半导体封装测试生产线排产研究

姚丽丽 [1, 2] 史海波 [1] 刘 昶 [1]

摘 要 以某半导体封装测试 (Semiconductor assembly and test manufacturing, ATM) 企业为研究背景, 对半导体封装测试的生产过程进行分析总结, 提出一种新的 "产能限定混线车间" (Capacity-limit flexible flow-shop, CLFFS) 模型作为半导体封装测试生产线的排产模型. 通过对半导体封装测试的特殊逻辑处理、排产方法以及排产规则等进行研究, 提出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作为半导体封装测试的总体排产方法, 同时针对批准备单处理生产阶段, 提出一种新的预测开机控制优化调度方法. 最后, 结合 CLFFS 排产模型和所提出的策略方法, 给出半导体封装测试排产的应用研究示例与比较, 结果证明本文给定的总体排产方法在 ATM 中具有很好的可行性和业务逻辑嵌入的即便性, 同时本文所提出的新的预测开机控制优化调度方法能够很好的缩短生产周期, 提高生产效率.

关键词 半导体封装测试, 产能限定混线车间, 启发式算法, 正序排产

引用格式 姚丽丽, 史海波, 刘昶. 半导体封装测试生产线排产研究. 自动化学报, 2014, **40**(5): 892−900

DOI 10.3724/SP.J.1004.2014.00892

Research on Scheduling in Semiconductor Assembly and Test Manufacturing

YAO Li-Li[1, 2] SHI Hai-Bo[1] LIU Chang[1]

Abstract Taking one semiconductor assembly and test manufacturing (ATM) enterprise as the study object, this paper analyzes and summarizes the production process of ATM, and proposes a new model which is named capacity-limit flexible flow-shop (CLFFS) as the scheduling model of ATM. By researching on the special scheduling logic constraints, strategies, and rules of scheduling in ATM, we propose a forward heuristics algorithm which is controlled by both logic constraints and scheduling rules as the general method, and present a novel predictive control scheduling algorithm in batch-prepared one-processed stage. Finally, using the proposed model and method, an application example of scheduling in ATM and comparison are given. The results show that the general method has the effectiveness in practical application and can conveniently embed logic constraints, and that the novel predictive control scheduling algorithm can shorten production cycle and improve enterprise production benefit.

Key words Semiconductor assembly and test manufacturing (ATM), capacity-limit flexible flow-shop (CLFFS), heuristic algorithm, forward scheduling

Citation Yao Li-Li, Shi Hai-Bo, Liu Chang. Research on scheduling in semiconductor assembly and test manufacturing. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(5): 892−900

半导体封装测试 (Semiconductor assembly and test manufacturing, ATM) 是最早向中国转型的半导体产业, 也是最适合中国发展的产业, 目前是中国半导体产业的重心. 根据中国半导体行业协会的统计[1], 2010 年中国集成电路产业销售额为 1 424 亿元, 其中芯片设计业销售 383 亿元, 芯片制造业销售 409 亿元, 封装测试行业销售额为 632 亿元. 封装测试环节是我国集成电路产业链中相对成熟的环节, 其产值一度占据我国集成电路产业总产值 70 %. 针对中国半导体产业的企业生产特点, 研究适合中国半导体封装测试生产特点的计划、调度等生产组织管理关键内容, 成为进一步提高中国半导体封装测试企业效益的重要手段.

生产调度通常包括两种: 静态调度和动态调度. 静态调度又称排产, 是指发生在实际生产之前, 假定生产环境不变, 给定的某一较长时间段的生产预安排方案, 对实际生产起重要的指导作用, 多为日生产计划指导所用[2]. 动态调度应用在实际生产过程中, 多是对局部阶段的作业进行的实时指派[3]. 静态调度虽然相比于动态调度来说, 对实时性的要求较弱, 但是由于其涉及整个生产过程, 具有全局优化的作

收稿日期 2013-01-31 录用日期 2013-08-12
Manuscript received January 31, 2013; accepted August 12, 2013
国家重大专项资助项目 (2011ZX02601-005) 资助
Supported by National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (2011ZX02601-005)
本文责任编委 李乐飞
Recommended by Associate Editor LI Le-Fei
1. 中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110016 2. 中国科学院大学 北京 100049
1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

用, 更为复杂[4]. 本文以某半导体封装测试企业为研究背景, 根据企业需求, 特对静态调度, 即排产, 进行研究, 为实际车间生产提供指导依据.

ATM 生产调度研究方法主要包括三类: 1) 基于运筹学的方法, 如混合整数规划方法[5] 等. 该类方法一般利用枚举获得最优的调度方案, 但是需要大量的计算时间, 仅适合较小规模的调度问题. 文献 [6] 将混合整数规划方法应用在 ATM 的两阶段调度问题中[6], 在每个阶段的机台数为个位数的情况下, 仿真取得了很好的优化效果. 2) 基于进化搜索的方法, 如遗传算法[7]、蚁群算法[8] 等. 该类方法具有很好的全局优化作用, 但是, 其搜索速率缓慢, 在应用规模方面同样受到一定的限制. 如文献 [9] 利用蚁群优化算法对 ATM 的瓶颈工序调度进行优化[9], 仿真设备较少, 对于大规模问题, 其很难在较短的时间内给出较好的优化结果. 3) 基于启发式规则的方法, 是最早提出的近似优化方法[10−11]. 其设计简单、计算复杂度低、易于实现, 在实际中得到广泛的应用[12], 尤其是在生产约束比较复杂的环境下优势更为明显, 能够对生产约束进行充分的满足与体现[13]. Lu 等最早致力于研究启发式规则来优化生产[14], 曾对半导体生产中能够减少生产周期的有效规则进行研究, 取得了很好的研究成果[15]. Tovia 等[16] 对 ATM 键合阶段的设备组调度问题进行研究, 采用一种启发式方法来降低生产准备时间. Chua 等[17] 针对 ATM 的瓶颈阶段, 研究开发了基于启发式规则的 APS (Advanced planning and scheduling) 系统, Yin 等[18] 研究开发了基于启发式规则的有限能力排产系统 (Finite capacity scheduling system, FCS), 这些系统都是利用工件优先选择规则 (Job prioritization rules, JP) 和机器选择规则 (Machine selection rules, MS) 控制实现优化, 且已经成功应用在一些 ATM 企业中, 取得了很好的应用效果[19]. 然而, 这些研究多是针对封装测试中某一阶段的调度问题进行方法研究, 并未给出多个阶段的整体研究方案, 同时所介绍的启发式调度方法仅依靠调度规则控制实现优化, 并未考虑到实际逻辑约束处理优化. 本文提出采用逻辑约束和启发式调度规则双层优化控制的正序排产算法作为半导体封装测试的总体排产方法. 同时针对批准备单处理生产阶段, 提出一种新的预测开机控制优化调度方法.

1　半导体封装测试生产分析

1.1　工艺介绍

半导体封装测试工艺流程主要包含划片、装片、键合、塑封、去飞边、电镀、打印、切筋和成型、外观检查、成品测试、包装出货等工序, 也包括一些特殊产品所具有的点胶、等离子清洗等辅助工序. 主加工过程可描述为: 利用划片刀将来自前道晶圆制造的圆片 (Wafer) 切割为小的晶片 (Die), 然后将切割好的晶片用装片胶贴装到相应的引线框架的基板上, 再利用超细的金属丝导线将晶片的接合焊盘连接到基板的相应引脚, 构成所要求的电路; 然后再对独立的晶片用塑料外壳加以封装保护; 塑封之后, 还要进行一系列操作, 如塑封后固化、切筋和成型、电镀以及打印等工艺; 封装完成后进行成品测试, 通常经过入检、测试和包装等工序, 最后入库出货.

1.2　排产要素分析

排产的主要功能就是将加工作业安排在加工设备上, 同时给定作业的预加工时间节点, 其主要包含三个关键输入要素: 加工作业、加工设备和加工时间.

1) 加工作业. 半导体封装测试中的产品类别示例如图 1 所示, 品种是最小的产品类别单元, 但其并不是最小加工单位. 企业中以 Lot 为单位进行组织生产, Lot 是以传输过程中的周转盒容量而定的最小组织加工单位, 也称为随工单, 一个周转盒内常包含成千上百个 Die. Lot 也是企业信息系统的产品追踪单位, 则排产时的输入作业单位也应该是 Lot.

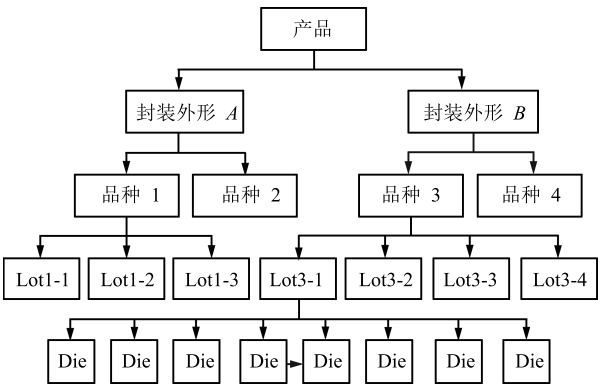


图 1　半导体封装测试产品类别

Fig. 1　Production types in ATM

2) 加工设备. 半导体封装测试企业, 生产设备数量庞大, 关键工序设备数量上千, 同时同一道工序存在多种型号设备, 产品不同, 选择设备类型要求可能不同. 由于组织生产单位 Lot 并不是真正意义上机械行业中完整不可分的工件, 在耗时较长工序, Lot 可以分在多台机器上生产, 这多台机器组成一个机组. 如, 在本文背景企业中的键合工序, 以机组为单位组织加工. 则排产中的设备也应该分为两种情况: 在以机组组织生产的工序, 加工作业分配到

机组; 在以单个机台生产的工序, 加工作业分配到设备.

3) 加工时间. 半导体封装测试生产中, 由于 Lot 中 Die 的数量可变, 很多工序常以 UPH (Units per hours) 作为计算时间参数, 其表示每小时可生产的 Die 数目. 排产中所用的加工时间与 UPH 的换算如式 (1) 所示.

$$t_{i,j} = \frac{n_i \times 60}{U_{i,j}} \tag{1}$$

式中, $t_{i,j}$ 示 Lot i 在工序 j 的加工时间, 以分钟为单位; n_i 表示 Lot i 所包含的 Die 数量; $U_{i,j}$ 表示 Lot i 在工序 j 的 UPH 值.

1.3 特殊生产约束处理

半导体封装测试生产过程中, 存在很多特殊的生产约束, 排产时, 需要进行相应的逻辑处理.

1) 晶圆存在阶段排产逻辑处理. 装片之前, 晶圆存在的阶段, 由于 Lot 还未拆分完成, 同一品种的产品作为一个整体组织加工, 称为投产批. 则进行排产时, 需要将属于同一投产批的 Lot 进行整合, 作为整体参与分配, 提取的排产对象不是单个 Lot, 而是由多个 Lot 组成的投产批; Lot 拆分后, 以 Lot 为单位分配. 在拆单之前的阶段, 属于同一投产批的所有 Lot 的预计开工时间和完工时间相同, 计算时开工完工时, 整体加工时间为投产批中所有 Lot 的处理时间之和, 如式 (2) 所示.

$$E_{p,j} = S_{p,j} + \sum_{i \in_p} t_{p,j} \tag{2}$$

式中, $E_{p,j}$ 表示投产批 p 的完工时间; $S_{p,j}$ 表示投产批 p 的开工时间; $t_{p,j}$ 表示属于投产批 p 的 Lot i 的加工时间.

在晶圆拆分阶段, 拆分完成一个 Lot 后, 该 Lot 就可直接进入下个阶段生产, 无需等待本投产批的所有 Lot 拆分完毕后离开.

2) 机组存在阶段排产逻辑处理. 以机组为单位组织生产时, 加工要求为: Lot 在机组内部的各个机台上平均分配生产, 整个 Lot 加工完成后才能进入下一个工序生产; Lot 生产过程中, 机组内的任何一台机器不允许进行其他 Lot 的加工. 则排产时, 可将机组作为一个整体, 将 Lot 分配给整个机组处理. 实际生产时间等于单台设备生产时间与机组内机台总数的商, 如式 (3) 所示.

$$P_{i,j} = t'_{i,j} = \frac{t_{i,j}}{m_{j,k}} \tag{3}$$

式中, $t'_{i,j}$ 表示机组生产的处理时间, $t_{i,j}$ 表示单台设备生产处理时间, $m_{j,k}$ 表示工序 j 机组 k 的机器总数.

3) 批准备 – 批处理阶段排产逻辑处理. 半导体后段制造过程中的固化工序, 所用的设备为烘箱, 烘箱是一种 “批准备 – 批处理” 设备, 当 Lot 达到一定批量后, 所有等待 Lot 一起入箱进行烘烤. 排产时, 同样要遵循批量要求, 当剩余 Lot 个数不足最小批量时, 也可分配给一个设备处理. 在此阶段, 所有 Lot 的处理时间为固定烘烤时间, 不由 UPH 进行计算, 如式 (4) 所示.

$$P_{i,j} = T_j \tag{4}$$

4) 批准备 – 单处理阶段排产逻辑处理. 半导体封装测试的电镀阶段, 由于设备庞大, 启动耗能大, 一般要求 Lot 只有达到一定批量后才能开动机器进行加工, 但是加工时, 并不是所有的 Lot 一次性进行加工, 而是连续不断的上机加工, 其相当于流水线的方式进行加工. 与批准备 – 批处理不同的主要区别是: 批准备 – 单处理中, 同一批生产的 Lot 的开始加工时间和结束加工时间不同; 而批准备 – 批处理中, 同一批生产的 Lot 的开始加工时间和结束加工时间相同. 排产时, 在批准备 – 单处理阶段同样要保证批量机台开工约束, 同时, 分配到同一设备 M_j 上的连续加工的两个 Lot, 即后续加工 Lot 的开始加工时间 S_{π_{i+1},M_j} 等于前面加工 Lot 的结束加工时间 E_{π_i,M_j}, 如式 (5) 所示.

$$S_{\pi_{i+1},M_j} = E_{\pi_i,M_j} \tag{5}$$

2 产能限定混线车间排产模型

20 世纪 90 年代, 后道封装测试与前道晶圆制造多由一个企业承担, 工艺流程相对单一, 半导体封装测试生产线排产问题被总结为混合流水车间排产问题 (Hybrid flow-shop problem, HFSP)[15]. 随着半导体产业精细分工和产能转移的持续发展, 封装测试由独立企业承担管控, 接收来自前道多个企业的订单, 生产品种多样, 工艺流程也有多个. 以某封装测试企业为研究背景, 总结其生产特点如下: 1) 存在多个工艺流程, 所有加工流程中的工序都遵循同一加工方向, 无逆序现象发生. 即, 如果某一道流程包含前后两道工序: $P0 \rightarrow P1$, 则其他任何流程中都不会有与此加工顺序相反 $P1 \rightarrow P0$ 的现象发生. 2) 同一加工流程内的不同工序加工时有先后加工顺序制约关系, 不同加工流程中的同一工序加工时无先后顺序制约条件. 3) 每道工序存在多种类型加工设备, 加工作业根据加工特性, 在合适的类型机台上生产, 并不是该阶段的所有设备.

由上述特点可知, 封装测试车间存在多道流程, 但是由于所有加工流程都遵循同一方向, 其可以转换为一条路线, 进行流水线式加工, 但是其转换后的流水线并不是传统意义上的流水线加工. 在不考虑特殊阶段的生产约束的情况下, 在此提出一种新的 "产能限定混线车间" (Capacity-limit flexible flow-shop, CLFFS) 模型, 作为半导体封装测试生产的整体排产模型.

产能限定混线车间排产问题可描述为: n 个工件在流水线上进行 m 个阶段的加工, 每一阶段至少有一台机器且至少有一个阶段存在多台机器; 每个阶段不一定所有的加工作业都有工序加工; 各个加工作业在相应的加工阶段, 只能在其工艺允许的设备上加工. 排产所需解决的问题是: 根据计划作业投产情况, 在满足生产约束的条件下, 以一定的性能指标为目标, 确定加工作业在各个工序的设备分配和在设备上的加工顺序. 以最小化最大加工完工时间 (Makespan) 为目标, 数学模型可建立如下:

$$\min \max_{i=1,2,\cdots,n} \{C_{im}\} \tag{6}$$

s.t.

$$\sum_{i\in I_j} x_{il}^j = 1,\ l = 1,2,\cdots,n_j, j = 1,2,\cdots,m \tag{7}$$

$$\sum_{l=1}^{n_j} x_{il}^j = 1,\ i \in I_j,\ j = 1,2,\cdots,m \tag{8}$$

$$\sum_{k\in M_{ji}} y_{ijk} = 1,\ \text{若 } x_{ij} = 1 \tag{9}$$

$$\sum_{k\in M_{ji}} y_{ijk} = 0,\ \text{若 } x_{ij} = 0 \tag{10}$$

$$C_{ij} \le S_{i(j+1)},\ \forall i, j \tag{11}$$

$$C_{ij} = S_{ij} + P_{ij},\ \text{若 } x_{ij} = 1 \tag{12}$$

$$C_{ij} = S_{ij},\ \text{若 } x_{ij} = 0 \tag{13}$$

$$\sum_{i\in I_j} x_{il}^j S_{ij} \le \sum_{i\in I_j} x_{i(l+1)}^j S_{ij} \tag{14}$$

$$\sum_{i\in I_j} x_{il_1}^j y_{ijk} C_{ij} \le \sum_{i\in I_j} x_{il_2}^j y_{ijk} S_{ij},\ l_1 \le l_2 \tag{15}$$

模型中, i 表示工件, j 表示加工阶段, l 表示位置序列, k 表示工件的最小处理设备: 机台或机组; I_j 表示在阶段 j 需要处理的工件 i 集合, n_j 表示在阶段 j 需要处理的工件总数, m 表示阶段总数, M_{ji} 表示阶段 j 能够处理工件 i 的设备集合; x_{ij} 为 0-1 变量, 表示工件 i 在阶段 j 是否存有加工工序, 如果有加工工序, 则取值为 1, 否则为 0; x_{il}^j 为 0-1 变量, 如果工件 i 在阶段 j 被安排在第 l 位置则取值为 1, 否则为 0; y_{ijk} 为 0-1 变量, 如果工件 i 在阶段 j 被安排到第 k 台机台 (或机组) 加工, 则取值为 1, 否则为 0; S_{ij} 表示工件 i 在阶段 j 的开始加工时间; C_{ij} 表示工件 i 在阶段 j 的完工时间; P_{ij} 表示工件 i 在阶段 j 的处理时间.

式 (6) 表示最小化最大完工时间目标. 式 (7) ~ (15) 为 CLFFS 模型的约束条件, 其中, 式 (7) 和式 (8) 保证每个阶段, 调度为所有在这个阶段存有加工工序的工件的一个全排列; 式 (9) 和式 (10) 表示任何一个阶段, 在该阶段存有加工工序的工件只能由该阶段中能够处理该工件的一台设备 (或一个机组) 上加工; 式 (11) 表示后道工序的开始时间必须在前道工序完成之后开始; 式 (12) 和式 (13) 表示如果工件在某一阶段存有加工工序, 则完工时间等于开始时间与加工时间之和, 否则完工时间等于开始加工时间; 式 (14) 表示以某种优先级进行工件调度排列, 排列位置越前的工件开始处理的时间越早; 式 (15) 表示同一阶段分配在同一机器上的, 排位靠后的工件必须等待排位靠前的工件加工完毕后才能开始加工.

总结 CLFFS 与 HFS 主要有两点不同: 1) HFS 要求各作业在每一个阶段均要完成一道工序[20−21]; 而在 CLFFS 中, 各作业在每个阶段最多一道工序, 也可以无工序加工. 2) HFS 是传统流水车间调度与并行机调度的综合, 每个阶段, 工件可以在任意机台上生产[22−23]; 而 CLFFS 中, 产能进行限定, 加工作业的工序只能在该阶段内的指定机器类型的设备上加工, 并不是任意机台.

3 基于启发式规则的排产方法研究

CLFFS 排产同 HFS 排产一样, 为 NP-难问题, 且在实际半导体封装测试生产中, 同时存在很多的生产约束. 鉴于启发式规则算法设计简单、易于实现的特点, 则本文采用基于启发式规则的方法对 CLFFS 模型进行求解, 作为半导体封装测试总体排产方法.

3.1 排产方法选择

常用的排产策略有两种: 基于工件的排产和基于工序的排产. 基于工件的排产: 首先, 对本次计划投产的所有的工件, 根据一定的优先调度规则进行一个全排列; 然后对工件进行逐次分配, 分配时, 对全排列中一个工件的所有工序安排完后进行下一个工件的安排. 基于工序的排产: 多用于流水线生产模型, 根据流水线上工序的顺序进行分配, 分配时对一道工序的所有工件分配完毕后, 进入下一道工

序的分配. 基于工件的排产可以用于任何生产模型, 但是由于其以工件的整个生产进行分配, 则很难在不同阶段嵌入不同逻辑处理; 而基于工序的排产则可以在生产的每一个阶段嵌入逻辑处理和规则控制, 很容易通过实现局部指标, 从而达到整体性能指标优化. CLFFS 作为流水线模型, 则本文采用基于工序的排产策略.

基于工序的排产, 根据排产方向不同又可以分为: 正序排产和倒序排产. 正序排产是将当前时间或者某一特定时间作为起点, 按照时间的先后顺序进行各道工序的安排, 进行推动式生产安排. 倒序排产是指将确定的订单完成时间或者某条工艺路径的预计加工完成时间作为起点, 从后向前安排各道工序, 找出各个工件的各工序的开工日期, 进而得到各订单的最晚开工日期, 进行拉动式生产. 倒序排产多为投产计划所用, 根据排产结果, 确定最晚投产日期. 故, 本文采用正序排产更切合实际企业的推动式生产.

基于启发式规则的正序排产方法在 CLFFS 中的具体应用流程图如图 2 所示. 排产时从第一道工序开始, 只有当本道工序排完后才能进入下一道工序的排产, 从而保证了 CLFFS 模型中式 (11) 的满足; 在每个阶段中, 提取所有在该阶段存有加工工序的工件进行调度, 保证了式 (7) 和式 (8) 的满足, 同时利用一定的工件优先选择规则, 进行提前分配, 保证了式 (14) 的满足; 对工件进行分配时, 只能分配给可分配资源集中的一台设备 (机组), 保证了式 (9) 和式 (10) 的满足. 另外, 式 (12)、式 (13) 和式 (15) 在计算加工时间时需要保证其满足, 其隐含在排产计算过程中.

3.2 排产规则选择

采用启发式规则排产方法, 实现特定性能指标的主要决定因素之一就是调度优先规则的应用. 调度优先规则可分为两种: JP 和 MS 在传统 Job-shop 和 Flow-shop 中, 由于加工路径确定, 只存在有 JP 来确定的工件加工顺序问题; 然而在 CLFFS 中, 由于需要解决工件顺序和设备分配的二元问题, 则调度优先规则除了 JP 外, 还应该有 MS. Panwalkar 和 Iskander 通过性能指标对 113 种不同规则进行了归纳和总结[24], 多数为 JP, 如最小交货期优先 (Earliest due date, EDD)、先到达先加工 (First come first serve, FCFS) 等; MS 发生在工件有多个设备可选择分配的情况下, 如最早结束加工设备优先 (First end first work, FEFW)、设备承载能力大者优先 (Capacity large first select, CLFS) 等.

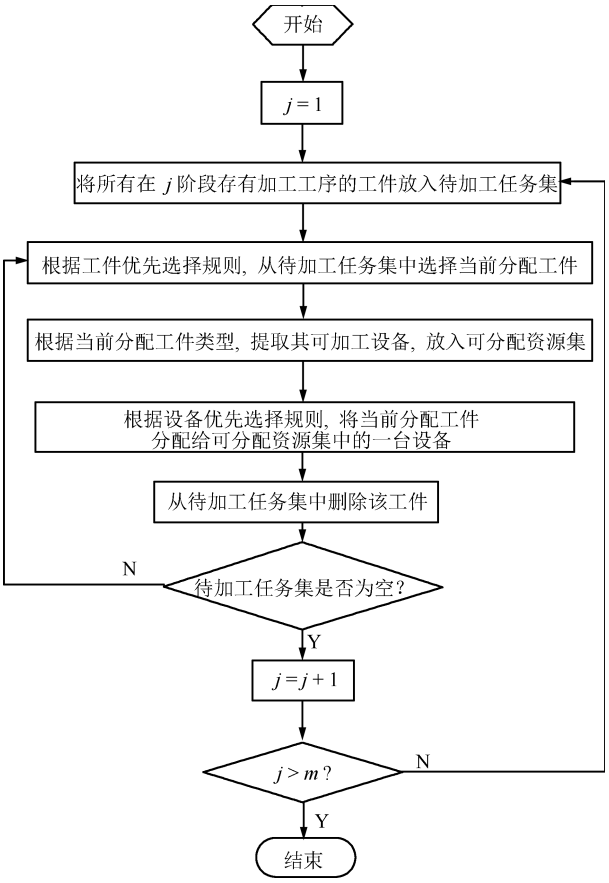


图 2 CLFFS 正序排产流程图

Fig. 2 Flow chart of forward scheduling in CLFFS

由于 ATM 企业是典型的 MTO 型企业, 对于交货期的性能指标除了通过投料计划控制外, 在详细排产时也需要进一步保证, 由于首道工序 Lot 的上线顺序对于 Lot 后道工序的生产及完工具有很大的影响, 则应在上线工序中, JP 采用 EDD 规则; 同时, 为了保证生产的快速性和连续性, 在后续工序中, JP 采用 FCFS 规则, MS 采用 FEFW 规则.

3.3 逻辑约束优化

传统基于规则的启发式优化调度算法仅是利用调度规则的使用实现优化, 但是未考虑实际生产约束处理的优化. 由于 ATM 生产过程中, 特殊生产约束复杂繁多, 如存在组批生产、换产现象、批准备单处理、批准备批处理、机组加工等, 这些约束在生产过程中除了必须满足外, 若进行相应的逻辑优化处理, 依然可以优化调度结果, 提高生产效益. 如第 4 节中本文针对批准备 – 单处理现象, 对批准备约束进行了优化处理, 提出一种新的预测开机控制优化调度方法, 缩短了生产周期, 提高了生产效益. 在此, 本文提出在保证满足生产约束的基础上, 利用逻辑约束和调度规则进行双层控制优化.

4 一种新的预测开机控制优化调度方法

根据本文给定的总体排产方法, 优化主要体现在两个方面: 启发式调度规则的使用和特殊逻辑约束的优化处理. 启发式调度规则已经研究确定, 特殊逻辑约束优化处理需要在满足生产约束的基础上, 优化处理, 提高生产效益. 在整体遵循基于启发式规则的正序排产算法的基础上, 针对批准备–单处理生产阶段, 本文提出一种预测开机控制优化调度方法, 利用特殊逻辑约束处理进行优化, 对设备开机时间进行提前预测, 即未到达最小批量时, 机器就可启动开始进行加工, 同时保证开机后最小加工批量的满足. 其不仅满足了企业大型设备批量开机生产的要求, 同时缩短了生产周期, 提高了生产效益.

假设工序间作业传输时间为 0, 批准备单处理设备的最小加工批量为常量 $N_{\zeta_{\min}}$, 则预测开机控制优化调度方法步骤可描述如下:

步骤 1. 在批准备–单处理阶段, 将在该阶段存有加工工序的所有 Lot 放入待加工作业集 (Waiting job set, WJS) 中, 并依据各个 Lot 的前道工序的结束时间, 对其进行排序, 结束越早, 排序越靠前 (保证满足 FCFS 规则); 同时, 将所有空闲设备放入可选空闲设备集 (Spare machine set, SMS) 中.

步骤 2. 检查 SMS 是否为空, 如果为空, 则跳转至步骤 5.

步骤 3. 检查 WJS 中的剩余 Lot 数 N_w 是否大于 $N_{\zeta_{\min}}$, 如果 $N_w < N_{\zeta_{\min}}$, 则跳转至步骤 5.

步骤 4. 从 WJS 中选择前个 Lot 放入当前分配作业集 (Current job set, CJS), 从 SMS 随机选择一台设备, 将 CJS 中的所有 Lot 分配给该设备. 从 WJS 中该 $N_{\zeta_{\min}}$ 个 Lot, 同时清空 CJS. 跳转至步骤 2.

步骤 5. 从 WJS 中依据排序选择第一个 Lot (前道工序最早结束的 Lot), 将其分配给第一个有效设备 (设备加工完成已分配作业的结束时间大于当前分配 Lot 前道工序的结束时间, 且其差值最小). 从 WJS 中删除该 Lot.

步骤 6. 检查 WJS 是否为空, 如果不为空, 则跳转至步骤 2; 否则, 结束批准备–单处理阶段的调度分配, 进入下一阶段调度.

预测开机控制调度方法的优化在于在满足批量要求的条件下, 对空闲设备的开机时间进行提前预测, 其主要体现在步骤 4 的开机控制中. 定义 CJS 中 Lot 依据前道工序结束时间排序后依次标记为 $\pi_1, \pi_2, \cdots, \pi_{N_{\zeta_{\min}}}$, 工序间的传输时间为 0, 如果设备 M_c 在 Lotπ_x 到达后启动开机, 则分配在设备 M_c 上的 Lot 的开始加工时间可如式 (16) 所示:

$$\begin{cases} S_{\pi_1,j} = E_{\pi_x,j-1} \\ S_{\pi_2,j} = E_{\pi_1,j} = S_{pi_1,j} + t_{pi_1,j} \\ \quad\vdots \\ S_{\pi_i,j} = E_{\pi_i-1,j} = S_{\pi_{i-1},j} + t_{\pi_{i-1},j} = \\ \quad S_{\pi_{i-1},j} + \sum\limits_{h=\pi_1}^{\pi_{i-1}} t_{h,j} \\ \quad\vdots \\ S_{\pi_{N_{\zeta_{\min}}},j} = E_{\pi_{N_{\zeta_{\min}}}-1,j} = \\ \quad S_{\pi_{N_{\zeta_{\min}}}-1,j} + t_{\pi_{N_{\zeta_{\min}}}-1,j} = \\ \quad S_{\pi_{N_{\zeta_{\min}}}-1,j} + \sum\limits_{h=\pi_1}^{\pi_{N_{\zeta_{\min}}}-1} t_{h,j} \end{cases} \tag{16}$$

式中, $E_{\pi_i,j}$ 为 Lotπ_i 在批准备–单处理阶段 j 的结束时间, $S_{\pi_i,j}$ 为 Lotπ_i 的在阶段 j 的开始加工时间.

预测开机控制调度方法的关键在于求解 π_x, 而不是传统的直接选取 $\pi_{N_{\zeta_{\min}}}$ 作为 π_x. 利用迭代搜索算法实现求解如下:

1) 假设 $\pi_x = \pi_1$, 即 $x = 1$;

2) 利用式 (16) 计算 CJS 中的每个 Lot 在批准备–单处理阶段的开始加工时间;

3) 比较阶段 j 开始时间和前道工序 $j-1$ 结束时间, 如果对于 CJS 中的任意 Lotπ_i, 式 (17) 都成立, 则设备 M_c 的开始加工时间 $S_{m_c} = E_{\pi_x,j-1}$, 结束计算; 否则, $x = x + 1$, 跳转至 2).

$$S_{\pi_i,j} \geq E_{\pi_i,j-1} \tag{17}$$

5 应用研究与比较

为了验证本文所提出的方法的有效性和优越性, 根据实际企业生产给定 CLFFS 模型数据和约束条件进行应用研究与比较. 模型中包括 5 个 Lot, 8 个加工阶段, 具体参数及约束条件如表 1 所示, 其加工时间数据为利用式 (1) 和式 (4) 计算后的时间.

模型中, Lot 1、Lot 3 和 Lot 5 属于投产批 P1, Lot 2 和 Lot 4 属于投产批 P2. 阶段 2 为 Lot 拆分阶段; 阶段 4 为批准备–批处理工序, 最大处理批量为 5; 阶段 5 为机组生产工序, 机组 0501 中有 3 台设备, 0502 中有 4 台设备; 阶段 6 为批准备–单处理工序, 有两台设备, 每台设备的最小加工批量为 2. 表 1 中, 数据 0 表示 Lot 不能在机台上加工, 如在阶段 5, Lot 2 和 Lot 4 不能在 0501 机台生产, Lot 1、Lot 3 和 Lot 5 不能在 0502 机台上生产. 如果在某阶段中, Lot 在该阶段所有机台上的加工时间为 0, 则表示该 Lot 在该阶段无工序加工, 如, Lot 2 和 Lot 4 在阶段 3 无工序加工.

表 1 CLFFS 模型参数

Table 1 The parameter sets of CLFFS

加工时间 (min)	Lot 1 (P1)	Lot 2 (P2)	Lot 3 (P1)	Lot 4 (P2)	Lot 5 (P1)	阶段特点
机台 0101	10	15	10	15	10	投产批生产
机台 0201	25	25	20	25	20	Lot 拆分
机台 0202	25	25	20	25	20	
机台 0301	25	0	25	0	15	普通
机台 0401	30	30	30	30	30	批准备 – 批处理
机组 0501	45	0	45	0	60	机组生产
机组 0502	0	120	0	80	0	
机台 0601	20	20	25	15	15	批准备 – 单处理
机台 0602	20	20	25	15	15	
机台 0701	15	20	25	20	15	普通
机台 0702	15	20	25	20	15	
期望完工时间	6:00	8:00	6:00	8:00	6:00	

排产时, 由于阶段 1 是晶圆生产工序, 则投产批 P1 和 P2 中所有 Lot 需要看作一个整体进行分配; 同时由于阶段 1 为上线工序, 根据最小交货期优先规则, 投产批 P1 优先生产, 此时 Lot 1 ∼ 3 具有相同的开始加工时间和结束加工时间. 在阶段 2 中, 晶圆进行拆分, 拆分完一个 Lot 后, Lot 就可进入阶段 3 加工. 阶段 4 为批准备 – 批处理阶段, 最小加工批量为 5, 等待准备批量达到 5 时, 开机生产, 此时所有 Lot 具有相同的开始加工时间和结束加工时间. 阶段 5 为机组处理阶段, 则每个 Lot 的加工时间需要根据式 (13) 进行计算, 计算后 Lot 1 ∼ 5 的处理时间分别为 15、30、15、20、20. 阶段 6 为批准备 – 单处理工序, 每台机器的最小启动生产批量为 2.

假定排产初始时刻为 0:00, 阶段间运输时间为 0. 在各个阶段满足生产约束的基础上, 分别对传统的调度规则单层优化控制方法[19] 和本文所提出的调度规则、逻辑约束双层优化控制方法进行应用研究与比较. 其中前者在所有的阶段采用 JP 和 MS 调度选择规则实现优化; 而后者在批准备 – 单处理阶段采用本文所提出的批准备连续单处理的预测控制调度方法.

排产结果方案如图 3 和图 4 所示, 其中, 图 3 为传统调度规则单层优化的排产方法结果; 图 4 为本文所提出的调度规则和逻辑约束双层优化排产方法结果, 其在批准备 – 单处理阶段采用本文提出的新的预测开机控制优化调度方法. 两个结果都表明, 利用基于启发式规则的正序排产方法在半导体封装测试排产中具有很好的可行性, 能够满足实际企业生产约束.

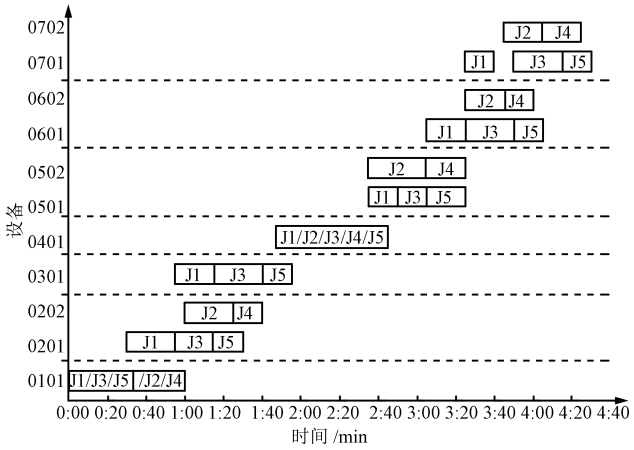


图 3 传统排产方法结果

Fig. 3 Result of the traditional scheduling

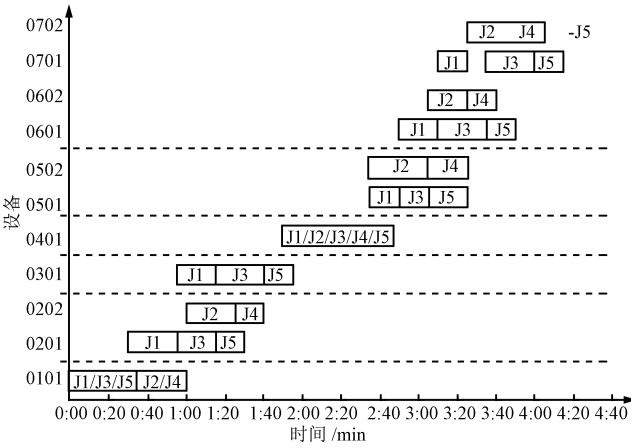


图 4 新的排产方法结果

Fig. 4 Result of the novel scheduling

本文提出的预测开机控制优化调度方法针对具有批量要求的阶段, 在保证开机后批量满足的情况下, 对设备开机时间进行提前预测, 即设备前等待 Lot 未到达最小批量时, 机器就可启动开始进行加工; 而传统的调度规则单层优化控制方法则不考虑逻辑约束的优化, 只有设备前等待 Lot 达到最小批量要求时, 机器才启动生产. 故, 本文提出的新的预测控制优化调度方法能够更好地缩短生产周期, 提高生产效益. 如, 图 4 与图 3 相比, 在相同生产约束环境下, 生产周期减少了 15 min. 在大规模实际生产中, 本文提出的预测开机控制优化方法更能发挥其优越性, 如在背景企业中, 利用该方法对某批投产计划约 2 000 个 Lot 进行排产, 生产周期缩短了约 11 小时.

6 结论

本文以某半导体封装测试企业为研究背景, 对半导体封装测试的多阶段排产问题进行研究. 通过对封装测试生产进行分析, 为封装测试生产建立CLFFS 排产模型, 提出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作为半导体封装测试的总体排产方法. 基于总体排产方法指导, 针对批准备单处理生产阶段, 提出一种新的预测开机控制优化调度方法, 缩短了生产周期, 提高了生产效益. 进一步的工作是将对其他阶段的逻辑处理优化方法进行研究, 如批准备–批处理, 机组生产等阶段.

References

1 The enterprises in China: Semiconductor assembly and test manufacturing is promising in China [Online], available: http://guba.eastmoney.com/look,600667,2014994262.html, November 13, 2012

2 Liao D Y, Chang S C, Pei K W, Chang C M. Daily scheduling for R&D semiconductor fabrication. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 1996, **9**(4): 550−561

3 Xuan H Y, Li B. Dynamic hybrid flowshop scheduling with batching production. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, **65**: 562−567

4 Wu Qi-Di, Qiao Fei, Li Li, Wang Zun-Tong. *Semiconductor Manufacturing System Scheduling*. Shanghai: Publishing House of Electronics Industry, 2006. 6−7
(吴启迪, 乔非, 李莉, 王遵彤. 半导体制造系统调度. 上海: 电子工业出版社, 2006. 6−7)

5 Garcia-Sabater J P, Maheut J, Garcia-Sabater J J. A two-stage sequential planning scheme for integrated operations planning and scheduling system using MILP: the case of an engine assembler. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2012, **24**(2): 171−209

6 Xiao J, Li Z. A MILP-based batch scheduling for two-stage hybrid flowshop with sequence-dependent setups in semiconductor assembly and test manufacturing. In: Proceedings of the 2010 Automation Science and Engineering. Toronto, Canada: IEEE, 2010. 87−92

7 Pesch E, Sterna M. Late work minimization in flow shops by a genetic algorithm. *Computers and Industrial Engineering*, 2009, **57**(4): 1202−1209

8 Li Yan-Jun, Wu Tie-Jun. A nested hybrid ant colony algorithm for hybrid production scheduling problems. *Acta Automatica Sinica*, 2003, **29**(1): 95−101

9 Song Y, Zhang M T, Yi J G, Zhang L, Li Z. Bottleneck station scheduling in semiconductor assembly and test manufacturing using ant colony optimization. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2007, **4**(4): 569−578

10 Jiang Yi-Wei, Wei Qi. An improved algorithm for a hybrid flow-shop problem in graphics processing. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(11): 1381−1386

11 Lu S H, Kimar P R. Distributed scheduling based on due dates and buffer priorities. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1991, **36**(12): 1406−1416

12 Huang Xiao-Ling, Chai Tian-You. Application of planning and scheduling cascade model of complex system processing to mineral processing MES system. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(9): 1130−1139

13 Qu Guo-Qiang. Bottleneck focused heuristic algorithm for hybrid flow shop scheduling problem. *Information and Control*, 2012, **41**(4): 514−521, 528
(屈国强. 瓶颈指向的启发式算法求解混合流水车间调度问题. 信息与控制, 2012, **41**(4): 514−521, 528)

14 Lu S H, Ramaswamy D, Kumar P R. Efficient scheduling policies to reduce mean and variance of cycle-time in semiconductor manufacturing plants. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 1994, **7**(3): 374−385

15 Uzsoy R, Lee C Y, Martin-Vega L A. A review of production planning and scheduling models in the semiconductor industry Part II: shop-floor control. *Institute of Industry Engineers Transactions*, 1994, **26**(5): 44−55

16 Tovia F, Mason S J, Ramasami B. A scheduling heuristic for maximizing wirebonder throughput. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 2004, **27**(2): 145−150

17 Chua T J, Cai T X, Yin X F. A heuristic approach for scheduling multi-chip packages for semiconductor backend assembly. In: Proceedings of the 2007 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Patras, Greece: IEEE, 2007. 1024−1030

18 Yin X F, Chua T J, Wang F Y, Liu M W, Cai T X, Yan W J, Chong C S, Zhu J P, Lam M Y. A rule-based heuristic finite capacity scheduling system for semiconductor backend assembly. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2004, **17**(8): 733−749

19 Chua T J, Wang F Y, Cai T X, Yin X F. A heuristics-based advanced planning and scheduling system with bottleneck scheduling algorithm. In: Proceedings of the 2006 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Hamburg, Germany: IEEE, 2006. 240−247

20 Liao C J, Tjandradjaja E, Chung T P. An approach using particle swarm optimization and bottleneck heuristic

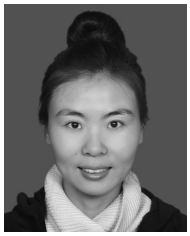
to solve hybrid flow shop scheduling problem. *Applied Soft Computing*, 2012, **12**(6): 1755−1764

21 Wang S J, Liu M. A genetic algorithm for two-stage no-wait hybrid flow shop scheduling problem. *Computers and Operations Research*, 2013, **40**(4): 1064−1075

22 Wang Sheng-Yao, Wang Lin, Xu Ye, Zhou Gang. An estimation of distribution algorithm for solving hybrid flow-shop scheduling problem. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(3): 437−443
(王圣尧, 王凌, 许烨, 周刚. 求解混合流水车间调度问题的分布估计算法. 自动化学报, 2012, **38**(3): 437−443)

23 Wang Ling, Zhou Gang, Xu Ye, Jin Yi-Hui. Advances in the study on hybrid flow-shop scheduling. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2011, **38**(1): 1−8, 22
(王凌, 周刚, 许烨, 金以慧. 混合流水线调度研究进展. 化工自动化及仪表, 2011, **38**(1): 1−8, 22)

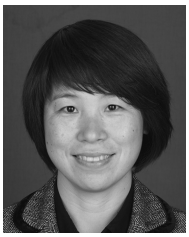
24 Panwalkar S S, Iskander W. A survey of scheduling rules. *Operations Research*, 1977, **25**(1): 45−61



姚丽丽 中国科学院沈阳自动化研究所博士研究生. 2009 年获得兰州理工大学学士学位. 主要研究方向为生产计划与调度. 本文通信作者.
E-mail: yaolili@sia.cn
(**YAO Li-Li** Ph. D. candidate at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. She received her bachelor degree from Lanzhou University of Technology in 2009. Her research interest covers production planning and scheduling. Corresponding author of this paper.)



史海波 中国科学院沈阳自动化研究所研究员. 2003 年获得哈尔滨工业大学博士学位. 主要研究方向为生产运作与管理、制造执行系统技术.
E-mail: hbshi@sia.cn
(**SHI Hai-Bo** Professor at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. He received his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2003. His research interest covers production and operation management, and manufacturing execution system technology.)



刘 昶 中国科学院沈阳自动化研究所副研究员. 2008 年获得中国科学院大学博士学位. 主要研究方向为高级计划与排产. E-mail: changl@sia.cn
(**LIU Chang** Associated professor at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. She received her Ph. D. degree from Graduate University of Chinese Academy of Sciences in 2008. Her research interest covers advanced planning and scheduling.)