

单向循环搬运系统交叉环布局优化问题研究

李军涛¹, 夏琨¹, 木濂洋²

(1.上海海洋大学, 上海 201306; 2.京都工艺纤维大学, 日本 京都 601-8585)

摘要: **目的** 为了提高单环单向循环搬运系统的搬运量和系统效率, 在单环单向循环搬运系统中增加交叉环且优化交叉环的布局(设置位置及数量)可以避免小车间不必要的等待时间, 为搬运系统提供捷径, 且提高搬运效率。**方法** 构建系统的数学模型并对不同交叉环布局(设置位置及数量)进行理论分析, 在 2 种基本调度算法下进行仿真实验优化。**结果** 通过理论和仿真实验分析得出, 2 种基本调度算法下, 交叉环设置为布局 1 时的系统干涉情况最小, 但系统单位时间搬运量较少; 交叉环设置为布局 4 时系统单位时间搬运量最大, 但系统干涉增加。**结论** 从减少能源消耗(干涉)的角度优化, 交叉环应设置 1 条且设置在系统正中间位置, 系统干涉时间最小, 单位时间搬运量也最少; 从单位时间搬运量最大的角度优化, 应在每 2 个处理站点中间设置多条交叉环, 单位时间搬运量最多, 但系统干涉时间最大。

关键词: 自动化物料搬运系统; 交叉环; 布局; 优化

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)21-0115-07

Optimal Layout of Shortcuts in Unidirectional Circulation-type Material Handling System

LI Jun-tao¹, XIA Kun¹, KISE Hiroshi²

(1.Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2.Kyoto Institute of technology, Kyoto 601-8585, Japan)

ABSTRACT: To increase the throughput and improve the performance, adding shortcuts and optimizing the different amounts and locations of shortcuts layout in unidirectional circulation-type material handling system on a single loop can provide the shorter route and also improve the efficiency of the system. This paper made a mathematical model of this system, analyzed the different amounts and locations of short-cut layout and then made the simulation experiments under the condition of two basic scheduling rules. According to the analysis and experiment, under the condition of two basic scheduling rules, the first layout of shortcuts setting could decrease the interference of the system but lower the throughput. The fourth layout of shortcuts setting could maximize the throughput of the system but increase the interference. In conclusion, from the view point of decreasing the energy consumption (interference), when the only shortcut must be located in the middle of all the processing station, the interference time achieves the minimum while the throughput is the lowest. From the view point of increasing the throughput in the system, when all the shortcuts must be located in the middle of each two processing stations, the maximum throughput can be achieved while the interference time is increased.

KEY WORDS: automated material handling system; shortcut; layout; optimization

半导体晶圆制造系统(SWFS)是半导体制造过程中最为复杂和昂贵的环节^[1], 在半导体晶圆制

造系统中, 为提高搬运效率、减少人工搬运等应运而生。自动化物料搬运系统(AMHS)扮演着重要的

收稿日期: 2016-04-19

基金项目: 上海教育创新研究基金(12ZZ167)

作者简介: 李军涛(1974—), 男, 湖北荆门人, 副教授, 主要研究方向为物流搬运系统的调度算法优化。

角色^[2]。AMHS 系统不仅可以有效地利用有限的洁净室生产空间,还可以提高生产设备的利用率,减少在制品量,缩短周期时间等。

单环单向循环搬运系统不仅是半导体晶圆制造自动化物料搬运系统的典型和基本环节,而且是自动化集成系统中从装卸点到立体仓库出库点、入库点的重要衔接子系统。在日本工厂自动化集成系统中得到了广泛运用,国外学者 Markon Sandor 和 Kise Hiroshi 等^[3]对其进行了许多理论研究。在这样的系统中,一系列小车沿着一个单环单向循环运行,装载货物送往路径上设置的处理站点,处理完毕后将货物沿最短路径送到卸货点或者其他站点。小车不断循环往复直到所有货物都被处理完成,由于车辆间不能超越,所以很难避免小车之间堵塞情况的发生^[4-5]。在单环单向循环搬运系统中增加交叉环,可以避免小车间不必要的等待时间,为单环单向搬运系统提供捷径。在带有交叉环的单向循环搬运系统中,由于系统的复杂性,合理设置交叉环的位置和数量对整个系统的效率有着十分重要的作用。由此,优化交叉环单向循环搬运系统中交叉环的布局设置,可提高搬运效率、降低生产成本。对实现企业降低成本、提高效率有着重要的意义。

针对搬运系统的优化,多数学者主要从车辆路径优化、车辆调度优化以及设施布局优化对其进行研究。对于车辆路径的优化, Hsueh Che-Fu^[6], Maza Samia^[7]等对搬运系统路径的优化做了研究。曹平方等^[8]用分支界定法对车辆路径问题进行算法优化。张元标等^[9]用混合粒子群算法求解物流配送车辆路径优化问题。廖伟志等^[10]结合 Petri 网模型和免疫算法来有效地实现柔性制造系统调度优化。周炳海^[11]、沈正花^[12]等对半导体晶圆制造工厂的自动物料搬运系统和高空提升运输中车辆调度进行了优化研究。对于设施布局的优化, Jawahar 等^[13]提出了 3 种类型的布局来避免柔性制造系统中车间的冲突和死锁:单回路、串联结构和分流结构。Ganesharajah Tharma 等^[14]对单回路布局问题中的线性布局、环形布局和复杂网络布局进行研究和分析。Ho Ying-Chin 等^[15]提出动态区域策略,用区域划分设计和动态区域控制来避免车辆间的堵塞,维持系统平衡。鉴于交叉环单向循环搬运系统的复杂性,交叉环的设置往往依赖于系统仿真观察后来确定,其设置点具有一定的随意性,搬运效率很难达到全局最优。夏琨等^[16]对

交叉环单向循环搬运系统中设置一条交叉环的位置问题进行了优化。文中在此基础上对单向循环搬运系统中多条交叉环的最优设置位置和数量进行理论分析和优化研究,并运用 2 种基本调度算法对实验数据进行验证,从而达到提高系统效率和单位时间搬运量的目的。

1 问题描述

如图 1 所示,交叉环单向循环系统由长度为 L 的总环线以及长度为 L_b 的支线, n_v 辆小车 (AGV), n_s 个具有相同功能的处理站点 (用于自动化立体仓库出入库站点存取货物处理或平行机的加工处理) 和装卸点 I/O (含一个装货站点 S_0 和一个卸货站点 S_{n_s+1})。 n_v 辆 AGV 的集合为 $v = \{v_1, v_2, \dots, v_{n_v}\}$, n_s 个处理站的集合为 $S_p = \{S_1, S_2, \dots, S_{n_s}\}$ 。

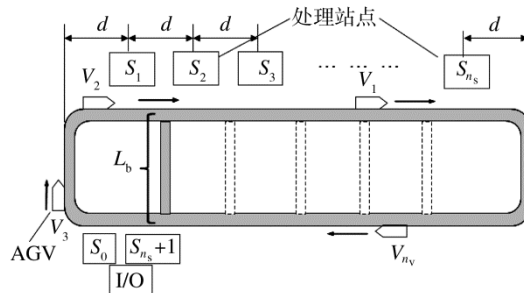


图 1 单向循环搬运系统交叉环布局模型

Fig.1 The layout of unidirectional circulation-type material handling system

在该系统中, n_j 个作业 (或是货物) 的集合 $J = \{J_1, J_2, \dots, J_{n_j}\}$ 按照 S_0 的出发顺序来进行编码, 每个作业 J_i ($1 \leq i \leq n_j$) 在 S_0 的位置被装载, 再由车辆搬运到某个处理站点 S_m ($1 \leq m \leq n_s$) 并进行处理 (或存储); 在处理站点被处理 (或拣选) 完成后运送到 S_{n_s+1} 进行卸载。作业 J_i 在 S_m 站点的处理时间称为 $P_m(i)$ 。车辆在搬运的过程中, 除在交叉汇合点外, 不能被超越, 所以会产生前一辆车在处理站点上进行处理的同时后一辆车被迫等待的情况, 即发生干涉, 产生一定的干涉时间, 影响系统的搬运效率。

假设所有的处理站 (不包括装载和卸载站) 都拥有同样的功能, 这种情况下每个作业的处理过程都是相同的。一般来说, 这个平行系统可以提供最高的系统效率和最高的系统可靠性。当假设处理时间 $P_m(i)$ 不依赖于站点 S_m 和作业 J_i 。换言之, 如果

作业 J_i 在 S_m 被处理, 则 $P_m(i)=P_p$ (常数), 否则 $P_m(i)=0$ 。根据实际生产, 在卸货点的卸货时间 $P_{n_s+1}(i)=P_{n_s+1} < P_p$, 则在装载点和卸货点之间永远不出现瓶颈现象, 不失一般性, 设 $P_0(i)=0$, 此情况适用于每个作业只做货物出库工作时。

2 干涉机制定义

假设车辆的加速度和减速度是无限的, 并且任意 2 点之间的距离由一辆持续运行的小车所需的时间单位来衡量。假设每辆车以相同恒定不变的速度运行着, 保持 2 个相邻车辆间至少 d_B 的距离才能避免小车间相撞, 并假设当车辆在第一个圈离开 I/O 站点时, 每 2 个相邻车辆之间的距离是 d_B (即为最小发车间隔)。

如图 2 所示, 设 $S_{m(k)}$ 为车辆 V_k 运载货物的处理站点 ($m(k)$ 为处理站点序号, $1 \leq m(k) \leq n_s$), 若 $m(k)=m(k+1)$, 则 V_k 和 V_{k+1} 两车之间的干涉称为串行干涉; 若 $m(k) \geq m(k+1)$, 则两车之间的干涉称为平行干涉; 若 $m(k) < m(k+1)$, 则两车之间的干涉称为非平行干涉。故在 I/O 站点, 每辆车之间发生的干涉为串行干涉。

在交叉环单向循环搬运系统的运行过程中, 小车间还会在交叉汇合点发生干涉, 称为交叉汇合点干涉。

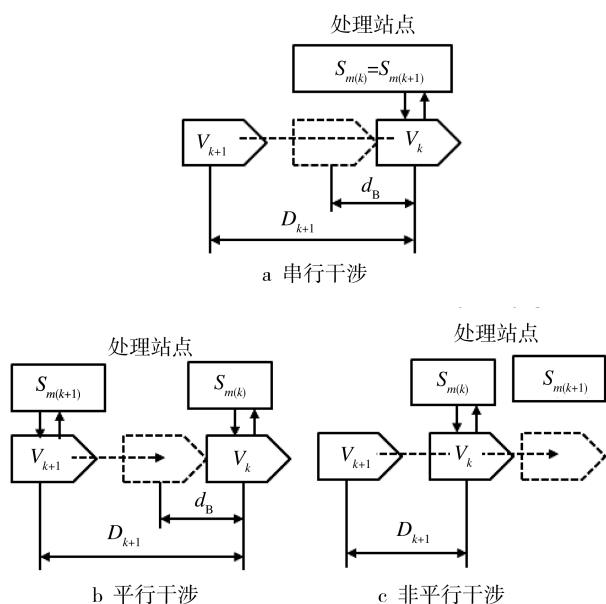


图 2 干涉类型

Fig.2 The interference type

3 车辆调度算法

随机调度算法 (Random)、顺序调度算法 (Order) 是工厂自动化系统 2 种基本调度算法, 在日本自动化工厂当中获得广泛应用。这 2 种调度算法基于作业处理顺序进行调度。

1) 随机调度算法。以相同的概率 ($1/n_s$) 随机分配一个作业到任何一个处理站的这种车辆调度原则被称为随机调度算法。

2) 顺序调度算法。如果分配作业 J_i 至站点 $S_{m(i)}$, 满足条件:

$$m(i) = n_s + 1 - i + \lfloor (i-1) / n_s \rfloor n_s \quad (1)$$

$\lfloor x \rfloor$ 表示不超过 x 的最大整数, 这种车辆调度规则被称为顺序调度算法, 即以 $S_{n_s}, S_{n_s-1}, \dots, S_1$ 的顺序重复分配作业 $J_1, J_2, \dots, J_{n_j}$ 至各个站点, 直到所有作业分配完成^[17]。

顺序调度算法可使作业按处理站点顺序依次进行处理, 在处理时间相同的情况下不会发生串行干涉和平行干涉, 非平行干涉只会发生在第 1 个处理站点 S_1 , 与随机调度算法在任何一个处理站点都存在干涉发生可能性相比, 可减少作业处理时车辆间不必要的等待时间。

以车辆数 $n_v=4$, 处理站点 $n_s=6$, 货物数 $n_j=12$, 处理时间相等的条件为例, 顺序调度车辆分配见图 3, 图 3 中括号内的数字为货物编号。第 1 圈 4 辆小车依次至 S_6, S_5, S_4, S_3 站点处理, 处理时间相同时不会发生串行和平行干涉; 第 2 圈小车 V_1, V_2 至 S_2, S_1 站点处理, 此时小车 V_3, V_4 被迫等待产生非平行干涉, 待小车 V_1, V_2 处理完成后, V_3, V_4 再至 S_6, S_5 站点处理; 第 3 圈继续按顺序分配小车至站点处理, 任何一个处理站点不存在干涉, 依次循环直至所有作业完成处理。

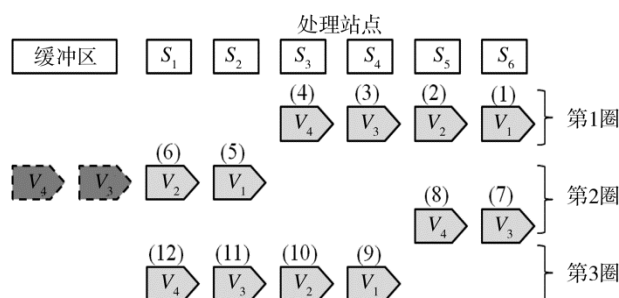


图 3 顺序调度算法处理分配 ($n_s=6, n_v=4, n_j=12$)

Fig.3 The distribution of order scheduling algorithm ($n_s=6, n_v=4, n_j=12$)

4 理论分析

文中假设车辆的加速度和减速度是无穷大, 每辆车辆以相同恒定不变的速度运行着, 根据所提出的系统模型, 假设处理站点之间的距离相同为 d , 假设平均每个处理站点的存取货物数相同为 n_{aj} , 即 $n_{aj} = n_j / n_s$ 。 n_s 为处理站点数, L_b 为支线长度。

当未设置交叉环时, 即单环单循环搬运系统中, 货物的总搬运行程 D 为:

$$D = n_{aj} \times n_s \times [2L_b + 2(n_s + 1)d] \quad (2)$$

4.1 设置一条交叉环情况

当交叉环设置在处理站点 S_1 和 S_2 之间的中点位置时, $x=1$, 货物的总搬运行程 D_1 为:

$$D_1 = 1 \times n_{aj} [2L_b + 2(1 + 1/2)d] + (n_s - 1)n_{aj} [2L_b + 2(n_s + 1)d] \quad (3)$$

式中: n_s, L_b, d, n_{aj} 已知。

当交叉环设置在处理站点 S_2 和 S_3 之间的中点位置时, $x=2$, 货物的总搬运行程 D_2 为:

$$D_2 = 2 \times n_{aj} [2L_b + 2(2 + 1/2)d] + (n_s - 2)n_{aj} [2L_b + 2(n_s + 1)d] \quad (4)$$

同理, 当交叉环设置在处理站点 S_x 和 S_{x+1} 之间的位置 x 处时, 货物的总搬运行程 D_x 为:

$$D_x = x \times n_{aj} [2L_b + 2(x + 1/2)d] + (n_s - x)n_{aj} [2L_b + 2(n_s + 1)d] \quad (5)$$

即:

$$D_x = n_{aj} \left\{ [2x + 2(n_s - x)]L_b + [x(2x + 1) + 2(n_s + 1)(n_s - x)]d \right\} = n_{aj} \left\{ 2n_s L_b + [2x^2 - (2n_s + 1)x + 2n_s^2 + 2n_s]d \right\} \quad (6)$$

在 $x \in (0, n_s)$ 时, D_x 恒小于 D , 即设置交叉环后, 货物总搬运行程减小。由于车辆匀速运行, 货物总搬运行程 D_x 越小, 系统总完工时间 $F_{\max}$ 也越小, 单位时间搬运量 ($T_p \equiv n_j / F_{\max}$) 越大。要使搬运行程总和最短, 即 dD_x/dx 时, D_x 取最小值, 此时考虑到交叉环的位置设置处 x 为整数, 故取 $x = \lfloor (2n_s + 1)/4 + 0.5 \rfloor$ 。所以, 当交叉环设置在位置 $x = \lfloor (2n_s + 1)/4 + 0.5 \rfloor$ 处为最优位置^[16]。

4.2 设置多条交叉环情况

综上所述, 当设置多条交叉环时, 由式(5)可推得, 货物的总搬运行程 D_x 为:

$$D_x = x_1 \times n_{aj} [2L_b + 2(x_1 + 1/2)d] + (x_2 - x_1)n_{aj} [2L_b + 2(x_2 + 1/2)d] + (x_3 - x_2)n_{aj} [2L_b + 2(x_3 + 1/2)d] + \cdots + (n_s - x_i)n_{aj} [2L_b + 2(n_s + 1)d] \quad (7)$$

式中: x_i 为第 i 条交叉环设置的位置, $x \in (0, n_s)$, 计算得出, 当设置 $x_i = n_s - 1$ 条交叉环时, 货物的总搬运行程 D_x 最小。故设置 $x_i = n_s - 1$ 条交叉环可使货物总搬运行程 D_x 最小, 系统总完工时间 $F_{\max}$ 也最小, 单位时间搬运量 T_p 最大。

5 仿真实验

研究对交叉环的位置和数量设置进行了数值分析, 用 AutoMod 仿真软件分别对 2 种基本调度算法下, 搬运系统效率和系统干涉的情况进行研究分析。

5.1 实验衡量指标

物流搬运系统中最重要绩效指标之一是单位时间搬运量 (T_p), 这是由单位时间内从装货点搬运到处理站点的货物数或从处理站点搬运到卸货点的货物数决定的。设 $F_{\max}$ 为完成处理 n_j 个货物的总完工时间, 则单位时间搬运量被定义为:

$$T_p \equiv n_j / F_{\max} \quad (8)$$

设 n_v 辆车处理 n_j 个货物, 运行 n_j / n_v 圈, 交叉环单向循环搬运系统搬运货物的平均距离 $\bar{L}$ 为:

$$\bar{L} = \frac{L + \frac{L}{2} + L_b}{2} \quad (9)$$

那么, 在没有发生干涉的情况下:

$$F_{\max} \geq (n_j / n_v) (\bar{L} + P_p + P_{n_s+1}) \quad (10)$$

则:

$$T_p \leq T_p^v \equiv \frac{n_v}{\bar{L} + P_p + P_{n_s+1}} \quad (11)$$

T_p^v 为根据车辆数线性增加的上界。若没有滞后一圈干涉的发生, $\lim_{n_j \rightarrow \infty} T_p = T_p^v$ 。设 L_{n_s} 为车辆从 S_1 到 S_{n_s} 的时间单位, 考虑到当所有处理站点除了 $L_{n_s} + d_B$ 个时间单位都处于处理中的同时交换接下

来在 S_1 后等待的 n_s 辆车的这种情况。这种情况下, 单位时间搬运量达到最大, 即:

$$T_p^S \equiv \frac{n_s}{P_p + L_{n_s} + d_B} \quad (12)$$

根据处理站点而增加的上界。因此, $UB_{T_p} \equiv \min\{T_p^v, T_p^S\}$ 为单位时间搬运量的上界。系统中, 单位时间搬运量越大, 系统的效率越高。由基于车辆数和基于处理站点的上界可得, 当

$$n_v \leq \left\lfloor \frac{n_s (\bar{L} + P_p + P_{n_s+1})}{P_p + L_{n_s} + d_B} \right\rfloor \text{ 时, 系统单位时间搬运量}$$

呈线性增加, 当 $n_v > \left\lfloor \frac{n_s (\bar{L} + P_p + P_{n_s+1})}{P_p + L_{n_s} + d_B} \right\rfloor$ 时, 系统

单位时间搬运量不再增加达到上界 (峰值), 对当

$$n_v \leq \left\lfloor \frac{n_s (\bar{L} + P_p + P_{n_s+1})}{P_p + L_{n_s} + d_B} \right\rfloor \text{ 车辆数情况下作优化研究。}$$

5.2 实验条件

另一个重要的指标是系统总干涉时间 (TIT), 系统干涉时间为系统中除小车正常搬运 (不被干涉) 的运行时间外所产生的干涉时间总和。实验条件: 系统货物数 n_j 为 600; 处理站点数 n_s 为 6; AGV 小车每次装载货物数为 1; 卸载货物时间 P_{n_s+1} 为 1 s; AGV 车速为 1 m/s; 加速度/减速度为 ∞ ; 货物处理加工时间 P_p 为 7 s; 总环线长度 $L=210$ m; 支线长度 $L_b=35$ m; 处理站点间距 $d=10$ m; 最小发车间隔 $d_B=10$ m; 车辆数 n_v 为 2~12; 实验布局见图 4, 设置相应交叉环数量及位置在单向循环搬运系统中。

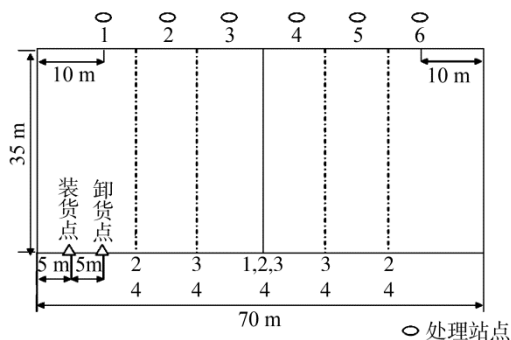


图 4 交叉环设置布局

Fig.4 The layout of the shortcut setting

布局 1, 设置 1 条交叉环在图中位置 1 处 (即

$x=3$)。布局 2, 设置 3 条交叉环在图中位置 2 处 (即 $x_1=1, x_2=3, x_3=5$)。布局 3, 设置 3 条交叉环在图中位置 3 处 (即 $x_1=2, x_2=3, x_3=4$)。布局 4, 设置 5 条交叉环在图中位置 4 处 (即 $x_1=1, x_2=2, x_3=3, x_4=4, x_5=5$)。

5.3 2 种基本调度算法情况下交叉环设置对单位时间搬运量的影响

交叉环设置在不同位置时, 随机调度算法情况下车辆数与单位时间搬运量的关系见图 5a, 顺序调度算法情况下见图 5b。

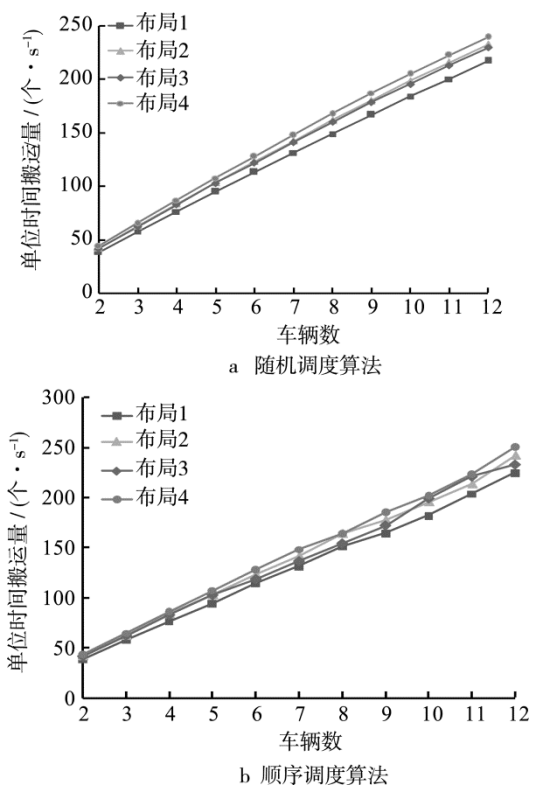


图 5 交叉环设置在不同位置时车辆数与搬运量间的关系

Fig.5 The relationship between the vehicles number and the throughput per unit time with the different location of shortcut

从图 5a 中可以看出, 随机调度算法中, 交叉环设置布局为布局 4 时 (即设置 $x_i=n_s-1$, 5 条交叉环), 在车辆数相同时, 单位时间系统搬运量最大, 布局 2 和布局 3 次之, 布局 1 (只设置一条交叉环在系统中间位置) 的单位时间系统搬运量最小。从图 5b 可以看出, 顺序调度算法情况与图 5a 中随机调度算法的情况基本类似。结合 2 种调度算法情况, 从单位时间内系统搬运量最大化的角度来看, 在每 2 个处理站点中间都设置交叉环 (即设置 $x_i=n_s-1$ 条交叉环) 可得到最大系统搬运量, 实验验证了理

论分析的正确性。

5.4 2种基本调度算法情况下交叉环设置对系统干涉时间的影响

在随机调度算法情况下,交叉环设置在不同的4种布局时车辆数与系统干涉时间之间的关系见图6a。可以看出车辆数相同时,布局1的系统干涉时间最小,布局2、布局3次之,布局4的系统干涉时间最大。从图6b可以看出,顺序调度算法情况下系统干涉时间有所波动,但与随机调度算法的情况基本相同。结合2种调度算法情况,从减少系统干涉时间、减少能源消耗的角度来看,交叉环最优位置只设置1条位于系统正中间时,系统干涉时间最小。

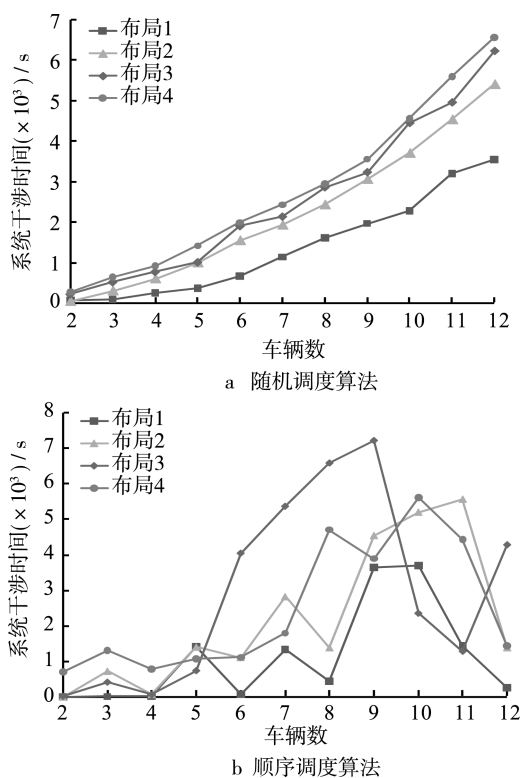


图6 交叉环设置在不同位置时车辆数与干涉时间的关系
Fig.6 The relationship between the vehicles number and the interference time with the different location of shortcut

6 结语

单环单向循环搬运系统广泛地运用在半导体晶圆制造自动化搬运系统中,其搬运效率的叠加往往决定着整个系统的效率。交叉环的布局设置问题是影响整个系统搬运效率的主要因素,为了提高搬运系统的搬运量和系统效率,文中构建了交叉环单

向循环搬运系统的数学模型,理论分析了交叉环的最优设置位置和数量问题,仿真研究分析得出不同衡量指标下的最优布局,从减少系统干涉时间和能源消耗的角度来看,交叉环布局应设置在系统正中间位置时,此时系统干涉时间最小,但单位时间搬运量少;从提高系统单位时间内搬运量的角度来看,交叉环布局应设置在每2个处理站点中间,此时单位时间搬运量最多,但系统干涉时间最大。通过在2种基本调度算法下对不同交叉环布局与系统单位时间搬运量和系统干涉情况之间的关系进行仿真实验,从而验证了理论分析的正确性。实验得出的交叉环最优布局(位置和数量)设置对实际的交叉环单向循环搬运系统的设计与优化有着科学的理论指导价值。

参考文献:

- [1] 郭乘涛. 基于问题分解与蚁群算法的半导体晶圆制造系统调度方法的研究[D]. 上海: 上海交通大学机械与动力工程学院, 2012.
GUO Cheng-tao. The Research on Scheduling of Wafer Fabrication System Based on Decomposition Method and Ant Colony Optimization Algorithm[D]. Shanghai: School of Mechanical Engineering of Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [2] WU L H, MOK P Y, ZHANG J. An Adaptive Multi-parameter Based Dispatching Strategy for Single-loop Interbay Material Handling Systems[J]. Computer in Industry, 2011, 62(2): 175—186.
- [3] MARKON S, KISE H, KITA H, et al. Control of Traffic Systems in Buildings[M]. Springer London, 2006.
- [4] LI Jun-tao. A Study on Scheduling Problems for Robotic Systems[D]. Kyoto: Kyoto Institute of Technology, 2006.
- [5] LI Jun-tao, ZHANG Li-zhen, SHANGGUAN Chun-xia, et al. A GA-based Heuristic Algorithm for Non-permutation Two-machine Robotic Flow-shop Scheduling Problem of Minimizing Total Weighted Completion Time[C]// The IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2010: 1281—1285.
- [6] HSUEH C F. A Simulation Study of a Bi-directional Load-exchangeable Automated Guided Vehicle System[J]. Computers & Industrial Engineering, 2010, 58(4): 594—601.
- [7] MAZA S, CASTAGNA P. A Performance-based Structural Policy for Conflict-free routing of Bi-directional Automated Guided Vehicles[J]. Computers in Industry, 2005, 56(7): 719—733.
- [8] 曹平方, 李灵, 李诗珍. 基于分枝界定的 VRP 模型精确算法研究及应用[J]. 包装工程, 2014, 35(17):

- 97—101.
- CAO Ping-fang, LI Ling, LI Shi-zhen. Research and Application of the Accurate Algorithm of VRP Model Based on Branch and Bound Method[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(17): 97—101.
- [9] 张元标, 吕广庆. 基于混合粒子群算法的物流配送路径优化问题研究[J]. 包装工程, 2007, 28(5): 10—12.
- ZHANG Yuan-biao, LYU Guang-qing. Study of Physical Distribution Routing Optimization Problem Based on Hybrid PSO Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(5): 10—12.
- [10] 廖伟志, 古天龙, 王汝凉, 等. 基于混杂 Petri 网的柔性制造系统免疫调度算法[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(1): 205—209.
- LIAO Wei-zhi, GU Tian-long, WANG Ru-liang, et al. Immune Scheduling Algorithm for FMS Based on Hybrid Petri Nets[J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(1): 205—209.
- [11] 周炳海, 胡新宇, 孙超. 基于改进型多目标粒子群算法的晶圆制造系统瓶颈工作站调度[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2014, 35(1): 63—68.
- ZHOU Bing-hai, HU Xin-yu, SUN Chao. Scheduling of Bottleneck Workstation in Wafer Fabrication Systems Based on Improved Multi-objective Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2014, 35(1): 63—68.
- [12] 沈正花, 陆志强. 基于仿真的半导体自动物料搬运系统调度优化[J]. 工业工程与管理, 2011, 16(1): 85—90.
- SHEN Zheng-hua, LU Zhi-qiang. Simulation Based Dynamic Scheduling Optimization for Automated Material Handling Systems in Semi-conductor Manufacturing[J]. Industrial Engineering and Management, 2011, 16(1): 85—90.
- [13] JAEAHAR N, ARAVINDAN P, SURESH R K. AGV Schedule Integrated with Production in Flexible Manufacturing Systems[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1998, 14(6): 428—440.
- [14] GANESHATAJAH T, HALL N G, SRISKANDARAJAH C. Design and Operational Issues in AGV-served Manufacturing Systems[J]. Annals of Operations Research, 1998, 76(1): 109—154.
- [15] HO Y C. Dynamic-zone Strategy for Vehicle-collision Prevention and Load Balancing in an AGV System With a Single-loop Guide Path[J]. Computers in Industry, 2010, 42(99): 159—176.
- [16] 夏琨, 李军涛, 陈淑侠, 等. 交叉环单向循环搬运系统中交叉环位置的优化[J]. 包装工程, 2016, 37(1): 89—93.
- XIA Kun, LI Jun-tao, CHEN Shu-xia, et al. Optimization on Locations of Shortcut in a Unidirectional Circulation-type Material Handling System[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(1): 89—93.
- [17] LI Jun-tao, KUWATA J, LU Ming-zhe, et al. Analysis and Optimization for Automated vehicle Routing on a Single Loop[J]. Journal of the operation Research society of Japan, 2006, 49(4): 202—221.