

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2016 年 6 月 30 日 (30.06.2016)



(10) 国际公布号
WO 2016/101181 A1

- (51) 国际专利分类号:
G05B 19/418 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2014/094837
- (22) 国际申请日: 2014 年 12 月 24 日 (24.12.2014)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201410805103.5 2014 年 12 月 23 日 (23.12.2014) CN
- (71) 申请人: 清华大学 (TSINGHUA UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。
- (72) 发明人: 刘民 (LIU, Min); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。郝井华 (HAO, Jinghua); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。
- (74) 代理人: 北京清亦华知识产权代理事务所 (普通合伙) (TSINGYIHUA INTELLECTUAL PROPERTY LLC); 中国北京市海淀区清华园清华大学熙澜院商业楼 301 室, Beijing 100084 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

(54) Title: PHOTOETCHING PROCEDURE DYNAMIC SCHEDULING METHOD BASED ON INDICATOR FORECASTING AND SOLUTION SIMILARITY ANALYSIS

(54) 发明名称: 基于指标预报和解相似度分析的光刻工序动态调度方法

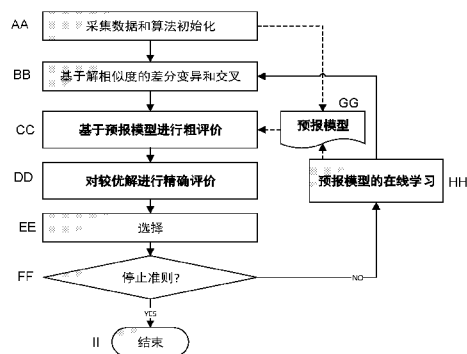


图 2 / Fig. 2

AA Collect data and initialize an algorithm
BB Differential mutation and crossing based on solution similarity
CC Perform rough evaluation based on a forecasting model
DD Perform precise evaluation on a better solution
EE Select
FF Are criteria stopped?
GG Forecasting model
HH Online learning of the forecasting model
II End

(57) Abstract: A photoetching procedure dynamic scheduling method based on indicator forecasting and solution similarity analysis, which relates to the fields of advanced manufacturing, automation and information. The dynamic scheduling method is provided for photoetching procedure dynamic scheduling on a semiconductor production line. The method comprises: firstly, dividing a photoetching procedure dynamic scheduling problem into a device selection scheduling sub-problem and a workpiece sequencing scheduling sub-problem; establishing, on line, a performance indicator forecasting model of the workpiece sequencing scheduling sub-problem; and then, solving an original scheduling problem by using a differential evolution algorithm based on solution similarity analysis. In the differential evolution algorithm, the performance indicator forecasting model of the workpiece sequencing scheduling sub-problem is used for performing quick rough evaluation on global scheduling performance of solutions of the device selection scheduling sub-problem. In the evaluation process on the scheduling solutions, a mode of combining precise evaluation and the rough evaluation is used to perform the performance evaluation on solutions in the differential evolution algorithm; by using the scheduling method, the efficiency and the effect of photoetching procedure production scheduling can be remarkably improved.

(57) 摘要:

[见续页]



基于指标预报和解相似度分析的光刻工序动态调度方法，属于先进制造、自动化和信息领域，针对半导体生产线光刻工序动态调度问题，提出一种动态调度方法。该方法首先将光刻工序动态调度问题分解为设备选择调度子问题和工件排序调度子问题，并在线建立工件排序调度子问题的性能指标预报模型，然后，利用基于解相似度分析的差分进化算法求解原调度问题。在差分进化算法中，上述工件排序调度子问题性能指标预报模型用于对设备选择调度子问题的解进行全局调度性能的快速粗评价。在对调度解的评价过程中，采用精确评价和粗评价相结合的方式进行差分进化算法中解的性能评价；使用该调度方法可显著提升光刻工序生产调度的效率和效果。

基于指标预报和解相似度分析的光刻工序动态调度方法

技术领域

本发明属于先进制造、自动化和信息领域，具体涉及一种面向半导体生产线光刻工序调度、基于指标预报和解相似度分析的光刻工序动态调度方法。

背景技术

本发明所针对的半导体生产线光刻工序调度问题是以总加权流经时间之和为优化目标、带有机具适配性约束和顺序相关准备时间的单工序调度问题。光刻工序是半导体生产线的关键工序之一，其调度效果对整个生产线的生产性能指标有较大影响。针对该类问题，已有的调度方法主要包括精确优化方法、经典人工智能方法、启发式规则 and 智能优化方法等。然而，已有调度方法在处理较大规模的上述调度问题时，调度性能仍然不够理想，因此，提出具有较好性能的光刻工序动态调度方法具有重要意义。

发明内容

为解决半导体生产线光刻工序以最小化总加权流经时间为优化目标的调度问题，本发明提出一种基于指标预报和解相似度分析的光刻工序动态调度方法（以下简称 PASM）。

本发明所针对的半导体生产线光刻工序调度问题是以总加权流经时间之和为优化目标、带有机具适配性约束和顺序相关准备时间的单工序调度问题，在本发明中，首先将上述调度问题分解为设备选择调度子问题和工件排序调度子问题，在此基础上，针对工件排序调度子问题，构建其性能指标预报模型。上述调度子问题性能指标预报模型的作用是，在不求解该调度子问题的前提下，通过分析该调度子问题的特征信息来预报该调度子问题对应较优解的性能优劣。在上述调度子问题性能指标预报模型基础上，提出基于解相似度分析的差分进化算法来求解设备选择调度子问题，其中，工件排序调度子问题性能指标预报模型用于对设备

选择调度子问题的解进行全局调度性能的快速评价，从而改善全局优化性能。

(一) 问题描述

半导体生产线光刻工序调度问题可具体描述如下：

光刻工序有 m 台光刻机， n 个待调度的工件，分别记为 $M = \{1, 2, \dots, m\}$ 和 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 。每个工件需要在某台光刻机上进行加工，工件 j ($j \in N$) 在机器 1 上的加工时间、权重、释放时间记为 $p_{1,j}$, w_j 和 r_j ，另外，工件 j 还对应一个可加工的光刻机集合 μ_j 以及光刻板型号 b_j ，只有该集合内的光刻机才可加工此工件，且在加工时，如果上一个加工任务对应的光刻板型号与本次任务对应的光刻板型号相同，则所需的切换时间为 0，否则需要一个固定的光刻板切换时间。另外，还考虑如下假设：同一个机器一个时刻只能加工一个工件，同一个工件一个时刻只能在一个机器上加工，而且一旦开始加工，不可中断直至加工完成。现需要安排工件在光刻机上加工，使得总加权流经时间最短。

假设 am_j ($am_j \in M$) 为工件 j 所指派的加工机器， f_j 为工件 j 的加工完成时间， S 为工件间切换时间矩阵， $S = \{s_{pq}\}_{n \times n}$ ，其中， s_{pq} 为工件 p 与工件 q 在同一个光刻机上相邻加工时所需的切换时间。就本发明所针对的光刻工序动态调度问题而言，若两个工件采用相同的光刻板，则二者之间的切换时间为零，否则需要一定的切换时间。上述光刻工序调度问题可采用混合整数规划模型描述，具体如下：

$$\min TFT = \sum_{j=1}^n w_j f_j \quad (1)$$

s.t.

$$st_j \geq r_j, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$am_j \in \mu_j, j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$st_{l,j} - st_{l,i} \geq p_{l,i} + s_{ij} \cup st_{l,i} - st_{l,j} \geq p_{l,j} + s_{ji} \quad (4)$$

$$k = 1, 2, \dots, m, i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j$$

其中，(1)表示优化目标，(2)表示工件释放时间约束，(3)表示机器适配性约束，(4)表示设备唯一性约束和工件切换时间约束。

(二) 问题分解

为求解上述调度模型，本发明首先将上述调度问题进行分解，将原调度问题分解为设备选择调度子问题和工件排序调度子问题，两个调度子问题可描述如下：

(1) 设备选择调度子问题

设 Θ_k 为指定到光刻机 k 上所有工件的集合, $f(\Theta_k)$ 为集合 Θ_k 中工件对应的总加权流经时间, 则设备选择调度子问题的数学模型描述如下:

$$\min TFT = \sum_{k=1}^m f(\Theta_k) \quad (5)$$

s.t.

$$am_j \in \mu_j, j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式(5)为该模型对应的目标函数, 式(6)表示工件的设备分配方案应满足设备适配性约束。可以看到与原问题相比, 该模型的搜索空间大大缩小, 因为不需给出具体的工件排序方案。

(2) 工件排序调度子问题

给定了设备选择调度子问题的解, 即 $\Theta_k (k = 1, 2, \dots, m)$ 给定, 工件排序调度子问题可看作是 m 个相互独立的子优化问题, 其中, 第 k 个子优化问题可描述如下:

$$\min TFT_k = \sum_{j \in \Theta_k} w_j f_j \quad (7)$$

s.t.

$$st_j \geq r_j, j \in \Theta_k \quad (8)$$

$$st_{l,j} - st_{l,i} \geq p_{l,i} + s_{ij} \cup st_{l,i} - st_{l,j} \geq p_{l,j} + s_{ji}$$

$$i, j \in \Theta_k, i \neq j \quad (9)$$

式(7)设备 k 对应的目标函数(即总加权流经时间), 式(8)表示工件的释放时间约束, 式(9)表示设备唯一性约束和准备时间约束。

(三) 调度子问题性能指标预报模型构建

在上述问题分解完成以后, 在本发明中将建立工件排序调度子问题的性能指标预报模型。需要说明的是, 在本发明中, 该性能指标预报模型并非是以给定的工件排序调度子问题的解作为输入, 而是直接以该工件排序调度子问题对应的关键特征作为输入来进行调度子问题性能指标预报。

本发明采用最小范数极限学习机(MN-ELM)来建立上述调度子问题的性能指标预报模型。

首先进行输入特征提取。我们在分析了上述工件排序调度子问题的特征之后, 结合大量的数值计算实验, 确定了如下问题特征量作为预报给定机器的工件排序调度子问题性能指标的输入:

- 分配至该机器 l 的工件的总加权加工时间: $\sum_{j \in \Omega_i} w_j p_{l,j}$
- 光刻板类别数量: NB

- 指派到当前光刻机的工件释放时间的集中程度: Cr
- 采用最小加权加工时间规则所获得的目标函数值: $TWFT_{swpt}$
- 区间 i 对应工件的总数量: $|\Omega_i|, i = 1, 2, \dots, I$.
- 区间 i 对应工件的总加权加工时间: $\sum_{j \in \Omega_i} w_j p_{l,j}, i = 1, 2, \dots, I$.

其中, $p_{l,j}$, w_j 和 r_j 分别为工件 j 在光刻机 l 上的加工时间、权重、释放时间, $j = 1, 2, \dots, n$, Ω_i 为分配到区间 i 的工件集合, 区间的划分方法为: 把整个调度时间轴划分为 I 个区间, I 为整数, 每个区间的长度为 $u = (r_{i,max} + p_{i,max} - r_{i,min})/I$, $p_{i,max}$ 为所有工件中加工时间的最大值, $r_{i,max}$ 和 $r_{i,min}$ 为所有工件释放时间的最大值和最小值, 区间的起始时刻为 $r_{i,min}$;

按照上述特征选择方法, 对给定机器的工件排序调度子问题, 用于构建调度子问题性能指标预测模型的特征共有 $2I + 4$ 个, 其中, 根据问题规模的不同, I 的取值在 $[4, 8]$ 区间预测效果较好。 Cr 是反映该机器前是否存在拥堵的指标, 该值越大, 表明存在拥堵的可能性越大。

Cr 的计算步骤如下:

- 1) 令 $L_i (i = 1, 2, \dots, I)$ 表示第 i 个区间的总负载, $L_{i,j}$ 为工件 j 对 L_i 的贡献。
- 2) 对工件 $j (j \in \Omega_i)$, 令 $st_j = r_j$, 则 $c_j = r_j + p_{l,j}$, 通过式 (10) 计算 $L_{i,j}$:

$$L_{i,j} = \begin{cases} 0 & i \times u \leq st_j \\ i \times u - st_j & (i-1) \times u < st_j \leq i \times u \\ u & st_j < i \times u \leq c_j \\ c_j - (i-1) \times u & (i-1) \times u < c_j \leq i \times u \\ 0 & c_j < i \times u \end{cases} \quad (10)$$

- 3) 计算第 i 个区间的总负载 $L_i = \sum_{j \in \Omega_i} L_{i,j}$ 。

- 4) 通过式 (11) 计算 Cr :

$$Cr = \sum_{i=1}^I (\max(L_i - u, 0))^2 \quad (11)$$

两个与区间相关的属性, $|\Omega_i|$ 和 $\sum_{j \in \Omega_i} w_j p_{l,j}$, 其计算方式如下。

- 1) 将所有工件按其释放时间由小到大的顺序排序, 不失一般性, 记 $j'_1, j'_2, \dots, j'_n$ 为排序后的各个工件, $r'_1, r'_2, \dots, r'_n$ 为对应的释放时间。

- 2) 对工件 $j'_k (i = 1, 2, \dots, n)$, 如果 $iu \leq r'_k < (i+1)u$ 成立, 其中 i 为时间窗口的序号, 则 j'_k 属于第 i 个时间窗口对应的工件集合。
- 3) 对每个时间窗口, $|\Omega_i|$ 为该时间窗口对应的工件数量, $\sum_{j \in \Omega_i} w_j p_{i,j}$ 为该时间窗口对应工件的加权加工时间之和。

在采用上述输入特征属性的基础上, 基于极限学习机 (ELM) 模型框架, 采用如下步骤建立调度子问题性能指标预报模型。需要说明的是, 由于调度子问题性能指标预报模型训练过程所需的训练数据是随着算法的运行逐步得到的, 因此, 所采用的极限学习机应基于在线学习框架。

步骤 (1): 模型参数初始化

对于给定的 N 个样本, 其输入记为 $X = \{x_i\}_{i=1}^N$, 其中 x_i 表示每 i 个样本, 由 $2I+4$ 维数据组成的向量; N 个样本输入相对应的输出记为 $Y = \{y_i\}_{i=1}^N$, y_i 为相应调度子问题的性能指标值;

给定基于结构风险最小化的极限学习机的隐层节点数 L , 采用径向基函数作为特征变换函数, 函数形式为 $G(a_i, b_i, x_i) = e^{-b_i \|x_i - a_i\|}$, $i = 1, 2, \dots, L$, 其中 a_i , b_i 为径向基函数的参数, a_i 维数为 $2I+3$ 维, 该值从 $[-1 \ 1]$ 中随机选取, b_i 为 1 维, 取值为从 $[\frac{1}{100} \ \frac{13}{300}]$ 随机选取; 根据极限学习机算法的逼近理论, 只要隐层节点数足够大, 算法能够以任意精度逼近任意的函数, 因此本发明中隐层节点数选取一个相对较大的值即可, 如 $L > 20$ 。

于是, 生成的极限学习机特征映射矩阵 $H(X)$ 为:

$$H(X) = \begin{bmatrix} G(a_1, b_1, x_1) & G(a_2, b_2, x_1) & \cdots & G(a_L, b_L, x_1) \\ G(a_1, b_1, x_2) & G(a_2, b_2, x_2) & \cdots & G(a_L, b_L, x_2) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ G(a_1, b_1, x_N) & G(a_2, b_2, x_N) & \cdots & G(a_L, b_L, x_N) \end{bmatrix}$$

步骤 (2): 算法初始化

对于时刻 t 而言, 极限学习机 ELM 的权值参数 w_t 初始化值为:

$$w_t = [\frac{1}{\nu} + H(X_t)^T H(X_t)]^{-1} H(X_t)^T Y_t$$

其中:

x_t 表示 t 时刻已经获得的样本，样本数量为 N ，于是产生的极限学习机映射矩阵为：

$$H(X_t) = \begin{bmatrix} G(a_1, b_1, x_1) & G(a_2, b_2, x_1) & \cdots & G(a_L, b_L, x_1) \\ G(a_1, b_1, x_2) & G(a_2, b_2, x_2) & \cdots & G(a_L, b_L, x_2) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ G(a_1, b_1, x_N) & G(a_2, b_2, x_N) & \cdots & G(a_L, b_L, x_N) \end{bmatrix}$$

$$Y_t = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdots \\ y_N \end{bmatrix}$$

ν 为惩罚系数；

步骤 (3)：在线学习过程

对于 $t+1$ 时刻，假定新到达样本的数量为 k 个，新到达样本对应的输入为

$$X_{IC} = \{x_i\}_{i=N+1}^{N+k}, \text{ 输出为 } Y_{IC} = \begin{bmatrix} y_{N+1} \\ y_{N+2} \\ \cdots \\ y_{N+k} \end{bmatrix}, \text{ 于是由新到达的样本数据形成的极限学习}$$

机映射矩阵为：

$$H(X_{IC}) = \begin{bmatrix} G(a_1, b_1, x_{N+1}) & G(a_2, b_2, x_{N+1}) & \cdots & G(a_L, b_L, x_{N+1}) \\ G(a_1, b_1, x_{N+2}) & G(a_2, b_2, x_{N+2}) & \cdots & G(a_L, b_L, x_{N+2}) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ G(a_1, b_1, x_{N+k}) & G(a_2, b_2, x_{N+k}) & \cdots & G(a_L, b_L, x_{N+k}) \end{bmatrix}$$

$t+1$ 时刻极限学习机权值参数 w_{t+1} 按照如下方式更新：

$$W_{t+1} = K_t W_t + K_t A_t^{-1} H(X_{IC})^T Y_{IC}$$

其中：

$$K_t = I - A_t^{-1} H(X_{IC})^T [H(X_{IC}) A_t^{-1} H(X_{IC})^T + I_{k \times k}]^{-1} H(X_{IC})$$

$$A_t^{-1} = [\frac{1}{\nu} + H(X_t)^T H(X_t)]^{-1}$$

$$A_{t+1}^{-1} = K_t A_t^{-1}$$

$I_{k \times k}$ 为对角线为 1 的单位矩阵；

K_t 、 A_t^{-1} 为引入的中间变量，从而简化更新后权值参数 w_{t+1} 的表达形式；

步骤 (4)：训练过程终止

当所有的训练数据都参与训练后，训练过程终止，此时输出训练完成后的极限学习机权值参数 w ；

（四）基于性能指标预报模型和解相似度分析的差分进化算法

本发明提出了基于性能指标预报模型和解相似度分析的差分进化算法，用来求解原光刻工序动态调度问题，动态地给出调度方案。所提出的差分进化算法在计算机上由如下步骤进行：

步骤（1）：算法初始化

每个设备选择调度子问题的解可表示为：

$$A = [r_1, r_2, \dots, r_n]$$

其中， r_j 为表示工件 j 对应加工机器的实数， $r_j \in (0, |\mu_j|]$ 。

在算法初始化中，首先产生 NP 个设备选择调度子问题的解形成初始解集合（也可称为初始种群），产生方法为：为每个工件，从其对应的可选设备集合 μ_j 中随机选择一台设备作为其加工设备。同时，设定差分进化算法（DE）中的若干参数，包括交叉率 CR ，缩放因子 F 。在本发明中， $CR \in [0,1]$ ， $F \in [0.5,1]$ 。算法的停止条件为算法运行时间达到运行时间限制为止。

在算法初始化中，还需要训练产生初始的调度子问题性能指标预报模型。在本发明所针对的问题中，一旦解集合中设备选择调度子问题的解给定，那么，排序子问题中的各个参数也即确定。本发明采用分枝定界算法（B&B）（Rabia Nessah, Imed Kacem. Branch-and-bound method for minimizing the weighted completion time scheduling problem on a single machine with release dates. Computers & Operations research, 2012, 39:471-478）来分别求解各个排序子问题，从而获取相应的每个设备选择调度子问题解的性能指标值。上述求解过程完成后，即可使用所获得的数据，采用前述第三节的方法训练产生初始的调度子问题性能指标预报模型。在算法初始化阶段，进行精确评价的解的数量为 N_0 个，在本发明中，选择 $N_0 = NP/2$ 。

步骤（2）：差分变异

针对给定解集合中的各个解，首先计算解的相似度矩阵：

$$M_d = \begin{bmatrix} \|A_g^1, A_g^2\| & \|A_g^1, A_g^3\| & \dots & \|A_g^1, A_g^{NP}\| \\ \|A_g^2, A_g^1\| & \|A_g^2, A_g^3\| & \dots & \|A_g^2, A_g^{NP}\| \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \|A_g^{NP}, A_g^1\| & \|A_g^{NP}, A_g^2\| & \dots & \|A_g^{NP}, A_g^{NP}\| \end{bmatrix}$$

其中， $d(i, j) = \|A_g^i, A_g^j\|$ 表示解 i 和解 j 之间的距离， A_g^i 表示第 g 代解集合中的第

i 个解。进一步,该举例被定义为: $\|A_g^i, A_g^j\| = \sum_{l=1}^n 1([r_l] \neq [r_j])$, 其中 $1(\cdot)$ 为指示函数, 若 $[r_l] = [r_j]$ 成立, 则 $1([r_l] \neq [r_j]) = 0$, 否则 $1([r_l] \neq [r_j]) = 1$ 。距离越小, 表明两个解之间的相似度越高。

在上述解相似度矩阵 M_d 基础上, 计算选择概率矩阵 M_p :

$$M_p(i, j) = 1 - \frac{d(i, j)}{\sum_i d(i, j)}$$

其中, $i, j = 1, 2, \dots, NP$ 。从当前解集合中随机选择一个解, 记为 $A_g^{r_1}$, 基于选择概率矩阵 M_p 可得到选择概率向量 $M_p(r_1, \cdot)$ (即选择概率矩阵 M_p 的第 r_1 行), 针对该选择概率向量, 实施轮盘赌方法, 选择 2 个互不相同的解 (即选择概率与其距离近似成反比)。不失一般性, 记所选中的另两个解为 $A_g^{r_2}, A_g^{r_3}$ 。采用如下公式来获得变异后的解:

$$V_g^i = A_g^{r_1} + F(A_g^{r_2} - A_g^{r_3})$$

步骤 (3): 交叉操作

在本发明中, 采用如下方法进行解的交叉操作: 分别对于步骤 (2) 产生的变异后解 V_g^i 的每个元素, 随机产生一个实数 $r \in [0, 1]$, 如果 $r \leq CR$, 则该元素替换目标解中相应位置的元素, 否则保留目标解中相应位置的元素。

步骤 (4): 评价与选择

在上述寻优操作完成之后, 本发明需要对解集合中的所有目标解进行评价。评价过程分成两个阶段, 首先进行粗评价, 其次进行精确评价。在粗评价阶段, 采用前述建立的调度子问题性能评价模型对解集合中的每个设备选择调度子问题的解 (同时也是差分进化算法解集合中的每个解) 进行性能评价, 在此基础上, 选择前 p 的较好解 (即对应的总加权流经时间较小的解), 采用前述分枝定界算法进行对其进行精确评价。精确评价所获得的数据同时用于调度子问题性能评价模型的在线训练, 在线训练的方法如第三节所述。在评价过程完成以后, 采用标准轮盘赌方法从解集合中选择出新的下一代解集合。

附图说明

图 1： 基于指标预报和解相似度分析的光刻工序动态调度方法硬件系统结构示意图。

图 2： 基于指标预报和解相似度分析的光刻工序动态调度方法流程示意图。

具体实施方式

本发明提出的动态调度方法依赖于相关数据采集系统，由调度系统客户端和调度服务器实现。在实际半导体生产线光刻区动态调度中应用本发明的软硬件架构示意图如图 1 所示，本发明的实施方式如下。

步骤（1）：获取上述半导体生产线光刻区动态调度问题对应的数据。

包括设备数量、各设备的释放时间、待加工的工件的释放时间/加工时间/优先级/可加工机器组信息，并存储至调度数据库中，并采用“发明内容”第一节的方法，形成待求解的半导体生产线光刻区动态调度问题实例。

步骤（2）：光刻区动态调度问题分解

针对所获得的光刻区动态调度问题实例，采用“发明内容”第二节的方法，将该实例分解为设备选择调度子问题和工件排序调度子问题。在后续的步骤中，上述两个子问题迭代求解，形成最终的光刻区动态调度方案。

步骤（3）：光刻区动态调度问题求解

针对上述光刻区动态调度问题实例，采用“发明内容”第三节和第四节的方法，求解上述问题，形成动态调度方案。

步骤（3.1）：差分进化算法初始化

设定差分进化算法与调度子问题性能指标预报模型的相关参数：

差分进化算法中的解集合规模： $NP=30$ ；

差分进化算法中的缩放因子： $F=0.95$ ；

差分进化算法中的交叉率： $CR=0.5$ ；

差分进化算法中的精确评价比例： $p=20\%$ ；

差分进化算法中的停止条件：需要根据不同的问题场景，设定不同的算法运

行时间限制，具体见后续实验结果说明；

步骤（3.2）：调度子问题性能指标预报模型初始化

调度子问题性能指标预报模型中的区间划分参数： $l=6$ ；

调度子问题性能指标预报模型中的径向基函数的参数： a_i 维数为 $2l+3$ 维，其每一维的取值从 $[-1 \ 1]$ 中随机选取， b_i 为 1 维，取值为从 $[\frac{1}{100} \ \frac{13}{300}]$ 随机选取；

调度子问题性能指标预报模型中的隐层节点数： $L=20$ ；

调度子问题性能指标预报模型中的惩罚因子 ν ，按经验取 2^{-15} ；

在上述参数设置基础上，采用本发明“发明内容”第四节步骤（2）的方法，产生设备选择调度子问题的 NP 个初始解形成初始解集合，然后，随机选择 $NP/2$ 个解，采用分枝定界算法进行精确评价，获得各个解对应的调度目标函数值（即总加权流经时间）。在此基础上，采用“发明内容”第三节的预报模型学习方法，利用所获得的调度子问题及其对应的目标函数值的数据，获得初始的调度子问题性能指标预报模型。

步骤（3.3）：差分变异和交叉

采用“发明内容”第四节步骤（3）和步骤（4）的方法，对解集合中的解，首先进行差分变异操作，然后进行交叉操作。操作完成后，形成新的解集合。

步骤（3.4）：评价与选择

采用“发明内容”第四节步骤（5）的方法，对解集合中的解，首先采用调度子问题性能指标预报模型进行粗评价，在此基础上，选择前 $p\%$ 的较好解进行精确评价，然后，采用标准轮盘赌方法进行选择，形成新一代解集合。

步骤（3.5）：在线训练更新预报模型参数，形成新的调度子问题性能指标预报模型

采用“发明内容”第三节的方法，结合步骤（3.4）中获得的前 $p\%$ 的较好解的精确评价数据，在线训练，更新原预报模型参数，形成新的调度子问题性能指标预报模型。

步骤（3.6）：算法终止条件判别

若算法运行时间已达到设定值，则停止；否则转步骤（3.3）进行迭代优化。

根据上述所提出的基于指标预报和解相似度分析的光刻工序动态调度方法，本发明做了大量的仿真试验，运行的硬件环境为：P4 2.8GHz CPU，4G RAM，操作系统为 Windows 7。由于篇幅所限，仅列出部分实验结果。首先，基于实际光刻区的生产数据，随机产生若干动态调度问题实例，其中，工件的加工时间、权重、释放时间按如下方式产生：

$$\begin{aligned} p_{l,j} &\sim U[1,20] \\ w_j &\sim U[1,10] \\ r_j &\sim U\left[0, \frac{n}{m} \times \text{avg}(p_j) \times \delta\right] \end{aligned}$$

其中， $\delta(\delta \in R^+)$ 为阻塞系数，反映该问题中工件释放间隔时间的密集程度； n 为工件数量， m 为机器数量， $U[\cdot, \cdot]$ 表示给定范围的均匀分布， $\text{avg}(p_{l,j})$ 为所有加工时间的平均值。为验证本发明方法的有效性，在数值计算中对上述已产生的问题实例基础上对工件的加工时间、释放时间参数施加了随机扰动。表 1 列出了本发明所提出的调度方法（简记为 SM-DE）与文献中的典型差分进化优化算法（M.G. Epitropakis, D.K. Tasoulis, N.G. Pavlidis, V.P. Plagianakos, M.N. Vrahatis. Enhancing differential evolution utilizing proximity-based mutation operators. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2011, 15(1):99-119，简记为 Pro-DE）在所随机产生的调度问题实例上的应用对比。

表 1 实验结果对比

$[n, m, \delta]$	Pro-DE		SM-DE		算法运行时间 (s)
	avg_{TFT}	std_{TFT}	avg_{TFT}	std_{TFT}	
[100, 10, 0.5]	11681.5	179.9	11589.0	169.2	100.0
[100, 10, 0.6]	11710.2	153.0	12003.7	141.8	100.0
[100, 10, 0.7]	11224.4	181.7	10112.0	150.1	100.0
[100, 10, 0.8]	9731.1	133.7	9287.3	124.7	100.0
[100, 10, 0.9]	10090.1	219.7	9027.7	153.1	100.0
[100, 10, 1.0]	9467.1	197.6	9729.2	181.5	100.0

[100, 10, 1. 1]	8758. 3	176. 4	8285. 9	158. 2	100. 0
[100, 10, 1. 2]	7805. 0	113. 2	7278. 2	113. 0	100. 0
[100, 10, 1. 3]	7681. 4	86. 4	7635. 2	103. 9	100. 0
[100, 10, 1. 4]	7787. 7	115. 4	7641. 6	120. 5	100. 0
[100, 10, 1. 5]	7454. 4	69. 6	7444. 1	69. 2	100. 0

在表 1 中, avg_{TFT} , std_{TFT} 分别为调度问题实例采用相应算法求解 20 次得到的总加权流经时间的平均值和方差, 算法允许运行时间为 100 秒, 在表 1 中较好的解标注为“加黑”状态。可以看出, 在算法允许运行时间相同的条件下, SM-DE 在绝大多数的情况都优于 Pro-DE 算法。

权 利 要 求

1. 基于指标预报和解相似度分析的光刻工序动态调度方法，其特征在于，该方法是一种采用基于解相似度分析的差分进化算法进行迭代优化的过程中，不断地利用精确评价所获得的工件排序调度子问题实例和调度解性能指标数据，对工件排序调度子问题性能指标预报模型进行在线学习，以提升预报模型的预报精度，进而改善差分进化算法寻优效率和效果的方法；所述方法在计算机上依次按如下步骤实现：

步骤（1）：获取半导体生产线光刻区动态调度问题对应的数据；

基于半导体生产线上的制造执行系统或其他数据采集系统，获取与光刻区动态调度问题相关的数据，具体包括光刻区可用设备数量、各设备的释放时间、光刻板类型及数量、待加工的各工件的释放时间/加工时间/优先级/可加工设备信息，并存储至调度数据库中，形成待求解的半导体生产线光刻区动态调度问题实例；

步骤（2）：光刻区动态调度问题分解

针对所获得的光刻区动态调度问题实例，将该实例分解为设备选择调度子问题和工件排序调度子问题；

步骤（3）：光刻区动态调度问题求解

步骤（3.1）：差分进化算法初始化

设定差分进化算法与调度子问题性能指标预报模型的相关参数：

差分进化算法中的解集合规模 NP ，在区间 $[20, 1000]$ 之间；

差分进化算法中的缩放因子 F ，在区间 $[0.5, 1]$ 之间；

差分进化算法中的交叉率 CR ，在区间 $[0, 1]$ 之间；

差分进化算法中的精确评价比例 p ，在区间 $[10\%, 30\%]$ 之间；

差分进化算法中的停止条件：需要根据不同的需要，设定不同的算法运行时间限制，在区间 $[5 \text{ 秒}, 2000 \text{ 秒}]$ 之间；

步骤（3.2）：调度子问题性能指标预报模型初始化

调度子问题性能指标预报模型中的区间划分参数 I ，在区间 $[4, 8]$ 之间；

调度子问题性能指标预报模型中的径向基函数的参数： a_i 维数为 $2I+3$ 维，其

每一维的取值从 $[-1 \ 1]$ 中随机选取, b_i 为1维, 取值为从 $[\frac{1}{100} \ \frac{13}{300}]$ 随机选取;

调度子问题性能指标预报模型中的隐层节点数 L , 在区间 $[5,100]$ 之间;

调度子问题性能指标预报模型中的惩罚因子 ν , 按经验取 2^{-15} ;

在上述参数设置基础上, 随机产生设备选择调度子问题的 NP 个初始解形成初始解集合, 然后, 随机选择 1 至 NP 个解, 采用分枝定界算法进行精确评价, 获得各个解对应的调度目标函数值; 在此基础上, 采用极限学习机的在线学习方法, 利用所获得的调度子问题及其对应的目标函数值的数据, 获得初始的调度子问题性能指标预报模型;

步骤 (3.3): 差分变异和交叉

对解集合中的解, 首先计算其距离矩阵, 在此基础上进行基于解相似性分析的差分变异操作, 最后进行交叉操作; 操作完成后, 形成新的解集合;

步骤 (3.4): 基于粗评价与精确评价相结合的评价与选择

对解集合中的解, 首先采用调度子问题性能指标预报模型进行粗评价, 在此基础上, 从当前解集合中选择 1 至 NP 较好解进行精确评价, 然后, 采用标准轮盘赌方法进行选择, 形成新一代解集合;

步骤 (3.5): 使用极限学习机的在线学习方法, 在线学习更新调度子问题性能指标预报模型参数, 形成新的调度子问题性能指标预报模型;

步骤 (3.6): 算法终止条件判别

若算法运行时间已达到设定值, 则停止; 否则转步骤 (3.3) 进行迭代优化。

2. 如权利要求 2 所述基于指标预报和解相似度分析的光刻工序动态调度方法, 其特征在于, 所述的调度子问题性能指标预报模型的输入包括如下属性:

- 分配至该机器 l 的工件的总加权加工时间: $\sum_{j \in \Omega_i} w_j p_{l,j}$
- 光刻板类别数量: NB
- 指派到当前光刻机的工件释放时间的集中程度: Cr
- 采用最小加权加工时间规则所获得的目标函数值: $TWFT_{swpt}$
- 区间 i 对应工件的总数量: $|\Omega_i|, i = 1, 2, \dots, L$.
- 区间 i 对应工件的总加权加工时间: $\sum_{j \in \Omega_i} w_j p_{l,j}, i = 1, 2, \dots, L$.

其中, $p_{l,j}$, w_j 和 r_j 分别为工件 j 在光刻机 l 上的加工时间、权重、释放时

间, $j = 1, 2, \dots, n$, Ω_i 为分配到区间 i 的工件集合, 区间的划分方法为: 把整个调度时间轴划分为 I 个区间, I 为整数, 每个区间的长度为 $u = (r_{i,max} + p_{i,max} - r_{i,min})/I$, $p_{i,max}$ 为所有工件中加工时间的最大值, $r_{i,max}$ 和 $r_{i,min}$ 为所有工件释放时间的最大值和最小值, 区间的起始时刻为 $r_{i,min}$;

Cr 的计算步骤如下:

- 1) 令 $L_i (i = 1, 2, \dots, I)$ 表示第 i 个区间的总负载, $L_{i,j}$ 为工件 j 对 L_i 的贡献;
- 2) 对工件 $j (j \in \Omega_i)$, 令 $st_j = r_j$, 则 $c_j = r_j + p_{l,j}$, 通过下式计算 $L_{i,j}$:

$$L_{i,j} = \begin{cases} 0 & i \times u \leq st_j \\ i \times u - st_j & (i-1) \times u < st_j \leq i \times u \\ u & st_j < i \times u \leq c_j \\ c_j - (i-1) \times u & (i-1) \times u < c_j \leq i \times u \\ 0 & c_j < i \times u \end{cases}$$

- 3) 计算第 i 个区间的总负载 $L_i = \sum_{j \in \Omega_i} L_{i,j}$;

- 4) 通过下式计算 Cr :

$$Cr = \sum_{i=1}^I (\max(L_i - u, 0))^2$$

在上述属性中, 两个与调度时间区间相关的属性, $|\Omega_i|$ 和 $\sum_{j \in \Omega_i} w_j p_{l,j}$, 其计算步骤如下:

- 1) 将该光刻机上的所有工件按其释放时间由小到大的顺序排序, 不失一般性, 记 $j'_1, j'_2, \dots, j'_n$ 为排序后的各个工件, $r'_1, r'_2, \dots, r'_n$ 为对应的释放时间;
- 2) 对工件 $j'_k (k = 1, 2, \dots, n)$, 如果 $iu \leq r'_k < (i+1)u$ 成立, 其中 i 为时间窗口的序号, 则 j'_k 属于第 i 个时间窗口对应的工件集合;
- 3) 对每个时间窗口, $|\Omega_i|$ 为该时间窗口对应的工件数量, $\sum_{j \in \Omega_i} w_j p_{l,j}$ 为该时间窗口对应工件的加权加工时间之和;

按照上述输入属性选择方法, 对给定的单台设备的工件排序调度子问题, 用于构建预测模型的特征共有 $2I + 4$ 个, 根据问题规模的不同, I 的取值在区间 $[4, 8]$ 之间。

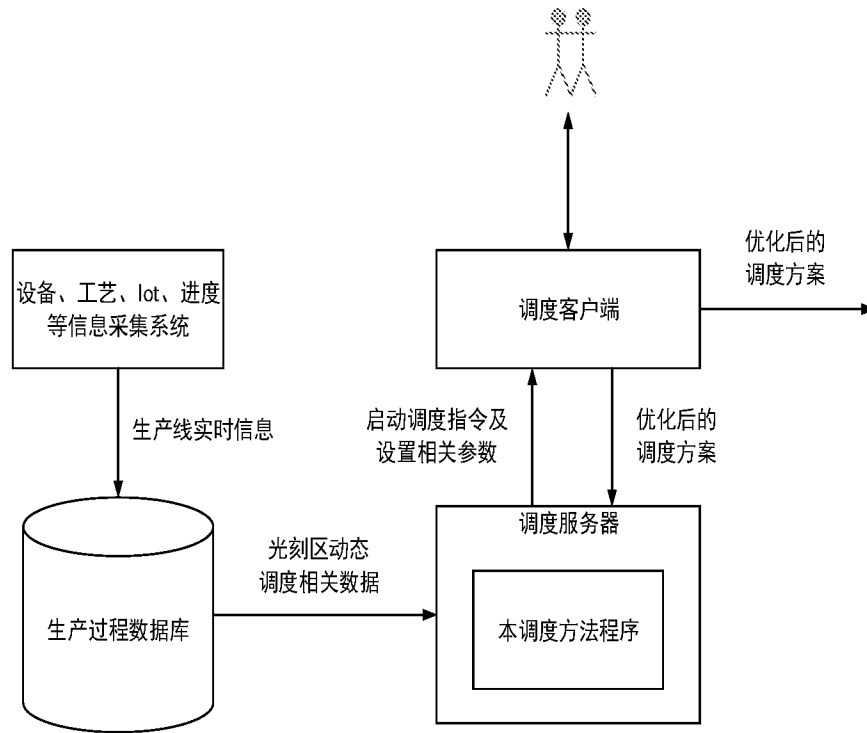


图 1

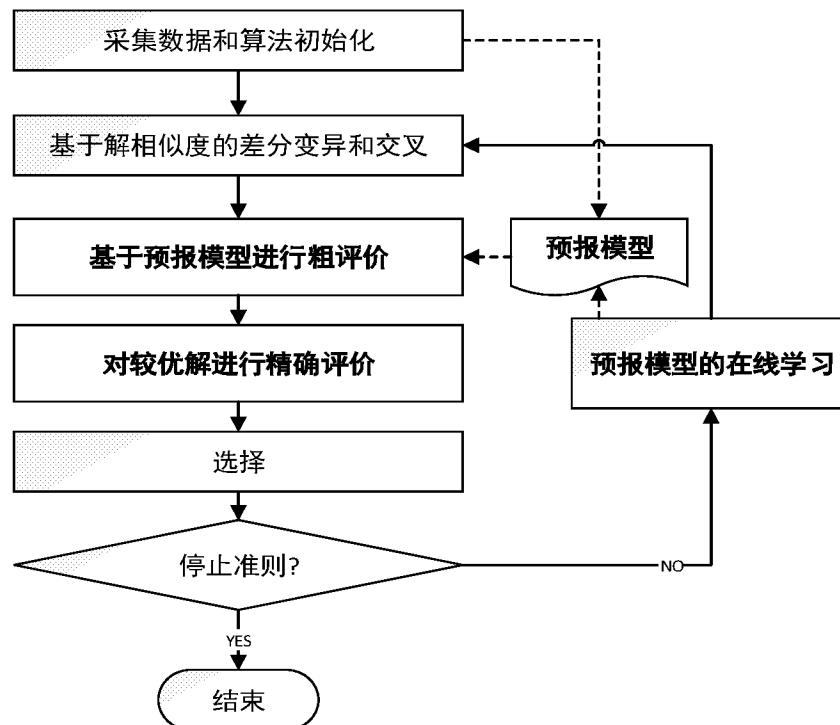


图 2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2014/094837

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G05B 19/418 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G05B; H01L; G06F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

WPI, EPODOC, CNPAT, CNKI, IEEE: etch, photoetch, lithography, dispatch, attemper, manage, dynamic, analyse

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 103310285 A (TONGJI UNIVERSITY) 18 September 2013 (18.09.2013) see description, paragraphs [0009]-[0042], and figure 2	1, 2
A	US 6604012 B1 (SAMSUNG ELECTRONICS CO., LTD.) 05 August 2003 (05.08.2003) the whole document	1, 2
A	JP 2005267371 A (TORESENTI TECHNOLOGIES K. K.) 29 September 2005 (29.09.2005) the whole document	1, 2

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date	“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	“&” document member of the same patent family
“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 14 May 2015	Date of mailing of the international search report 29 May 2015
--	---

Name and mailing address of the ISA State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimengqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No. (86-10) 62019451	Authorized officer WANG, Li Telephone No. (86-10) 82245262
--	--

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2014/094837

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 103310285 A	18 September 2013	None	
US 6604012 B1	05 August 2003	JP 3957964 B2	15 August 2007
		JP 2001185466 A	06 July 2001
		KR 20010038300 A	15 May 2001
		KR 100311077 B	02 November 2001
		TW 464942 A	21 November 2001
JP 2005267371 A	29 September 2005	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2014/094837

A. 主题的分类

G05B 19/418(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G05B; H01L; G06F

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

WPI, EPODOC, CNPAT, CNKI, IEEE: 光刻, 刻蚀, 蚀刻, 调度, 管理, 排程, 动态, 分析, etch, photoetch, lithography, dispatch, attemper, manage, dynamic, analyse

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 103310285 A (同济大学) 2013年 9月 18日 (2013 - 09 - 18) 参见说明书第[0009]-[0042]段, 附图2	1-2
A	US 6604012 B1 (三星电子股份有限公司) 2003年 8月 5日 (2003 - 08 - 05) 全文	1-2
A	JP 2005267371 A (TORESENTI TECHNOLOGIES K.K.) 2005年 9月 29日 (2005 - 09 - 29) 全文	1-2

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2015年 5月 14日

国际检索报告邮寄日期

2015年 5月 29日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN)
北京市海淀区蓟门桥西土城路6号
100088 中国

传真号 (86-10)62019451

授权官员

王丽

电话号码 (86-10)82245262

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2014/094837

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	103310285	A	2013年 9月 18日	无			
US	6604012	B1	2003年 8月 5日	JP	3957964	B2	2007年 8月 15日
				JP	2001185466	A	2001年 7月 6日
				KR	20010038300	A	2001年 5月 15日
				KR	100311077	B	2001年 11月 2日
				TW	464942	A	2001年 11月 21日
JP	2005267371	A	2005年 9月 29日	无			

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2009年7月)