m$ .

算法3中的Step 5通过对 $E_2$ 中边所对应的导引路径进行拆分,令其中加入新的物理区域,使得原本包含边输入结点的扩充危险域拆分为多个都不包含边输入结点的扩充危险域,从而预防了定理2中的死锁情况;Step 8通过减少AGV的数量,使其小于扩充危险域的个数,从而预防了定理3中的死锁情况.

以图2(b)中的AGVS为例,可以看出, $D'(e_{45})$ 中包含了 $e_{45}$ 的输入结点 $v_4$ ,则AGVS会发生死锁.根据算法3找到 $E_1 = \{e_{45}\}, E_2 = \{e_{46}\}$ .将 $e_{46}$ 对应的导引路径一分为二,中间加入一个安装有传感器的物理区域 $v_7$ .修改后的有向图模型如图4(a)所示,其中结点集合 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7\}$ ,边集 $E = \{e_{12}, e_{23}, e_{34}, e_{45}, e_{47}, e_{56}, e_{61}, e_{63}, e_{76}\}$ .对有向图中的边进行扩充危险域划分,其中 $e_{12}$ 、 $e_{56}$ 和 $e_{76}$ 拥有相同的扩充危险域, $e_{23}$ 和 $e_{63}$ 拥有相同的扩充危险域, $e_{45}$ 和 $e_{47}$ 拥有相同的扩充危险域,划分出来的5个扩充危险域如图4(b)所示.

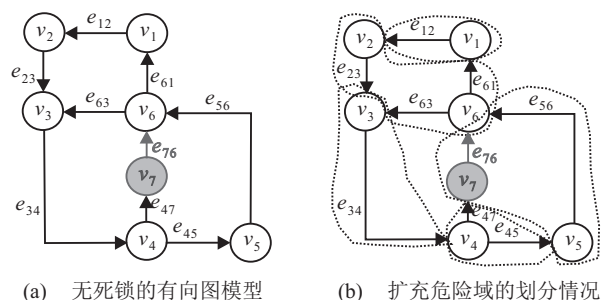


图4 无死锁的有向图模型及扩充危险域的划分情况

从图4中可以看出,所有边的输入结点均不在自身的扩充危险域中,当控制AGV的数量小于5时,AGVS就不会发生死锁.

### 4 仿真实验

#### 4.1 防碰撞控制方法的仿真实验

为了验证所提出的防碰撞控制方法的有效性,对于图4(a)中的AGV系统,根据定理1设计了控制器,并编写了Matlab仿真程序.其中,假定初始情况下区域 $v_4$ 和 $v_7$ 中各有1辆AGV,不考虑AGV在区域中的装卸载时间,AGV匀速通过导引路径 $e_{12}$ 、 $e_{23}$ 、 $e_{34}$ 、 $e_{45}$ 、 $e_{47}$ 、 $e_{56}$ 、 $e_{61}$ 、 $e_{63}$ 和 $e_{76}$ 分别需要3、2、4、3、2、4、2、3和2个时间步长.在以上条件下,分别进行了200、400、800和1000个时间步长的仿真实验,运行结果均显示在任何区域或导引路径内均无碰撞发生.现以400个时间步长为例,给出仿真具体结果和分析.

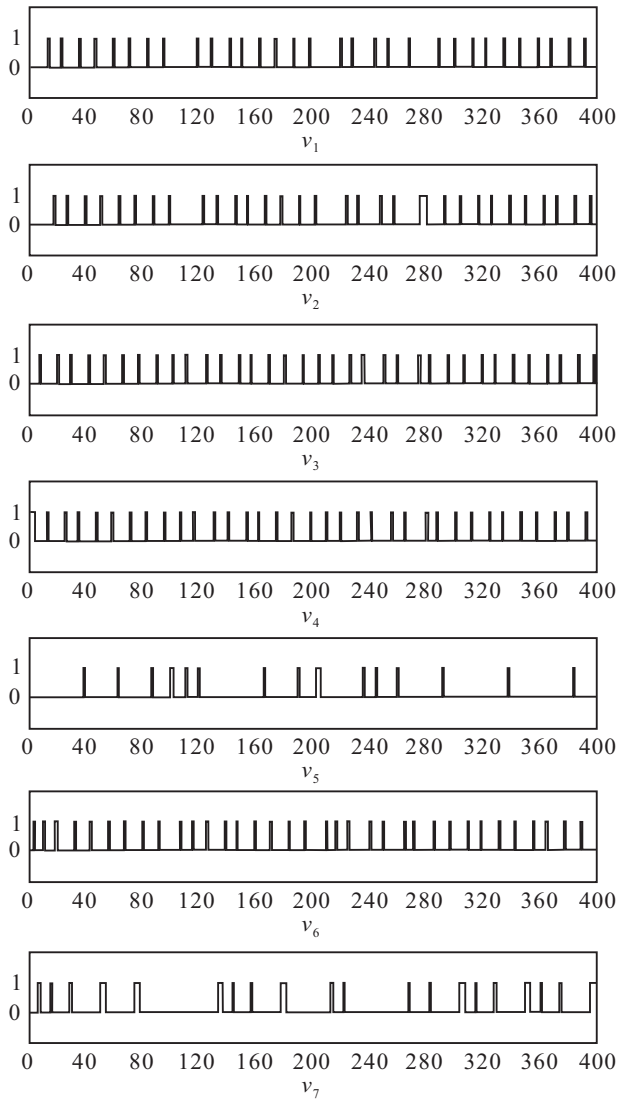


图5 AGVS中各区域内车辆数

由图5和图6可知,仿真过程中任何时刻AGVS中的区域或导引路径内都不会出现两辆及以上的车辆.

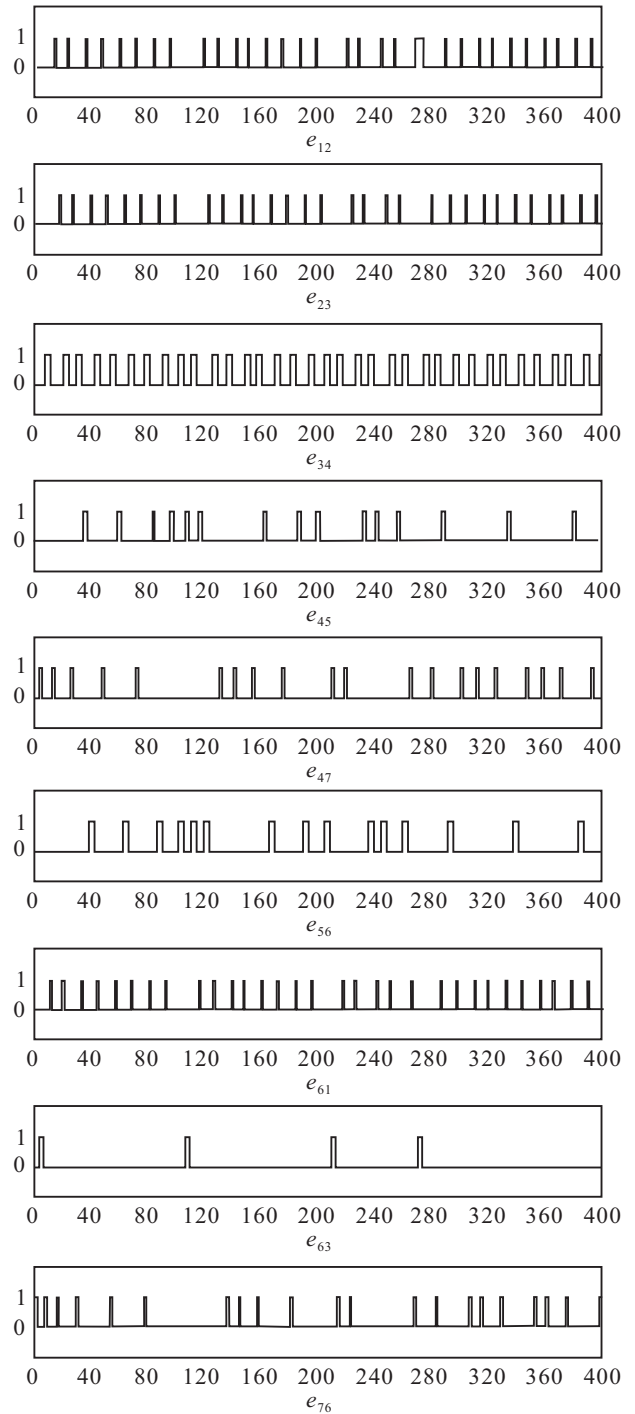


图6 AGVS中各导航路径内车辆数

AGV,即不会发生车辆碰撞.因此,按照定理1设计的控制器可以达到防碰撞目的.

#### 4.2 死锁发生条件及其控制方法的仿真实验

为了验证定理2和定理3中的死锁发生条件以及算法3中死锁控制方法的有效性,通过编写Matlab仿真程序,对于图2(a)和图4(a)中的AGVS,当AGV数量从2逐一增加到7时,分别进行了1000个时间步长的仿真实验,得到的仿真结果如表1所示.

图2(a)中的AGVS满足定理2中的死锁条件,从表1中第3行可以看出,无论AGVS中的AGV数量是

表1 AGVS是否发生死锁的统计情况

是否发生死锁	AGV 数量					
	2	3	4	5	6	7
图2(a)的AGVS	是	是	是	是	是	是
图4(a)的AGVS	否	否	否	是	是	是

多少,系统都会发生死锁,这验证了定理2的有效性;图2(a)和图4(a)中的AGVS分别有4和5个扩充危险域,从表1中第3行4~7列和第4行5~7列可以看出,当AGVS中AGV的数量大于或等于扩充危险域的个数时,系统会发生死锁,这验证了定理3的有效性;利用算法3对图2(a)中的AGVS进行了改进,得到图4(a)中AGV数量小于5的AGVS,从表1中第4行的2~4列可以看出,系统不会发生死锁,这验证了算法3中死锁控制方法的有效性。

## 5 结论

本文以电磁感应导引方式的AGVS为研究对象,提出了一种基于有向图的防碰撞和死锁的形式化控制方法.在部分观测的条件下,定义了扩充危险域的概念,通过分析有向图模型中边与结点的关系,找到了一种可以估计危险域中AGV数量的方法,并给出了导引路径的控制规范,按照此控制规范对导引路径进行通断电控制,AGVS中将不会发生车辆碰撞.此外,本文还给出了由模型到控制程序的转换方法,为更加柔性、自动化的AGVS程序设计奠定了基础.针对系统死锁的两个条件,给出了相应的死锁控制方法,并通过仿真实验验证了本文方法的有效性.当AGVS中导引路径等控制元件出现故障时,如何准确诊断出故障位置,从而快速地对模型进行修改,并给出相应的紧急控制策略,将是下一步的研究目标。

## 参考文献(References)

[1] Xiao H N, Lou P H, Qian X M, et al. A unidirectional guided-path network design method under flexible job shop environment[J]. *J of Mechanical Engineering*, 2013, 49(3): 122-129.

[2] Vis IFA. Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems[J]. *European J of Operational Research*, 2006, 170(3): 677-709.

[3] Le-Anh T, De Koster M B M. A review of design and control of automated guided vehicle systems[J]. *European J of Operational Research*, 2006, 171(1): 1-23.

[4] Asef-Vaziri A, Hall N G, George R. The significance of deterministic empty vehicle trips in the design of a unidirectional loop flow path[J]. *Computers & Operations Research*, 2008, 35(5): 1546-1561.

[5] Elmekawy T Y, Liu S. A new memetic algorithm for optimizing the partitioning problem of tandem AGV systems[J]. *Int J of Production Economics*, 2009, 118(2):

508-520.

- [6] Correa A I, Langevin A, Rousseau L M. Scheduling and routing of automated guided vehicles: A hybrid approach[J]. *Computers & Operations Research*, 2007, 34(6): 1688-1707.
- [7] 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.
- [8] 郭大宏. 基于单向导引路径网络的AGVS自主路径规划及交通管理方法研究[J]. *制造业自动化*, 2013(11): 98-100.  
(Guo D H. Self path planning and traffic management method for unidirectional guided-path based automated guided vehicle system[J]. *Manufacturing Automation*, 2013(11): 98-100.)
- [9] 肖海宁, 楼佩煌. 自动导引车系统避碰及环路死锁控制方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(5): 1244-1252.  
(Xiao H N, Lou P H. Collision avoidance and cycle-deadlock control method for automated guided vehicle system[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(5): 1244-1252.)
- [10] Zhu F, Tan D L. Elementary motion-based multi-robot collision avoidance and deadlock prevention[J]. *Chinese J of Computers*, 2001, 24(12): 1250-1255.
- [11] Rezapour S, Zanjirani-Farahani R, Miandoabchi E. A machine-to-loop assignment and layout design methodology for tandem AGV systems with single-load vehicles[J]. *Int J of Production Research*, 2010, 49(12): 3605-3633.
- [12] Bai S F, Tang D B, Gu W B, et al. Research of multiple AGV systems based on mixed regional control module[J]. *Machinery & Electronics*, 2012(3): 8-12.
- [13] Silva C F, Quintans C, Colmenar A, et al. A method based on petri nets and a matrix model to implement reconfigurable logic controllers[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2010, 57(10): 3544-3556.
- [14] Gomes L, Lourenco J. Rapid prototyping of graphical user interfaces for petri-net-based controllers[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2010, 57(5): 1806-1813.
- [15] Luo J L, Ni H J, Zhou M C. Control program design for automated guided vehicle systems via petri nets[J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics Systems*, 2015, 45(1): 44-55.
- [16] Ru Y. State estimation and sensor selection in discrete event systems modeled by Petri nets[D]. USA: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010.
- [17] Hsieh S, Kang M Y. Developing AGVS Petri net control models from flowpath nets[J]. *J of Manufacturing Systems*, 1998, 17(4): 237-250.