

# 多产品半柔性并联生产线预防性维修调度模型研究

李波, 吴志明, 王强

(电子科技大学空天科学技术研究院 成都 611731)

**【摘要】**针对半导体芯片封装测试工厂多产品和半柔性并联生产线的预防性维修调度问题,提出了以生产时间最大化为目标函数,以多产品情况下生产线柔性限度、各产品所需的生产时间要求、预防性维修宽放区间、维修班组数量为约束的多产品半柔性并联生产线预防性维修调度的模型。将该模型应用于某芯片封装测试工厂的多产品半柔性并联生产线的预防性维修调度,在lingo9.0软件中建模并进行模型求解。调度结果已成功运用于实际生产,验证了该模型的可行性和准确性。

**关键词** 封装测试工厂; 多产品; 并联生产线; 预防性维修; 调度; 半柔性

中图分类号 TP305

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.05.030

## Research on Preventive Maintenance Scheduling Model for Multi-Products and Semi-Flexible Parallel Production Line

LI Bo, WU Zhi-ming, and WANG Qiang

(Institute of Astronautics & Aeronautics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

**Abstract** According to preventative maintenance scheduling for Multi-products and Semi-flexible Parallel Production Line (MSPPL) in semiconductor chipset assembly and test factories, the preventive maintenance scheduling model for MSPPL is proposed with the maximal production time as the objective function and under four constraints semi-flexible limits, multi-product production time requirements, preventive maintenance time windows, and the amount of preventive maintenance worker group. The proposed model has been applied in the multi-products and semi-flexible parallel production line of a chipset assembly and test factory by using the software named lingo (version is 9.0). The scheduling results have been successfully applied the actual production, which validates the feasibility and accuracy of the proposed model.

**Key words** assembly and test factory; multi-products; parallel production line; preventative maintenance; scheduling; semi-flexible

设备的预防性维修是根据设备的运行情况,对设备做出提前维护或维修,以减少设备故障的发生率<sup>[1]</sup>。因此,合理的预防性维修是提高设备利用率,实现资产效率最大化的有效途径。

半导体封装测试工厂的工作站之间是串联的关系,而在工作站的内部,将生产线1(简称线1,下同)~生产线 $m$ 在同一个工作站内完成同一道工序的所有设备类型相同的并行生产线合称为并联生产线。为了满足市场需求的多样性,半导体制造(如芯片封装测试)企业大量使用了柔性生产线,这种生产线可以通过改变生产参数加工不同产品,但实际生产中生产线的柔性有一定的限度,如线1经过参数调整能生产A和B两种产品(但不能生产其他种类的

产品,如不能生产产品C和D),而线2经过参数调整能生产B、C和D等3种产品(但不能生产产品A)。

当生产线中有设备进行预防性维修时,该条生产线要整体停产。从预防性维修调度角度看,并联生产线是调度的最基本组合;从生产功能角度看,并联生产线作为生产流程中的一环直接影响生产计划的完成,通过改变设备的参数可以实现对不同产品的产量要求;从维修人员角度看,由于设备的通用性,并联工序生产线可以共享维修人员。因此,以并联生产线为单位进行预防性维修调度研究是合理且必要的。

在半导体制造生产线预防性维修调度领域,文献[2-3]以对两层优化结构方面的研究为后续研究确

收稿日期: 2010-12-21; 修回日期: 2011-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(70701007, 51075060); 四川省青年基金(09ZQ026-054)

作者简介: 李波(1975-),男,博士,副教授,主要从事生产过程控制、复杂系统集成与自动化、装备故障诊断与维修等方面的研究。

立了研究框架；以对时间宽放区间的研究确定了两层结构之间的联系纽带。文献[2]首次提出了预防性维修的两层优化结构，用于实现单设备单预防性维修任务的优化，上层结构基于设备的具体状态确定预防性维修的大体时间，下层结构基于生产需求结合费用限制确定预防性维修的具体时间。文献[3-4]提出了与前者类似的预防性维修计划的二层结构优化模型，上层MDP (markov decision process)模型进行长期预防性维护优化，用于确定预防性维护的时间宽放区间；下层MIP(mixed-integer programming)模型在上层预防性维护优化时间宽放区间的范围内进行短期调度优化，模型以利润最大化作为目标函数，并以预防性维修时间宽放区间、维修资源限制为约束实现并联性生产线调度优化方案的选择，该模型还考虑了生产流程对串联设备的影响。文献[5-6]都提出采用设备可用度最大为目标函数建立调度模型，约束条件与文献[3]的模型一致。文献[7]沿用了文献[3]的模型目标函数与约束，设计了用遗传算法求解模型的方法。文献[8]基于WIP理论改进了上述模型可用度的算法，并赋予了新的解法。国内在维修调度方面也进行了大量的研究，但大部分针对故障维修而非预防性维修。文献[9]通过综合分析战时维修调度问题，给出了一般装备维修调度问题的数学描述，建立了一种考虑维修流程的多单元维修任

务调度模型。文献[10]进一步针对战时维修任务调度的特点，建立了基于最大保障时间的维修任务静态、动态调度模型。文献[11]针对战时维修任务的特点，以尽快恢复参战作战单元的战斗力的目标，提出了一种考虑维修专业的动态维修任务调度的优化方法。文献[12]用时间Petri网对军用装备维修的多机并行调度问题进行建模，提出采用离散事件仿真技术与基于双重编码的仿生算法相结合的方法进行仿真求解，生成优化的维修保障方案。以上研究为预防性维修优化理论奠定了基础，也指出了预防性维修调度的研究范围，并进行有益的探索，创建了对于其实际研究背景适用的模型，但是都没有考虑多产品情况下柔性(或半柔性)生产线的预防性维修调度问题；而且主要以利润最大化为目标函数，而在实际生产中制造部门的主要目标是完成既定产量。所以，本文考虑多产品的产量要求，以总的产品产量为目标函数，建立有效的调度模型；并以实际的芯片封装测试工厂为应用对象进行实例验证，以解决多产品半柔性并联生产线的预防性维修调度问题。

## 1 半柔性并联生产线预防性维修调度问题的提出

半导体芯片封装测试工厂的工作站及生产线布局如图1所示。实现一组并联生产线一个工作周期的预防性维修调度的具体调度问题描述如下：

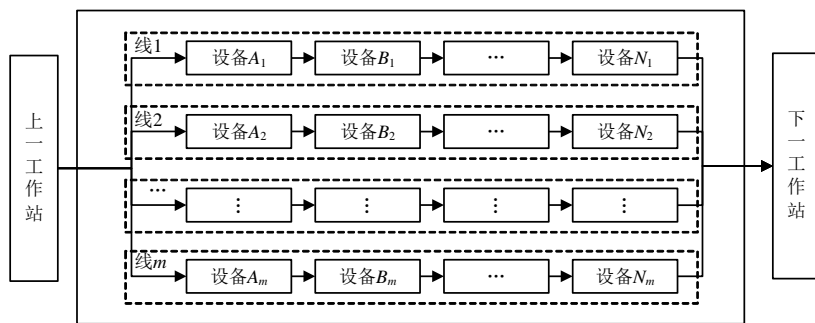


图1 半导体封装测试工厂的工作站及生产线布局图

总共有 $m$ 条生产线并联，调度周期内的时间单元为 $T$ 个； $I$ 条生产线共享 $r$ 组维修工人，其中每条生产线做预防性维修需要1组工人共同工作 $d$ 个(可以为小数)时间单元；已知每条生产线可以生产的产品种类(生产线柔性限度)和每条生产线的预防性维修宽放区间；产品 $k$ 的生产时间要求为至少 $P_k$ 个时间单元。

在满足生产线柔性限度、各产品所需的生产时间要求、预防性维修宽放区间、维修班组数量限制的前提下，本文给出 $I$ 条生产线在 $T$ 个时间单元的生

产和预防性维修调度结果。

## 2 建模

### 2.1 确定目标函数和约束条件

在本文的模型中，最重要的是目标函数，文献[3-4]以生产流程中的利润最大化为模型目标函数，具体的构成为设备生产效益，预防性维修花费，预防性维修时间造成的产品积压费用。文献[5-6]的模型沿用了上述方案。在实际的生产过程中，因为产品的产能是制造部门最直观的指标，制造部门往

往是用按时完成生产计划作为绩效考核指标。因此, 本文将目标函数定为总产品产量的最大化。

完整的模型还需要有准确的约束条件。同一条半柔性生产线在修改参数后可以生产不同的产品, 也造成了生产计划的多产品性。因此, 调度要保证并联生产线在规定的时间内完成多产品的生产任务, 第1个约束是必须保证多产品产量的完成。由于半柔性生产线的柔性有一定的限度, 第2个约束是保证每条生产线安排生产的产品在其可以生产的产品范围之内。第3个约束是上层模型确定的预防性维修时间宽放区间(在设备性能允许时间范围之内进行预防性维修, 都可以积极预防故障带来的严重危害, 该范围被定义为预防性维修时间宽放区间)。第4个约束是在进行预防性维修调度时必须受制于维修小组(人力)的限制。

2.2 模型建立

根据以上分析, 建立的调度模型如下:

基本变量如下:  $i$  为第*i*条生产线(简称生产线*i*);  $t$  为第*t*个时间单元(简称*t*时间单元);  $k$  为第*k*种产品(简称*k*产品)。

复合变量如下:  $a_i(t)$  为生产线*i*在*t*时间单元是否在进行预防性维修(1: 在进行; 0: 不在进行);  $\beta_i^k(t)$  为生产线*i*在*t*时间单元是否在生产*k*产品(1: 在生产; 0: 不在生产);  $b_i^k(t)$  为生产线*i*在*t*时间单元的预防性维修间隙生产  $k$ 产品的时间长度(小于 1);  $w_i, u_i$  分别为生产线*i*做预防性维修的起点时间和终点时间(可以取小数);  $r(t)$  为所有生产线在*t*时间单元做预防性维修所需的维修小组数量。

参数如下:  $I$  为生产线总数(整数);  $T$  为时间单元总数(整数);  $P_k$  为用于生产*k*产品的时间单元数量要求(整数且大于等于零);  $C_i^k$  为生产线*i*能否生产*k*产品(1: 可以; 0: 不可以);  $[W_i, U_i]$  为生产线*i*进行预防性维修的时间宽放区间[ $\min, \max$ ];  $d$  为生产线做预防性维修所需的时间;  $R_t$  为*t*时间单元可获得的维修小组数量。

模型目标函数为:

$$\max \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (\beta_i^k(t)) \tag{1}$$

s.t

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T (\beta_i^k(t)) + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T b_i^k(t) \geq P_k \tag{2}$$

if  $C_i^k = 1$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T b_i^k(t) = \sum_{t=1}^T a_i(t) - d \tag{3}$$

$$\beta_i^k(t) \neq 1 \text{ if } C_i^k = 0 \tag{4}$$

$$\sum_{i=1}^I a_i(t) > 0 \tag{5}$$

$$W_i \leq w_i \leq u_i \leq U_i \tag{6}$$

$$r(t) \leq R_t \tag{7}$$

该模型目标函数(式(1))是为了追求产能最大化, 具体形式是要求进行生产的时间单元数最大化, 即从1~ $I$ 的所有生产线在从第1个时间单元到总时间单元*T*里, 用于生产从1~ $K$ 的所有产品的时间单元数最大。式(2)是用来实现各种产品的产量要求, 即满足各产品所需的生产时间要求, 而所需的生产时间由完全进行生产的时间单元和进行预防性维修的时间单元的维修间隙时间组成。式(3)保证进行预防性维修的时间单元的维修间隙时间可全部进行生产。式(4)保证生产线只能生产可以生产的产品, 以满足生产线的柔性限度要求。式(5)用来保证预防性维修能够进行。式(6)用来保证预防性维修在宽放区间内完成, 以满足预防性维修宽放区间的要求。式(7)用来满足维修班组数量要求。

3 实例分析

本文以实现某半导体芯片封装测试工厂的一组并联生产线一个工作周的预防性维修调度为分析实例。总共有13条生产线并联, 以半个工作日(12 h)即一个班为时间单元, 则一个工作周由14个班组成。13条生产线共享2组维修工人, 其中每条生产线做预防性维修需要1组工人工作0.7个班。生产线1~6可以生产A、B两种产品, 生产线7~13可以生产B、C两种产品。生产线1~13的预防性维修时间宽放区间依次为[2,4]、[4,6]、[6,8]、[1,3]、[3,5]、[7,9]、[8,10]、[5,7]、[10,12]、[9,11]、[12,14]、[11,13]、[5,7]。产品A、B、C在该工作周的生产时间要求依次为40、70、40个班。在满足各个产品生产时间要求、维修宽放区间、维修小组数量限制的前提下优化调度13条生产线在14个时间单元的生产和预防性维修。

Lingo是建立和求解线性、非线性和整数最佳化模型更快更简单更有效率的综合工具。基于本文所建模型和实例数据, 在Lingo9.0软件中建模如下(下述语句为Lingo中的实际模型语句, 其中前有“!”为注释语句):

```
!基于实例的Lingo模型开始;
model:
sets:
    links/I1...I13/;
```

!生产线1~13;  
 time/ $t_1 \dots t_{14}$ ;  
 !时间单元1~14;  
 status(links, time): A, B, C, PM;  
 !决策变量集合, A表示在生产A产品, B表示在生产B产品, C表示在生产C产品, PM表示进行预防性维修;

endsets  
 max=@sum(status(I,J):A(I,J)+B(I,J)+ C(I,J));  
 !目标函数为产量最大化;  
 PM(1,2)+PM(1,3)+PM(1,4)=1;  
 PM(2,4)+PM(2,5)+PM(2,6)=1;  
 PM(4,1)+PM(4,2)+PM(4,3)=1;  
 PM(5,3)+PM(5,4)+PM(5,5)=1;  
 PM(6,7)+PM(6,8)+PM(6,9)=1;  
 PM(7,8)+PM(7,9)+PM(7,10)=1;  
 PM(9,10)+PM(9,11)+PM(9,12)=1;  
 PM(10,9)+PM(10,10)+PM(10,11)=1;  
 PM(11,12)+PM(11,13)+PM(11,14)=1;  
 PM(12,11)+PM(12,12)+PM(12,13)=1;  
 PM(13,5)+PM(13,6)+PM(13,7)=1;  
 !上述约束保证PM在时间宽放区间内完成;  
 @for(status(I,J): @BIN(A); @BIN(B); @BIN(C); @BIN(PM); );  
 !上述约束保证变量A、B、C、PM只能取0或1;

@sum(status(I,J):A(I,J))>=40;  
 !实现产品A的产量约束;  
 @sum(status(I,J):B(I,J))>=70;  
 !实现产品B的产量约束;  
 @sum(status(I,J):C(I,J))>=40;  
 !实现产品C的产量约束;  
 @for(time(J):@sum(links(I):PM(I,J))<=1.4  
 !实现维修班组数量约束;  
 @for(status(I,J):(PM(I,J)+A(I,J)+B(I,J)+

C(I,J))<=1; );  
 !保证设备在一个时间单元内只能进行一种操作或者闲置;  
 end  
 !基于实例的Lingo模型结束。

进一步求解, 得出的调度结果和班次操作状况分别如表1和表2所示。

表1横向第一行为时间单元(该实例为班)1~14, 纵向第一列为生产线1~13。每个单元格内容为该生产线在相应班次的操作(A代表生产产品A, B代表生

产产品B, C代表生产产品C, PM代表进行预防性维修)。表2纵向第一列为生产线1~13, 横向第一行的“操作班”列表示该生产线进行预防性维修的班次(如“2”则表示第2班进行预防性维修), 横向的最后4列分别表示在该班次进行预防性维修(PM)、生产A产品、生产B产品、生产C产品的操作时间。

表1 各生产线实例调度结果

生产线	班次													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	A	PM	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
2	A	A	A	A	A	PM	A	A	A	A	A	A	A	A
3	A	A	A	A	A	A	A	PM	A	A	A	A	A	A
4	A	PM	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
5	B	B	B	PM	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
6	B	B	B	B	B	B	PM	B	B	B	B	B	B	B
7	B	B	B	B	B	B	B	PM	B	B	B	B	B	B
8	B	B	B	B	B	B	PM	B	B	B	B	B	B	B
9	B	B	B	B	C	C	C	C	C	PM	C	C	C	C
10	C	C	C	C	C	C	C	C	C	PM	C	C	C	C
11	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	PM	C	C	C
12	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	PM	C	C	C
13	B	B	B	B	PM	C	C	B	B	B	B	B	B	B

表2 进行预防性维修班次操作内容和各自持续时间

生产线	操作内容				
	操作班	进行 PM	生产 A (班)	生产 B (班)	生产 C (班)
1	2	0.7	0.3	0	0
2	6	0.7	0.3	0	0
3	8	0.7	0.3	0	0
4	2	0.7	0.3	0	0
5	4	0.7	0.3	0	0
6	7	0.7	0.3	0	0
7	8	0.7	0	0	0.3
8	7	0.7	0	0	0.3
9	10	0.7	0	0	0.3
10	10	0.7	0	0	0.3
11	12	0.7	0	0	0.3
12	11	0.7	0	0	0.3
13	5	0.7	0	0	0.3

对表1和表2中的数据进行统计得出产品A的生产时间为41.8班, 大于生产时间要求40班; 产品B的生产时间为79班, 大于生产时间要求70班; 产品C的生产时间为52.1班, 大于生产时间要求40班; 生

产线1~6只生产A或者B产品, 生产线7~13只生产B或者C产品, 符合半柔性限制约束; 各条生产线的预防性维修都在相应时间维修宽放区间内完成, 符合维修宽放区间约束; 同一时间单元所需维修班组数也未超过维修班组约束的范围。

## 4 结束语

本文针对半导体芯片封装测试多产品半柔性并联生产线的预防性维修调度问题展开研究, 提出了多产品半柔性并联生产线预防性维修调度的主要约束因素, 强调将多产品产量作为重要的约束因素, 并根据半导体芯片封装测试设备昂贵, 需要长时运转的特性将产能最大化作为目标函数, 建立了以生产线柔性限度、各产品所需的生产时间要求、预防性维修宽放区间、维修班组数量限制为约束的半导体芯片封装测试多产品半柔性并联生产线预防性维修调度的模型。结合某半导体并联生产线的应用实例, 应用线性规划工具lingo软件建立调度模型并成功地求解, 调度结果已在半导体芯片封装测试工厂应用, 验证了该模型的可行性和准确性。

## 参 考 文 献

- [1] SIM S H, ENDRENYI J. Optimal preventive maintenance with repair[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1998, 37(1): 92-96.
- [2] VAN DIJKHUIZEN G C, VAN HARTEN A. Two stage generalized age maintenance of a queue-like production system[J]. European Journal of Operational Research, 1998, 108(2): 363-378.
- [3] YAO Xiao-dong, FU Mi, MARCUS S I. Optimization of preventive maintenance scheduling for semiconductor manufacturing system: models and implementation[C]// Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Control Applications. [S.l.]: IEEE, 2001.
- [4] YAO Xiao-dong, FU M, MARCUS S I. Optimal preventive maintenance scheduling in semiconductor manufacturing[J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2004, 17(3): 345-35.
- [5] ALARDHI M, LABIB A W. Preventive maintenance scheduling of multi-cogeneration plants using integer programming[J]. Journal of the Operational Research Society, 2008, 59(4): 503-509.
- [6] ALIDAEE B, WANG H. An improved integer programming for preventive maintenance of complex systems[J]. Journal of the Operational Research Society, 2009, 60(9): 1295-1297.
- [7] 厉红, 钱省三. 集束型芯片封装测试设备的预防维修计划优化[J]. 半导体技术, 2005, 30(11): 39-42.  
LI Hong, QIAN Xing-san. Optimizing of preventive maintenance scheduling for cluster tools of semiconductor manufacturing[J]. Semiconductor Technology, 2005, 30(11): 39-42.
- [8] GAO Jie, GEN M, SUN Lin-yan. Modelling and scheduling preventative maintenance in semiconductor manufacturing industry with MAs[J]. Manufacturing Technology and Management, 2009, 16(2): 101-126.
- [9] 朱昱, 宋建社, 曹继平, 等. 一种考虑装备维修流程的多维修任务调度[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(7): 1366-1369.  
ZHU Yu, SONG Jian-she, CAO Ji-ping, et al. Maintenance task scheduling model of multiunit considering armament maintenance process[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(7): 1366-1369.
- [10] 朱昱, 宋建社, 王正元. 基于最大保障时间的战时装备维修任务调度模型[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(1): 11-14.  
ZHU Yu, SONG Jian-she, WANG Zheng-yuan. Scheduling model of equipment maintenance task in wartime based on the most support time[J]. Fire Control & Command Control, 2009, 34(1): 11-14.
- [11] 王正元, 严小琴, 朱昱, 等. 一种考虑专业的动态维修任务调度的优化方法[J]. 兵工学报, 2009, 30(2): 252-256.  
WANG Zheng-yuan, YAN Xiao-qin, ZHU Yu, et al. An optimal method on dynamic maintenance task scheduling with subject taken into account[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(2): 252-256.
- [12] 张威, 骆诗定, 肖云魁. 军用装备维修调度计划仿真研究[J]. 军事交通学院学报, 2010, 12(1): 34-39.  
ZHANG Wei, LUO Shi-ding, XIAO Yun-kui, et al. Simulation research on military equipment maintenance scheduling plan[J]. Journal of Academy of Military Transportation, 2010, 12(1): 34-39.

编辑 黄 莘