

基于任务相匹配的半导体键合设备动态编组方法

高治军,彭佳玉,司雯

(沈阳建筑大学信息与控制工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 在半导体封装线上键合设备数量较大,传统的设备固定编组方法无法实现设备编组提供产能与加工任务需求产能动态匹配的现状下,提出一种基于加工任务相匹配的半导体键合设备动态编组方法,解决设备编组结果提供产能不足或提供产能冗余而造成资源浪费的问题.方法 利用图论中的连接矩阵表示设备编组关系的拓扑结构,给出设备编组封闭位置约束及设备类型与产品类型匹配约束,设计设备编组偏差、吻合率、设备编组惩罚和等评价指标,建立设备编组模型.结果 笔者对多组不同规模的数据进行仿真实验,通过数据对比,证明了所提出的键合设备动态编组方法在解决半导体封装线上键合设备编组问题的有效性.结论 键合设备动态编组方法适用于半导体封装线上的键合工艺段,能够在一定程度上减少产能冗余,减少资源浪费.

关键词 半导体封装线;动态匹配;需求产能;动态编组

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Dynamic Marshalling Method of Semiconductor Bonding Equipment Based on Task Matching

GAO Zhijun, PENG Jiayu, SI Wen

(School of Information and Control Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The number of bonding equipment on the semiconductor packaging line is relatively large, and it is usually necessary to group and manage the equipment during the production operation. Under the current situation that fixed equipment marshalling cannot achieve dynamic matching with the production capacity required by the processing task, a dynamic marshalling method of semiconductor bonding equipment based on task matching is proposed. Using the connection matrix in graph theory to represent the topology structure of the device grouping relationship, the device grouping closed position constraints and the device type and product type matching constraints are given model. Through simulation experiments on multiple sets of data of different sizes, the effectiveness of the proposed dynamic bonding method of bonding equipment in solving the problem of bonding equipment grouping on semiconductor packaging lines is verified.

收稿日期:2020-01-19

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFF0300304-04);辽宁省教育厅基础研究项目(lnjc201912)

作者简介:高治军(1978—),男,副教授,博士,主要从事无线传感器网络和智能优化理论方面研究.

The dynamic grouping method of bonding equipment is suitable for the bonding process section of the semiconductor packaging line, which can reduce the redundancy of production capacity and reduce the waste of resources to a certain extent.

Key words: semiconductor packaging line; equipment matrix; processing task capacity requirements; dynamic marshalling

随着半导体材料应用的日益广泛,其生产线的调度问题成为控制领域的研究热点.总体上,半导体生产线可以分为前道晶圆制造生产线和后道封装测试生产线^[1].现阶段针对晶圆制造生产线的研究较多,而缺少对封装测试生产线的研究.马继山等^[2]给出了一种半导体封装测试线的生产优化方案.利用OCR技术实现了设备状态的实时监控、远程发送操作指令等,能够在一定程度上提高半导体封装测试的自动化生产水平.一些学者比较了半导体组装与测试作业的不同调度规则和影响系统性能的因素^[3],研究分析得出,设计用于处理尽可能多的热批次的两个规则在最小化加权短缺方面表现最佳.姚丽丽等^[4]提出一种采用逻辑约束和调度规则双层优化控制的启发式正序排产算法,并给出一种新的预测开机控制优化调度方法,能够很好地缩短生产周期,提高生产效率.半导体封装测试生产线同时具有设备数量多、工艺复杂、产品生命周期短等特点,因此对半导体封装测试线的研究在整个半导体制造领域也具有很大的理论和应用价值.键合工序作为半导体封装过程的瓶颈工序^[5]之一,具有设备数量最多、加工时间最长、设备间产能差异大等特点,因此键合设备管理成为生产线管理的重点、难点^[6].

半导体封装线是将通过测试的晶圆按照产品型号及功能需求制成独立芯片的过程^[7].在现有产能之下,如果不能充分发挥键合工艺段中设备的生产潜力,将会制约半导体行业的发展^[8].现阶段半导体封装线上键合工艺段多由工人根据生产经验对设备进行固定编组管理,即根据设备能加工的产品

类型确定编组结果,设备编组一旦确定组内包含的设备数目即固定,导致设备组的加工能力随即确定^[9].这样的编组方式使得设备的提供产能无法很好地匹配加工任务的需求产能,设备编组不能实现与加工任务间的动态匹配,从而易造成机器设备空闲,生产线管理混乱等情况,限制了生产效率也造成了资源浪费.当前半导体产业日益趋向小批量、多品种的生产模式,传统的固定编组模式使得半导体生产受到限制,易造成资源浪费.对半导体键合设备进行动态编组将提高半导体封装线的设备利用率、缩短生产周期、降低生产成本,更符合生产实际.

对于编组问题,国内外的研究多集中在铁路交通领域,而少有对生产调度优化方面的研究.方开莎等^[10]在列车编组可变前提下构建多目标优化模型,证明了采用大交路大编组、小交路小编组的模式能有效平衡乘客等待时间与城市轨道交通运营企业效益.戎亚萍等^[11]构建了基于多编组模式下的多目标列车开行方案优化模型,认为在客流不均衡系数较大时,宜采用多编组运输组织方式.R. Jacob等^[12]开发了一种针对动态编组的分类计划编码,将列车分类方法简单地表征为计划类别,应用这种有效的编码实现更简单精确的分类,为改进列车编组实践提供了坚实的基础.王冬海等^[13]论述了在全自动运行线路上通过全自动化技术手段在线调整车辆的编组模式,从固定编组优化成灵活编组,在客流高峰时段实现“大编组,高密度”运营,在客流非高峰时段实现“小编组,高密度”运营,平衡了运力及服务水平之间的矛盾.万路军等^[14]采用量子遗传算法实现了智能体编

组,但是没有实现应对不确定事件的动态战略调整。

因此,针对现阶段半导体封装线键合设备编组无法实现提供产能与需求产能动态匹配的问题,笔者提出一种基于加工任务相匹配的半导体键合设备编组方法,通过建立设备之间的关联关系矩阵,建立半导体键合设备动态编组模型,并结合图论的方法实现设备之间的动态编组。研究表明,笔者所提出的动态编组问题能够在一定程度上减少产能冗余,节约生产资源。

1 半导体键合设备动态设备编组方法

1.1 模型设计

当把几个设备编成一组即生成了一个独立的生产单元时,由于半导体行业生产的晶圆不可分割的特殊性,编组中只能选一个设备来加工晶圆,这样在同一加工时间浪费了其余几个设备的生产能力,造成了很大的资源浪费,因此笔者建立设备编组模型,根据生产任务的需求产能将设备灵活编组,以提高生产设备的利用率,进而提高整个生产线的效率。

有向图^[15]是一种由许多节点和分支组成的、用来对所研究的系统结构进行描述的图形。其中各个节点分别表示系统的各个组件,分支及其方向表示组件间的因果关系及作用方向。半导体键合工序中加工设备的分布和连接形状本身就构成了网络图,结合有向图的概念,来建立基于加工任务匹配的半导体键合设备编组模型。

在图论中,通常用邻接矩阵来表示有向图,如果图中有 n 个节点,则用 $n \times m$ 的矩阵 M 表示,定义为

$$M_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{存在从节点 } i \text{ 指向节点 } j \text{ 的边;} \\ 0, & \text{节点 } i, j \text{ 没有边连接。} \end{cases} \quad (1)$$

1.2 编组约束

(1) 同一编组内设备完成工序相同。

(2) 同一编组内所包含设备类型一致。

(3) 同一编组内所有设备可加工相同类型产品。

(4) 同一编组中所有设备为相邻设备。

(5) 编组设备不能交叉,同一设备只能包含在一个编组中。

(6) 未被编组的设备不能封闭到已编组区域的内部。

1.3 编组流程

半导体封装线上键合设备动态编组流程如图1所示。

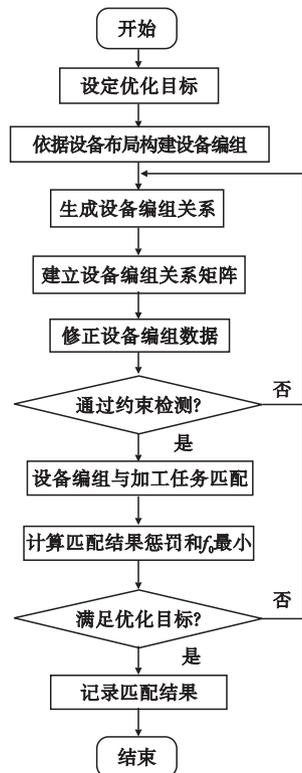


图1 半导体键合设备动态编组流程图

Fig. 1 Dynamic marshalling flow chart of semiconductor bonding equipment

步骤1 设置设备编组的优化目标建立设备编组惩罚和函数^[16]。

$$f_u = \sum_{p=1}^{PN} (a_p PC_p + \beta_p EC_p) \quad (2)$$

式中: PC_p 为设备编组提供产能相对加工任务 W_p 的不足; EC_p 为提供产能匹配加工任务 W_p 的冗余; a_p 为对于加工任务 p 的产能不足惩罚权重; β_p 对于加工任务产能冗余惩

罚权重. 设置设备编组的优化目标为惩罚和最小.

步骤2 引入图论的方法. 将待编组工序上的所有设备抽象成二维平面上的一个设备节点^[17], 以 n 行 m 列设备矩阵 M 表示所有设备节点, 其中 $M_{i,j}$ 表示第 i 行 j 列设备, 如 $M_{1,1}$ 表示位于设备矩阵 M 中第 1 行第 1 列的设备.

$$M = \begin{bmatrix} M_{1,1} & M_{1,2} & \cdots & M_{1,m} \\ M_{2,1} & M_{2,2} & \cdots & M_{2,m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ M_{n,1} & M_{n,2} & \cdots & M_{n,m} \end{bmatrix} \quad (3)$$

步骤3 将所有相邻设备节点两两相连, 随机产生设备之间的关联系数用 0、1 表示, “0”表示设备之间无关联关系, 即两个设备不在一编组组内, “1”表示设备之间有关联关系, 即两个设备被编在一组内构成一个如下图所示的网络结构图^[18].

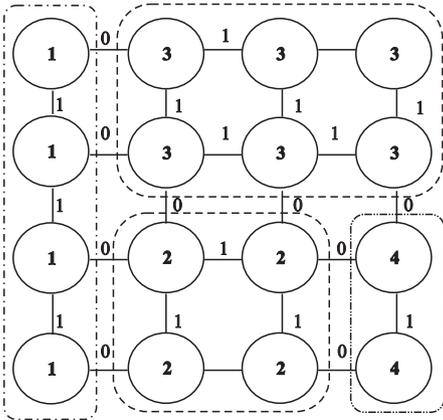


图2 设备关联关系网络结构图

Fig. 2 Structure diagram of device association network

步骤4 依据设备之间的关联关系, 得出邻接矩阵并进行横向与纵向的拆分, 建立设备编组行关联关系矩阵 LR 和列关联关系矩阵 LC , 并建立临时设备编组 G .

行之间的关联关系矩阵 LR 如式(4)所示, $L_{i,j}^r$ 表示第 j 列的第 i 行和第 $i+1$ 的设备之间的行关联系数, $L_{i,j}^r \in \{0, 1\}$, $i \in \{1, 2, \dots, n-1\}$, $j \in \{1, 2, \dots, m\}$ 取“1”表示相邻两行设备有关联可编为一组, 取“0”

表示相邻两行设备无关联不可编为一组. 同理, 列之间的关联关系矩阵 LC 如式(5)所示. $L_{i,j}^r$ 表示第 j 列和第 $j+1$ 列的设备之间的列关联系数, $L_{i,j}^r \in \{0, 1\}$, $i \in \{1, 2, \dots, n\}$, $j \in \{1, 2, \dots, m-1\}$ 取“1”表示相邻两列设备有关联可编为一组^[19-20], 取“0”表示相邻两列设备无关联不可编为一组.

$$LR = \begin{bmatrix} L_{1,1}^r & L_{1,2}^r & \cdots & L_{1,m}^r \\ L_{2,1}^r & L_{2,2}^r & \cdots & L_{2,m}^r \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ L_{n-1,1}^r & L_{n-1,2}^r & \cdots & L_{n-1,m}^r \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$LC = \begin{bmatrix} L_{1,1}^c & L_{1,2}^c & \cdots & L_{1,m-1}^c \\ L_{2,1}^c & L_{2,2}^c & \cdots & L_{2,m-1}^c \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ L_{n,1}^c & L_{n,2}^c & \cdots & L_{n,m-1}^c \end{bmatrix} \quad (5)$$

通过生成的行、列关联关系矩阵 LR 、 LC 将关联在一起的设备编为一组, 赋予一个临时编组号 g_t , g_t 表示第 t 个设备编组的编组号, 且 $g_t \in \{g_1, g_2, \dots, g_{GN}\}$, $t \in \{1, 2, \dots, GN\}$, GN 表示所有编组的最大编组号.

步骤5 修正编组关联关系.

由步骤3得到的设备编组临时编码矩阵会存在符合编组规则, 但是不符合实际编组情况的情况, 所以需要通过对步骤3中每个编组标识的临时编组号 g_i , 利用行扫描检测与列扫描检测, 修正编组关系.

行检测是从第 1 行开始检测到第 n 行, 检测每一行关联系数是否正确, 如第 i 行第 j 列的设备编组号 $g_{i,j}$ 与第 i 行第 $j+1$ 列的设备编组号 $g_{i,j+1}$ 相等, 则设备行关联 $L_{i,j}^r$ 关系应该取“1”, 如果是“0”, 应该将其置“1”. 共进行 $n \times (m-1)$ 次检测校验. 列检测与行检测同理修正列关联关系.

步骤6 设备编组约束检测.

包含设备编组封闭位置关系约束与设备类型与加工类型匹配两部分检测, 任意一个约束检测不满足, 则编组结果无效, 返回步骤3.

(1) 封闭位置关系约束

同一设备组构成的封闭区域内不能包含不属于该组的其他设备. 此约束能够避免设备组管理人员管辖范围重叠而造成生产管理组织混乱的情况.

判断设备组的闭合范围内是否包含其他的组设备, 需要根据设备编组矩阵 G 中的编组关系, 分别进行行、列检测, 如果检测出一个设备编组中所有设备构成的闭合区域内包含非本编组的设备, 则认为此次的设备编组不合理. 这个检查过程需要根据行列检测结果共同确定编组结果是否合理.

假设变量 $gz_{t,i,j}$, 当第 i 行第 j 列设备所属编组的编组信息与第 t 个编组的编组号同时, $gz_{t,i,j}$ 等于“1”, 否则等于“0”.

$$gz_{t,i,j} = \begin{cases} 1, & g_{i,j} = g_t; \\ 0, & g_{i,j} \neq g_t. \end{cases} \quad (6)$$

其中, $i \in \{n1_t, n2_t\}, j \in \{m1_t, m2_t\}$.

$F_{i,j}$ 表示第 t 个设备编组的第 i 行中是否包含不属于第 t 个编组的设备, “1”表示不包含, “0”则表示包含不属于第 t 个编组的设备. $F_{i,j}$ 表示第 t 个设备编组的第 j 列中是否包含不属于第 t 个编组的设备.

$$F_{t,j} = \begin{cases} 1, & \sum_{j=m1_t, i}^{m2_t, i} gz_{t,i,j} = (m2_{t,j} - m1_{t,j}); \\ 0, & \sum_{j=m1_t, i}^{m2_t, i} gz_{t,i,j} < (m2_{t,j} - m1_{t,j}). \end{cases} \quad (7)$$

F_t 表示第 t 个设备编组所构成封闭区域内是否包含非编组的设备, 为“0”表示第 t 个设备编组的 $F_{t,i}$ 行检测结果和 $F_{t,j}$ 列检测结果同时确定编组内有非编组 t 的设备, 为“1”则表示不包含非编组 t 的设备.

F 表示设备编组结果满足设备位置约束, 当所有设备编组构成封闭区域都不包含非编组的设备, 即满足封闭约束的编组数等于设备编组组数, 说明编组结果合理. 如果不满足设备编组封闭位置关系约束, 则返回步骤 3 重新开始.

(2) 设备类型与加工产品类型匹配约束

产品类型 k_x 共 kn 个产品类型, 设备类型 K_N 共 KN 个设备类型. 产品类型与设备类

型匹配关系矩阵 Kk 可以表示为式(8), 其中若 Kkl_{k_y, k_x} 为“1”则表示产品类型与设备类型匹配, 为“0”则不匹配.

$$Kk = \begin{bmatrix} Kkl_{1,1} & Kkl_{1,2} & \cdots & Kkl_{1,kn} \\ Kkl_{2,1} & Kkl_{2,2} & \cdots & Kkl_{2,kn} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Kkl_{KN,1} & Kkl_{KN,2} & \cdots & Kkl_{KN,kn} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

设备类型与设备匹配关系矩阵 Mk 如式(9)所示, 其中 $Mkl_{i,j,y}$ 表示设备类型与设备匹配关系, 其中若 $Mkl_{i,j,y}$ 为“1”则表示设备与设备类型匹配, 为“0”则表示设备与设备类型不匹配.

$$Mk = \begin{bmatrix} Mkl_{1,1,1} & Mkl_{1,1,2} & \cdots & Mkl_{1,1,KN} \\ Mkl_{1,2,1} & Mkl_{1,2,2} & \cdots & Mkl_{1,2,KN} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Mkl_{n,m,1} & Mkl_{n,m,2} & \cdots & Mkl_{n,m,KN} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

MK 表示设备与产品类型匹配关系矩阵如式(10)所示, 通过 $Mk = MK \times Kk$ 得到. 其中若 $Mkl_{i,j,x}$ 为“1”则表示设备与设备类型匹配, 为“0”则设备与设备类型不匹配.

$$MK = \begin{bmatrix} Mkl_{1,1,1} & Mkl_{1,1,2} & \cdots & Mkl_{1,1,KN} \\ Mkl_{1,2,1} & Mkl_{1,2,2} & \cdots & Mkl_{1,2,KN} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Mkl_{n,m,1} & Mkl_{n,m,2} & \cdots & Mkl_{n,m,KN} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

对于设备编组 g_i , 它里面所涵盖的设备类型用集合 $Mg_i = \{M_{i,j} | g_{i,j} = g_t\}$ 表示, 如果对于任意的设备编组 g_t 和产品类型 k_x , $\exists (Mg_t \subseteq M_{k_x}, k_x \in k)$ 成立, 则设备编组符合设备类型和加工产品类型的匹配约束.

步骤7 设备编组与加工任务匹配.

构造基于产品类型的设备编组提供能力矩阵 Gga , ga_{t,k_x} 是设备编组 g_t 生产 k_x 类型产品的加工能力, $ga_{t,k_x} = (\sum_{i=n1_t}^{n2_t} \sum_{j=m1_t}^{m2_t} V_{i,j,k})gT$, $i \in \{n1_t, n2_t\}, j \in \{m1_t, m2_t\}$.

$$Gga = \begin{bmatrix} ga_{1,k_1} & ga_{1,k_2} & \cdots & ga_{1,k_{kn}} \\ ga_{2,k_1} & ga_{2,k_2} & \cdots & ga_{2,k_{kn}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ ga_{GN,k_1} & ga_{GN,k_2} & \cdots & ga_{GN,k_{kn}} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

构造加工任务的产能需求集合 GW , $GW = \{gw_p | p \in \{1, 2, \dots, PN\}\}$ 加工任务的需求产能与设备组加工能力匹配序列为 $Gamc = \{\langle gw_p, gma^p \rangle | p \in \{1, 2, \dots, PN\}\}$, 其中, gma^p 表示设备组加工能力, gw_p 表示加工任务需求能力。

步骤 8 设备编组结果的评价指标为设备编组和加工任务的惩罚和 f_0 , 优化目标为设备编组与加工任务惩罚和最小 $\min f_0$ 。若满足优化范围则将临时编组结果保存下来, 若不满足返回步骤 3, 直到达到最大迭代次数, 停止编组并取最小惩罚和所对应的编组作为最优编组结果。

1.4 编组方法分析

(1) 键合设备动态设备编组方法将改善以往固定编组模式下空闲设备多, 造成产能冗余的问题。以不同的产能需求为依据对设备进行动态编组, 将实现设备编组的提供产能与加工任务的需求产能动态匹配。该编组方法能够使同设备做组里的全部设备始终在一个封闭互联的区域内, 便于对生产线上工人对同一设备组的管控。

(2) 以各设备能够加工的产品类型为依据进行编组, 而不再仅仅依据设备类型, 可以考虑到加工任务要求的产品类型, 体现设备编组结果受加工任务驱动的特点, 增加了设备编组的可变化性。

(3) 利用图论中有向图的概念建立设备编组模型矩阵, 通过邻接矩阵的变化, 改变设备之间的关联关系, 实现设备的动态编组。

2 仿真实验与分析

笔者的仿真实验基于 Matlab 软件实现, 运行环境为 Win10x64, Intel (R) Core (TM) i5-4200U CPU @ 1.60GHz, Matlab R2016b, 内存为 8GB。仿真实验中, 设备分为 A、B、C 三种类型, 其中 a 类型产品只能由 A、B 类型设备加工, b 类型产品只能由 B、C 类型设备加工。

2.1 评价指标的设计

生产编组偏差 (Deviation of device marshalling results) d 为设备编组组数 GN 与加工任务数 PN 之差。

$$d = GN - PN. \quad (12)$$

由于生产线要求设备编组内可加工产品类型与其加工任务产品类型一致, 而且编组设备所构造的区域内不可以包含非此编组的设备或设备组, 所以生成的编组结果会有无法通过约束检测的情况。吻合率 (Rate of detection by constraint) r 表示生成编组结果通过约束检测的比例, F_g 表示没通过约束检测的编组组数。

$$r = \frac{(GN - F_g)}{GN} \times 100\%. \quad (13)$$

实际生产中, 设备组提供产能冗余会加快生产, 但也造成了资源浪费, 而产能配置不足会延迟生产造成拖期。设备编组的优化目标是设备分组与加工任务惩罚和 f_0 最小, 则获取到最优的设备编组结果。

2.2 仿真结果分析

表 1 为需求产能集合内数据分布程度密集时, 基于需求产能匹配的半导体键合设备编组方法针对不同设备规模的设备组进行编组的实验结果。表 2 为当需求产能集合内部数据分布离散时, 基于需求产能匹配的半导体键合设备编组方法针对不同设备规模的设备组进行编组的实验结果。

表 1 产能密集时的设备编组仿真结果对比

Table 1 Comparison of simulation results of equipment marshalling with dense capacity

设备规模	距离参数 d_c	f_0	d	r
3 × 4	0.20	113.12	1.57	87.98
4 × 4	0.40	113.27	1.76	78.80
7 × 7	0.60	134.78	9.32	95.53
10 × 10	1.20	255.60	23.56	86.78
15 × 15	3.00	310.01	50.24	91.25

从表 1 和表 2 中得知, 基于需求产能匹配的半导体设备编组方法是具有可行性的,

可以实现不同设备规模下的设备编组。

表2 产能离散时的设备编组仿真结果对比

Table 2 Comparison of simulation results of equipment marshalling with discrete capacity

设备规模	距离参数 d_c	f_0	d	r
3×4	0.20	134.82	1.50	77.00
4×4	0.40	89.17	1.30	88.50
7×7	0.60	154.31	9.59	96.40
10×10	1.20	258.46	22.3	92.50
15×15	3.00	282.82	52.23	95.90

以4×4设备规模的编组得到的惩罚和结果最小的编组结果为例,如图3所示。将16个设备抽象成16个节点建立设备矩阵,通过邻接矩阵生成各个设备之间的关联关系,表示设备之间行关联或列关联,然后将直接相互关联或间接相互关联的设备编为一组,生成临时设备编组结果,再对其进行封闭区域约束检测以及设备类型与加工产品类型的匹配约束检测,将满足约束检测的设备编组结果与加工任务进行匹配。如图3所示,将16个设备编为4个生产单元,设备编组组数等于加工任务数,说明编组偏差为0,所有的设备都进行加工生产。

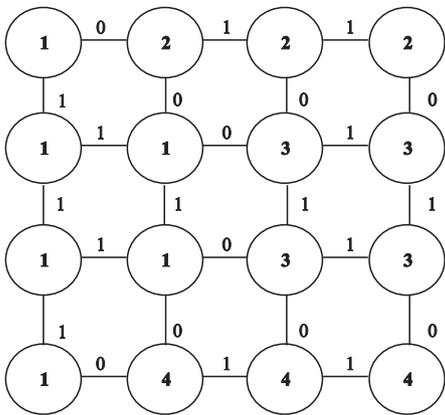


图3 4×4设备规模的编组结果

Fig. 3 The marshalling result of 4×4 device scale

从图中可以看出,此编组结果满足封闭约束条件,设备生产单元之间相互不交叉,并且将A和B类型设备编在一个生产单元来加工a类型产品,B和C类型设备编在一个

生产单元来加工b类型产品,符合产品类型与设备类型匹配关系的约束。

3 结 语

针对半导体封装线上的固定设备编组无法实现与加工任务的需求产能的动态匹配的问题,将图论的方法应用于设备编组中,建立能够与加工任务需求产能相匹配的半导体键合设备编组模型。通过设备之间的关联关系矩阵,改变设备之间的编组关系。在不同加工任务下对该编组模型进行仿真实验,验证了设备编组模型可以实现动态编组,改善了以往固定编组资源浪费的问题。综上,基于半导体封装线的动态设备编组方法实现了设备编组与加工任务产能需求的灵活匹配,在一定程度上实现了动态编组。

参考文献

- [1] 肖荣俊,陈禾,黄俊兵,等. 半导体封装测试生产线模型及其调度方法[J]. 北京理工大学学报,2013,33(11):1161-1164.
(XIAO Canjun, CHEN He, HUANG Junbing, et al. Math model and scheduling method for the semiconductor assembling and testing line [J]. Transactions of Beijing institute of technology, 2013, 33(11): 1161-1164.)
- [2] 马继山,张志胜. 一种新型的基于OCR技术的半导体生产自动化解决方案[J]. 机械设计与制造工程,2019,48(5):51-56.
(MA Jishan, ZHANG Zhisheng. A new solution of semiconductor production automation based on OCR technology [J]. Machine design and manufacturing engineering, 2019, 48(5): 51-56.)
- [3] JIA Shihui, MORRICE D J, BARD J F. A performance analysis of dispatch rules for semiconductor assembly & test operations[J]. Journal of simulation, 2018, 13(3): 1-13.
- [4] 姚丽丽,史海波,刘昶. 半导体封装测试生产线排产研究[J]. 自动化学报,2014,40(5):892-900.
(YAO Lili, SHI Haibo, LIU Chang. Research on scheduling in semiconductor assembly and test manufacturing [J]. Acta automatica sinica, 2014, 40(5): 892-900.)
- [5] 张国辉,刘昶,姚丽丽,等. 半导体封装测试生产线瓶颈检测的一种方法[J]. 电子器件,2015,38(1):44-48.
(ZHANG Guohui, LIU Chang, YAO Lili, et al. A method of bottleneck detection of semiconductor assembly and test production line [J]. Chinese journal of electron devices,

- 2015,38(1):44-48.)
- [6] 沈熙磊. 半导体封装行业研究报告[J]. 半导体信息,2011,2(2):28-29.
(SHEN Xilei. Semiconductor packaging industry research report [J]. Semiconductor information. 2011,2(2):28-29.)
- [7] 贾鹏德,吴启迪,李莉. 性能指标驱动的半导体生产线动态派工方法[J]. 计算机集成制造系统,2014,20(11):2808-2813.
(JIA Pengde, WU Qidi, LI Li. Objective-driven dynamic dispatching rule for semiconductor wafer fabrication facilities [J]. Computer integrated manufacturing systems, 2014, 20(11):2808-2813.)
- [8] 吴启迪,马玉敏,李莉,等. 数据驱动下的半导体生产线动态调度方法[J]. 控制理论与应用,2015,32(9):1233-1239.
(WU Qidi, MA Yumin, LI Li, et al. Data-driven dynamic scheduling method for semiconductor production line [J]. Control theory and applications, 2015, 32(9):1233-1239.)
- [9] 邢轶斌,徐海滨,康永. 半导体封装阶段批加工设备调度[J]. 电子技术与软件工程,2019(16):118-120.
(XING Yibin, XU Haibin, KANG Yong. Scheduling of batch processing equipment in semiconductor packaging stage [J]. Electronic technology, 2019(16):118-120.)
- [10] 方开莎,董奇志,牛红霞. 可变编组条件下的城市轨道交通大小交路优化研究[J]. 铁道运输与经济,2018,40(5):94-99.
(FANG Kaisha, DONG Qizhi, NIU Hongxia. An analysis on optimizing part and full routes of urban rail transit under different marshalling plans [J]. Railway transport and economy, 2018,40(5):94-99.)
- [11] 戎亚萍,张星臣,柏赞,等. 城市轨道交通多编组列车开行方案优化研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2016,16(5):117-122.
(RONG Yaping, ZHANG Xingchen, BAI Yun, et al. Optimization for train plan of urban transit based on hybrid train formation [J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2016,16(5):117-122.)
- [12] JACOB R, PETER MÁRTON, MAUE J, et al. Multistage methods for freight train classification [J]. Networks, 2015, 57(1):87-105.
- [13] 王冬海,黄梁光. 列车灵活编组在城市轨道交通全自动运行线路中的应用[J]. 城市轨道交通研究,2019,22(增刊2):102-105.
(WANG Donghai, HUANG Qiguang. Application of flexible train formation on rail transit FAO lines [J]. Urban mass transit, 2019,22(S2):102-105.)
- [14] 万路军,姚佩阳,周翔翔,等. 多编组协同任务分配模型及DLS-QGA算法求解[J]. 控制与决策,2014,29(9):1562-1568.
(WANG Lujun, YAO Peiyang, ZHOU Xiangxiang, et al. Cooperative task allocation methods in multiple groups using DLS-QGA [J]. Control and decision, 2014,29(9):1562-1568.)
- [15] FRANK G, CAROLIN R. Comparing linear width parameters for directed graphs [J]. Theory of computing systems, 2019, 63(6):1358-1387.
- [16] 乔非,许潇红,方明,等. 半导体晶圆生产线调度的性能指标体系研究[J]. 同济大学学报,2007(4):537-542.
(QIAO Fei, XU Xiaohong, FANG Ming, et al. Performance evaluation system for scheduling semiconductor wafer product line [J]. Journal of tongji university, 2007(4):537-542.)
- [17] 胡福年,孙守娟. 基于图论的矩阵算法在配电网故障定位中的应用[J]. 中国电力,2016,49(3):94-98.
(HU Funian, SUN Shoujuan. Fault location of distribution network by applying matrix algorithm based on graph theory [J]. Electric power, 2016,49(3):94-98.)
- [18] 符升平,李胜波,罗宁. 基于图论的自动变速器拓扑变换和传动特性分析[J]. 上海交通大学学报,2018,52(3):348-355.
(FU Shengping, LI Shengbo, LUO Ning. Topological transformation and transmission characteristics analysis of vehicle auto transmission based on graph theory [J]. Journal of Shanghai jiaotong university, 2018,52(3):348-355.)
- [19] JAYAKRISHNA K, VINODH S, ANISH S. A graph theory approach to measure the performance of sustainability enablers in a manufacturing organization [J]. International journal of sustainable engineering, 2016,9(1):47-58.
- [20] 彭星煜,吴云冬,喻建胜,等. 基于图论的L-13站工艺系统拓扑分析[J]. 油气储运,2017,36(12):1374-1379.
(PENG Xingyu, WU Yundong, YU Jiansheng, et al. Topological analysis on the process system of L-13 station based on graph theory [J]. Oil & gas storage and transportation, 2017,36(12):1374-1379.)
- (责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)