

文章编号: 1001-0920(2011)01-0010-07

考虑切换时间的多品种印刷电路板表面贴装生产线调度优化

靳志宏¹, 陈贞², 李向军³, 刘颖¹

(1. 大连海事大学 交通运输管理学院, 辽宁 大连 116026; 2. 烟台南山学院 工商管理
学院, 山东 烟台 265713; 3. 大连水产学院 信息工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要: 考虑了多品种小批量生产环境下的印刷电路板生产调度优化问题, 建立了以包括切换时间在内的多品种平均流程时间最小化为目标的调度优化模型. 针对电子产品组装独特的切换后效应, 开发了主动禁忌搜索算法, 分组间搜索和组内搜索2个层次对印刷电路板的排序问题进行优化. 通过与理论下界值比较的仿真实验显示了模型与算法的有效性及其现实应用的可行性.

关键词: 印刷电路板; 多品种小批量; 切换后效应; 流程时间下界值; 主动禁忌搜索

中图分类号: N945.15

文献标识码: A

Optimization on scheduling multi-type printed circuit boards with consideration of setup times in surface mounting assembly line

JIN Zhi-hong¹, CHEN Zhen², LI Xiang-jun³, LIU Ying¹

(1. College of Transportation Management, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. College of Business Administration, Yantai Nanshan University, Yantai 265713, China; 3. College of Information Engineering, Dalian Fisheries University, Dalian 116023, China. Correspondent: JIN Zhi-hong, E-mail: jinzhihong@dmlu.edu.cn)

Abstract: In a multi-type and low-volume production environment, a printed circuit boards(PCBs) assembly scheduling problem is considered. A mathematical model is proposed to minimize the flow times, in which the setup time accounts on a considerable proportion. Based on the characteristic of the carryover sequence dependent setups, a reactive tabu search algorithm is developed to determine the sequences within and among PCB groups. The simulation experiments of contrasting with the lower bounds of flowtime show the effectiveness and feasibility of the proposed model and algorithm.

Key words: printed circuit board; multi-type and low-volume; carryover sequence dependent setup; flowtime lower bound; reactive tabu search

1 引言

在印刷电路板(PCB)的生产过程中, 电子元器件的贴装是整条生产线的瓶颈, 决定整条生产线的生产效率^[1]. PCB生产者从客户那里接收品种不一、批量各异的订单, 且交货期限不同, 要获得最大利润, 就要在生产过程中最小化各订单作业的平均流程时间, 以此来最大限度地满足客户需求.

Johnson等人^[2]根据PCB种类数及机器台数, 将生产调度问题分为如下4个层次: 1) 单机单品种问题(1-1), 涉及单机优化问题, 其目标为总的贴装时间最小化^[3-4]; 2) 单机多品种问题(1-M), 涉及单机多品种间切换策略问题, 其目标为贴片机的切换时间最小化^[5-6]; 3) 多机单品种问题(M-1), 涉及将PCB所需要

贴装的原件在各台机器上的负荷分配问题, 其目标为均衡分配生产线上各台贴装机的的工作负荷^[7-8]; 4) 多机多品种问题(M-M), 涉及1)~3)的所有问题.

本文解决的正是第4个层次的多机多品种优化问题. 由于生产线上元件供料器容量的限制, 多品种PCB在表面贴装生产线上生产时, 避免不了元件供料器的切换问题. 不同的切换策略导致生产线的生产效率不尽相同. 文献[9]将切换策略分为4类: 单一切换策略、成组切换策略、最小切换策略和部分切换策略, 针对单机多品种PCB的生产环境, 对各种切换策略进行比较, 进而探讨各种切换策略的适用环境. [10]针对一种典型的表面贴装生产线, 采用最小切换策略将PCB排序, 使得每种PCB均与排在其前

收稿日期: 2009-10-20; 修回日期: 2010-01-04.

基金项目: 国家自然科学基金项目(70572086); 辽宁省自然科学基金项目(20052140).

作者简介: 靳志宏(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 从事物流系统优化、生产与运作管理等研究; 陈贞(1985-), 女, 助教, 硕士生, 从事生产与运作管理的研究.

面的PCB有最多的相同元件数以减少元件切换时间.[11]针对由两台贴片机组成的典型生产线优化问题进行了研究,在已知供料器配置的情况下对PCB进行分组,采用最小切换策略来切换元件供料器,利用禁忌搜索算法求解最优的PCB组间的贴装顺序.[12]提出了2种切换策略,优化了PCB贴装排序以及元件在各台贴片机上的负荷分配问题.关于第4个层次的多机多品种优化问题,上述现行研究均只研究了其中的第1个和第2个子问题,并未进行集成研究,因此也就不能实现整体调度优化.

本文在前期研究^[3,5-8,13]的基础上,针对多品种小批量的生产环境,对PCB表面贴装生产线调度进行总体优化.将其分解成4个相互关联的子问题,并在元件负荷分配^[7]、PCB成组与供料器切换^[13]优化的基础上,开发PCB组间以及组内搜索2个层次的主动禁忌搜索算法,据此对PCB贴装顺序进行优化.并在此基础上对上述子问题进行算法集成,以实现生产线调度的整体优化.

2 问题描述与建模

2.1 问题描述

电子产品组装因其元器件的数量庞大、品种繁多、电子产品寿命周期短等特点给生产运作调度带来了巨大的挑战,多品种、小批量、变批量已经成为电子制造的主流生产模式.在这种模式下,多品种之间的切换时间在整个组装时间中占据越来越大的比重.

图1为典型的表面贴装技术(SMT)生产线,由高速贴片机与多功能贴片机组成.每台贴片机能够容纳20个供料槽位,每种元件占据贴片机上的1个供料槽位.一般来说,单品种PCB所需要的元件种类数一般不会超过供料器的容量,但多品种PCB所需的元件种类总数通常超出供料器的容量.贴装过程中,不同品种PCB所需要的元件被安置在这些供料槽上,取贴装置从供料槽上取下元件后贴装到PCB上指定的位置.根据对实证研究对象的调查数据,高速贴片机平均贴装1个元件的时间为0.06s,平均切换1个供料槽的时间为180s.多功能贴片机有2个工作台,但只有1个工作台工作,另外1个工作台只用于放置大型或异型元件.每个工作台容纳10个供料槽,平均贴装1个元件需要0.18s,平均切换1个供料器的时间

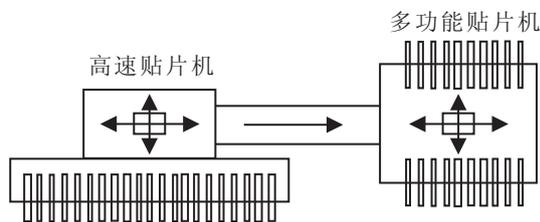


图1 典型SMT生产线

为220s.在不同品种的PCB间切换时,贴片机都需要一定的准备切换时间,通常为切换一个元件供槽时间的6倍左右,即1200s.由此可见,切换时间在电子产品组装过程中具有举足轻重的地位.

本文将多品种PCB生产调度问题分解为以下4个子问题:1)元件种类在各台贴片机上的负荷分配;2)PCB成组;3)元件供料槽配置及切换策略选择;4)PCB排序.文献[7]解决了子问题1),文献[13]解决了子问题2)与3),本文将在此基础上着重解决子问题4).目标函数为求多品种PCB在生产线上的平均流程时间最短,将所涉及的PCB生产排序问题进一步分解成PCB组间排序和PCB组内排序2个层次.在此基础上,对这些相互关联的子问题进行集成,进而实现生产线整体的调度优化.

2.2 数学建模

模型参数及决策变量说明如下:

1)模型参数为: ε 是一个非常小的正数; L 是一个非常大的正数; I 是PCB种类集合; $i \in I$ 是PCB种类编号; b_i 是PCB种类 i 的生产批量, $i \in I$; G 是PCB组的集合; B_g 是PCB组 g 内所含PCB种类的集合, $g \in G$; g 是PCB组编号, $g \in G$; C 是所有元件种类集合; c 是元件种类编号, $c \in C$; m 是贴片机编号, $m = 1, 2$; F^m 是贴片机 m 上所能容纳的供料器数量, $m = 1, 2$; t_c^m 是元件种类 c 在贴片机 m 上的单位贴片时间, $m = 1, 2, c \in C$; $p_{i,c}$ 是PCB种类 i 需要贴装的元件种类 c 的个数, $i \in I, c \in C$; st^m 是贴片机 m 上元件供料槽的单位切换时间, $m = 1, 2$; $PT_{g,i}^m$ 是组 g 内的PCB种类 i 在贴片机 m 上的贴片时间, $i \in I, m = 1, 2$.

2)决策变量为

$$v_{i'i}^g = \begin{cases} 1, & \text{组 } g \text{ 内的 PCB 种类 } i \text{ 在 } i' \text{ 的紧后贴装;} \\ 0, & \text{otherwise;} \end{cases}$$

$$i', i \in B_g, g \in G.$$

$$u_{g'g}^g = \begin{cases} 1, & \text{PCB 组 } g \text{ 在 } g' \text{ 的紧后贴装;} \\ 0, & \text{otherwise;} \end{cases}$$

$$g', g \in G.$$

$$d_{g,c}^m = \begin{cases} 1, & \text{组 } g \text{ 贴装时需要在贴片机 } m \text{ 上} \\ & \text{卸下元件种类 } c; \\ 0, & \text{otherwise;} \end{cases}$$

$$g \in G, c \in C, m = 1, 2.$$

$$a_{g,c}^m = \begin{cases} 1, & \text{组 } g \text{ 贴装时需要在贴片机 } m \text{ 上} \\ & \text{装上元件种类 } c; \\ 0, & \text{otherwise;} \end{cases}$$

$$g \in G, c \in C, m = 1, 2.$$

$$k_{g,c}^m = \begin{cases} 1, & \text{组 } g \text{ 贴装时需要在贴片机 } m \text{ 上} \\ & \text{保留元件种类 } c; \\ 0, & \text{otherwise;} \end{cases}$$

$$g \in G, c \in C, m = 1, 2.$$

3) 状态变量 (取决于决策变量) 为

$$h_{g,c}^m = \begin{cases} 1, & \text{组 } g \text{ 贴装时需要的元件种类 } c \text{ 已经} \\ & \text{配置在贴片机 } m \text{ 上;} \\ 0, & \text{otherwise;} \end{cases}$$

$$g \in G, c \in C, m = 1, 2.$$

J_g^m 是 PCB 组 g 贴装时, 贴片机 m 上的元件种类集合, $g \in G, m = 1, 2$.

CT_g^m 是 PCB 组 g 在贴片机 m 上的完工时间, $g \in G, m = 1, 2$.

$O_{g,i}^m$ 是组 g 内的 PCB 种类 i 在贴片机 m 上的完工时间, $g \in G, i \in B_g, m = 1, 2$.

$ST_{g,i}^m$ 是组 g' 在组 g 的紧前贴装时贴片机 m 上的切换时间, $g', g \in G, m = 1, 2$.

4) 目标函数为

$$z^* = \min \left(\sum_{g \in G} \sum_{i \in B_g} O_{g,i}^2 \right) / |I|. \quad (1)$$

5) 约束条件为

$$PT_{g,i}^m = \sum_{c \in C} t_c^m a_{g,c}^m p_{i,c} > 0, \quad (2)$$

$$g \in G, i \in B_g, m = 1, 2;$$

$$PT_{g,i}^1 \geq PT_{g,i}^2, g \in G, i \in B_g; \quad (3)$$

$$PT_{g,i}^1 - PT_{g,i}^2 \leq \varepsilon, g \in G, i \in B_g; \quad (4)$$

$$\sum_{m=1}^2 a_{g,c}^m = 1, g \in G, c \in C; \quad (5)$$

$$\sum_{c \in C} a_{g,c}^m \leq F^m, g \in G, c \in C, m = 1, 2; \quad (6)$$

$$h_{g,c}^m \geq a_{g,c}^m, g \in G, c \in C, m = 1, 2; \quad (7)$$

$$d_{g,c}^m \geq a_{g,c}^m - h_{g',c}^m u_{g',g}, \quad (8)$$

$$g', g \in G, c \in C, m = 1, 2;$$

$$k_{g,c}^m \leq \max(h_{g',c}^m u_{g',g}, a_{g'',c}^m u_{g,g''}), \quad (9)$$

$$c \in J_g^m, g', g'', g \in G, m = 1, 2;$$

$$|J_g^m| \leq F^m, g \in G, m = 1, 2; \quad (10)$$

$$ST_{g',g}^m = \text{st}^m \left(6 + u_{g',g} \sum_{c \in C} (d_{g,c}^m + (|J_{g'}^m| + d_{g,c}^m - F^m)) \right), g', g \in G, m = 1, 2; \quad (11)$$

$$CT_g^m \geq (CT_{g'}^m + ST_{g',g}^m) u_{g',g} + \sum_{i \in B_g} PT_{g,i}^m b_i, \quad (12)$$

$$g \in G, m = 1, 2;$$

$$O_{g,i}^m \geq (CT_{g'}^m + ST_{g',g}^m) u_{g',g} + \sum_{i' \in B_g} PT_{g,i'}^m b_{i'} v_{i',i}^g + PT_{g,i}^m b_i, \quad (13)$$

$$g', g \in G, i', i \in B_g, m = 1, 2;$$

$$O_{g,i}^2 \geq O_{g,i}^1 + PT_{g,i}^2, g \in G, i \in B_g; \quad (14)$$

$$CT_g^m = \max_{i \in B_g} (O_{g,i}^m), g \in G, m = 1, 2; \quad (15)$$

$$O_{g,i}^m - O_{g,i'}^m v_{i',i}^g + L v_{i',i}^g \geq PT_{g,i}^m b_i, \quad (16)$$

$$g \in G, i', i \in B_g, m = 1, 2;$$

$$v_{i',i}^g \in \{0, 1\}, u_{g',g} \in \{0, 1\}, d_{g,c}^m \in \{0, 1\}, \quad (17)$$

$$a_{g,c}^m \in \{0, 1\}, h_{g,c}^m \in \{0, 1\}, k_{g,c}^m \in \{0, 1\}.$$

目标函数(1)使平均流程时间最短. 约束条件(2)计算并确保PCB种类*i*在生产线上每台贴片机上进行贴装; 约束条件(3)表示由于2台贴片机之间没有缓冲设备, 在高速机的贴片时间不能小于多功能机的贴片时间; 约束条件(4)确保每种PCB分到各台贴片机上的负荷尽量接近; 约束条件(5)表示PCB组内的相同种类的元件都被安排在同一台贴片机上进行贴装; 约束条件(6)确保各组PCB安排到各台贴片机上贴装的元件种类数不能超出贴片机的供料槽位的容量; 约束条件(7)表示下一组PCB所需要贴装的元件已经配置在贴片机上时, 无需切换此种元件; 约束条件(8)确定两个组切换时是否需要切换元件供料槽, 这是通过检查下一组所需元件是否在前一组也需要贴装来实现的; 约束条件(9)确定元件是否被保留; 约束条件(10)确保当每种PCB贴装时, 贴片机*m*上的元件种类数不能超出贴片机的元件供料槽容量; 约束条件(11)计算组*g'*安排在组*g*紧前生产时贴片机*m*上的切换时间, 即该贴片机准备切换时间与元件供料槽切换时间之和; 约束条件(12)确保当前组PCB的完工时间至少等于同台贴片机上前一组PCB的完工时间与本组的切换时间及贴片时间之和; 约束条件(13)表示PCB种类*i*的完工时间至少等于同台贴片机上前一组PCB的完工时间、*i*所在组的切换时间、同组内排在*i*前面的PCB的完工时间以及*i*的贴片时间之和; 约束条件(14)表示每一PCB必须是在前一台贴片机上贴装完毕后才能进入下一台贴片机进行流水作业; 约束条件(15)表示每组PCB的完工时间为组内完工时间最迟的PCB的完工时间; 约束条件(16)表示2种PCB之间的完工时间之差至少应为后面一种的贴片时间; 约束条件(17)为0-1约束.

3 基于主动禁忌搜索算法的PCB组间及组内排序

禁忌搜索算法已经被证明适用于电子产品的组装调度优化问题^[14-15]. 此外, 贴片机上元件供料槽的

切换具有独特性,称为“切换后效性”,即切换时间不仅具有顺序依赖性、与转前加工对象有关,而且与排产在其前加工的所有对象有关.换言之,给定 N 个PCB组,并将其排序为 $1, 2, \dots, N$,第 N 组PCB生产时所需要的切换时间不仅依赖于第 $N-1$ 组,而且取决于前面所有的 $N-1$ 组.这是因为前面贴装的元件在供料槽位容量许可的范围内可以不必卸下,直接用于后续的PCB贴装.当然该种元件在供料槽的位置不仅影响其切换时间,同时也影响其贴装时间.

针对这种切换的后效性特征,设计了一种主动禁忌搜索算法,包含外搜索组间顺序和内搜索组内顺序.整个主动禁忌搜索过程在组内搜索和组间搜索之间往复循环.

搜索邻域设置如下:

外搜索邻域为 $NG(\sigma) = (\sigma')$, σ' 是由当前解 σ 得到的一个新的PCB组间顺序,通过移动交换相邻两组的贴装顺序而每组内PCB的生产顺序保持不变所得.需要注意的是,最后1组与第1组进行交换.

内搜索邻域为 $NG(\sigma) = (\sigma')$, σ' 是由解 σ 得到的一个新的PCB组内顺序,通过保持组间顺序不变而移动交换组内相邻两种PCB的贴装顺序得到.

算法中用到的主要参数如下:OLTM为外搜索长期记忆矩阵;OTL为外搜索禁忌表;OIL为外搜索索引表,是局部最优解的集合,即若当前解比其子代解更优,则说明当前解为局部最优解,将其放入索引表中;OCL为外搜索候选表,是可能的局部最优解的集合,即若当前解比其父代解更优,则说明当前解有成为局部最优解的可能,将其放入候选表中;OIT为外搜索中未使最优解改进的迭代次数;OAL为外搜索渴望水平(即解禁条件、特赦准则),一般等于当前最优解 σ' 所对应的目标值,即 $OAL = \text{obj}(\sigma^*)$.相应地,内搜索用到的各参数为ILTM,ITL,IIL,ICL,IIT和IAL,其功能与外搜索类似.适应度直接采用目标函数值,即平均流程时间.

外搜索算法步骤如下:

Step 1: 初始化,确定初始解 σ_0 ,对 σ_0 首先实施内搜索.令 $\sigma^* = \sigma = \sigma_0$,初始化外搜索各参数:OCL = OIL = $\{\sigma\}$,OIT = 0,OAL = $\text{obj}(\sigma^*)$.由初始解 σ_0 产生 $N \times N$ 的OLTM矩阵;OTL = \emptyset ,禁忌表OTL的长度初始设置为 $\lfloor N/2 \rfloor$,即 $|\text{OTL}| = \lfloor N/2 \rfloor$.

Step 2: 生成邻域解.通过移动交换相邻两组顺序得到当前解的邻域 $NG(\sigma)$,去掉 $NG(\sigma)$ 已放入OCL中的解,并对 $NG(\sigma)$ 中其余解进行内搜索.

Step 3: 搜索最优解.选取 $NG(\sigma)$ 中的最优解,若产生的最优解不在禁忌表中,则接受这个解;否则,继续寻找下一个未被禁忌,或者被禁忌但是符合解禁条

件 $\text{obj}(\sigma) < \text{obj}(\sigma^*)$ 的解.

Step 4: 更新各参数.将由Step 3得到的最优解放入禁忌表OTL,更新外搜索其他各参数;若这个解中组 g 安排在 \bar{p} 位置,则令 $\text{OLTM}[g, \bar{p}] = \text{OLTM}[g, \bar{p}] + 1$.若当前解 σ 比其父代解优,具有成为局部最优解的可能,则将其放入候选表OCL;若 σ 比下一次迭代所得的解(即子代解)优,则它就是局部最优解,将其放入索引表OIL.若 σ 比当前最优解更好,则更新当前最优解,令 $\sigma^* = \sigma$,更新渴望水平 $OAL = \text{obj}(\sigma^*)$,并且令 $\text{OIT} = 0$;否则,令 $\text{OIT} = \text{OIT} + 1$.禁忌表的长度设置如下:若最优解在最后 $\lfloor \text{OIT}/2 \rfloor$ 次迭代时没有得到更新,且禁忌表长度 $|\text{OTL}|$ 第一次变化或者前一次被缩小,则将禁忌表长度增大为原来的1.5倍,即 $|\text{OTL}| = \lfloor 1.5|\text{OTL}| \rfloor$,并令 $\text{OIT} = 0$;若最优解在最后 $\lfloor \text{OIT}/2 \rfloor$ 次迭代时没有得到更新,且禁忌表长度 $|\text{OIT}/2 \rfloor$ 即将变化或者上一次是增大的,则将禁忌表长度缩小为原来的一半,即 $|\text{OTL}| = \lfloor |\text{OTL}|/2 \rfloor$.

Step 5: 终止规则.当下列任意一项满足时算法停止:1) $\text{OIT} = \lfloor N/2 \rfloor$,即最优解未被更新的迭代次数达到 $\lfloor N/2 \rfloor$;2) $|\text{OIL}| = \lfloor N^2/2 \rfloor$,即局部最优解个数达到 $\lfloor N^2/2 \rfloor$.

Step 6: 若未满足任何一项,则返回Step 2重新进行搜索.为了找到全局最优解,需进行集中化和多样化交叉搜索.每次重新搜索时,先集中化搜索初始解,若找到的初始解未存在于初始解集合中,则接受这个初始解,重新进行主动禁忌搜索对PCB进行排序:将重新构建的序列作为初始解,并且初始化参数OTL,OIT和OAL.将解 σ 放入OCL和OIL中.若该初始解已经存在于初始解集合中,则放弃这个初始解,重新进行多样化搜索;若多样化搜索得到初始解未存在于初始解集合中,则接受这个初始解,重新对PCB进行排序.

内搜索原理与外搜索相同,对于PCB组 g , ILTM_g 是由 σ 产生的 $n_g \times n_g$ 长期记忆矩阵, n_g 为组 g 内的PCB种类数.若组 g 内的PCB种类 i 在解 σ 中的位置为 \bar{p} ,则令 $\text{ILTM}_g[i, \bar{p}] = 1$;初始禁忌表长度为 $|\text{ITL}| = \left\lfloor \sum_{g \in G} n_g / N \right\rfloor$.当满足下面任何一项时,内搜索程序终止:1) 最优解未被更新的迭代次数达到 $\left\lfloor \sum_{g \in G} n_g / N \right\rfloor$;2) 局部最优解个数达到 $\left\lfloor n \sum_{g \in G} n_g / N \right\rfloor$,其中 $n = \max_{g \in G}(n_g)$.

上述主动禁忌搜索的过程是外搜索从某一组顺序过渡到另一组顺序,而内搜索从组内PCB的某一排序过渡到组内PCB的另一排序.当外搜索找到了一个新的组顺序,搜索过程就转移到内搜索,目的是找到外搜索该组顺序所对应的最优的组内PCB顺序,由此

得到最短的平均流程时间. 当找到最优的组内 PCB 顺序后, 搜索程序又转到外搜索, 去寻找更优的组间顺序. 因此, 整个主动禁忌搜索过程在组内搜索同组 PCB 顺序和组间搜索组顺序 2 个层次交替进行, 直至满足终止条件为止.

4 算法集成

整条组装流水线的调度优化问题可以分解成 PCB 成组、元件负荷分配、供料器切换以及 PCB 组装排序 4 个子问题, 这些子问题相互关联、相互影响, 需要根据其内在联系对其进行集成. 其中, PCB 成组基于相对相似系数^[13], 元件在贴片机间的负荷分配参见文献 [7], 供料器切换采用成组切换与部分切换 (KTNS) 相结合的混合切换策略^[5,13]. 整个集成算法流程如图 2 所示.

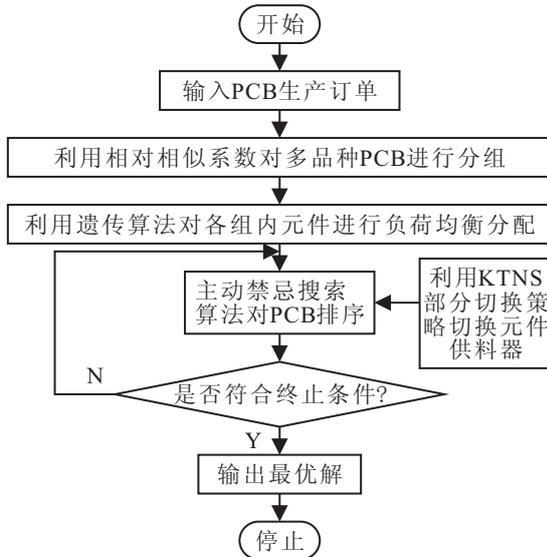


图 2 集成算法流程

5 平均流程时间理论下界值

平均流程时间理论下界值的计算基于 3 个前提: 1) 首先仅考虑单台贴片机成组调度的切换时间, 将 2 台贴片机的平均流程时间最小化问题转化为 2 个独立的单台贴片机平均流程时间的最小化问题; 然后再由各自得到的最小平均流程时间来估计原问题的平均流程时间下限. 即在考虑第 1 台贴片机时, 忽略第 2 台贴片机上小组间的切换时间及其贴装生产时间; 同理, 考虑第 2 台贴片机时, 忽略第 1 台贴片机上小组间的切换时间及其贴装时间. 2) 计算最小切换次数时不考虑顺序依赖问题, 即切换时间独立于贴装顺序. 3) 基于 Johnson 规则得到由 2 台机器组成的流水线的最优加工顺序.

切换时, 在贴片机 m 上组 g 的切换次数最少为

$$Q_g^m = \max\{1, 2R_g^m\}, \quad m = 1, 2, \quad g \in G.$$

其中 $R_g^m = |H_g^m| - \max_{g' \neq g} (|H_g^m \cap H_{g'}^m|) - (F^m - |H_g^m|)$,

H_g^m 为组 g 在贴片机 m 上的元件集合, 即每组最少需要安装或卸下的元件种类数. 假设除了组 g' 所需要的元件之外, 安装到贴片机供料槽上的元件均不需要切换, 即都是组 g 需要的元件供槽. 因此, 贴片机 m 上的切换时间下限为

$$S_{LB}^m = \text{st}^m \sum_{g \in G} Q_g^m, \quad m = 1, 2.$$

设 P_g^m 为组 g 的整体贴装时间; $P_{g,i}^m$ 为 PCB 种类 i 在贴片机 m 上的贴装时间, $P_{g,i}^m = \text{PT}_{g,i}^m b_i$, 则有 $P_g^m = \sum_{i \in B_g} P_{g,i}^m$, $g = 1, 2, \dots, N$; n_g 为组 g 内所含 PCB 的种类数, $n_g = |B_g|$. 根据 Johnson 规则, 得到 PCB 在 2 台机器上的最优排序, 即:

1) 根据最短贴装时间规则将每组内的 PCB 进行排序, 组内 PCB 按照贴装时间升序排列, $P_{g,(1)} \leq P_{g,(2)} \leq \dots \leq P_{g,(n_g)}$;

2) 按照每个组内平均完工时间升序排列, 即

$$((\text{ST}_{(1)} + T_{(1)})/n_{(1)}) \leq ((\text{ST}_{(2)} + T_{(2)})/n_{(2)}) \leq \dots \leq ((\text{ST}_{(N)} + T_{(N)})/n_{(N)}).$$

设 σ_0^1 为第 1 台贴片机由上述算法所得到的贴装顺序, 包括组内顺序和组顺序; $f'(\sigma_0^1)$ 为利用最小切换时间计算所得到的平均流程时间. 同理: σ_0^2 和 $f'(\sigma_0^2)$ 分别为第 2 台贴片机由前述算法所得到的生产序列和平均流程时间. 记

$$r_1 = \max\{0, \min_{g \in G} \{\text{ST}_g^1 + \min_{i \in B_g} \{PT_{g,i}^1\}\} - \text{ST}_{(1)}^2\}.$$

第 2 台贴片机上所有种类 PCB 的最小贴装时间为

$$r_2 = \min_{g \in G, b \in B_g} \{PT_{g,i}^2\},$$

则多品种 PCB 的平均流程时间理论下限 (最小贴装时间+最小切换时间) 为

$$f_{LB} = \max\{f'(\sigma_0^1) + r_2/|I|, r_1 + f'(\sigma_0^2)\}.$$

6 算法评价与仿真实验

6.1 算法评价

利用目标函数下界值与上界值对所提出的主动禁忌搜索算法进行评价. 其中: 目标函数下界值采用平均流程时间理论下限值 f_{LB} ; 目标函数上界值为采用主动禁忌搜索算法得到的各代解的目标函数值平均值, 用 f_{UB} 表示. 主动禁忌搜索算法所得的最优目标函数值 f^* 相对于 f_{UB} 的相对偏差用 μ_1 表示, $\mu_1 = (f_{UB} - f^*)/f^*$; 相对于 f_{LB} 的相对偏差用 μ_2 表示, $\mu_2 = (f^* - f_{LB})/f_{LB}$.

6.2 仿真实验

6.2.1 基于实际生产订单的优化过程仿真

选取实际生产的 8 种 PCB 订单进行模拟实验, 检验所提出算法的优化过程. 各代解目标函数值如图 3

所示,每次重新搜索的当前最优解所对应的目标函数值如图4所示,当前最优解目标函数值如图5所示。

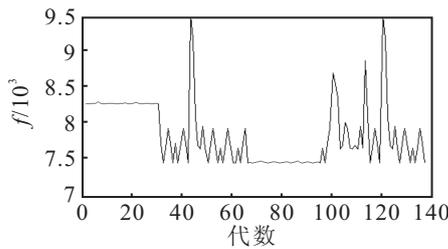


图3 各代解目标函数值

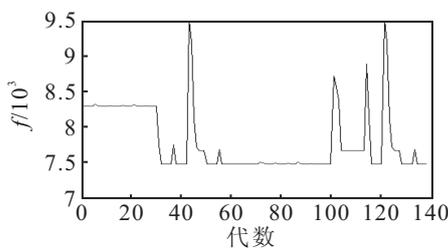


图4 每次重新搜索的当前解

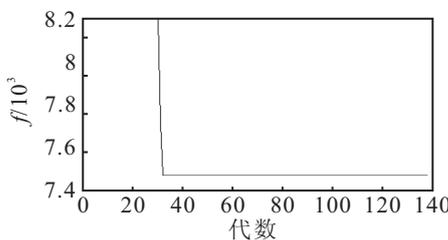


图5 当前最优解

由图3可以看出,前30代优化过程较为缓慢,这是由于内搜索只改变组内PCB种类的生产顺序,各组之间的切换时间不变,优化的空间不是很大.30代以后不改变组内最优的PCB种类生产顺序,算法实施外搜索.此时,保留组内的PCB顺序,改变各组之间的生产顺序,使得每组的切换次数(切换时间)不同,因此平均流程时间的波动较大.第30~65代为外搜索,目标函数值有较大波动.算法终止找到的近似最优解为G2(B7-B4)-G3(B2-B6)-G4(B1-B3)-G1(B8)-G5(B5),最优目标函数值为125 min.

从图4可以看出,第1次内搜索共搜索6次;然后转向外搜索4次;再次转入内搜索仍然为6次;最后转向外搜索5次,至此,主动禁忌搜索算法排序结束.在这一过程中,主动禁忌搜索算法为了跳出局部最优或者为了避开陷入循环,设计了多样化搜索初始解.由图5可知,对于该问题,主动禁忌搜索算法在第32代即找到最优解.

6.2.2 随机生成的仿真实验

选取贴近生产实际的规模不同的订单进行模拟实验,每次的PCB种类数均不相同,从5到25种不等,每次实验PCB种类间的相似性也不相同.利用

μ_1 与 μ_2 对主动禁忌搜索得到的近似最优解进行评价,结果如表1所示.由表1可知,近似最优解与上界值的平均相对偏差为6.02%,与下界值的平均相对偏差为6.82%.

表1 仿真实验结果

PCB种类	元件种类	分组	f_{UB}	f^*	f_{LB}	μ_1 / $\%$	μ_2 / $\%$
5	35	3	6607.12	6295.30	5930.31	4.72	6.15
8	44	5	7876.90	7488.40	7040.90	4.93	6.36
12	50	8	9767.31	9153.40	8453.71	6.29	8.28
14	42	6	9693.87	9055.91	8512.42	6.58	6.38
20	48	8	14790.22	13741.80	12882.87	7.09	6.67
25	55	10	16890.12	15792.05	14751.56	6.50	7.05
平均值						6.02	6.82

为了进一步说明主动禁忌搜索算法找到的近似最优解的质量,本文对小规模问题设计禁忌搜索算法,使得禁忌表长度尽可能的长.因为在理论上,若禁忌表长度足够长,则禁忌搜索的寻优过程能够遍历整个解空间,所以一定能够找到全局最优解.仍以上述8种PCB为例,在分组数为5,组内的PCB种类数分别为2,2,1,1的情况下,所有的PCB排序种类共有960种.其中内层搜索和外层搜索共同使用一个禁忌表,这样就能够使得算法遍历所有的可行解,由此找到的最优解即为实际问题的最优解.而遍历整个解空间之后找到的最优解与主动禁忌搜索算法找到的最优解完全相同,即PCB的最优生产顺序为G2(B7-B4)-G3(B2-B6)-G4(B1-B3)-G1(B8)-G5(B5),最优目标函数值为7488.40s.

关于主动禁忌搜索算法的求解时间效率,除了取决于禁忌表长度等参数外,还取决于现实问题的规模.如求解表1中8种PCB的小规模问题,利用一般PC机在禁忌表长度足够长、能够得到全局最优解的情形下也不超过30s;对于表1中25种PCB的大规模问题,若禁忌表长度适中,则其计算时间也不超过180s,完全具有现实应用可行性.

7 结论

针对多品种小批量生产环境下的PCB组装生产线的生产调度优化问题,建立了以包括切换时间在内的多品种平均流程时间最小化为目标的调度优化模型.针对电子组装独特的切换后效性,开发了主动禁忌搜索算法,分组间搜索和组内搜索2个层次对PCB的排序问题进行优化.在此基础上进行了算法集成,并通过一系列的仿真实验表明了模型与算法的有效性及其现实可行性.

参考文献(References)

- [1] 靳志宏.印刷电路板组装生产线调度优化问题建模[J].

- 中国管理科学, 2008, 16(专辑): 122-127.
(Jin Z H. Modeling the line balancing for the printed circuit board assembly[J]. Chinese J of Management Science, 2008, 16(S): 122-127.)
- [2] Johnson M, Smed J. Observation on PCB assembly optimization[J]. Electronic Packaging and Production, 2001, 41(5): 38-42.
- [3] 靳志宏, 计明军, 田娜. PCB 插装机组调度优化及其实证研究[J]. 中国制造业信息化, 2009, 38(15): 39-43.
(Jin Z H, Ji M J, Tian N. The optimization on insertion scheduling for a printed circuit board assembly machine[J]. Manufacture Information Engineering of China, 2009, 38(15): 39-43.)
- [4] 曾又姣, 金焯. 基于遗传算法的贴片机贴装顺序优化[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 10(2): 205-208.
(Zeng Y J, Jin Y. Component placement sequence optimization for surface mounting machine based on genetic algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2004, 10(2): 205-208.)
- [5] 靳志宏, 计明军, 刘颖. 印刷电路板大型并行系统的表面贴装调度优化及其实证研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(9): 1067-1070.
(Jin Z H, Ji M J, Liu Y. Optimization of printed circuit board assembly scheduling and its applications for a large parallel system[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(9): 1060-1071.)
- [6] Ohno K, Jin Z H, Elmaghraby S S. An optimal assembly mode of multi-type printed circuit board assembly[J]. Int J of Computer & Industrial Engineering, 1999, 50(4): 451-471.
- [7] 郭姝娟, 靳志宏. 表面贴装生产线贴片机负荷均衡优化[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(4): 817-822.
(Guo S J, Jin Z H. Optimization on component allocation between placement machines in surface mount technology assembly line[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 15(4): 817-822.)
- [8] Jin Z H, Ito T, Ohno K, et al. Scheduling hybrid flowshops in printed circuit board assembly lines[J]. Int J of Production and Operation Management, 2002, 11(2): 216-230.
- [9] 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.
- [10] Günther H O, Gronalt M, Zeller R. Job sequencing and component setup on a surface mount placement machine[J]. Production Planning and Control, 1998, 9(2): 201-211.
- [11] Logendran R, Gelogullari C A, Sriskandarajah C. Minimizing the mean flow time in a two-machine group scheduling problem with carryover sequence dependency[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2003, 19(1): 21-33.
- [12] Ashayeri J, Selen A W. Planning and scheduling model for insertion in printed circuit board assembly[J]. European J of Operational Research, 2007, 183(8): 909-925.
- [13] 靳志宏, 刘颖, 陈贞, 等. 多品种小批量环境下的印刷电路板组装切换次数优化[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(9): 751-757.
(Jin Z H, Liu Y, Chen Z, et al. The optimization on setups for the printed circuit board assembly in a multi-type and low-volume environment[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(9): 751-757.)
- [14] Tang C S, Denardo E V. Models arising from a flexible manufacturing machine: Part 1[J]. Operations Research, 1988, 36(5): 767-777.
- [15] Askin R G, Dror M, Vakharia A J. Printed circuit board family grouping and component allocation for a multimachine open shop assembly cell[J]. Naval Research Logistics, 1994, 41(5): 587-608.

~~~~~  
(上接第9页)

- [56] Leo H Chiang, Mark E Kotanchek, Arthur K Kordon. Fault diagnosis based on fisher discriminant analysis and support vector machines[J]. Computers and Chemical Engineering, 2004, 28(8): 1389-1401.
- [57] Jack L B, Nandi A K. Support vector machines for detection and characterization of rolling element bearing faults[J]. J of Mechanical Engineering Science, 2001, 215(9): 1065-1074.
- [58] Castro D, Ranson A, Matheus J, et al. Fault detection and identification in chemical processes using multivariable statistical techniques and SVM for classification[C]. Proc of ISA Monterrey. North Carolina: ISA Services Inc, 2002: 165-175.
- [59] Rolf Isermann. On fuzzy logic applications for automatic control, supervision and fault diagnosis[J]. IEEE Trans on System, Man and Cybern, 1998, 28(2): 221-235.
- [60] Choudhury A A S, Shah S L, Thornhill N F. Diagnosis of process nonlinearities and valve stiction: Data driven approaches[M]. New York: Springer, 2008.