

## 可重组制造系统中物流运输路径规划

宋士刚, 李爱平, 徐立云

(同济大学 现代制造技术研究所, 上海 201804)

**摘要:** 在分析可重组制造系统物流布局的基础上, 根据物流运输网络的空间分布特征, 提出了一种动态的 AGV(自动引导小车)路径规划方法. 利用图论, 构建了 AGV 路径规划的有向图网络模型, 采用机床相对位置矩阵、距离矩阵以及阻塞系数来描述车间环境信息, 通过系统的重组, 有效缩短运输距离. 针对物流运输动态路网的变化, 把整个运输网络划分成不同的子路网, 动态地优化变化附近运输节点所在的子路网, 从而较迅速地得到最佳运输路径. 仿真结果表明了该方法的有效性和快速性.

**关键词:** 可重组制造系统; 自动引导小车; 路径规划; Dijkstra 算法

**中图分类号:** TH 165

**文献标识码:** A

### Logistics Transport Routing Planning in Reconfigurable Manufacturing System

SONG Shigang, LI Aiping, XU Liyun

(Institute of Advanced Manufacturing Technology, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Based on an analysis of logistics layout in reconfigurable manufacturing system, a method of the dynamic routing planning is proposed for automated guided vehicle (AGV) according to the spatial distribution feature of logistics transport network. Directed graph network model of AGV routing planning was built based on graph theory. Workshop circumstance information was described by the relative position matrix of machine tools, the distance matrix and congestion coefficient. Through reconfiguring system, the transport distance can be shortened effectually. Specific to dynamic change of logistics transport road network, the whole transport network was partitioned with different sub-road networks, and those including transport nodes near the changed location were optimized to obtain best transport routing rapidly. Simulating result verifies the validity and celerity of this method.

**Key words:** reconfigurable manufacturing system; automated guided vehicle(AGV); routing planning; Dijkstra algorithm

可重组制造系统是一种能够在需要的时间, 根据生产需求以及系统内部的变化, 在充分利用现有制造资源的基础上, 快速提供合适生产能力和功能的制造系统. 它能够在系统规划与设计规定的范围内, 基于现有自身系统, 通过可重构机床或移动设备, 以及生成虚拟制造单元等方式, 重组制造系统. 目前, 可重构机床仍在研究之中, 因此, 通过可重构机床的方式实现可重组制造系统还有困难. 现在主要以设备的移动、添加以及逻辑重组的方式, 实现可重组制造系统的重组. 通过逻辑重组的设备, 在物理位置上可以不相邻而且不可移动, 在逻辑和概念上却可以相互关联, 构成临时虚拟动态实体. 这种关联可通过生产物流系统来实现.

自动引导小车 (automated guided vehicle, AGV), 以快速、准确的运输, 运输路径柔性化, 便于计算机管理与调度等优点, 广泛应用于制造业, 可实现可重组制造系统中各设备间的关联. 据统计, 在产品生产的整个过程中, 仅仅有 5% 的时间用于加工和制造, 剩余 95% 都用于储存、装卸、等待加工和输送<sup>[1]</sup>, 造成了企业总经营费用增加. 因此, 如何在保证可重组制造系统满足生产的同时, 提高系统物流的运行效率, 使 AGV 能快速而高效地将物料运送到各个设备, 满足生产需求对于系统的生产, 尤为重要. 为达到以上要求, AGV 必须有一条高效、通畅的运输路径, 因此, 规划 AGV 路径具有很重要的现实意义. 一条路径的好坏取决于许多因素, 如距离、时间、车速、转弯的数目和环境信息等. 这些因素称为路径规划的优化指标. 选择优化指标的标准取决于系统优化的需求, 本文选择距离作为优化指标 (因为

收稿日期: 2008-10-18

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划资助项目(2007AA042002); 上海市“十一五”基础性重点研究资助项目(06JC14066)

作者简介: 宋士刚(1978—), 男, 博士生, 主要研究方向为 CAD/CAPP/CAM 集成、可重组制造系统等. E-mail: shongsg@163.com

李爱平(1951—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为网络化制造、制造业信息化等. E-mail: limuzi@tongji.edu.cn

其他因素的随机性较大),因此,路径规划问题就转化为最短路径问题.

目前,最短路径问题一直是图论、地理信息系统及运筹学等学科的一个研究热点.人们提出了很多算法解决最短路径问题,如状态空间法<sup>[2]</sup>、神经网络法<sup>[3]</sup>和遗传算法<sup>[4]</sup>等.这些算法的一个共同特点是,力求通过先进的计算机数据结构和运筹学方法,从理论上减少搜索算法的时间复杂度,而忽略了实际运输网络本身所特有的空间分布特性.笔者在分析可重组制造系统中物流布局的基础上,基于图论,提出了一种动态的 AGV 路径规划方法,简化了计算,同时降低了物流成本.

## 1 AGV 路径规划

### 1.1 AGV 路径规划的有向图网络模型

图论方法是应用十分广泛的运筹学分支,广泛地应用在控制论、信息论、科学管理、电子计算机等各个领域.图论中的图  $G$  是指由非空有限集合  $V$  和  $V$  中某些元素无序对的集合  $E$  构成的二元组  $(V, E)$ .  $V$  称为  $G$  的顶点集,其中的元素称为  $G$  的顶点.  $E$  称为  $G$  的边集,其中的元素称为  $G$  的边.若要区分指定图中每条边的 2 个顶点的顺序时,就得到一个完全不同的组合对象,即有向图.在图中,往往还需要加入各类数量指标来表示事物之间的量化关系.这种附加于图中的数量指标称为权,被赋有权的图称为网络.

在可重组制造系统中,当 AGV 将工件从上一机床运送到下一个机床时,按这两台机床在地理位置上是否相邻,其路径可分两种情况:①若两台机床相邻,该 AGV 直接将工件就从上一机床运送到下一机床,途中不必经过其他机床.②若不相邻,AGV 途中至少要经过一台机床才能到达下一机床,途中需确定接着向哪台机床运送.如果用顶点来表示各种加工机床,用边来表示 AGV 运输路径,用权来代表路径的数量指标,就构成了 AGV 路径规划的有向图网络模型.应用图论,可将可重组制造系统 AGV 路径规划描述为一种图:重组对象是一无向图,重组结果则是一有向图<sup>[5]</sup>.AGV 在各机床间运动,形成虚拟有向路径网络,按合理有效的路径网络运送工件,能够最大程度地缩短运输距离.

### 1.2 最短路径生成算法

最短路径问题就是要在赋权图的 2 个顶点之间寻找出权和最小的通路.由于 AGV 路径规划的有向

图网络模型中不会出现负权值,因此,可以采用 Dijkstra 算法求解.这是求解最短路径的经典算法,建立在抽象的网络模型上,把路径抽象为网络中的边,以边的权值来表示路径相关的参数.算法确定了赋权网络中从某点到所有其他节点的具有最小权的路.由于经典 Dijkstra 算法是一个按节点随起始点路程递增顺序产生最短路径的过程<sup>[6]</sup>,因此,在最短路径的搜索过程中具有很大的盲目性,随时都会向四面八方展开.这样,最终扫过的搜索区域基本上是以起始点为原点,以起始点与目标点的连线长度为半径的一个圆.

目前,针对这一问题提出了许多新的改进算法<sup>[7-8]</sup>,且各具特色.这些改进算法通过限制搜索区域,降低算法的空间复杂度,但很少考虑网络模型的动态变化对算法的影响.在可重组制造系统的工件运输网络中,路段有时会堵塞.当某一路段拥挤或因其他原因使 AGV 不能通过时,必然会影响最短路径.但是这种影响是局部的,在绝大多数情况下,不可能影响整个运输网络所有的路径.对于因路段堵塞而需要重新计算最短路径的情况,笔者采用一种可拼接物流技术,对运输路径进行动态优化.现定义可拼接物流技术.

**定义 1** 根据不同的运输节点,将整个最短运输路网划分成不同的子路网,每段子路网都是模块化和相对独立的,自身的变化极少影响到其他的子路网.这就是可拼接物流技术.

根据以上的定义,当某路段交通堵塞时,可以把整个物流运输路网划分成三个独立的子路网,分别为上子路网、中子路网和下子路网.中子路网是指包含交通堵塞路段的、由相邻 2 个运输节点组成的子路网.中子路网之前的子路网称为上子路网,以下的称为下子路网.当某路段因堵塞等原因需重新规划路径时,仅对该路段所处的中子路网路径进行优化计算,其他子路网运输路径保持不变,以减少计算量,从而较迅速地得到最短路径.

## 2 系统环境信息描述

在可重组制造系统中,为了规划 AGV 运输路径,必须描述车间环境信息.现分别采用机床距离矩阵、相对位置矩阵以及阻塞系数来描述车间详细信息,提供路径网络生成所需的输入数据.

### 2.1 机床相对位置矩阵

机床相对位置矩阵  $P$  中的元素  $p_{ij}$  表示第  $i$  号机

床与第  $j$  号机床的位置关系. 在生产过程中, 首先由工件的工艺确定工件加工物流的主流方向, 然后, 根据主流方向, 用 3 个不同的数字分别表示各机床的相对位置, 由此生成机床相对位置矩阵. 矩阵的元素为

$$\mathbf{P} = p[ij] = \begin{cases} 1 & j \text{ 在 } i \text{ 前} \\ 0 & j \text{ 与 } i \text{ 平行} \\ -1 & j \text{ 在 } i \text{ 后} \end{cases} \quad (1)$$

显然, 矩阵中各机床相对位置值随物流主流方向的改变而改变. 如图 1 所示, 当某工件加工工序为 CNC1→CNC2→CNC3→CNC5 时, 加工物流的主流方向是从左到右, 则  $p_{12} = 1$ . 若另有工件的工序为 CNC4→CNC2→CNC1 时, 则加工物流的主流方向是从右到左, 此时,  $p_{12} = -1$ .

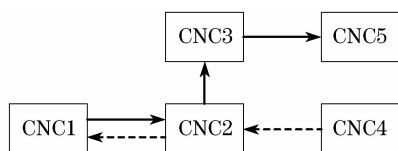


图 1 工序物流图  
Fig.1 Process logistics

## 2.2 阻塞系数

当各运输线路阻塞时, 会使 AGV 速度降低, 甚至停下来. 引起阻塞的主要原因如下: ①AGV 本身出现故障; ②两辆以上的 AGV 竞争同一路段; ③线路交叉; ④运输线路超负荷运行. 文献[9]在对 AGV 总有效时间修改的基础上, 提出用阻塞系数测量 AGV 的阻塞程度. 利用阻塞系数分析 AGV 阻塞程度时, 假设——

- 物流系统中, 各 AGV 在运行过程中不发生故障, 并以同样速度运行;
- AGV 的满载速度与空载速度相同;
- 由各机床将 AGV 路径网络划分成不同路段;
- 在每一路段的开始和结束处都能采集数据.

则第  $m$  条线路的阻塞系数  $C_m$  为

$$\left. \begin{aligned} C_m &= 1 - I_m N_m / \sum_{n=1}^{N_m} A_{mn}, \\ I_m &= L_m / S, \quad m = 1, 2, \dots, M \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中:  $A_{mn}$  表示 AGV 在第  $m$  条线路上通过第  $n$  次时的实际运行时间;  $N_m$  表示第  $m$  条线路上通过 AGV 的次数;  $I_m$  表示 AGV 在第  $m$  条线路上的理想运行时间;  $L_m$  表示第  $m$  条线路的长度;  $S$  表示 AGV 的速度. 若  $\sum_{n=1}^{N_m} A_{mn} = I_m N_m$ , 则  $C_m = 0$ , 表明该线路无阻塞.  $C_m$  越大, 阻塞越严重<sup>[10]</sup>.

## 2.3 距离矩阵文件

距离矩阵文件基于初始路径网络生成, 记录网络中节点之间距离信息. 该文件的行和列均代表网络中节点序号, 若 2 个节点  $v_i, v_j$  之间有直接联系, 即第  $i$  号机床与第  $j$  号机床相邻, 则距离矩阵  $\mathbf{D}$  中的元素值  $d_{ij}$  为二者的距离; 若两机床不相邻, 则该元素值用  $\infty$  表示.

假设有向图  $G = (V, E)$  有  $s$  个顶点, 即  $V = \{V_0, V_1, \dots, V_{s-1}\}$ , 则表示  $G$  中各顶点距离关系为一个  $s \times s$  的距离矩阵. 矩阵的元素为

$$\mathbf{D} = d[ij] = \begin{cases} w_{ij}, & i \text{ 和 } j \text{ 相邻} \\ \infty, & i \text{ 和 } j \text{ 不相邻} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $w_{ij}$  表示边  $v_i v_j$  上的权重;  $\infty$  表示一个计算机允许的、大于所有边上权重的数. 为了物流运输路径的最优化, 将各路段的运输距离作为各边的权重, 求解的最优路径即是最短路径. 在确定权重时, 为体现交通阻塞对物流运输的影响, 各路段的运输距离为

$$w_{ij} = L_{ij} / (1 - C_{ij})$$

其中:  $C_{ij}$  表示边  $v_i v_j$  的阻塞系数;  $L_{ij}$  为边  $v_i v_j$  之间的物理距离. 由此, 根据实际运输网络, 可计算出距离矩阵中各元素的值, 生成距离矩阵文件.

## 3 路径规划的实现

规划 AGV 路径的目的就是要求尽可能减少工件的移动次数, 缩短移动距离, 降低物流成本, 从而降低产品成本. 在物流路径上, 要尽量避免回退及阻塞. 所谓回退, 就是某两机床之间的物料流向与工件的主流方向相反. 回退会增加物流成本, 应该尽可能地避免; 而且回退与设施布置密切相关, 在某些情况下, 可以通过改变布置而避免. 阻塞易于理解, 因为物流线路的交叉以及超负荷运行等原因, 使 AGV 运输发生等待, 降低物流效率, 增加物流成本. 因此, 尽可能选择阻塞率小的线路.

由于可重组制造系统中物流运输网络环境复杂多变, 为了有效地避免回退、阻塞, 更好地处理堵塞事件, 综合采用重构物流布局以及可拼接物流技术, 动态优化 AGV 运输路径. 整个路径网络 AGV 路径规划工作流程如图 2 所示. 总体思路如下:

(1) 根据现有设备物理布局, 利用图论, 将系统设备物理布局转换为初始路径网络. 判断相邻机床的相对位置, 生成机床相对位置矩阵文件.

(2) 分析路径网络中各路段的阻塞程度, 得到阻塞系数, 并计算运输距离, 将结果储存为距离矩阵文件. 通过距离矩阵文件, 应用 Dijkstra 优化算法, 规划

AGV 运输路径, 求出从起点到终点的最短路径.

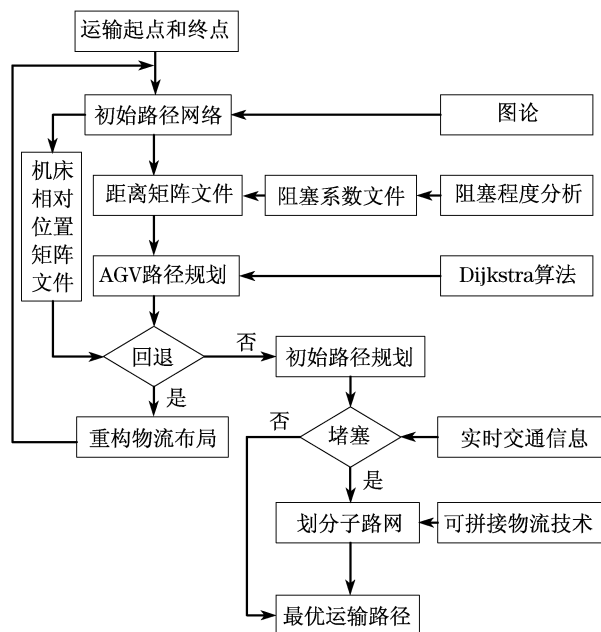


图 2 路径规划工作流程

Fig. 2 Routing planning working flow

(3) 由机床相对位置矩阵文件, 判断 AGV 路径是否产生回退. 若是, 则重构设备布局, 避免回退现象; 否则, 该 AGV 最短运输路径即为初始规划路径.

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0.30 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.18 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.25 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 0.30 & 0 & 0.28 & 1.00 & 1.00 & 0.30 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 1.00 & 0.28 & 0 & 0.30 & 1.00 & 1.00 & 0.32 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 1.00 & 1.00 & 0.30 & 0 & 0.24 & 1.00 & 1.00 & 0.35 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.24 & 0 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.2 & 0.15 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 0.18 & 0.3 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0 & 0.27 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.15 & 0.32 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 1.00 & 1.00 & 0.32 & 1.00 & 1.00 & 0.27 & 0 & 0.20 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.28 & 1.00 & 1.00 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.35 & 1.00 & 1.00 & 0.20 & 0 & 0.26 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.26 & 1.00 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.20 & 1.00 & 1.00 & 0.26 & 0 & 0.29 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.15 & 0.12 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.15 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.29 & 0 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.15 \\ 0.25 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.15 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0 & 0.26 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.32 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.26 & 0 & 0.25 & 1.00 & 1.00 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.28 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.25 & 0 & 0.20 & 1.00 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.26 & 0.15 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.20 & 0 & 0.12 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.12 & 0.15 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.12 & 0 \end{bmatrix}$$

现有工件需经过 7 道工序, 分别经过不同的机床(CNC)完成加工. 具体工件经过的机床顺序为: CNC1→CNC2→CNC6→CNC7→CNC12→CNC9→CNC10. 由图 3 分析可知, 从 CNC7 到 CNC12 的物料流动方向与主流方向相反, 因此, 这两道工序之间发生了回退. 毫无疑问, 在物料的回退过程中, 会增加物料的来回搬运, 增加物流成本. 为了避免回退, 对

(4) 根据实时交通信息, 当某一路段严重堵塞、需要重新计算最短路径时, 采用可拼接物流技术, 把整个路径网络划分成不同的子路网, 只对堵塞路网进行动态优化, 生成最优运输路径. 若无交通堵塞, 则原有路径即为最优运输路径.

在可重组制造系统中, 当同时有多个产品需加工时, 不同产品制造运输网络的最优路径之间可能会有冲突. 对此, 优先法是一种有效的解决方法, 该方法通过分析系统中各机器的实际生产负荷以及生产任务量, 确定瓶颈机床集, 并根据瓶颈机床与 AGV 之间的运输关系, 优先对瓶颈机床之间的路段进行物流运输<sup>[11]</sup>.

## 4 仿真分析

设可重组制造系统中有机床 15 台, 机床布局及机床的编号如图 3 所示. 利用图论构建系统中 AGV 路径规划的有向图网络模型. 各相邻机床的横向距离为 5 m, 纵向距离为 4 m, 由此可写出机床相对位置矩阵  $P$  和距离矩阵  $D$ . 矩阵  $P$  和  $D$  可以完整地反映车间的信息. 其中, 路径网络中各路段阻塞系数矩阵  $C$  为

现有物流布局重构, 移动 CNC8 和 CNC12, 相互调换位置, 由此省去工件的物料来回运输量. 通过运输距离矩阵文件, 应用 Dijkstra 优化算法, 规划 AGV 运输路径, 分别计算出车间重组前和重组后从 CNC1 到 CNC10 的最短路径分别为 62.48 m 和 39.75 m. 可见, 由于重组后的物流布局有效避免了回退, 使得整个工艺过程中 AGV 的每趟运输距离减少了

22.73 m,比原有路径缩短了36%的路程,大大降低了物流成本.

在物流运输过程中,设由于CNC12到CNC9路段严重堵塞,或其他原因使AGV不能通过,需重新计算最优路径,本文采用可拼接物流技术,把整个路径网络划分成三个独立的子路网:CNC1→CNC12,上子路网;CNC12→CNC9,中子路网;CNC9→CNC10,下子路网.仅重新计算中子路网,规划路径为CNC12→CNC14→CNC9(其他子路网路径保持不变),从而较迅速地得到最优路径.

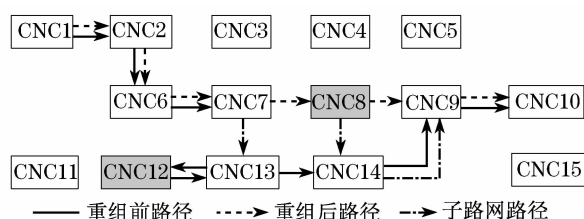


图3 仿真结果

Fig.3 Simulating result

## 5 结语

制造系统物流运输路网中最优路径的选择一直是企业关注的焦点.本文基于图论,构建了可重组制造系统中AGV路径规划的有向图网络模型;采用机床相对位置矩阵、距离矩阵以及阻塞系数,描述车间环境信息;通过物流系统的重构,有效避免了回退现象,缩短了运输距离;利用可拼接物流技术,动态优化子路网,从而快速地满足了AGV路径规划的要求.

### 参考文献:

[1] 张晓萍,颜永年,吴耀华,等.现代生产物流及仿真[M].北京:清华大学出版社,1998.  
ZHANG Xiaoping, YAN Yongnian, WU Yaohua, et al. Modern production material handling and simulation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998.

[2] 胡正兴,李一民,詹跃东.自动导引小车局部智能避障的A\*算法[J].昆明理工大学学报,2005,30(5):51.  
HU Zhengxing, LI Yiming, ZHAN Yuedong. An intelligent obstacle avoidance A\* algorithm of automatic guided vehicles in local environment[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology, 2005, 30(5): 51.

[3] 肖本贤,齐东流,刘海霞,等.动态环境中基于模糊神经网络的AGV路径规划[J].系统仿真学报,2006,18(9):2401.  
XIAO Benxian, QI Dongliu, LIU Haixia, et al. AGV path planning in the dynamic environment based on fuzzy neural network[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(9): 2401.

[4] ZHAN Yudong, LUO Ying. The goods-flowing system AGV technology of Yuxi cigarette factory and the developmental research of AGV nationalization technology [C] // IEEE International Vehicle Electronics Conference. Piscataway: IEEE Press, 1999: 425-428.

[5] 梁福军,宁汝新. RMS中工件路径网络生成方法[J]. 工业工程与管理, 2004(6): 8.  
LIANG Fujun, NING Ruxin. Method of parts guide-path network formation in RMS [J]. Industrial Engineering and Management, 2004(6): 8.

[6] FU Mengyin, LI Jie, ZHOU Peide. Design and implementation of bidirectional Dijkstra algorithm[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2003, 12(4): 366.

[7] 付梦印,李杰,邓志红.限制搜索区域的距离最短路径规划算法[J].北京理工大学学报,2004,24(10):881.  
FU Mengyin, LI Jie, DENG Zhihong. A route planning algorithm for the shortest distance with in a restricted searching area[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2004, 24(10): 881.

[8] 王晓丽,杨兆升,吕旭涛,等.平行四边形限制最短路径算法及其在交通网络中的应用[J].吉林大学学报,2006,36(1):123.  
WANG Xiaoli, YANG Zhaosheng, LV Xutao, et al. Shortest path algorithm based on limiting parallelogram and its application in traffic networks [J]. Journal of Jilin University, 2006, 36(1): 123.

[9] Benita M B. System reliability and congestion in a material handling system [J]. Computers & Industrial Engineering, 1999, 36: 673.

[10] 王金娥,孙庆鸿,陈南,等. AGVs 关键技术研究及发展趋势[J]. 制造业自动化, 2002, 24(1): 36.  
WANG Jin'e, SUN Qinghong, CHEN Nan, et al. The research and developing trend of AGVs key technology [J]. Manufacturing Automation, 2002, 24(1): 36.

[11] SONG Shigang, LI Aiping, XU Liyun. AGV Dispatching strategy based on theory of constraints [C] // IEEE CIS & RAM 2008. Piscataway: IEEE Press, 2008: 922-925.