

6-1-2020

Online Scheduling Method of Cluster Tools with Residency Time Constraint

Linying Li

1. School of Software, Dalian University of Foreign Languages, Dalian 116044, China; ;

Lu Rui

2. Police Information Department, Liaoning Police College, Dalian 116036, China;

Shaohua Li

1. School of Software, Dalian University of Foreign Languages, Dalian 116044, China; ;

Jing Yu

1. School of Software, Dalian University of Foreign Languages, Dalian 116044, China; ;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Online Scheduling Method of Cluster Tools with Residency Time Constraint

Abstract

Abstract: For cluster tools with residency time constraints in semiconductor manufactory, online scheduling problem was studied when temporary wafers arrived with emergency order, rework and new product development, et al. Utilizing available resource interval, the two-layer online scheduling method was proposed without changing existing schedule. *The outer layer algorithm used an improved quantum evolutionary algorithm to optimize processing order of temporary wafers. Based on the results, the inner layer algorithm gained feasible solutions from available space by backward stepwise recursive strategy, and determined start time of wafer in feasible solution space by means of reverted sequence maximum backtrack strategy.* Simulation results and comparisons on benchmarks with different scales demonstrate the effectiveness of the presented method.

Keywords

online scheduling, quantum evolutionary algorithm, cluster tools, semiconductor manufactory, residency time constraints

Authors

Linying Li, Lu Rui, Shaohua Li, Jing Yu, and Jianhua Diao

Recommended Citation

Li Linying, Lu Rui, Li Shaohua, Jing Yu, Diao Jianhua. Online Scheduling Method of Cluster Tools with Residency Time Constraint[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(2): 337-345.

有滞留时间约束的集束型装备在线调度方法

李林瑛¹, 卢睿², 李绍华¹, 景雨¹, 刁建华¹

(1. 大连外国语学院软件学院, 辽宁 大连 116044; 2. 辽宁警察学院公安信息系, 辽宁 大连 116036)

摘要: 针对半导体制造中有滞留时间约束的集束型装备, 研究了客户紧急订单、返工、新产品试制等临时晶圆到达时的在线调度问题, 提出了不改变已有晶圆调度的前提下, 利用资源空闲时间区间的两层在线调度方法。外层算法通过改进量子进化算法用以优化临时晶圆加工排序; 内层算法在给定晶圆排序的基础上, 采用后向逐级递推的策略从资源的空闲时间区间获得可行解, 利用逆序最大逐级回溯策略在可行解空间获得晶圆的加工开始时间。通过不同规模测试问题上的仿真实验和算法比较, 验证了提出方法的有效性。

关键词: 在线调度; 量子进化算法; 集束型装备; 半导体制造; 滞留时间约束

中图分类号: TP241.2; TP278

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017) 02-0337-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201702014

Online Scheduling Method of Cluster Tools with Residency Time Constraint

Li Linying¹, Lu Rui², Li Shaohua¹, Jing Yu¹, Diao Jianhua¹

(1. School of Software, Dalian University of Foreign Languages, Dalian 116044, China;

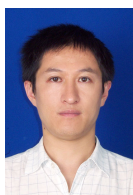
2. Police Information Department, Liaoning Police College, Dalian 116036, China)

Abstract: For cluster tools with residency time constraints in semiconductor manufactory, online scheduling problem was studied when temporary wafers arrived with emergency order, rework and new product development, et al. Utilizing available resource interval, the two-layer online scheduling method was proposed without changing existing schedule. *The outer layer algorithm used an improved quantum evolutionary algorithm to optimize processing order of temporary wafers. Based on the results, the inner layer algorithm gained feasible solutions from available space by backward stepwise recursive strategy, and determined start time of wafer in feasible solution space by means of reverted sequence maximum backtrack strategy.* Simulation results and comparisons on benchmarks with different scales demonstrate the effectiveness of the presented method.

Keywords: online scheduling; quantum evolutionary algorithm; cluster tools; semiconductor manufactory; residency time constraints

引言

集束型装备由若干单晶圆加工模块和一个计



收稿日期: 2015-11-27 修回日期: 2016-03-12;
基金项目: 国家自然科学基金(61501082); 辽宁省教育厅科学研究一般项目(L2015137, L2014011, L2014455, L2014456);
作者简介: 李林瑛(1975-), 男, 辽宁大连, 博士, 副教授, 研究方向为优化理论与优化方法。

算机控制的物料搬运机械手组成, 广泛应用于半导体制造的刻蚀、涂胶显影和化学机械抛光等加工过程。搬运机械手按照事先制定好的调度程序, 将晶圆从一个加工模块搬运到相邻下一个加工模块。加工模块之间不存在缓冲模块, 晶圆在加工模块停留的时间有上下限值, 这一要求称为滞留时间约束^[1]。滞留时间约束会减少可行解空间, 增加了调

度的复杂性。另一方面, 半导体生产线存在着来自客户的紧急订单、返工、新产品试制等高优先级临时晶圆, 该类晶圆具有小批量、多类型晶圆(工件)的特点, 且晶圆进入集束型装备前的到达时间、加工时间及数目信息是未知的, 这种信息的不确定性使离线调度方案失去可行性, 必须采用有效的在线调度方法^[2]。

国内外研究者对有滞留时间约束的集束型装备的调度问题进行了深入研究, 但在传统制造装备调度问题上通常考虑机器和工件调度, 并不考虑物料搬运设备的调度^[3-5]。集束型装备在线调度问题不仅要考虑晶圆加工排序外, 还需要考虑机械手搬运作业排序, 该问题已被证明为 NP 难问题^[6]。文献[7]通过分析加工模块能力、缓冲模块和滞留时间等约束, 建立了两集束型装备的混合整数规划模型^[8-9]。最先研究了双臂集束型装备调度问题, 提出了基于线性规划模型的启发式搜索算法, 并采取三种规则减少算法搜索空间。文献[10]求解线性规划模型从而得到系统可调度性的充分条件。如果存在可行解, 则可通过线性规划模型获得最优调度方案。文献[11]建立能够求解多种晶圆流程模式的动态分支定界算法, 但该算法在剪枝策略设计上没有考虑调度问题的结构特性。文献[12-13]建立了可重用模型和基于机械手等待时间的启发式算法, 其算法参数设置复杂且在实践上应用范围受限。上述研究均假设设备只加工一种类型的晶圆, 集中在获取机械手作业排序, 在研究方法上采用的是数学规模模型和分支定界法。

实际在线调度问题往往需要利用资源的空闲时间来加工多种不同类型的临时晶圆, 还需要优化晶圆加工排序。文献[14]给出了两种类型晶圆的基于 Swap 的启发式方法。针对临时晶圆加工, 文献[15-16]提出了基于时间约束集方法的逐级回溯启发式算法, 但他们的算法都基于给定的晶圆排序, 仅适合于求解规模较小的调度问题。

本文研究临时晶圆随时到达时, 如何合理安排临时晶圆的加工排序以及资源的空闲时间, 在不改

变已有晶圆调度的情况下使所有晶圆的完工时间最短。当临时晶圆的数目为 1 时, 可直接按文献[15-16]的算法求解, 但随着问题规模的增加, 在计算时间和计算资源上往往让人难以接受。针对以上问题, 本文提出了求解调度问题的两层在线调度方法。外层通过改进量子进化算法(QEA, quantum evolutionary algorithm)用以优化晶圆加工排序。在此晶圆排序基础上, 内层算法采用基于后向逐级递推策略和逆序最大回溯策略确定晶圆的加工开始时间。仿真结果表明本文方法的有效性和可行性。

1 问题描述

1.1 在线调度

广义的动态调度实现方式分为两类: 一是在已有静态调度方案的基础上, 根据制造系统的现场状态及加工任务信息, 及时对静态调度方案进行调整, 产生新的方案。这类调度过程称为重调度; 另一类是基于允许时间的在线调度, 即事先不存在静态调度方案, 直接按照生产系统中的晶圆、设备的状况和相关信息, 使用某种计算方法, 确定晶圆或设备的加工决策。本文考虑第二类调度, 并假设一批次临时晶圆到达时, 已事先调度好的晶圆继续加工, 调度系统优先考虑临时晶圆的作业安排。在实时调度系统中, 资源(加工模块和机械手)可以使用的加工时间和运输时是一些时间区间值, 能否在这些区间值上加工取决于要加工晶圆的滞留时间及资源的空闲时间^[2]。因此, 在满足滞留时间约束下, 合理安排待加工晶圆的加工顺序和加工开始时间至关重要。

1.2 在线调度模型

集束型装备由若干晶圆加工模块和搬运机械手组成。加工模块 M_i 编号为 $0, 1, 2, \dots, N, N+1$, 其中编号 0 和 $N+1$ 为输入装载室和输出装载室。晶圆总能及时送入输入装载室, 完成加工的晶圆总能被及时运出输出装载室。 W 个不同类型的晶圆编号为 $1, 2, \dots, W$, 首先从 M_0 进入, 激光定位后

依次通过加工模块 1, 2, ..., N 的加工, 最后在 M_{N+1} 中冷却离开系统^[17-18]。晶圆在加工模块的加工时间或者停留时间必须满足滞留时间约束, 即 $t_{F,i,m} - t_{S,i,m} \in [T_{P,i,m}, T_{Q,i,m}]$, $1 \leq i \leq N, 1 \leq m \leq W$, 其中 $T_{P,i,m}$ 和 $T_{Q,i,m}$ 表示晶圆 m 在 M_i 上的加工时间和最大允许滞留时间, $t_{S,i,m}$ 和 $t_{F,i,m}$ 表示晶圆 m 在 M_i 的开始时间和离开时间。晶圆在加工模块之间的搬运作业由单臂机械手完成, 每次只能搬运一片晶圆。机械手从加工模块 $i-1$ 卸载晶圆、运输和装载晶圆到加工模块 i , 其所需时间为 T_M 。前一个晶圆被搬运走后, 加工模块才能装载下一个晶圆且每次最多只能加工一片, 加工过程不中断, 机械手将晶圆装载到加工模块后立刻开始加工。

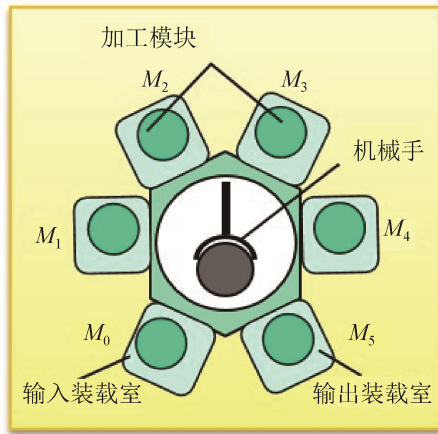


图 1 集束型装备
Fig. 1 Cluster Tools

CM_i 和 CT 表示加工模块和机械手的允许区间集合, 即 $CM_i = \{[L_{i,1}^d, U_{i,1}^d], [L_{i,2}^d, U_{i,2}^d], \dots, [L_{i,\gamma(i)}^d, U_{i,\gamma(i)}^d]\}$, $CT = \{[L_1^t, U_1^t], [L_2^t, U_2^t], \dots, [L_\tau^t, U_\tau^t]\}$, 其中 $\gamma(i)$ 和 τ 分别表示 CM_i 和 CT 时间区间的数目, $[L_{i,\gamma(i)}^d, U_{i,\gamma(i)}^d]$ 表示加工模块的一个空闲区间, d 为加工模块标识。

在线调度属于动态调度, 需要利用加工模块和机械手空闲时间区间 CM_i 和 CT , 在满足滞留时间约束的前提下, 合理安排不同类型晶圆的加工顺序和加工开始时间, 以实现最小化所有晶圆的完工时间。由于机械手将晶圆装载到加工模块后加工立刻开始, 因此将各工位的加工开始时间

排序即是得机械手作业的排序。

上述问题的在线调度模型为:

$$|t_{F,i_1,m_1} - t_{F,i_2,m_2}| \geq T_M \quad (1)$$

$$|t_{S,i_1,m_1} - t_{S,i_2,m_2}| \geq T_M \quad (2)$$

$$t_{S,i+1,m} = t_{F,i,m} + T_M \quad (3)$$

$$T_{P,i,m} \leq t_{F,i,m} - t_{S,i,m} \leq T_{Q,i,m} \quad (4)$$

$$t_{S,i,m} \geq L_{i,\gamma(i)}^d, i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$t_{F,i,m} \geq L_i^t, i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$t_{F,i,m} \leq U_{i,\gamma(i)}^d, i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$t_{S,i+1,m} \geq U_i^t, i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

其中式(1)~(3)称为机械手搬运时间约束, 式(4)称为加工模块滞留时间约束, 式(5)~(8)称为加工模块和机械手空闲时间约束, 其中约束(5)表示加工开始时间 $t_{S,i,m}$ 大于等于加工模块空闲区间的下界 $L_{i,\gamma(i)}^d$, 其它约束表示的含义类似, 调度目标是 minimized 所有晶圆的完工时间 C_{\max} 。

本文的在线调度模型与静态调度模型区别在于: 在线调度模型还需要满足式(5)~(8)的加工模块和机械手空闲时间约束。

2 在线调度方法

随着待加工临时晶圆的数目增加, 为利用加工模块和机械手的空闲区间, 在线调度方法要考虑加工晶圆排序问题。

在线调度方法分为内外两层算法, 外层算法使用量子进化算法对晶圆的加工排序进行迭代; 在给定的晶圆加工排序下, 内层算法获得各工位晶圆加工开始时间, 并求出最小给定晶圆的完工时间 C_{\max} 。

2.1 内层调度算法

为有效、快速求解调度问题, 本文提出了利用资源空闲时间的内层算法用以确定晶圆在各工位的加工开始时间。

算法在给定的晶圆加工排序下, 计算晶圆在各工位的加工开始和结束时间。算法分为两个阶段: 首先采用后向逐级递推的策略获得可行解, 即根据

已有机械手和加工模块的空闲时间, 逐级向后寻找加工模块可行的开始时间和结束时间, 即寻找可行解空间; 然后在可行解空间采用逆序最大逐级回溯的策略计算得到 $t_{S,i,m}$ 和 $t_{F,i,m}$, 其最大策略保证晶圆在加工模块在加工结束后的停留时间尽可能短。

2.1.1 算法描述

为了确定各工位晶圆加工的开始时间 $t_{S,i,m}$ 和结束时间 $t_{F,i,m}$, 内层算法描述如下:

$$x_{1,m} = L_{i,\gamma(i)}^d \quad (9)$$

$$y_{i-1,i,m} = \max(L_i^d, x_{i-1,m} + T_{P,i,m}), \quad (10)$$

$$i = 2, 3, \dots, N, m = 1, 2, \dots, W$$

$$x_{i,m} = \max(L_{i,\gamma(i)}^d, y_{i-1,i,m} + T_M), \quad (11)$$

$$i = 2, 3, \dots, N, m = 1, 2, \dots, W$$

$$x_{N+1,m} = x_{N,m} + T_{P,N,m}, t_{S,N+1,m} = x_{N+1,m} \quad (12)$$

$$t_{S,N,m} = \max(x_{N,m}, x_{N+1,m} - T_{Q,i-1,m}) \quad (13)$$

$$t_{F,i-1,m} = \max(y_{i-1,i,m}, x_{i,m} - T_M), \quad (14)$$

$$i = N, N-1, \dots, 2, m = 1, 2, \dots, W$$

$$t_{S,i-1,m} = \max(x_{i-1,m}, t_{F,i-1,m} - T_{Q,i-1,m}), \quad (15)$$

$$i = N, N-1, \dots, 2, m = 1, 2, \dots, W$$

其中式(9)~(12)逐级向后确定可行的加工开始时间, 式(13)~(15)以最大逐级回溯的策略确定 $t_{S,i,m}$ 和 $t_{F,i,m}$ 。

定理 1 由式(9)~(15)所确定的 $t_{S,i,m}$ 和 $t_{F,i,m}$ 满足调度模型的约束条件(4)~(6)。

证明:

(I) 由 $t_{F,i-1,m} \geq x_{i-1,m} + T_{P,i-1,m}$, 且由式(15)可知 $t_{S,i-1,m} + T_{P,i-1,m} = \max(x_{i-1,m} + T_{P,i-1,m}, t_{F,i-1,m} - T_{Q,i-1,m} + T_{P,i-1,m}) \leq \max(x_{i-1,m} + T_{P,i-1,m}, t_{F,i-1,m})$, 故 $T_{P,i,m} \leq t_{F,i,m} - t_{S,i,m}$, $i = N, N-1, \dots, 2, m = 1, 2, \dots, W$; 由式(15)可知 $t_{S,i-1,m} \geq t_{F,i-1,m} - T_{Q,i-1,m}$, 因此约束(4)成立。

(II) 由式(11)可知 $x_{i,m} \geq L_{i,\gamma(i)}^d$, 由式(15)可知 $t_{S,i-1,m} \geq x_{S,i-1,m}$, 故 $t_{S,i,m} \geq L_{i,\gamma(i)}^d, i = 1, 2, \dots, N, m = 1, 2, \dots, W$, 因此约束(5)成立。

(III) 由式(11)可知 $y_{i-1,i,m} \geq L_j^d$, 由式(15)可知 $t_{F,i-1,m} \geq y_{i-1,i,m}$, 故 $t_{F,i,m} \geq L_j^d, i = 1, 2, \dots, N, m = 1, 2, \dots, W$, 因此约束(6)成立。

定理 1 证明了内层算法各计算公式满足调度模型的约束条件, 保证了算法求解的可行性。

定理 2 算法求得的 $t_{S,i,m}$ 和 $t_{F,i,m}$, 使晶圆在加工模块滞留时间为最小值。

证明: 式(15)取最大值 \max , 故 $t_{S,i,m}$ 为满足滞留时间约束的最晚开始时间, 由 $T_{P,i,m}$ 为晶圆在加工模块最小停留时间, 且式(10)确定 $y_{i-1,i,m}$ 取值不能减少, 进而 $t_{F,i,m}$ 是晶圆在加工模块的最早结束时间, 故 $t_{F,i,m} - t_{S,i,m}$ 为晶圆在加工模块的滞留时间, 且取得最小值。

定理 2 证明了内层算法能够使晶圆在加工模块上的停留时间最短, 因此能够最大限度地保证了晶圆的加工质量, 防止加工模块残留的腐蚀气体或热量破坏已完成加工的晶圆^[2]。

2.1.2 内层算法示例

(1) 加工模块和机械手的空闲加工区间和搬运区间、晶圆加工时间和最大滞留时间等参数设定如下:

$$CM_1 = \{[0, 2], [4, 10], [12, +\infty)\};$$

$$CM_2 = \{[4, 8], [10, +\infty)\};$$

$$CM_3 = \{[10, 30], [40, +\infty)\}; CT = \{[6, 17], [19, +\infty)\};$$

$$T_M = 2;$$

$$[T_{P,1,m}, T_{Q,1,m}] = [2, 4]; [T_{P,2,m}, T_{Q,2,m}] = [4, 5];$$

$$[T_{P,3,m}, T_{Q,3,m}] = [5, 6].$$

(2) 计算过程

第一个允许时间区间集合为: $[0, 2]; [6, 17]; [4, 8]; [6, 17]; [10, 30]$ 。由算法步骤2和步骤3计算得到:

$$t_{S,4,m} = 19, t_{S,3,m} = 14, t_{S,2,m} = 8, t_{S,1,m} = 2, t_{F,2,m} = 12, t_{F,1,m} = 6。$$

由于 $t_{S,4,m} = 19 < U_{3,1}^d = 30, t_{S,3,m} = 14 < U_2^d = 17, t_{S,2,m} = 8 < U_1^d = 17, t_{F,2,m} = 12 > U_{2,1}^d = 8, t_{F,1,m} = 6 > U_{1,1}^d = 2$, 由步骤4可知没有为临时晶圆获得可行加工开始时间, 需要选择第二个允许时间区间集合, 即 $[4, 10]; [6, 17]; [10, +\infty]; [6, 17]; [10, 30]$ 。

返回步骤2, 执行到步骤4可知获得了临时晶圆可行加工开始时间, 即: $t_{S,4,m} = 21 < U_{3,1}^d = 30, t_{S,3,m} = 16 < U_2^t = 17, t_{S,2,m} = 10 < U_1^t = 17, t_{F,2,m} = 14 < U_{2,2}^d = +\infty, t_{F,1,m} = 8 < U_{1,2}^d = 10$ 。转到步骤6并为下一个临时晶圆安排可行加工开始时间。

2.2 外层量子进化算法

外层通过改进量子进化算法优化晶圆加工排序。该算法通过保留进化算法中变异、交叉和选择操作, 并在进化过程中引入了量子旋转门以实现个体的变异和种群的进化^[19-20]。

2.2.1 编码和解码

含有 w 个晶圆量子染色体编码可定义为 $\begin{bmatrix} \alpha_1 \cdots \alpha_i \cdots \alpha_n \\ \beta_1 \cdots \beta_i \cdots \beta_n \end{bmatrix}$, 其中 $|\alpha_i|^2 + |\beta_i|^2 = 1, i = 1, 2, \dots, n$; α_i 和 β_i 是复数, 为量子位对应态的概率幅; 量子编码长度 $n = (\lceil \log_2 w \rceil + 1) \times w$ 。

本文采用二进制解码法实现量子染色体和晶圆加工顺序之间的转换。其基本步骤如下: 首先产生 n 个 $[0,1]$ 间随机数 $\text{random}(i)$, 分别与量子染色体中对应基因位的 $|\alpha_i|^2$ 值进行比较, 当 $\text{random}(i) \leq |\alpha_i|^2$, 相应的二进制位为 0, 否则为 1。以此类推, 产生一组长度为 n 的二进制串并转换位十进制数。接着, 将此十进制数升序排序, 同时保证每个数的相对位置不变, 其排序序号为晶圆的加工顺序, 如果十进制数相同, 位置靠前的排序序号较小, 否则较大。如表 1 所示是 4 个晶圆的编码和解码过程。

表 1 量子染色体的解码

Tab. 1 Quantum Chromosome Decoding	
量子编码	数值
二进制串	100 101 110 101
十进制串	4 5 6 5
晶圆加工顺序	1 2 4 3

2.2.2 进化操作

(1) 交叉操作、变异和选择操作

本文采用两点交叉、互换变异操作和基于队列的选择方法来增强算法的全局搜索能力, 避免出现局部最优的现象。

两点交叉的基本步骤是通过任选两个父代染色体中的两点产生两个子代染色体。如图 2 所示通过两个父代产生了子代 1, 同理产生子代 2: 2 1 4 3 5。



图 2 染色体两点交叉
Fig. 2 Two-point Crossover

互换变异操作是指随机选取两个基因位, 对这两个基因位进行互换。如图 3 对父代基因位 4 和 3 进行交换, 从而产生新的子代染色体。

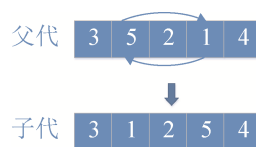


图 3 染色体互换变异
Fig. 3 Exchange Mutation

进化过程中通过内层算法得到各工位晶圆加工的开始时间, 并求出最小的完工时间 C_{\max} 。适应度函数定义为 $Fit = s / C_{\max}$, s 为固定常数。

在求得适应度值的基础上, 为了尽可能地使优良个体参与到种群的进化中, 采用整体排序选择法来选择进化种群: 将种群中的个体按照适应值从小到大原则选择规定数量的个体作为下一代的进化群体^[21]。

(2) 量子位的旋转更新

量子旋转门更新量子概率幅以指引算法的整体的进化方向。对含有 n 个加工晶圆的集束型装备, 第 $j+1$ 染色体基因位 i ($\alpha_i^{j+1}\beta_i^{j+1}$) 采用动态调整旋转角步长策略:

$$\begin{bmatrix} \alpha_i^{j+1} \\ \beta_i^{j+1} \end{bmatrix} = U(\theta_i) \begin{bmatrix} \alpha_i^j \\ \beta_i^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\Delta\theta_i & -\sin\Delta\theta_i \\ \sin\Delta\theta_i & \cos\Delta\theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_i^j \\ \beta_i^j \end{bmatrix} \quad (16)$$

要使算法既能利用历史信息搜索当前解空间, 又能兼顾对未知空间的探索, 需要合理确定量子旋转门旋转角。若当前的适应度值较大, 则表明当前距离最优值较远, 需要选择较大的转角来提高搜索效率, 但算法容易陷入局部最优; 反之, 若当前的适应度值较小, 则表明接近最优值, 需要选择较小的转角, 防止算法越过全局最优值。因此, 式(16)中动态旋转角 $\Delta\theta_i$ 为:

$$\Delta\theta_i = \alpha^j \times \exp\left(-\frac{\Delta f(i) - \min \Delta f}{k}\right) \quad (17)$$

式中: α^j 为旋转角初值; $\Delta f(i)$ 为 i 代父代与子代个体的适应度函数的一阶差分; k 为正整数常数。

2.2.3 两层在线调度方法

Step 1: 初始化调度问题相关参数, 包括最大迭代次数、初始种群规模 N , 最大代数, 交叉率, 变异率;

Step 2: 初始化种群和量子概率幅, 解码该种群产生子代种群;

Step 3: 变异和交叉操作;

Step 4: 子代种群解码确定晶圆的加工顺序, 令 $\gamma(i) = 1, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, \tau$ 。

Step 5: 按照晶圆的加工顺序, 选择一个进入集束型装备的临时晶圆, 按式(18)~(21)逐级向后确定解空间。

$$x_{1,m} = L_{i,\gamma(i)}^d \quad (18)$$

$$y_{i-1,i,m} = \max(L_{i,\gamma(i)}^d, x_{i-1,m} + T_{P,i,m}), \quad (19)$$

$$i = 2, 3, \dots, N, m = 1, 2, \dots, W$$

$$x_{i,m} = \max(L_{i,\gamma(i)}^d, y_{i-1,i,m} + T_M), \quad (20)$$

$$i = 2, 3, \dots, N, m = 1, 2, \dots, W$$

$$x_{N+1,m} = x_{N,m} + T_{P,N,m}, t_{S,N+1,m} = x_{N+1,m} \quad (21)$$

Step 6: 按式(22)~(24)向后回溯计算 $t_{S,i}$ 和 $t_{F,i}$ 。

$$t_{S,N,m} = \max(x_{N,m}, x_{N+1,m} - T_{Q,i-1,m}) \quad (22)$$

$$t_{F,i-1,m} = \max(y_{i-1,i,m}, x_{i,m} - T_M), \quad (23)$$

$$i = N, N-1, \dots, 2, m = 1, 2, \dots, W$$

$$t_{S,i-1,m} = \max(x_{i-1,m}, t_{F,i-1,m} - T_{Q,i-1,m}), \quad (24)$$

$$i = N, N-1, \dots, 2, m = 1, 2, \dots, W$$

Step 7: 如果 $t_{S,N+1,m} \leq U_{N,\gamma(N)}^d, t_{S,i,m} \leq U_j^t$ 与 $t_{F,i,m} \leq L_{i,\gamma(i)}^d$ 成立, 则转入 Step9, 否则转入 Step8。

Step 8: 如果 $t_{S,N+1,m} > U_{N,\gamma(N)}^d$ 则令 $\gamma(N) = \gamma(N) + 1$; 如果 $t_{S,i,m} > U_j^t$, 则令 $j = j + 1$; 如果 $t_{F,i,m} > L_{i,\gamma(i)}^d$ 则令 $\gamma(i) = \gamma(i) + 1$, 返回 Step5。

Step 9: 更新加工模块及机械手的空闲时间区间, 并按升序重新排列可用时间区间, 得加工模块及机械手的空闲时间区间。

Step 10: 若所有晶圆加工开始时间和结束时间计算完毕, 求出最小的完工时间 C_{\max} , 转到步骤 Step11, 否则返回 Step5。

Step 11: 根据内层算法确定最小的完工时间 C_{\max} 获得父代和子代染色体适应值, 采用直接插入排序从种群中选出最优染色体;

Step 12: 利用量子旋转门更新得到新量子概率幅, 解码后得到新的子代种群;

Step 13: 如果满足最大迭代次数的中止条件, 则输出最满意解, 算法结束; 否则转至 Step3。

为方便说明, 本文将量子染色体编码、进化和量子旋转门更新等方面改进的两层在线调度方法称为 IQEA 算法, 反之称为 QEA 算法。

3 仿真与实验分析

为有效地评价本文提出的调度方法, 特引入以下比较变量^[11]:

$R_m = (FP_A - FP_B) / FP_B \times 100\%$ 为周期延时率, 表示 FP_A 相对于 FP_B 的延时率, R_m 最小, 越接近 FP_B 。相关符号定义如下: FP_A 表示本文晶圆完工时间的平均值; FP_B 作为 benchmark, 表示没考虑滞留时间约束的基本周期(Fundamental Period), 其值为 $\max\{(N+1)\delta + 2\lceil(N+1)/2\rceil\varepsilon, \max\{T_{P_{\max}} + 2\varepsilon + \delta\}^{[14]}$ 。

为了验证两层在线调度方法 IQEA 的有效性, IQEA 分别与已有文献中遗传算法 QEA、(GA)^[22]、粒子群算法(PSO)^[2]和 QEA 进行比较。所有的测试算法均以 Visual Studio 2010 编程, 运行环境为 Win8, CPU 主频 1.8 GHz, 内存 8 GB。加工模块和单臂机械手的空闲加工区间和搬运区间:

CM1 = {[0, 27], [2, 25], [6, 30], [7, 33], [8, 35], [10, 36], [13, 39], [17, 45], [21, 49], [30, 57], [39, +∞), [40, +∞), [45, +∞), [49, +∞)};

CM2 = {[2, 26], [3, 27], [4, 29], [7, 30], [9, 34], [12, 39], [15, 45], [20, 46], [27, 50], [32, 67], [42, 69], [43, +∞), [50, +∞), [53, +∞), [55, +∞)};

CM3 = {[4, 30], [5, 29], [5, 33], [7, 39], [11, 36], [12, 37], [18, 49], [30, +∞), [35, +∞), [39, +∞), [42, +∞), [44, +∞), [47, +∞)};

CM4 = {[3, 27], [4, 27], [4, 29], [7, 36], [8, 32], [10, 38], [14, 39], [20, 46], [29, 56], [32, 59], [42, 79], [55, +∞), [57, +∞), [60, +∞), [62, +∞)};

CM5 = {[4, 28], [5, 34], [7, 34], [9, 32], [10, 36], [13, 39], [18, 46], [21, 52], [31, 59], [40, 67], [49, +∞), [53, +∞), [58, +∞), [60, +∞)};

CM6 = {[7, 39], [8, 33], [8, 38], [9, 35], [13, 39], [21, 48], [24, 50], [30, 57], [32, 60], [43, 77], [53, +∞), [60, +∞), [63, +∞), [69, +∞), [80, +∞)};

CT = {[6, 15], [13, 24], [15, 30], [26, 37], [30, 50], [40, 55], [51, 67], [52, 66], [65, 77], [72, 88], [80, 90], [85, 99], [100, 120], [101, +∞), [8, +∞), [120, +∞), [125, +∞)}.

假设临时晶圆加工时间 $T_{P,i,m}$ 和最大滞留时间 $T_{Q,i,m}$ 服从均匀分布, 构造 10 组不同规模的随机测试算例, 具体参数设计如下: $T_M=2$; $T_{P,i,m}=30+U(1,50)$; $T_{Q,i,m}=2T_{P,i,m}+U[1,25]$; $R=5,10,15,20,25,30$ 。IQEA 算法种群规模和进化种群规模设为 100, 迭代次数为 100, 交叉率为 0.75, 变异率 0.90, 进化尺度 0.01, 初始旋转角度为 9° 。

表 2 记录了晶圆数目为 5 的算例的运行结果: 晶圆加工顺序: 1->2->5->4->3, 最后一个晶圆 3 在工位 6 的加工开始时间为 225 s, 所有晶圆的完工时间为 256 s。

表 2 具体算例的调度方案

Tab. 2 The Scheduling Scheme of a Numerical Example/s

晶圆加工顺序	各工位的加工开始时间					
	1	2	3	4	5	6
1	6	32	64	96	118	160
2	17	43	75	97	119	161
5	40	82	104	126	148	180
4	69	101	123	155	187	219
3	79	103	145	167	193	225

由表 3 可知, IQEA 算法平均生产周期的相对值 R_m 在 5.48%~25.10%, 总体平均值($\sum R_m/15$)为 16.33%。进一步观察数据, 由图 4 可以看出 IQEA 算法的运行时间随着 N 增大而总体上呈线性增长。300 mm 半导体生产线生产一批次晶圆数目通常为 25 片, IQEA 算法运行时间仅为 20.43 s, 可知算法产生解的时间是比较短的, 达到了集束型装备厂商对在线调度方法的性能要求(小于 30 s)。

表 3 随机算例的运行结果

Tab. 3 The Results of Random Examples

晶圆数目	IQEA		QEA		GA		PSO	
	R_m (%)	运行时间 /s	R_m (%)	运行时间 /s	R_m (%)	运行时间 /s	R_m (%)	运行时间 /s
5	5.48	1.61	12.71	1.45	5.31	1.59	5.11	1.68
10	12.36	2.46	28.49	2.01	12.56	2.45	12.44	2.58
15	16.01	5.71	36.8	3.78	15.38	5.62	15.91	5.73
20	18.59	8.28	59.43	4.26	24.34	7.29	27.22	8.31
25	20.43	10.23	68.29	7.31	30.21	9.11	32.01	9.24
30	25.1	17.58	83.56	13.44	40.28	15.64	42.39	16.01

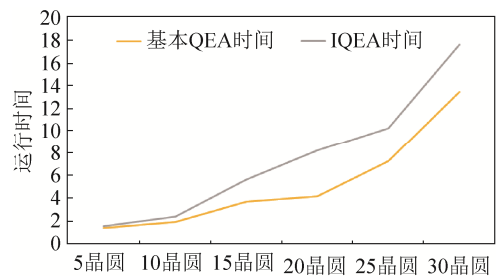


图 4 晶圆数量对算法运行时间的影响
Fig. 4 Relationship of the Algorithm Runtime and Number of Wafers

另外,与表 3 的 GA、PSO、QSM 算法的运行结果比较,可以发现对于一组算例(N,W),本文算法虽然在运算时间上略微长于 GA、PSO、QEA 算法,但在求解质量上具有较明显的优势。在问题规模较小时(晶圆数目小于 20),IQEA 算法与 GA、PSO 算法性能相当,优于 QEA 算法;对于较大规模问题,IQEA 算法有效性均优于其它三类算法。其中,QEA 算法平均生产周期的相对值 R_m 在 12.71%~83.56%,总体平均值($\sum R_m/15$)为 48.21%,为本算法的 2.95 倍,其主要原因是:改进算法虽然会额外消耗移动的运行时间,但其良好的编码方式和有效的改进策略不断提高解的优化质量。从表 3 和图 5 可以看出,随着调度问题规模的不断加大,IQEA 所求的周期延时率虽然有所增加,但是相对 QEA 增加趋势并不明显。因此,本文提出的 IQEA 在线调度方法能有效地解决临时晶圆到来时的在线调度问题。

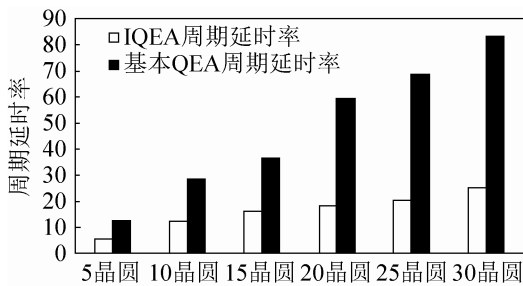


图 5 晶圆数量对周期延时率的影响

Fig. 5 Relationship of R_m and Wafer Numbers

文献[2]的刻蚀设备调度问题属于一类有滞留时间约束集束型装备调度问题。刻蚀工艺过程包括刻蚀加工模块 A 或 B(氢氟酸或氨氟化物),除酸清洗模块和干燥模块三个步骤。表 4 列举了刻蚀集束型装备的加工参数,其它参数与前面随机算例相同。

表 4 刻蚀集束型装备的加工参数 /s

Tab. 4 Processing Parameters of Etching Cluster tools

晶圆类型 A			晶圆类型 B		
工位	$T_{P,i,m}$	$T_{Q,i,m}$	工位	$T_{P,i,m}$	$T_{Q,i,m}$
刻蚀模块 A/B	35	50	刻蚀腔模块	50	60
清洗模块	30	50	清洗模块	30	50
干燥模块	30	90	干燥模块	30	90

一批次临时晶圆为 25 片,其中过 A 和 B 类晶圆的数量分别为 13 片和 12 片,经过 IQEA 算法计算得到临时晶圆的加工顺序为: [A B A B A B A B A B A B A B A B A B A B A B A],最小完工时间为 920 s。IQEA 算法运行结果与文献[2]的粒子群算法相同,但其运行时间(26.12 s)短于粒子群算法的运行时间(28.30 s),且计算时间在可接受范围。

4 结论

本文提出的算法有效地解决了在具有多类型临时晶圆集束型装备的调度过程中,由于滞留约束限制而产生的冲突和死锁的问题,为此类集束型装备的调度问题提供了一个可行的方法。通过仿真实验表明,该方法在待加工临时晶圆数目很多时,仍能在使用较少计算代价的情况下迅速得到较好的调度方案;且与 GA、PSO、QEA 的实验比较,验证了提出方法的有效性。

参考文献:

- [1] 卢睿,李林瑛.有晶圆滞留时间约束的集束型装备调度问题研究[J].系统仿真学报,2014,26(8):1775-1780. (Lu Rui, Li Linying. Research on scheduling problem of cluster tools with residency time constraints [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2014, 26(8): 1775-1780.)
- [2] 李林瑛,胡静涛.有滞留时间约束的集束型装备在线调度问题研究[J].控制与决策,2011,26(1):44-48. (Li Linying, Hu Jingtao. Online scheduling problem of cluster tools with residency time constraints [J]. Control and Decision, 2011, 26(1): 44-48.)
- [3] Zhang R, Song S, Wu C. A hybrid artificial bee colony algorithm for the job scheduling problem [J]. International Journal of Production Economics (S0925-5273), 2013, 141(1): 167-178.
- [4] 晏鹏宇,车阿大,唐小我.基于加工时间分类视角的自动化生产系统调度综述[J].计算机集成制造系统,2012,18(2):332-341. (Yan Pengyu, Che Ada, Tang Xiaowo. Scheduling problems in automated production systems based on processing times classification [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(2): 332-341.)
- [5] 王艳红,王文霞,于洪霞,等.一类求解作业车间调

- 度问题的动态平衡自适应蚁群算法 [J]. 计算机集成制造系统, 2013(10): 2521-2527. (Wang Yanhong, Wang Wenxia, Yu Hongxia, et al. Dynamic balance adaptive colony algorithm solving Job-Shop Scheduling [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013(10): 2521-2527.)
- [6] Dawande M, Geismar H N, Pindo M, et al. Throughput optimization in dual-gripper interval robotic cells [J]. IIE Transactions (S0740-817X), 2010, 42(1): 1-15.
- [7] Li X, Fung R Y K. Optimal K-unit cycle scheduling of two-cluster tools with residency constraints and general robot moving times [J]. Journal of Scheduling (S1094-6136), 2016, 19(2): 165-176.
- [8] Rostami S, Hamidzadeh B. An optimal scheduling technique for dual-arm robots in cluster tools with residency constraints [J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing (S0894-6507), 2001, 17(5): 609-618.
- [9] Rostami S, Hamidzadeh B. Optimal scheduling techniques for cluster tools with process-module and transport-module residency constraints [J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing (S0894-6507), 2002, 15(3): 341-349.
- [10] Kim J H, Lee T E. Scheduling analysis of time-constrained dual-armed cluster tools [J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing (S0894-6507), 2003, 16(3): 521-534.
- [11] Jung C, Kim H J, Lee T E. A branch and bound algorithm for cyclic scheduling of timed petri nets [J]. IEEE Transactions on Automation Science & Engineering (S1545-5955), 2015, 12(1): 1-15.
- [12] Qiao Y, Wu N Q, Zhou M C. Schedulability and scheduling analysis of dual-arm cluster tools with wafer revisiting and residency Time constraints based on a novel schedule [J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Systems (S1083-4427), 2015, 45(3): 472-484.
- [13] Zhu Q H, Wu N Q, Qiao Y, et al. Scheduling of Single-Arm Multi-cluster Tools With Wafer Residency Time Constraints in Semiconductor Manufacturing [J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing (S0894-6507), 2015, 28(1): 117-125.
- [14] Lee J H, Kim H J, Lee T E. Scheduling cluster tools for concurrent processing of two wafer types [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering (S1545-5955), 2014, 11(2): 525-536.
- [15] 刘明祥, 周炳海. 基于时间约束集的集束型设备群调度方法 [J]. 自动化学报, 2012, 32(8): 479-484. (Liu Mingxiang, Zhou Binghai. Scheduling algorithm of multi-cluster tools based on time constraint sets [J]. Acta Automatic Sinica, 2012, 32(8): 479-484.)
- [16] 周炳海, 刘明祥, 周淑美. 带滞留约束的双臂集束型设备群的调度方法 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(1): 83-89. (Zhou Binghai, Liu Mingxiang, Zhou Shumei. Scheduling method for dual-blade multi-cluster tools with residency constraints [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(1): 83-89.)
- [17] 李林瑛, 胡静涛. 半导体制造两集束型装备调度模型和算法研究 [J]. 系统仿真学报, 2010, 22(8): 1942-1946. (Li Linying, Hu Jingtao. Scheduling model and its algorithm for two-cluster tools with single-blade robot [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2010, 22(8): 1942-1946.)
- [18] 李林瑛, 胡静涛. 复杂单臂机器人集束型装备调度模型 [J]. 信息与控制 [J]. 2009, 38(4): 431-436. (Li Linying, Hu Jingtao. Scheduling model of complicated cluster tools with single-blade robot [J]. Information and Control, 2009, 38(4): 431-436.)
- [19] 钱洁, 郑建国, 张超群, 等. 量子进化算法研究现状综述 [J]. 控制与决策, 2011, 26(3): 321-327. (Qian Jie, Zheng Jianguo, Zhang Chaoqun, et al. Reviews of current studying progress on quantum evolutionary computation [J]. Control and Decision, 2011, 26(3): 321-327.)
- [20] 王跃岗, 车阿大. 基于混合量子进化算法的自动化制造单元调度 [J]. 计算机集成制造系统, 2012, 19(9): 2193-2201. (Wang Yuegang, Che Ada. Robotic cells scheduling based on hybrid quantum evolutionary algorithm [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 19(9): 2193-2201.)
- [21] 宋强磊, 车阿大. 量子进化算法在生产调度中的应用综述 [J]. 计算机应用研究, 2012, 29(5): 1601-1605. (Song Qianglei, Che Ada. Survey on application of quantum evolutionary algorithm in production scheduling [J]. Application Research of Computers, 2012, 29(5): 1601-1605.)
- [22] Kumar S. Minimizing cycle time in large robotic cells [J]. IIE Transactions (S0740-817X), 2005, 37(2): 123-136.