

文章编号: 1674-9057(2011)02-0278-08

不确定条件下 SMT 产品生产规划的建模及 GA 求解

刘电霆¹, 周德俭²

(1. 桂林理工大学 机械与控制工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 广西工学院 机械工程系, 广西 柳州 545006)

摘要: 针对 PCBA 组装企业的 SMT 产品生产规划问题, 给出了一种考虑预估订单和生产线故障率等不确定条件的生产任务排程方法。该方法将预估订单的批量、来料时间和交货期等用区间数表示, 建立其不确定型调度模型, 并采用可能度水平将该模型转换为确定型, 然后用遗传算法进行求解。给出了该遗传算法的结构, 并提出了“染色体按生产线分段、段内按产品加工序排列”的 8 进制编码、基因交叉和段长改变的变异操作等具体方法。实验结果验证了其可行性, 具有较好的参考价值。

关键词: 任务规划; 不确定; 建模; 遗传算法; 区间数

中图分类号: TP391

文献标志码: A

0 引言

面对复杂多变的产品与市场环境, SMA (surface mount assembly) 组装业必须适应多用户、多品种、小批量的生产要求, 以最低的成本及时地生产出用户满意的 SMT (表面组装技术, surface mount technology) 产品。为此, SMA 组装车间的合理规划调度显得尤为重要。

关于 SMA 组装的调度问题, 从 20 世纪 90 年代起, 国外已着手进行了研究: T M Tirpak 等^[1]研究了 SMT 贴片机旋转头工作周期的优化问题, 并提出采用自适应模拟退火算法进行求解; V J Leon 等^[2]讨论了单台 SMA 装配机操作的设置策略, 涉及送料器交替、贴片顺序和 PCB 板的顺序等设置, 针对分组设置方法, 给出了其相应步骤、数学模型和分层聚类算法, 针对部分交替设置方法, 也给出了其算法步骤; P Neammanee 等^[3]针对带送料器容量约束的、单机器顺序依赖时间设置的 SMA 装配调度问题, 建立提前和拖延惩罚最少的优化模型, 采用遗传算法与最小停止时间调度规

则、工具更换迅速原则相结合的混合启发式算法来求解其调度问题; P Ji 等^[4]针对一条 SMA 装配线的元器件分配问题, 建立了最大最小整数规划模型, 以最小加工周期为目标, 用遗传算法进行优化求解; N V Hop 等^[5]针对多类型并行机器的 SMA 装配调度问题, 建立多目标优化模型, 包括 PCB 板分组及每台机器平衡, 每台机器上 PCB 排序机的 PCB 板上元件切换等, 并采用混合遗传算法进行求解; Y Crama 等^[6]将 SMA 装配的生产计划问题, 按层次分解为优化子问题, 并着重讨论了单机器单类型 SMA、单机器多类型 SMA 和多机器的优化调度问题, 建立了其数学模型, 采用启发式算法进行求解; F R Lin 等^[7]将 SMA 多生产线系统分为生产线和电路板 2 级进行协同调度, 先确定 1 周内每天生产的 SMA 类型和数量, 然后进行微调, 以便发挥最大生存能力、提高生产率, 包括平衡各生产线的负载和供货期接近的任务提前等。

在我国, 这方面的研究起步较晚。其中, 李凯^[8]采用旅行商问题对贴片机的贴片头和吸嘴移

收稿日期: 2010-07-25

基金项目: 广西自然科学基金项目(桂科自 0991251); 广西制造系统与先进制造技术重点实验室开放基金项目(09-007-05_011); 广西科学研究与技术开发计划项目(桂科攻 0992006-8)

作者简介: 刘电霆(1966—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 制造自动化与信息化、不确定环境下控制与决策, liudian@glite.edu.cn。

引文格式: 刘电霆, 周德俭. 不确定条件下 SMT 产品生产规划的建模及 GA 求解 [J]. 桂林理工大学学报, 2011, 31(2): 278-285.

动顺序进行描述, 尝试运用了回溯算法进行求解。郭妹娟^[9]针对 SMT 生产线多台贴片机之间负荷分配问题, 以使贴片时间与更换吸嘴时间之和最大、工作台生产时间最小化为目标构建了负荷均衡模型, 并采用遗传算法进行求解。韦平^[10]根据并行机器调度的理论研究, 以及提前/拖期 (E/T) 调度问题的解决方案, 给出了 SMT 车间排产优化的数学模型和目标函数, 并将遗传算法和启发式规则相结合进行求解。成萌^[11]针对系统级优化采用按元器件引脚间距来判断 SMA 的相似性, 将 SMA 分组并分配到相应配置的生产线上; 通过组合优先调度规则对同一类型的 SMA 进行排序; 建立了多台贴片机之间元器件的分配数学模型, 并采用遗传算法优化分配元器件, 使贴片机之间的生产负荷得到合理分配, 消除了贴片机之间循环时间的不平衡; 建立多条生产线之间平衡问题的数学模型, 并采用遗传算法和模拟退火相结合求解, 提高了生产线效率, 减少了生产线的总空闲时间。

综上所述, 已有的研究主要涉及 3 个层次的 SMT 产品的生产调度问题, 即系统级、生产线级和贴装设备级优化。当加工工艺参数设定后, 贴片头的每次移动时间、吸嘴的每次更换时间、SMA 的每次翻板和移动时间等都是确定的。也就是说, 这 3 个层次的生产调度实际上是确定性组合优化问题。

虽然有个别学者在系统级之上研究了 SMT 产品的生产排程问题, 如李国民^[12]针对 SMA 在同一个生产系统中加工双面的特性, 综合考虑生产系统中多条生产线的非等效性、生产过程中的换线时间、交货期和来料情况等影响因素, 建立生产系统排程的数学模型, 并采用遗传算法进行求解, 但也只是考虑了确定性条件参数, 也属于确定组合优化问题。

在全球化市场竞争的今天, SMT 产品的生产企业要面对多变的客户订单、多变的产品类型, 还要考虑所拥有生产设备的可靠率等问题。本文探讨在这种不确定环境下、一段时间内的 SMT 产品的生产规划问题。

1 问题描述

对于一个 SMT 产品的生产企业来说, 往往需要对生产提前作计划, 比如季度生产计划、月生

产计划, 即在一段时间内, 安排每条生产线加工何种订单的哪类 SMT 产品, 并确定从何时开始、加工多少块该类 SMT 产品, 以保证及时完成订单的生产并获得最优的生产效率等。这种计划 (或规划) 一般是针对现有订单和预期订单, 并在考虑现有生产设备情况下制定的。

由于预期订单只能根据以往的合作经验和目前的市场情况做出判断, 在实际获得订单前, 其 SMT 产品种类、数量和交货期等都是预测的不确定值。另外, 生产设备的运行状况也必须考虑, 其故障率只能根据经验估计。也就是说, 这种生产计划是在不确定条件下做出的, 称为不确定性生产规划。

将 SMT 生产线整体地看作一单位机台, 则这种不确定环境下 SMT 产品的生产规划问题可抽象为不确定性资源受限项目调度问题 (resource-restrained project scheduling problem under uncertainty, URCPSP)。它可简单地概括如下:

有若干张 SMA 制造加工工单, 在若干条生产线 (单位机台) 加工, 除某些产品不能在指定机台上加工外, 可以在任意一台机台上加工, 但加工效率不同。产品在开始加工前需要设定工艺参数和投放物料等, 花费一定的准备时间。每条生产线的故障率预先估计。加工订单中有些是已签合同的, 其品种、数量和交货期是确定值; 有些是预测的订单, 其品种、数量和交货期都是估计值。现要进行生产预规划, 安排哪条生产线在哪一段时间加工哪个订单的哪种 SMT 产品, 以实现某些优化的目标, 比如使生产过程尽量缩短、让存货状况尽量稳定、提高资源和设备的使用率等等。

2 数学模型建立及转换

2.1 数学模型建立

2.1.1 变量和参数 结合生产实际, 考虑到数学模型表达简洁、全面的要求, 对变量和参数设定如下。

① 已知参数。

M : SMT 生产线条数;

N : 工件总数, $N = N_D + N_U$;

N_D : 已签订单工件总数;

N_U : 预估订单工件总数;

i : 已签订单工件编号, $i = 1, 2, \dots, N_D$;

j : SMT 生产线编号, $j = 1, 2, \dots, M$;
 k : 工件加工顺序编号, $k = 1, 2, \dots, N$;
 l : 预估订单工件编号, $l = 1, 2, \dots, N_0$;
 r : 工件 i 或 l 的同一编号, $r = 1, 2, \dots, N$;
 Q_i : 工件 i 的加工批量, $i \leq N_0$;
 S_{rj} : 工件 r 在生产线 j 的处理速度, $S_{rj} = 0$ 表示

工件 r 不能在生产线 j 上生产;

EST_i : 工件 i 的最早开始加工时间(job earliest start time), 物料约束;

LFT_i : 工件 i 的最晚结束加工时间(job latest finish time), 交货期约束;

AT_j : 生产线 j 可以开始加工每种 SMT 产品前, 设定工艺参数和投放物料等的准备时间(machine ready available time);

FR_j : 生产线 j 的设备故障率(machine failure rate)。

α_r : 工件 r 的提前开工惩罚系数;

β_r : 工件 r 的推迟交货惩罚系数。

② 不确定参数。

\tilde{Q}_l : 工件 l 的预估加工批量;

\widetilde{EST}_l : 工件 l 的最早开始加工时间(job earliest start time), 物料约束;

\widetilde{LFT}_l : 工件 l 的最晚结束加工时间(job latest finish time), 预估交货期约束;

③ 决策变量。

X_{rjk} : 工件 r 安排在生产线 j 的第 k 批加工顺序进行加工;

\widetilde{ST}_{jk} : 生产线 j 的第 k 批加工顺序开始加工时间;

④ 辅助变量。

δ_{jk} : 生产线 j 的第 k 批加工工件开始前的准备时间;

\widetilde{FT}_{jk} : 生产线 j 的第 k 批加工工件的完成时间;

PT_{ij} : 工件 i 在生产线 j 的处理时间, $PT_{ij} = Q_i/S_{ij}$; 如果 $S_{ij} = 0$, 则 $PT_{ij} = 0$;

\widetilde{PT}_{lj} : 工件 l 在生产线 j 的处理时间, $\widetilde{PT}_{lj} =$

\tilde{Q}_l/S_{lj} ; 如果 $S_{lj} = 0$, 则 $\widetilde{PT}_{lj} = 0$;

\widetilde{ST}_r : 第 r 批工件开始加工时间;

\widetilde{FT}_r : 第 r 批工件加工完成时间。

2.1.2 模型假设 本研究的基本假设有下列几项^[12]。

① 工作不可分割, 即每一个工件同时只能在一部机器上进行加工;

② 为了减少机器的设定和调整时间, 机器在一段时间内只加工一类工件。

2.1.3 数学模型 在假设条件限定的环境下, 以整体(开始加工)提前和(完成加工)拖延的惩罚最小为目标, 得出了数学模型如下。

目标函数

$$\min F = \left\{ \sum_{i=1}^{N_0} Q_i \{ \alpha_i \times \max[(EST_i - ST_i), 0] + \beta_i \times \max[(FT_i - LFT_i), 0] \} + \sum_{i=1}^{N_0} \tilde{Q}_i \{ \alpha_i \times \max[(\widetilde{EST}_i - \widetilde{ST}_i), 0] + \beta_i \times \max[(\widetilde{FT}_i - \widetilde{LFT}_i), 0] \} \right\} \text{ S. T.}$$

$$\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N X_{rjk} = 1, r = 1, \dots, N; \quad (1)$$

$$\sum_{r=1}^N X_{rjk} \leq 1, j = 1, \dots, M, k = 1, \dots, N; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \widetilde{FT}_{jk} &= \widetilde{ST}_{jk} + (1 + FR_j) \left[\sum_{i=1}^{N_0} (X_{ijk} \times PT_{ij}) + \right. \\ &\quad \left. \sum_{l=1}^{N_0} (X_{lyk} \times \widetilde{PT}_{lj}) \right], j = 1, \dots, M, k = 1, \dots, N; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\widetilde{ST}_{jk} \geq \widetilde{FT}_{j(k-1)} + \delta_{jk}, j = 1, \dots, M, k = 1, \dots, N; \quad (4)$$

$$\delta_{jk} = \sum_{r=1}^N AT_j \times X_{rjk}, j = 1, \dots, M, k = 1, \dots, N; \quad (5)$$

$$X_{rjk} = 0, \text{ 若 } S_{rj} = 0; \quad (6)$$

$$\widetilde{ST}_r = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N (X_{rjk} \times \widetilde{ST}_{jk}), r = 1, \dots, N; \quad (7)$$

$$\widetilde{FT}_r = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N (X_{rjk} \times \widetilde{FT}_{jk}), r = 1, \dots, N. \quad (8)$$

其中: 式(1)表示每个产品 r 唯一位置; 式(2)表示每个位置 (j, k) 加工唯一产品或为空闲; 式(3)表示产品加工的开始时间与结束时间的关系式; 式(4)表示相邻产品加工的先后顺序; 式(5)表示生产线 j 的第 k 个加工工件开始前的准备时间; 式(6)表示不能在生产线 j 上加工的产品 r 情况; 式(7)表示产品 r 加工开始时间; 式(8)表示产品 r 加工结束时间。

2.2 模型转换

由于每个预估订单的加工批量及交货期等是无法准确知道的，所以该数学模型表示一种不确定优化问题，目前还无有效的直接求解方法，通常是将其转换为确定性数学模型，然后采用相应的方法求解。

预估订单的加工批量及交货期等可表示为一区间数^[13-14]：

记 $\tilde{\mu} = [a, b] = \{x \mid a \leq x \leq b, a, b \in \mathbf{R}\}$ ，称 $\tilde{\mu}$ 为一个区间数。特别地，若 $a = b$ ，则 $\tilde{\mu}$ 退化为一个实数。

设两个区间数 $l_{\tilde{\mu}} = [a, b]$ 和 $l_{\tilde{\nu}} = [c, d]$ ，且 $l_{\tilde{\mu}} = [b - a]$ ， $l_{\tilde{\nu}} = [d - c]$ ，实数 $\beta \in [0, 1]$ ，记 $p(\tilde{\mu} \geq \tilde{\nu})$ 为 $\tilde{\mu} \geq \tilde{\nu}$ 的可能度，定义它们的运算法则如下。

- (1) $\tilde{\mu} + \tilde{\nu} = [a + c, b + d]$;
- (2) $\tilde{\mu} - \tilde{\nu} = [a - d, b - c]$;
- (3) $\tilde{\mu} \times \tilde{\nu} = [ac, bd]$;
- (4) $\tilde{\mu} \div \tilde{\nu} = \left[\frac{a}{d}, \frac{b}{c}\right]$;
- (5) $\beta\tilde{\mu} = [\beta a, \beta b]$;
- (6) $p(\tilde{\mu} \geq \tilde{\nu}) = \min\left\{\max\left(\frac{b - c}{l_{\tilde{\nu}} + l_{\tilde{\mu}}}, 0\right), 1\right\}$ 。

设置可能度水平 λ ^[15]，可将上述数学模型式(1)~式(8)中含区间数的式子变为只含确定性变量和数值的形式

$$p[f_a(\cdot) \geq f_b(\cdot)] \geq \lambda. \quad (9)$$

这样，上述不确定优化的数学模型转换为确定型。

3 基于遗传算法的模型求解

该问题显然是一个 NP-Hard 问题，用解析方法、分支定界法和基于规则的一般启发式算法等很难求解。

在规模较大时，采用遗传算法(genetic algorithm, GA)可以较快地得到问题的优化解，且是全局性的，所以采用 GA 对转换后的调度模型进行求解。

3.1 编码方式

算法采用“染色体按生产线分段、段内按产品加工工序排列”的 N 进制编码方法。

$$\underbrace{x_{11} \ x_{12} \ \cdots \ x_{1N}}_{\text{第 1 条生产线}} \ \underbrace{x_{21} \ x_{22} \ \cdots \ x_{2N}}_{\text{第 2 条生产线}} \ \cdots \ \underbrace{x_{M1} \ x_{M2} \ \cdots \ x_{MN}}_{\text{第 M 条生产线}}$$

按生产线对染色体进行分段，每个段代表 1 条生产线安排情况，共 M 段；每个段内基因顺序号为

各生产线加工顺序编号，第 m 段有 N_m 个位。基因 x_{jk} 取值为 $r (r = 1, 2, \dots, N)$ ，代表第 j 条生产线的第 k 号加工工序加工第 r 号订单工件。编码的染色体总长度为：

$$L = \sum_{m=1}^M N_m = N, 0 \leq N_m \leq N.$$

3.2 适应度函数

生产规划的目标函数为提前/拖延的惩罚 F 最小，为极小化问题。因此，遗传算法中，规模为 H 的种群中个体 $h (h = 1, 2, \dots, H)$ 的适值函数定义为

$$f_h = 1/F_h. \quad (10)$$

3.3 选择

采用按比例适应度分配法。个体 h 的适应度为 f_h ，则 h 被复制的概率为^[16]

$$p_h = f_h / \sum_{h=1}^H f_h. \quad (11)$$

3.4 交叉算子

采用单点交叉法，交叉概率为 p_c 。记参与交叉运算的两个个体为 m 和 f ，选择一随机整数 $q (1 \leq q \leq J)$ ，由 m 和 f 通过在 q 点交叉运算产生两个后代分别为 d 和 s 。在 d 的染色体中，前 q 个位置继承于 m ，而后 $J - q$ 个位置来自于 f 。 s 的染色体形成过程与 d 相似。

交叉运算后，需要验证约束条件是否满足。若不满足，则本次操作结果取消，重新进行交叉运算，直到满足约束条件为止。

3.5 变异算子

变异操作共有 2 种：一是 2 点交换，即以概率 p_m 随机交换 2 点基因位；二是段长变化，即以概率 p_m 更改各段基因位数，如第 2 段含 3 位变成含 1 位等。

3.6 算法结构

具有最佳适应度值的个体称为优良个体，在算法中从上一代中复制一定数量 h_g 的优良个体直接进入下一代，有利于优良个体特性的传播和对后代的教育作用。这样，算法流程如下所示^[17]。

初始化参数： $M, N_D, N_U, Q_i, S_j, EST_i, LFT_i, AT_j, \alpha_r, \beta_r, \tilde{P}_i, \tilde{Q}_i, \widehat{EST}_i, \widehat{LFT}_i, \widehat{FR}_j, H, Z, p_c, p_m, h_g$ ，用随机方法产生初始种群 POP_0 ，并计算个体适应度值；

```
z = 0
WHILE z < Z DO
```

比例复制 H 个个体并两两匹配；

对匹配后的个体利用交叉算子进行操作, 生成 POP' _z;

利用变异算子对 POP' _z 进行操作, 生成 POP'' _z;

计算 POP'' _z 个体的适应度值和 g;

从 POP'' _n 中选择 h_g 个最优个体, 从 POP'' _n 选择 M - h_g 个最优个体形成 POP_{z+1}

z = z + 1

ENDWHILE;

输出 POP_z 中适应度值最好的个体。

4 实例分析

4.1 生产规划问题描述

某小型 SMA 加工企业, 一共有 SMT 生产线 4 条。主要区别是 Quadris、Sony 和 4797 型高速贴片机及通用贴片机的类型和数量不同, 其他设备一致^[12]。这 4 条生产线的故障率分别为 2%、3%、1.5%、2.5%。产品在开始加工前需要投放物料和设置工艺参数等, 费时均为 30 min。

某月有 5 种已签订单和 2 种预估订单的 SMT 产品待加工。同一产品在不同生产线上加工的速度是不同的(表 1)。

提前和推延罚金系数分别为 [3, 2, 3, 4, 6, 1, 4]、[5, 6, 4, 8, 6, 7, 8]。现需要对这 7 种 SMT 产品加工进行生产规划。

4.2 生产规划问题建模

由已知条件, 可知目标函数:

$$\begin{aligned} \min F = & 3\ 500 \{ 3 \times \max[(7.0 - ST_1), 0] + \\ & 5 \times \max[(FT_1 - 586.8), 0] \} + \\ & 900 \{ 2 \times \max[(36.0 - ST_2), 0] + \\ & 6 \times \max[(FT_2 - 611.5), 0] \} + \\ & 1\ 500 \{ 3 \times \max[(349.0 - ST_3), 0] + \\ & 4 \times \max[(FT_3 - 619.5), 0] \} + \\ & 2\ 000 \{ 4 \times \max[(370.0 - ST_4), 0] + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & 8 \times \max[(FT_4 - 620.0), 0] \} + \\ & 350 \{ 6 \times \max[(514.0 - ST_5), 0] + \\ & 6 \times \max[(FT_5 - 636.0), 0] \} + \\ & [400, 500] \{ 1 \times \max[((391.0, 445.0) - \widetilde{ST}_6), 0] + \\ & 7 \times \max[(\widetilde{FT}_6 - (612.0, 644.0)), 0] \} + \\ & [200, 300] \{ 4 \times \max[((463.0, 535.0) - \widetilde{ST}_7), 0] + \\ & 8 \times \max[(\widetilde{FT}_7 - (636.0, 668.0)), 0] \}。 \end{aligned}$$

S. T. :

$$\sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^7 X_{rjk} = 1, r = 1, \dots, 7, \quad (12)$$

$$\sum_{r=1}^7 X_{rjk} \leq 1, j = 1, \dots, 4, k = 1, \dots, 7。 \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} \widetilde{FT}_{1k} &= \widetilde{ST}_{1k} + 1.02[48.61X_{11k} + 2.68X_{21k} + \\ & 53.57X_{31k} + 16.67X_{41k} + 1.24X_{51k} + \\ & (12.50, 15.63)X_{61k} + (4.35, 6.52)X_{71k}], \\ \widetilde{FT}_{2k} &= \widetilde{ST}_{2k} + 1.03[44.87X_{12k} + 2.68X_{22k} + \\ & 53.57X_{32k} + 19.61X_{42k} + 1.24X_{52k} + \\ & (12.50, 15.63)X_{62k} + (4.35, 6.52)X_{72k}], \\ \widetilde{FT}_{3k} &= \widetilde{ST}_{3k} + 1.015[60.34X_{13k} + 2.68X_{23k} + \\ & 53.57X_{33k} + 23.53X_{43k} + 1.24X_{53k} + \\ & (12.50, 15.63)X_{63k} + (4.35, 6.52)X_{73k}], \\ \widetilde{FT}_{4k} &= \widetilde{ST}_{4k} + 1.025[44.87X_{14k} + 1.72X_{24k} + \\ & 37.50X_{34k} + 15.04X_{44k} + 0.79X_{54k} + \\ & (9.76, 12.20)X_{64k} + (4.35, 6.52)X_{72k}], \\ & k = 1, \dots, 7。 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \widetilde{ST}_{jk} &\geq \widetilde{FT}_{j(k-1)} + \sum_{r=1}^7 0.5X_{rjk}, j = 1, \dots, 4, \\ &k = 1, \dots, 7, \end{aligned} \quad (15)$$

表 1 订单情况
Table 1 Detail of orders

产品序号	生产数量	来料时间	交货时间	生产线加工速度/(件·h ⁻¹)			
				1号	2号	3号	4号
1	3 500	01T07	25T10	72	78	58	78
2	900	02T12	26T11:30	336	336	336	524
3	1 500	15T13	26T19:30	28	28	28	40
4	2 000	16T10	26T20	120	102	85	133
5	350	22T10	27T12	282	282	282	41
6	[400, 500]	17T07 - 19T13	26T12 - 27T20	32	32	32	41
7	[200, 300]	20T07 - 23T13	27T12 - 28T20	46	46	46	46

$$\widetilde{ST}_r = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N (X_{rjk} \times \widetilde{ST}_{jk}), r = 1, \dots, N, (16)$$

$$\widetilde{FT}_r = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N (X_{rjk} \times \widetilde{FT}_{jk}), r = 1, \dots, N. (17)$$

4.3 模型转换

由区间数计算法则可知, 当 $p(\tilde{\mu} \geq \tilde{\nu}) \geq 0.5$ 时, $a + b \geq c + d$ 。故为简化起见, 取可能度水平为 0.5, 则前面式(15)变为:

$$p(\widetilde{ST}_{jk} \geq \widetilde{FT}_{j(k-1)} + \sum_{r=1}^7 0.5X_{rjk}) \geq 0.5, \\ j = 1, \dots, 4, k = 1, \dots, 7。$$

其他等式按区间数的加、减、乘、除和倍乘运算法则求解, 则该数学模型化为确定型。

4.4 模型的遗传算法求解

4.4.1 编码 由于有 4 条生产线分配给 7 种产品, 所以基因编码有 4 段, 染色体总长度为 7 位。

例如第 1 段内染色体为 154, 表示第 1、5、4 号产品在第 1 条生产线的第 1、2、3 号加工序加工。

4.4.2 初始种群的产生 采用随机方法生成初始种群, 并按约束条件进行验证, 以保证初始值为可行解。总染色体数为 $7! = 5\,040$, 种群规模 K 取 20。

4.4.3 遗传算法程序 虽然 MATLAB 7.1 具有遗传算法工具 GATOOL, 但它更适用于函数优化, 而本例为含区间数约束的整数优化。为此, 笔者重新编写了遗传算法程序, 下面列出了几个主要函数的关键程序代码。

(1) 主函数程序

Function dispatchmain()

调用初始化参数函数 initialparameter()

调用初始化种群函数 initialpopulation()

for k = 1 : population_size (种群大小)

调用适应度函数 Finemoney() 计算染色体适应度

end

令遗传代数 gageration 为 1

while (gageration < = generation_size)

调用轮盘赌函数选择父辈 selectroulette()

调用单点交叉函数产生子辈 gacross1point()

调用交叉变异函数产生子辈 gamutationswap() 和

调用随机移动变异函数改变段长 gamutationmove()

由 h_g 个优良个体和交叉、变异个体组成下一代

绘制平均完工期限 plot(generation, duetime)

hold on

绘制优秀个体 plot(thisgoodgen, 's')

遗传代数加 1, gageration = gageration + 1

end

(2) 轮盘赌选择函数程序

function selectroulette()

for i = 1 : population_size

计算适应度比例 $p_k = f_k / \sum f_k$

end

调用排序函数 sort() 对适应度不比例进行排序

for i = 1 : population_size

计算累积概率 gawheel(i)

end

for i = 1 : population_size

产生随机数 $r = \text{rand}$

for j = 1 : length(gawheel)

if($r < \text{gawheel}(j)$)

按轮盘赌选择父辈 gaparents(i)

break

end

end

end

(3) 单点交叉函数程序

Function gacross1point()

计算交叉子辈数 ngacrossKids

index = 0

for i = 1 : ngacrossKids/2

index = index + 1;

选择 1 个父个体 parent1 = gaparents(index, :)

index = index + 1;

选择另 1 个父个体 parent2 = gaparents(index, :)

选择交叉点 csite = ceil(rand * string_length - 1)

产生 1 个子个体 gacrossKids(i, :) = [parent1(1 : csite), parent2((csite + 1) : end)]

产生另 1 个子个体 gacrossKids(i + ngacrossKids/ 2, :) = [parent2(1 : csite), parent1((csite + 1) : end)]

判断是否满足约束条件? 若满足则 i + 1 继续进行循环; 否则重新产生子个体。

end

(4) 两点交换变异函数程序

function gamutationswap()

计算变异子辈数 ngamutationKids

for i = 1 : ngamutationKids

选择 1 个父个体 mparent = gaparents(round(rand

* (population_size - 1) + 1, :)

选择基因的交叉位子

```

P1 = find( rand(1, string_length) < pm)
P2 = find( rand(1, string_length) < pm)
变异操作 mutationparent( 1, :) = [ mutationparent
( 1:(p1 - 1)), mutationparent( p2), mutationparent( (p1
+ 1):( p2 - 1)), mutationparent( p1), mutationparent
(( p2 + 1):end)]
产生 1 个子个体 gamutationKids(i, :) = mparent
判断是否满足约束条件? 若满足则 i + 1 继续进
行循环; 否则重新产生子个体。
end

```

(5) 段长随机改变函数程序

```

function gamutationmove( )
选择段长改变点 movePoints = find( rand(1,3) < pm)
变异操作
for i = 1: population_size
for j = 1:3
if movePoints == j
gaN(i, j) = gaN(i, j) + 1
gaN(i, j + 1) = gaN(i, j + 1) - 1
end
end
end
end

```

4.4.4 仿真测试 按种群规模为 20、迭代代数
为 10、交叉概率 p_c 为 0.8、变异概率 p_m 为 0.05、保
留优良个体数 h_g 为 2，按上述 MATLAB 遗传算
法程序，对本示例模型进行求解的仿真测试见图 1。

在图 1a、b 中为各代平均罚金(用‘.’表示)

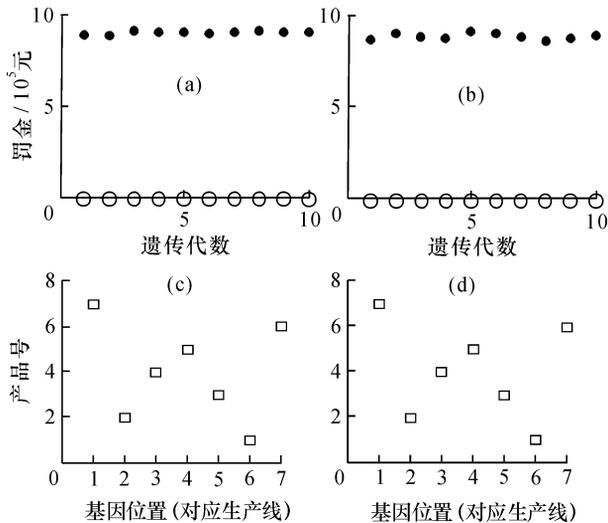


图 1 示例仿真运行结果

Fig. 1 Diagram of sample simulation results

和最少罚金(用‘.’表示)区间数的上、下限，
横坐标为遗传代数，纵坐标为罚金。图 1c、d 为
遗传算法求解后的最优个体，纵坐标上的位置分
别对应 7 种 SMA。横坐标上的各位置分别对应 4
条生产线：1、2 位置对应第 1 条生产线；3 位置
对应第 2 条生产线；4、5 位置对应第 3 条生产
线；6、7 位置对应第 4 条生产线。

由于生产任务不太多，在各条生产线上均衡
排产的方案较多，所以平均罚金变化不大，很快
就找到最优排产方案。

图 1 中，有 2 个矩形框分别对应纵坐标的第 7
和 2 号位置、横坐标的第 1 和 2 号位置，表示第 7
和 2 号 SMA 在第 1 条生产线上依次加工；同理，
第 4 号 SMA 在第 2 条生产线上加工、第 5 和 3 号
SMA 在第 3 条生产线上依次加工、第 1 和 6 号
SMA 在第 4 条生产线上依次加工，即最优排产方
案为 7245316。这时，罚金为 0 元。

5 结束语

SMT 生产企业对 SMA 加工进行预规划是必要
的，它可以避免生产安排的盲目性。本文在考虑
订单的不确定性和设备的可靠性等基础上，建立
了相应的生产任务预规划模型，并用遗传算法进
行求解，以使生产过程尽量缩短、存货状况尽量
稳定、资源和设备充分使用等。

实例也说明了该方法所建立模型及其转换原
理的正确性，其结果表明了所设计的遗传算法的
有效性。将所编制的 MATLAB 求解程序移植并嵌
入到相应的 ERP 或 MES 系统中，可以帮助中小企
业做到自动地进行车间生产任务排产。该方法还
对其他多项目、多目标的任务调度具有较好的参
考价值。

参考文献:

[1] Tirpak T M, Nelson P C, Asmani A J. Optimization of revolver head SMT machines using adaptive simulated annealing (ASA) [C] //IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium, 2000: 214-220.

[2] Leon V J, Peters B A. A comparison of setup strategies for printed circuit board assembly [J]. Computers & Industrial Engineering, 1998, 34 (1): 219-234.

[3] Neammanee P, Reodecha M. A memetic algorithm-based heuristic for a scheduling problem in printed circuit board as-

- sembly [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2009, 56 (1): 294 - 305.
- [4] Ji P, Sze M T, Lee W B. A genetic algorithm of determining cycle time for printed circuit board assembly lines [J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 128 (1): 175 - 184.
- [5] Hop N V, Nagarur N N. The scheduling problem of SMAs for multiple non-identical parallel machines [J]. *European Journal of Operational Research*, 2004, 158 (3): 577 - 594.
- [6] Crama Y, van de Klundert J, Spieksma F C R. Production planning problems in printed circuit board assembly [J]. *Discrete Applied Mathematics*, 2002, 123 (1-3): 339 - 361.
- [7] Lin F R, Shaw M J, Locascio A. Scheduling printed circuit board production systems using the two-level scheduling approach [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 1997, 16 (2): 129 - 149.
- [8] 李凯. 表面贴装系统的优化设计和实现 [D]. 成都: 西南交通大学, 2003.
- [9] 郭妹娟. SMT 生产线贴片机负荷均衡优化 [D]. 大连: 大连海事大学, 2008.
- [10] 韦平. SMT 车间排产优化的研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
- [11] 成萌. SMT 柔性制造系统中车间排产优化的研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- [12] 李国民. SMT 段生产排程系统研究应用 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [13] 杨纶标, 高英仪. 模糊数学原理及应用 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006.
- [14] 徐泽水. 不确定多属性决策方法及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [15] 刘电霆, 周德俭. 虚拟企业中细粒度协同设计任务的不确定调度及 GA 求解 [J]. *机械设计*, 2008, 25 (11): 4 - 7, 41.
- [16] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 28, 38.
- [17] 刘士新, 王梦光, 唐加福. 一种求解资源受限工程调度问题的遗传算法 [J]. *系统工程学报*, 2002, 17 (1): 1 - 7.

On SMT Production Schedule Under Uncertainty

LIU Dian-ting¹, ZHOU De-jian²

(1. *College of Mechanical and Control Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;*
2. *Department of Mechanical Engineering, Guangxi University of Technology, Liuzhou 545006, China*)

Abstract: Facing the problem of the SMT (surface mount technology) production plan in PCB (printed circuit board) assembly firm, a kind of new method of arranging the assembly tasks to the production lines under uncertain condition, where the customs' orders predicted and the fault rates of the production lines are considered, is presented. Its corresponding mathematic model, where the scales of orders predicted and the arriving time of materials and the supplying time of orders predicted are described as interval numbers, is set up. The model is converted into an ascertain one by possibility-level, and then solved by GA (genetic algorithm). The structure of this GA, especially, the method of octal chromosome coding, are proposed in this paper. And the mutation operations include the swap of the genes on two points and the length of the segments is changed randomly. A computational example is studied, the results reveal that the model and the converting method and the GA are correct. The method presented has high reference value in solving similar problem.

Key words: task plan; uncertainty; modeling; genetic algorithm; interval number