

大连海事大学

---

硕士学位论文

---

多品种印刷电路板表面贴装生产线优化

---

姓名：陈贞

---

申请学位级别：硕士

---

专业：物流工程与管理

---

指导教师：靳志宏

---

20090601

## 摘要

印刷电路板 (printed circuit board, PCB) 是在通用基材上, 按预定设计形成点间连接及印刷电子元器件的电路板。PCB 生产调度属于典型的制造领域中的生产物流调度与协调问题。

近年来, 为了更有效的提高企业的生产效率, PCB 生产物流调度已经成为一个重要研究的课题。印刷电路板的组装系统是表面贴装组装系统, 该系统是以应用表面组装技术 (surface mount technology, SMT) 为主的先进制造系统, 并具有柔性制造系统, 计算机集成制造系统等先进制造系统的特性。印刷电路组装业面临多品种, 小批量的生产环境必须适应多用户, 多任务, 多品种的生产要求, 以最低的成本和最小的缺憾在最短的时间内获得最大的产出。因此 SMT 生产线的优化就非常重要。

在同一生产线中, 考虑 PCB 的生产时间的时候不仅要考虑到 PCB 的贴装时间, 还要考虑到不同品种 PCB 之间交换生产时的机器准备切换时间和元件供料器的切换时间。因此如何对 PCB 分组, 怎样安排生产线上各台贴片机的元件负荷, 采用什么切换策略对元件供料器进行切换以及怎样安排 PCB 的生产顺序都能影响到生产线上 PCB 的生产效率。文章主要解决的是单条生产线上的多品种、少批量 PCB 的生产物流调度问题: 目标函数是求生产线的平均流程时间 (Mean Flow Time) 最短。

文章系统的介绍了 SMT 生产线的主要组成设备, 针对多品种、小批量生产环境下, 采用成组切换策略和部分切换策略相结合的切换策略对由高速贴片机和多功能贴片机组成的表面贴装生产线的生产物流调度问题进行了优化。根据实际问题建立了表面贴装生产线的生产物流调度问题模型, 并且将生产线调度优化问题分解成以下四个子问题分别设计算法进行求解: PCB 分组问题; 贴片机上元件负荷分配问题; 元件切换问题; PCB 生产排序问题。设计相对相似系数法求解成组问题, 并与其他成组策略结果进行比较, 得出此方法更加有效; 分组之后, 利用 KTNS 部分切换策略对不同组进行生产时的元件供料器进行切换; 最后利用主

动禁忌搜索算法分组内搜索和组间搜索两个层次对 PCB 的排序问题进行优化。外搜索是对 PCB 生产小组的进行排序，而内搜索是对每组内的 PCB 种类的生产顺序进行排序。

通过模拟实验，得出本文设计的切换策略及排序算法能够找到比较优的解。

**关键词：印刷电路板；表面组装技术；供料器切换；顺序依赖；生产线优化**

## Optimization on Scheduling Multi-type Printed Circuit Boards in a SMT Assembly Line

### Abstract

Printed circuit board (PCB) is the circuit board on which a number of electronic are located at predefined positions and wired through electrical connections. The scheduling of PCB belongs to typical unisonous scheduling problem on production logistics in manufacturing field.

Scheduling the production of printed circuit boards (PCBs) in electronics manufacturing has been a subject of intense research in recent years, primarily motivated by the need to develop newer and efficient methods to enhance productivity. PCB is assembled by surface mount manufacturing system. This system is an advanced manufacturing system, which has characteristics of surface mount technology (SMT), flexible manufacturing systems and computer integrated manufacturing system. PCB assembly is under high-mix and low-volume production environment, which must offer high product variety and satisfy the dynamic product demand. Its objective is to maximize the output with the lowest cost and smallest defect rate in the shortest possible time. This trend emphasizes the importance of optimizing the SMT assembly processes.

The assembly time to consider consists not only the placement time, but also the setup time and feeder exchange time between different types of PCB in the assembly line. Therefore, how to solve the problems of job grouping, components allocation on machines, feeder setup strategies and the PCB production sequence in the assembly line can affect the productivity of PCB. The dissertation mainly solved the production scheduling problem of multi-type and small-batch environment in an assembly line: the objective considered is to minimize the mean flow time.

SMT production line was systematically introduced in this dissertation. A combination of group setup strategy and partial setup strategy is employed in this dissertation to optimize the scheduling of PCBs of various types and small quantities on

the SMT assembly line composed by the high-speed placement machine and multi-function placement machine. A mathematical model of production scheduling problem was established in accordance with the actual problem of surface mount production line. And the production scheduling problem in the assembly line was decomposed into four subproblems: job grouping problem, components allocation on machines, feeder setup, and the sequence of PCB production. The relative similarity coefficient method was proposed to solve the job grouping problem, and the grouping result was compared with that of other group strategies. The new grouping strategy outperformed existing methods of grouping. The KTNS (keep tool needed soonest) strategy was applied to determine the feeder setup for a given sequence of groups to be processed after the boards were assigned to different groups. Finally, the reactive tabu search algorithm was used to sequence PCB groups at two levels: the outside level and inside level. At the outside level an outside tabu search algorithm was applied to move from one group sequence to another, and at the inside level an inside tabu search algorithm was invoked to move, within each group, from one board type sequence to another.

Through simulation experiments, it showed that the proposed algorithm could find a better solution.

**Key Words:** printed circuit board (PCB); surface mount technology (SMT); feeder set-up; sequence dependent; assembly optimization

# 大连海事大学学位论文原创性声明和使用授权说明

## 原创性声明

本人郑重声明：本论文是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果，撰写成博士/硕士学位论文“多品种印刷电路板表面贴装生产线优化”。除论文中已经注明引用的内容外，对论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表或未公开发表的成果。

本声明的法律责任人由本人承担。

论文作者签名：陈贞 2009年7月5日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者及指导教师完全了解“大连海事大学研究生学位论文提交、版权使用管理办法”，同意大连海事大学保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权大连海事大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，也可采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编学位论文。

保密口，在\_\_\_\_年解密后适用本授权书。

本学位论文属于： 保密口

不保密（请在以上方框内打“√”）

论文作者签名：陈贞 导师签名：靳志宏  
日期：2009年7月5日

## 第 1 章 绪论

### 1.1 选题背景和意义

印刷电路板 (PCB) 是在通用基材上, 按预定设计形成点间连接及印刷电子元器件的电路板。印刷电路板组装是将电子元器件组装在印刷电路板上, 从而实现电子元器件的互联。电子制造技术作为制造业当中发展最为迅速, 最代表制造技术先进性的部分, 在当今世界上的发展更是日新月异, 在电子信息产业中的地位越来越重要, 而印刷电路板组装又是电子信息产业的基础加工业, 也是其支柱产业。2005 年中国大陆已成为仅次于日本的第二大 PCB 制造地。但是, 我国印刷电路板组装业起步较晚, 从 20 世纪 80 年代初至今仅 20 年多年时间, 而且我国 PCB 总产值的 92% 来自外资, 本土企业贡献只有 8%。印刷电路板组装业涉及多学科, 是集知识密集, 技术密集, 资本密集与劳动密集于一体的行业。印刷电路板生产是完全按订单生产的一种产业, 即按专门的图形、指定的特性、指定的数量和指定的时间提供给客户产品。印刷电路板的组装系统是表面贴装组装系统 (SMT), 该系统是以应用先进制造技术为主的先进制造系统, 并具有柔性制造系统, 计算机集成制造系统等先进制造系统的特性。印刷电路组装业面临多品种, 小批量的生产环境必须适应多用户, 多任务, 多品种的生产要求, 以最低的成本和最小的缺憾在最短的时间内获得最大的产出。而生产时所需电子元器件门类、品种和规格特别多, 贮存期短, 生产工序多, 任何一道工序有一点错误都会造成废品。因此全过程生产管理必须全都处于受控状态, 是一个管理周密而又严格的产业。满足这一问题的有效途径是全过程最优。

为了在当今全球激烈的市场竞争中保持自己的优势, 各电子产品制造商千方百计地提高生产效率来降低生产成本。而贴片机是 PCB 装配生产线中最关键的设备, 其工作效率的高低会制约着整条生产线生产能力的发挥。因此, 如何实现高效生产、更好地满足电子装备整机单位板级电路模块的多品种、变批量、短周期、低成本、高质量、小型化以及升级换代快的要求, 缩短 PCB 装配生产线中元器件的装配时间就成为近年来国内外相关学者研究的热点之一。生产商从客户那里接

收不同品种和批量的订单，这就要求生产商在生产过程中最小化各订单作业的平均流程时间，以此来最大限度的满足客户要求。

而在大批量、小品种的的生产环境下，由于贴片机上的供料器容量是有限的，因此，元件供料器的切换是不可避免的。因此，在同一生产线中，考虑 PCB 的生产时间的时候不仅要考虑到 PCB 的贴装时间，还要考虑到不同品种 PCB 之间交换生产时的机器准备切换时间和元件供料器的切换时间。因此如何安排生产线上各台贴片机的元件负荷，采用什么切换策略对元件供料器进行切换以及怎样安排 PCB 的生产顺序都能影响到 PCB 的生产效率。

### 1.2 国内外相关课题研究现状

本文的研究是基于国家自然科学基金项目：电子产品组装系统优化调度的模型与方法研究，编号：70572086。在此项目中，我们把印刷电路板组装过程的优化问题可概括成为三个层次<sup>[1]</sup>：第一个层次，单台贴片机优化决策问题，即供料器分配到供料槽上和确定元器件的取贴顺序。这个层次的目标是提高贴片机的生产率。第二个层次，单条生产线优化问题。它包括元件负荷分配问题和品种切换问题。第三个层次的问题是多生产线平衡优化问题，即不同种类的 PCB 板在不同生产线之间的指派优化问题。本文正是在第一个子问题的研究成果的基础之上进行第二个子问题的 SMT 生产线优化问题研究。

多品种 PCB 在 SMT (Surface Mounting Technology, SMT) 生产线优化问题除了考虑各种 PCB 在生产线上多台贴片机上的贴装时间优化以外，还涉及不同品种 PCB 生产时贴片机供料槽上的元件供料器的切换时间，使得贴片时间和切换时间之和也就是使得 PCB 生产完工时间最短。多品种的 PCB 进行切换时涉及到一些元件供料器的切换策略，不同的切换策略导致生产线的生产效率也不同。

对于利用各切换策略来解决 SMT 生产线中的 PCB 品种切换问题，国内的文章基本没有涉及，国外已有不少学者研究。

Brandeau 和 Billington<sup>[2]</sup>对由自动工作阶段和手动工作阶段构成的生产线提出了两种启发式算法分别对元件供料器配置和 PCB 排序问题进行优化。前者试图避

免将使用频率不高的（不常用的）元件放到自动工作阶段。而后者是将整个板放到一个阶段来生产，而非两个阶段（自动+手动）生产。

Hashiba 等人<sup>[3]</sup>针对单机多品种的生产优化，将其目标为切换次数最少。并将优化问题分成三个子问题：PCB 种类分组，组间排序，元件负荷分配。作者采用启发式算法来解决单个子问题，并进一步用模拟退火算法进行实验，发现了比启发式分解方法更好的解。

Bhaskar 和 Narendran<sup>[4]</sup>针对单机多品种 PCB 生产环境，将分组问题建立非线性混合整数规划来求解，并利用最大支撑树分组策略进行优化。

Leon 和 Peters<sup>[5]</sup>考虑 PCB 集成的元件贴装问题，利用部分切换策略建立了一种启发式算法，并对其产生的解与单一切换策略，最小切换策略及成组切换策略所得的解进行比较。单一切换策略主要用于大批量生产，而成组切换策略对于大小批量混合生产的情况比最小切换策略常用。

Gronalt 等人<sup>[6]</sup>针对单机多品种 PCB 的生产环境，在假定 PCB 生产顺序已经确定的并且不考虑元件贴装顺序的情况下，考虑不同规格的元件供料器的切换问题，对 KTNS 切换策略进行改进，并给出了分配供料器的方法。

Leon 和 Peters<sup>[7]</sup>针对单机多品种 PCB 的生产环境，对各种切换策略进行比较。通过对不同批量生产情况下，将供料器切换，元件贴装顺序，PCB 生产顺序三个问题进行优化，实验结果表明成组切换策略在切换时间较长、PCB 贴装通用元件种类数较多的情况下比较适用，而部分切换策略目标是使得完工时间最短，因此灵活的生产环境下优于其他切换策略。

Salonen 和 Smed<sup>[8]</sup>针对高速贴片机的混合批量的 PCB 生产进行优化，目标函数中不仅考虑元件切换时间，还考虑切换时贴片机的准备切换时间。文中总结了三种成组切换策略、四种最小切换策略，然后利用其中的 GSA1 成组策略和 MSAGenius 最小切换策略结合开发出新的切换策略。通过大量实验对比这八种切换策略所得的结果进行比较，得出当每次贴片机切换准备切换时间与单个元件切换时间之比大于等于 5 时，作者所提出的切换策略得到更优解。

Rossetti 和 Stanford<sup>[9]</sup>对单台贴片机的调度优化问题进行分组、排序，在一直供

料器配置的情况下，利用期望切换距离矩阵对 PCB 进行分组，然后利用最近邻算法对 PCB 进行排序。最后通过实例对算法进行评价。

Narayanaswami 和 Iyengar<sup>[10]</sup>认为在成组过程中不仅应该考虑 PCB 的元件相似性，即 Jaccard 相似系数，还应该考虑未分组 PCB 与已分组的“合成板”的相对相似性（即未分组 PCB 与合成板的通用元件种类数与 PCB 本身所需要贴装元件种类数的比值）。基于此，作者提出了新的成组策略，并用贪婪树遍历法对 PCB 的生产进行顺序。最后将实验结果与其他算法进行比较。

Leon 和 Jeong<sup>[11]</sup>提出了一种改进的成组切换策略，对单机多品问题进行调度优化，目标是元件的切换和贴装时间之和即产品完工时间最短。分组时利用最小变化距离（Minimum metamorphic distance）同时考虑元件的相似性和 PCB 的几何相似性，设计实验得出这种改进的切换策略要优于其他切换策略。

Jitti 和 Manop<sup>[12]</sup>针对供料器容量有限的单台贴片机的 PCB 生产调度问题提出了一种基于遗传算法的模拟算法，目标是使得带权重的总的晚交货时间最短。利用最小松弛时间（minimum slack time, MST）规则生成初始种群，并采用 KTNS 切换策略以及局部搜索算法进行求解。通过实验验证，作者提出的模拟算法能够找到更优解，虽然计算量比较大，但是实际上还是可取的。

Günther 等人<sup>[13]</sup>提出了一种典型的表面贴装生产线，并采用了最小切换策略将 PCB 排序，使得每种 PCB 都与其前面的 PCB 有最多的相同元件数。作者提出了三个不同的子问题：PCB 排序，元件切换，供料器配置。并利用启发式算法来解决各个子问题。

Logendran 等人<sup>[14]</sup>针对电子制造中由两台贴片机组成的典型的生产线的优化问题进行了研究，目标是整个平均流程时间最短。文中假设各种 PCB 的元件供料器已经确定，根据各个供料器配置情况对 PCB 进行分组，然后采用最小切换策略，并且给出了一种确定平均流程时间下限的方法，最后利用禁忌搜索算法分两个层次：组内搜索和组间搜索，来求得最优的 PCB 组的生产顺序。利用两种生产环境进行验证分析，一种是各种 PCB 之间的相似性较大且批量大的情况，即板之间通用元件较多的情况；另外一种 PCB 之间的相似性较小，且批量小的情况。结果

表明两种情况下前者通过优化平均流程时间与文中所设计的平均流程时间下限平均偏差 13%，而后者为 8%。

Ashayeri 和 Selen<sup>[15]</sup>对 PCB 表面贴装生产线的调度问题进行优化，主要建模解决了以下两个问题：（1）PCB 生产排序；（2）元件在各台贴片机上的负荷分配。作者提出了两种策略：一种是以切换时间最小化的 C 策略；另一种是以贴装时间最小化的 P 策略。C 策略首先利用 TSP 问题找出一个可行 PCB 生产顺序，然后建立整数规划模型对元件在各台贴片机上的负荷均衡问题进行求解，最后用 KTNS 策略解决元件切换问题。P 策略先利用整数规划模型将元件分配到各台贴片机上，然后利用均衡策略重新安排元件供料器，最后利用 TSP 问题求解 PCB 生产顺序。

### 1.3 本文的主要内容

本文是解决 SMT 优化问题的第二层次优化的多品种 PCB 在生产线上的优化问题，这涉及到各种 PCB 的分组、切换、排序，PCB 所需贴装的各种元件种类在各台贴片机上的负荷分配，单台贴片机上的元件供料器配置，元件的贴装顺序等子问题。以高速贴片机和多功能贴片机串联成典型的 SMT 生产线为例，研究多品种 PCB 在生产线上的优化问题。

第一章全面而又概括的介绍了课题提出的背景和意义，现有文献综述以及研究的思路和方法，为整篇论文的展开打下基础。

第二章系统的介绍了 SMT 生产线，它是研究多品种 PCB 生产线优化问题的大背景。在此基础上，详细的归纳了 SMT 优化问题的分类。指出本文所研究的问题是 SMT 优化问题第二层次的多品种 PCB 在生产线上的优化问题。

第三章是本文的重点之一，针对多品种 PCB 在 SMT 生产线上所涉及的单品种 PCB 的优化问题和多品种 PCB 的优化问题进行描述及建模。

第四章是也是本文的重点，针对多品种 PCB 在生产线上的优化问题所涉及各个子问题进行算法设计并求解，最终目标是使得生产线的平均流程时间最小。采用成组策略和部分切换策略结合的方法解决多品种 PCB 生产过程中的切换问题。并利用禁忌搜索算法分两个层次对 PCB 排序：组间搜索和组内搜索。最后将

算法集成，找到使平均流程时间最小的解。

第五章根据实际生产过程当中的多品种优化问题进行优化，通过 MATLAB 编程实现，得出较满意的解。实验数据结果验证了模型和算法的可行性和高效性。

文章的最后对全文的工作做出了总结，同时也提出了研究中存在的一些需要进一步讨论、修改并加以完善的问题和不足之处。

## 第 2 章 SMT 组装系统

SMT 组装系统的组成形式是根据组装产品和组装工艺要求不同而不同，其差别主要体现在：用于单面还是双面组装，生产线上是否配置有自动检测设备等组成形式方面；系统的组装效率、组装精度等性能指标方面；以及系统的计算机集成化程度方面。SMT 组装系统的组成主体或基本组成形式是 SMT 生产线，各种形式的 SMT 生产线及其主要设备的基本功能，以及其控制与管理形式是基本相同的。

图 2.1 是一个典型的 SMT 生产线<sup>[16]</sup>。

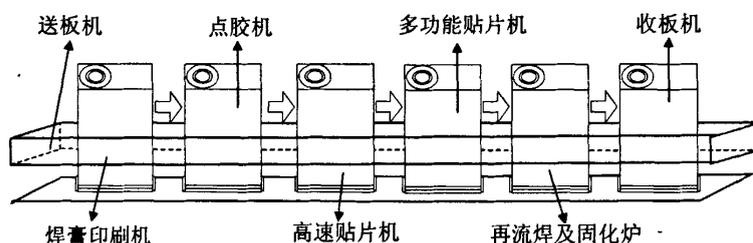


图 2.1 SMT 生产线的典型组成形式

Fig.2.1 The composition of the SMT production line

### 2.1 SMT 组装系统主要组成设备的功能

以下简单介绍焊膏印刷机、粘接剂（亦称焊胶）点胶机、贴片机、再流焊炉、波峰焊炉等 SMT 组装系统主要组成设备的基本功能<sup>[17]</sup>。

#### (1) 焊膏印刷机

焊膏印刷机是组成 SMT 组装系统或 SMT 生产线的主要设备和影响组装质量的关键设备，用于将焊膏（膏状焊料）涂敷在为贴装元器件的 PCB 的焊盘上。它也可用于在 PCB 上涂敷固定 SMC/SMD 用的粘接剂，但很少采用。早期的焊膏印刷机大多采用丝网印刷涂敷工艺，因此，习惯上也称其为焊膏丝网印刷机，简称丝印机。焊膏印刷机有手动、半自动、全自动等类型，目前，在 SMT 组装系统或 SMT 生产线中配置的焊膏印刷机一般均为全自动印刷机。

焊膏印刷机的基本功能是：采用丝网印刷或网板印刷技术，将定量的焊膏，精确、均匀、快速地涂敷在 PCB 的各个指定位置上。全自动焊膏印刷机具有较强的功能，它可自动完成一系列的焊膏印刷操作过程。

### (2) 点胶机

点胶机是用于将固定 SMC/SMD 用粘接剂涂敷到 PCB 上的粘接剂涂敷设备，由于其涂敷工艺采用的是注射点涂（焊胶）技术而得名。它是组成 SMT 组装系统或 SMT 生产线的主要设备之一。与点胶机原理相类似的还有点膏机，用于焊膏的点涂。点膏机与焊膏印刷机相比，有涂敷效率低、涂敷质量低的缺陷；实际生产中很少采用。而点胶机却应用普遍，成为 SMT 产品双面组装系统或生产线中不可缺少的配套设备。点胶机有手动、半自动、全自动和高速、低速等类型，目前，在 SMT 组装系统或生产线中配置的点胶机一般均为全自动高速点胶机。

点胶机的基本功能为：采用注射点涂技术，将定量的粘接剂准确、快速地涂敷到 PCB 的各个指定位置上。全自动点胶机可完成包含 PCB 自动传送与定位在内的一系列自动操作。

### (3) SMC/SMD 贴片机

贴片机也称为贴装机或贴装设备，用于各类片式 SMC/SMD 贴装，是组成 SMT 组装系统或 SMT 生产线、决定系统组装效率和组装功能的核心和关键设备。贴片机有半自动或全自动、高速或低速、多功能或通用、高精度或普通精度等各种不同类型，各种类型贴片机的性能和功能有一定差异，但基本贴片功能相同。

贴片机的基本功能可概括为：在不对 SMC/SMD 造成任何损坏的前提下，完整、稳定、准确、快速、可靠地拾取所需 SMC/SMD，并按程序要求稳定、准确、快速、可靠地将其贴放在 PCB 指定的位置上。

### (4) 再流焊炉

再流焊炉用于 SMC/SMD 其它元器件和接插件引脚、电极与 PCB 焊盘之间的钎焊连接，是组成 SMT 组装系统或 SMT 生产线的主要设备。其基本功能为：在机械传送机构的带动下，使已贴装有待焊元器件的 PCB 以设定速度通过设定温度工作区，采用外部热源，加温已经事先涂敷在 PCB 焊盘与被连接对象引脚或电极

之间的焊料，使其通过预热、升温、熔化（再次流动）、冷却等过程，最终达到 PCB 焊盘与被连接对象引脚或电极之间牢固、可靠的焊接。

再流焊炉根据加热方法的不同，有红外再流焊、热风再流焊、红外热风再流焊、汽相再流焊等多种类型。由于红外热风再流焊吸收和融合了红外再流焊与热风再流焊的优点，具有加热效果好、温场均匀等特点，目前在 SMT 组装系统中使用的比例越来越大。

#### (5) 波峰焊炉

波峰焊炉用于 SMC/SMD 或插装元器件和接插件引脚、电极与 PCB 焊盘、接插通孔之间的钎焊连接，是组成 SMT 混合组装系统的主要设备。其基本功能为：在机械传送机构的带动下，使已装有待焊元器件的 PCB 的待焊面通过焊剂涂布区和熔融焊料循环流动的波峰面，采用浸焊方式进行焊接，最终达到 PCB 焊盘与被连接对象引脚或电极之间牢固、可靠的焊接。

浸焊时，焊料波峰由电动泵或电磁泵喷流而成，当 PCB 上的插装元器件待焊接部位通过波峰时，焊料可以润湿穿过通孔的插装元器件引脚突出（浸入焊料）的部分，并能吸入经过电镀的接插通孔里；当预先用粘接剂粘连在 PCB 焊接面上的 SMC/SMD 直接浸入、并通过焊料波峰时，焊料润湿金属引脚和焊盘焊接表面，并自动吸附在两者之间；从而实现插装元器件或 SMC/SMD 与 PCB 焊盘之间的焊接。

根据焊料波峰的个数和波形不同，波峰焊有单峰焊、双波峰焊、喷射波峰焊和“Ω”波峰焊等类别，目前普遍使用的是双波峰焊，与单波峰焊相比，双波峰焊具有能利用第二波峰焊的修正，消除焊接遮蔽等焊接质量缺陷的优点。

#### (6) 其它装置

SMT 组装系统的组成设备中，与组装功能直接相关的装置主要还有 PCB 上板机和下板机、PCB 传送装置、PCB 转板机和翻板机，以及在混合组装系统中采用的人工插装流水生产线，或者是代替人工插装作业的插装元器件自动插装机、引脚折弯机和剪切机等。

上述 SMT 组装系统组成设备，形成了组装系统组装 SMT 产品的主要能力，完成或执行 SMT 组装系统的绝大部分功能。除此之外，在 SMT 组装系统中配套的检测和测试设备、清洗设备、返修设备等各种辅助设备，还使 SMT 组装系统具有强大的产品组装质量检测、控制功能和不合格产品的返修功能。

### 2.2 SMT 组装系统的一般属性

SMT 组装系统是电子(产品)组装系统，是用于 PCB 级电子电路组件表面组装的电子产品制造系统，属于制造系统和生产系统范畴。它具有生产系统的一般属性。

电子(产品)组装系统是包含市场分析、产品设计、工艺规划、组装制造、检验出厂、产品销售和售后服务等各个环带的组装制造全过程，及其所涉及的硬件、软件和人员组成的一个将各种电子元器件、机电元器件、电路基板以及机械结构件等制造资源，进行合理的设计、互连、安装、调试，使其转变为适用的电子产品或半成品（小到电子器件、集成电路、微电子组件，大至家电、通信、雷达、计算机等产品)的有机整体。

电子组装系统可分为器件/组件级组装系统、PCB/子系统级组装系统、整机/系统级组装系统，分别应用于不同的组装对象。目前，在电子组装系统中应用最广、发展最快的是以 SMT 组装系统为标志的 PCB/子系统级组装系统。

SMT 组装系统所涉及的科学和技术领域相当广泛，其中有：包含 CAD/CAPP/CAM 技术、计算机集成制造技术的一般先进制造技术；包含器件与电路制造技术、器件与微系统封装技术、表面组装技术，电气互联与连接技术、机电兼容与匹配技术的电子先进制造技术；包含集成电路技术、厚薄膜混合微电子技术、微波电路技术、印制电路技术的电子电路技术；包含传感测试技术、电路测试技术、组装过程控制技术的自动测控技术等。涉及电子与微电子、机械、计算机、材料、物理、化学等多个学科门类。

总之，SMT 组装系统是集多种技术与多门学科于一体的高科技综合体。

## 2.3 SMT 组装系统的先进性

SMT 组装系统是以应用先进制造技术为生的先进制造系统，并具有柔性制造系统、计算机集成制造系统等先进制造系统的特性。

### 2.3.1 SMT 组装系统的先进制造属性

先进制造技术是制造业不断吸收信息技术和现代管理技术的成果，并将其综合应用产品设计、加工、检测、管理、销售、使用、服务乃至回收的制造全过程，以实现优、高效、低耗、清洁、灵活生产，提高对动态多变的市场的适应能力和竞争能力的制造技术的总称。它的主要特征是技术的多学科性、系统性、综合性与集成性；技术的实性和应用面的广泛性；以及技术应用产生的优质、高效、低耗、清洁；灵活生产效果。

SMT 组装系统所采用的技术以具有上述技术特征的 SMT 新兴技术和先进制造技术为主，并融合了多门科学和技术，产生的生产效果具有明显的优质、高效、低耗、清洁、活特征，是一个应用先进制造技术的先进制造系统。

SMT 组装系统的先进性主要体现在：

- (1) 组成系统的主要组装设备高速、高精，自动化、数控化程度高；
- (2) 系统的物料自动传输能力、实时可备能力强；
- (3) 系统计算机控制能力和生产适应能力强；
- (4) 各组成设备计算机控制能力强、系统信息集成的基础条件好；
- (5) 系统对产品变化的顺应能力强、适用面广等。

### 2.3.2 SMT 组装系统的柔性特征

SMT 组装系统具有 FMS 特征，主要体现在以下方面。

#### (1) 设备柔性

系统关键设备(丝印机、贴片机、再流焊炉、PCB 传送装置等)能按照需要，针对不同规格、不同外型尺寸元器件和 PCB，由组装程序控制自动进行工夹具夹持尺寸、定位基准、贴片头及其吸嘴规格等内容的适应性调整。

#### (2) 产品柔性和加工柔性

在定义的 PCB 规格和元器件种类范围内，能通过协调生产线中设备的任务分工、调整 PCB 夹具规格等，实现工艺流程的快速改变和对新规格产品组装工艺调整的快速响应。

(3) 物料搬运系统柔性

系统的核心设备贴片机储存元器件种类多，系统的物料自动传输能力、在线备料能强，能适应各种不同产品的组装需求。

(4) 组装系统柔性

单台组装设备的计算机控制能力和适应能力强，具有形成系统整体计算机控制或集的良好基础，能比较方便地进行硬件设备的重组再建，系统有良好的可塑性。

### 2.3.3 SMT 组装系统的集成特性

采用计算机集成技术，以一条或多条 SMT 生产线为主体形成的 SMT 组装系统，有 CIMS 特征；集成度较高、规模较大的系统，其实质即为 SMT 产品组装生产的 CIMS。它由生产管理分系统(PMS)、质量保证分系统(QS)、产品设计分系统(DS)、网络数据库分系统(NDS)、产品制造分系统(MS)几个分系统组成。整个系统结构层次分明，集设计制造于一体，并可以利用网络进行 CAD 设计文件，产品合同信息与市场信息等内容的远程通信，其网络结构采用了宽带网络交换器，具有数据交换快速流畅的特点。

## 第3章 多品种 PCB 表面贴装生产线调度问题建模

### 3.1 SMT 优化问题

假设要生产一系列的 PCB 来满足订单需求,当 PCB 加工任务下达到车间,在进行生产物流调度的时候要涉及以下问题<sup>[18-21]</sup>。首先进行的是将 SMT 承担的多个产品组装工作任务进行分组,并将其分配到各条生产线。可以将每条生产线的任务分为一个或多个组,并将这种分配后的生产线的工作流程尽量满足各项限制条件,使各生产线之间达到利用率的和系统生产效率最高。这样每一种 PCB 就被分配到一条生产线上。对于一条生产线,把要通过这条生产线生产的 PCB 种类排成一个优化生产顺序。然后,为每一种 PCB 分配它的元器件到各台贴片机。对于被分配了元器件的单台贴片机,把元器件安排到工作台的具体供料槽上,并安排取贴循环顺序,使得工作台的生产率最大。

我们把 SMT 优化调度问题分成三个层次的优化问题<sup>[1]</sup>。第一个层次,单台贴片机优化决策问题,即供料器分配到供料槽上和确定元器件的取贴顺序。这个层次的目标是提高贴片机的生产率。第二个层次,单条生产线优化问题。它包括元件负荷均衡优化问题和品种切换问题。对于单一品种的 PCB 来说,把 PCB 上的元件分配到一条生产线的各台贴片机上,目标是生产时间最短和减少贴片机之间负荷不平衡。对于多品种的 PCB,由于在品种切换的时候,前一个 PCB 板元件在供料槽上的设置位置(set up)和后一个 PCB 板的在同一供料槽上的元件设置不同,而产生的切换问题。因此需要一个优化的生产顺序,目标是减少一条生产线的切换时间。第三个层次的问题是多生产线优化问题,即不同种类的 PCB 板在不同生产线之间的指派优化问题。总体来说每一层次问题的解决都要考虑 PCB 板的特性和贴片机的属性。高层次的问题的解决策略影响低层次问题的解决策略。各个层次的问题之间相互影响。三个层次的优化问题关系如图 3.1 所示。

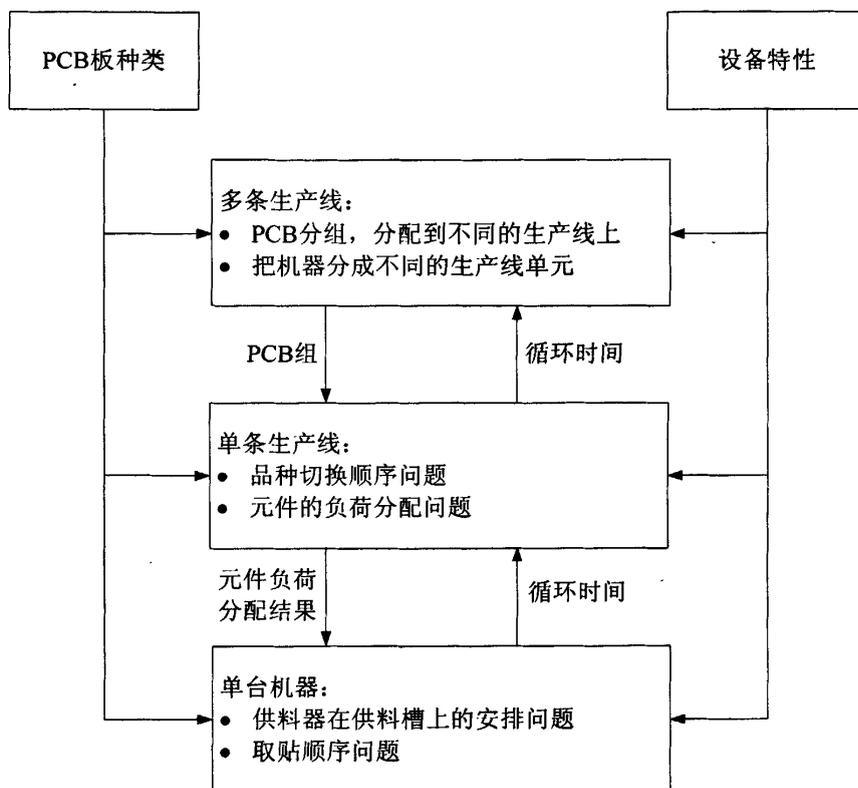


图 3.1 表面贴装生产线优化问题分层图解

Fig.3.1 The scheduling optimization problem of SMT Assembly Line

(1) 第一层次的优化问题：单台贴片机优化。

下面简单介绍一下单台贴片机的一个工作台在优化时要解决的问题，即供料器分配和元件贴装顺序两个子问题。首先给出一个取贴循环的定义：贴片头移动到供料器的槽的相应位置，依次或同时吸取元器件，通过视觉检测后移动到 PCB 依次贴装这些元件，这样的取贴过程被称为一个取贴循环。一个基本的取贴循环包括取料，校正和贴放三个动作<sup>[2]</sup>。不考虑校正动作，一个工作台的总生产时间是由贴片头沿着供料槽将本次循环中所元器件吸取完毕的时间  $t_1(i)$ ；贴片头离开供料槽，移动到 PCB 的上方，依次把本次循环中所有元件贴装完毕的时间  $t_2(i)$ ；从取贴循环  $i$  的最后贴装位置到取贴循环  $i+1$  两个取贴循环之间的移动时间  $t_{i,i+1}$ ；

以及两个取贴循环之间可能会更换吸嘴的时间 $T$ ,四部分时间组成的。它们都与元件种类在供料槽上的分配位置,和取贴顺序有关。

(2) 第二层次优化问题:单条生产线的优化问题。

① 负荷均衡优化问题

当单品种 PCB 的元件在单条生产线多台贴片机之间进行分配时,首先应该分配的是只能在指定的贴片机加工的元件,例如盘式包装的元件只能分配给多功能机,型号在 1608(长度为 1.6mm,宽度为 0.8mm)以下的元器件只能在高速机上加工。然后对那些两台贴片机都能贴装的元件进行分配,最主要的目标 PCB 的生产时间最小,通过所有工作台的最大的循环时间最小来实现。因为高速贴片时间是 0.06s/点,多功能贴片时间是 0.18s/点,而切换一次吸嘴的时间是 2s/次,切换吸嘴会占用很多的时间,所以应减少同一工作台内部的吸嘴切换时间,尽量使分配到同一个工作台上加工的元件吸嘴切换次数最少。吸嘴的选择因元器件和贴片机类型而异,不同的元器件需要采用不同的吸嘴进行吸取,同一种元器件若高速机、多功能机都能加工,则在两台贴片机上所选择的吸嘴种类不同。

② 切换问题

不同于其他的柔性制造系统(FMS),在快速生产的 PCB 生产线上不断地切换供料器是不可行的,因为切换的时间是生产时间的好多倍,高速贴片机切换一个元件供料器的时间是 180 秒,而多功能贴片机是 220 秒。所以解决的方法是:把属于同一组的几个类型板的元件在一次切换中全部设置在供料槽上。对于一个给定的顺序,一个组的 PCB 在贴片机上所需要切换的时间,不仅仅是基于顺序的,而且是基于从第一个组一直到在这个顺序中这个组之前的组所有的组的持续顺序(carryover sequence)。例如:如果 N 个组的顺序排成 1, 2, ..., N 的顺序,那么第 N 个板的换供料器的切换时间不仅仅像一般的基于顺序调度问题的取决于它前面的一个组,即(N-1)组,而是取决于之前的所有组的顺序,即 1, 2, 3..., (N-1)组。同一种类型,并且一起生产的 PCB 板,叫做一个批量(lot)。在生产之前,根据这种类型的 PCB 周需求量的大小,决定该种板的批量大小。批量大小影响生产时间。切换问题的特征是:两台贴片机的基于持续顺序的、考虑批量的成组调

度问题。除此之外，这个问题比一般的柔性生产系统中遇到的问题复杂在于：一、一个组的切换取决于元件和供料器在供料槽上的位置。二、PCB的生产过程在多台贴片机上。

### (3) 第三层次的优化问题：生产线负荷均衡优化问题

把产品种类分配到各条生产线上，是多种电子工业的要解决的主要问题。这个问题必须考虑每条生产线的各个因素，比如说贴片机能力限制，这样才能与各种PCB板的数量和生产线的技术要求相匹配。解决这个问题的目标是使包括切换时间在内的总生产时间最少或使每个产品品种的生产率最大。

解决SMT生产线的优化问题采取的方法包括成组，组的拆分，最小切换策略，排序，元件分配，供料器的安排，取贴顺序优化等问题。

## 3.2 切换策略综述

Johnsson 和 Smed<sup>[22]</sup>根据板的种类数及贴片机台数，将PCB生产物流调度问题分为以下四个层次：

(1) 单机单品种问题 (1-1)，涉及单机优化问题。目标为总的贴装时间最小。

(2) 单机多品种问题 (1-M)，涉及单机切换策略问题。目标为贴片机的切换时间最小。

(3) 多机单品种问题 (M-1)，PCB所需要贴装的原件在各台贴片机上的负荷分配问题。目标为均衡分配生产线上的工作量。

(4) 多机多品种问题 (M-M)，多条生产线上工作量分配问题，包括：生产线间的负荷均衡，生产线上的生产顺序等问题。

上述第2层次的问题不仅包含贴装时间，还涉及品种之间的切换时间，这就涉及到怎样减少不同品种PCB之间的切换时间的策略问题。切换策略对于生产率影响很大，通常有以下方法来降低切换次数：①通过增大生产批量来降低切换频率；②采用成组技术。

Leon 和 Peters<sup>[7]</sup>在其文献中将切换策略分为四类：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。各切换策略特点及其适用环境如下：

(1)单一切换策略 (Unique Setup Strategy)，每次生产一种板，确定元件的供料器配置及贴装顺序，将贴装时间最小化。在单一切换策略中，切换时供料器上所有的元件都要撤下来，然后将下一种板所需要的元件重新放置上去。这种策略常用于单台贴片机单品种大批量的生产环境。当涉及到多种板时，单一切换策略找到最小贴装时间的解。然而，由于在切换新产品时前一种产品的所有元件都被从供料槽上移下来，因此切换时间也可能很大。于是，当利用单一切换策略时，完工时间不受板顺序的影响。

(2)成组切换策略 (Group Setup Strategy)，将类似的板分到一个组中，使得切换只存在于不同组之间进行交换时，同组内不同板之间不产生切换。本策略的优点是使得组间的切换时间与组内的贴装时间之和最小，即目标是完工时间最小。由于组内供料器配置是各板的整体最优配置，不一定是某个板的最优配置，因此，对于一些板而言，利用这种策略时的贴装时间会大于利用单一切换策略时的贴装时间。成组切换策略对于大小批量混合生产的情况比最小切换策略常用。

(3)最小切换策略 (Minimum Setup Strategy)，目标是确定板的生产顺序及元件供料器的配置，使得整个切换时间最小。其思想是只在生产下一种 PCB 需要切换供料器时才进行切换操作。在这种策略下，只对 PCB 集成时所需要的供料器置换，对于为了减小贴装时间而进行的供料器置换则不予处理。因此，比较相似的 PCB 会安排顺序生产，这样使得切换时间也相对较少。若给定板顺序以及使得每个板切换时间最小的元件供料器配置，则使得每个板的贴装时间最小的元件贴装顺序也就确定了。

(4)部分切换策略 (Partial Setup Strategy)，即从一种板切换到另一种板进行生产时，只切换供料器的一个子集，即只切换部分供料器。有一部分供料器放置在贴片机上不动，只切换需要切换的那部分供料器。其目标是切换时间与生产时间之和最小，即求完工时间最小。元件只有在切换惩罚小于降低的贴装时间时才从贴片机当前的供料槽上移下来。很明显的，我们要充分考虑当前贴片机的切换状态。在这种切换策略下，切换时间不仅与排在其前面紧挨着的板有关，还与排在其前面所有的板及其生产顺序都有关系。它居于单一切换策略 (贴装时间最小化)

和最小切换策略（切换时间最小化）之间。比如，对于大批量生产，部分切换策略就可能归于单一切换策略；而对于小批量和贴装时间短的 PCB 进行生产时，部分切换策略就相当于最小切换策略。因此，部分切换策略更具有灵活性。部分切换策略也有很多形式。部分切换策略在确定供料器配置和贴装顺序时，考虑了切换单个供料器的时间，而其他策略都不考虑。当切换单个供料器时间很小时，会考虑利用多次切换来降低贴装时间；而切换单个供料器时间较长时，则通过适当调整贴装时间来降低切换次数。

### 3.3 单品种 PCB 生产线调度优化问题

本节主要介绍前述优化问题中的第二个层次中的负荷均衡优化问题，涉及贴片机上吸嘴种类的选取和切换。

当单品种 PCB 的元件在单条生产线多台贴片机之间进行分配时，首先应该分配的是只能在指定的贴片机加工的元件，例如盘式包装的元件只能分配给多功能机，型号在 1608(长度为 1.6mm,宽度为 0.8mm)以下的元器件只能在高速机上加工。然后对那些两台贴片机都能贴装的元件进行分配，最主要的目标 PCB 的生产时间最小，通过所有工作台的最大的循环时间最小来实现。因为高速贴片时间是 0.06s/点，多功能贴片时间是 0.18s/点，而切换一次吸嘴的时间是 2s/次，切换吸嘴会占用很多的时间，所以应减少同一工作台内部的吸嘴切换时间，尽量使分配到同一工作台上加工的元件吸嘴切换次数最少。吸嘴的选择因元器件和贴片机类型而异，不同的元器件需要采用不同的吸嘴进行吸取，同一种元器件若高速机、多功能机都能加工，则在两台贴片机上所选择的吸嘴种类不同。

对于单一生产线，单品种 PCB 生产负荷的分配问题，可以用下图 3.2 表示。

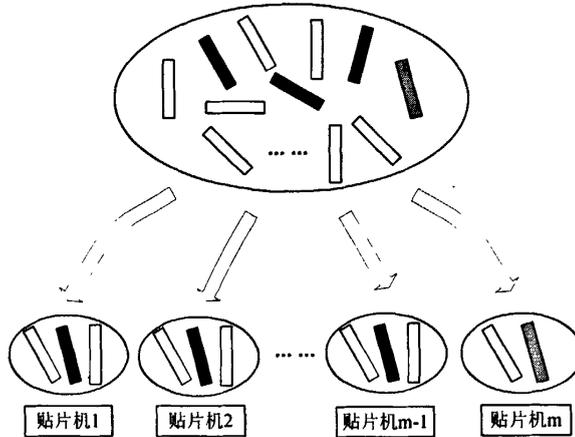


图 3.2 元件负荷均衡优化问题概述

Fig.3.2 Component allocation problem overview

当单品种 PCB 在指定的生产线上生产的时候，一个很重要的问题就是元器件在贴片机（高速贴片机和多功能贴片机）之间的负荷均衡优化问题。优化的分配方法会使得生产时间最短。

贴片机在实际生产中的速度通常用循环时间，也就是用完成一个产品的整个贴装过程所需的时间来表示。在同一生产线中循环时间最长的贴片机将决定整条生产线的实际产量和生产能力。为了实现生产能力平衡，必须合理分配同一生产线中多台贴片机的生产负荷。这里所谓的生产负荷，指的是每台贴片机贴装的元器件数量。

因为贴片机是整个 SMT 生产线的瓶颈，所以主要以贴片机为研究对象。在实际生产中，一般的形式是一台高速贴片机和一台多功能贴片机在生产中以串联的方式分布，如图 3.3 所示。

当元件在多台贴片机之间进行分配时首先应该考虑的是有些元器件只能在某个指定的贴片机上加工。例如盘式包装的元件只能分配给多功能机，大型异型元器件只能在高速机上加工，然后对那些两台贴片机都能贴装的元件进行分配。最主要的目标 PCB 的总体生产时间最小。这可以通过各个工作台的最大的循环时间最小化来实现。切换一次吸嘴的时间比贴片一个元件的时间大得多，切换吸嘴会

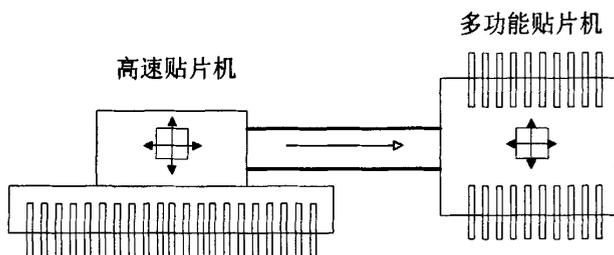


图 3.3 两台贴片机组成的集成系统

Fig.3.3 Two-Machine Assembly System

占用很多的时间，所以应减少同一工作台内部的吸嘴切换时间，尽量使分配到同一个工作台上加工的元件吸嘴切换次数最少。吸嘴的选择因元器件和贴片机类型而异，不同的元器件需要采用不同的吸嘴进行操作，同一种元器件被安排到高速机上或多功能机上所选择的吸嘴不同。

### 3.4 多品种 PCB 生产线调度优化问题建模

#### 3.4.1 问题描述

在大批量、小品种的的生产环境下，由于贴片机上的供料器容量是有限的，因此，元件供料器的切换是不可避免的。因此，在同一生产线中，考虑 PCB 的生产时间的时候不仅要考虑到 PCB 的贴装时间，还要考虑到不同品种 PCB 之间交换生产时的元件供料器的切换时间。生产时间最长的贴片机将决定整条生产线的实际产量和生产能力。生产商从客户那里接收不同品种和批量的订单，这就要求生产商在生产过程中最小化各订单作业的平均流程时间，以此来最大限度的满足客户要求。如何安排贴片机上元件供料器的配置以及 PCB 在生产线上的生产顺序等，使得多种 PCB 的生产平均流程时间最短，是提高生产线生产效率的关键。

本文主要针对多品种、少批量的生产环境下的单条生产线的问题进行优化。假设每种元件供料器这占据贴片机上的一个供料槽位。单种 PCB 所需要的元件种类数不超过生产线上的供料器容量，但是多品种 PCB 所需的元件种类总数超出生产线上的供料器容量。因此，本文研究涉及元件供料器切换的多品种 PCB 在表面贴装生产线上的优化问题。

本文所研究的 SMT 生产线是由高速贴片机与多功能贴片机组成的,如图 1 所示。每台贴片机都能够容纳 20 个供料器。生产不同 PCB 所需要的元件被安置在这些供料器上,取贴装置从供料器上取下元件然后贴装到 PCB 上对应的位置。

高速贴片机上平均贴装一个元件的时间为 0.06s,平均切换一个供料器的时间为 180s。多功能贴片机有两个工作台,但只有一个工作台工作,另外一个工作台只用于放置大型或异型元件,每个工作台容纳 10 个供料器,平均贴装一个元件需要 0.18s,平均切换一个供料器时间为 220s。当从客户处接收不同品种和批量的订单时,怎么样最小化各订单作业的平均流程时间,是本文要解决的问题,主要针对多品种、小批量的生产环境进行优化。

一般而言,采用成组技术来降低切换时间,将类似的 PCB 分到同一组当中能够明显的降低生产线的生产时间。因此,本文采用成组切换和部分切换相结合切换策略(详见第四章)。

本文将多品种 PCB 生产物流调度问题分为以下四个子问题进行研究:1.PCB 品种分组问题;2.元件种类在各台贴片机上的负荷分配问题;3.元件切换问题;4. PCB 生产排序问题。目标函数为求平均流程时间最短。并将所涉及的 PCB 生产排序问题分成两个层次:

(1)PCB 组层次:不同 PCB 组的生产排序问题;

(2)PCB 层次:同一组的 PCB 排序问题。

### 3.4.2 模型参数及变量说明

参数:

$\varepsilon$ : 一个非常小的正数;

$L$ : 一个非常大的正数;

$I$ : PCB 种类集合;

$i$ : PCB 种类编号,  $i \in I$ ;

$b_i$ : PCB 种类  $i$  的生产批量,  $i \in I$ ;

$G$ : PCB 组的集合;

$B_g$ : PCB组  $g$  内所含 PCB 种类的集合,  $g \in G$ ;

$g$ : 小组编号,  $g \in G$ ;

$C$ : 所有元件种类集合;

$c$ : 元件种类编号,  $c \in C$ ;

$m$ : 贴片机编号,  $m=1,2$ ;

$F^m$ : 贴片机  $m$  上所能容纳的供料器数量,  $m=1,2$ ;

$t_c^m$ : 元件种类  $c$  在贴片机  $m$  上估计的平均单位贴片时间,  $m=1,2$ ,  $c \in C$ ;

$p_{i,c}$ : PCB 种类  $i$  需要贴装的元件种类  $c$  的个数,  $i \in I$ ,  $c \in C$ ;

$st^m$ : 贴片机  $m$  上元件供料器的单位切换时间,  $m=1,2$ ;

$PT_{g,i}^m$ : 小组  $g$  内的 PCB 种类  $i$  在贴片机  $m$  上的贴片时间,  $i \in I$ ,  $m=1,2$ ;

决策变量:

$J_g^m$ : 当 PCB 组  $g$  生产时, 贴片机  $m$  上的元件种类集合,  $g \in G$ ,  $m=1,2$ ;

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

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

$ST_{g',g}^m$ : 小组  $g'$  安排到小组  $g$  之前生产时在贴片机  $m$  上的切换时间,  $g', g \in G$ ,

$m=1,2$ ;

$v_{i,i'}^g$ : 1, 小组  $g$  内的 PCB 种类  $i$  紧接在  $i'$  之后生产;

0, 否则;  $i, i' \in B_g$ ,  $g \in G$

$u_{g',g}$ : 1, PCB 小组  $g$  紧接在  $g'$  之后生产;

0, 否则;  $g', g \in G$

$d_{g,c}^m$ : 1, 小组  $g$  生产时需要在贴片机  $m$  上切换安装元件种类  $c$ ;

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

$a_{g,c}^m$ : 1, 小组  $g$  需要贴装的元件种类  $c$  安排到贴片机  $m$  上;

0, 否则。  $g \in G$ ,  $c \in C$ ,  $m=1,2$

$k_{g,c}^m$ : 1, 组  $g$  生产时, 需要保留贴片机  $m$  上除了组  $g$  要贴装的元件之外的元件种类  $c$ ;

0, 否则;  $g \in G, c \in C, m=1,2$

状态变量:

$h_{g,c}^m$ : 1, 小组  $g$  生产时所需要贴装的元件种类  $c$  已经放置到贴片机  $m$  上;

0, 否则;  $g \in G, c \in C, m=1,2$

### 3.4.3 模型目标函数和约束条件

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

s.t.

$$PT_{g,i}^m = \sum_{c \in C} t_c^m \cdot a_{g,c}^m \cdot p_{i,c} > 0, \quad g \in G, i \in B_g, m=1,2 \quad (3.1)$$

$$PT_{g,i}^1 \geq PT_{g,i}^2, \quad g \in G, i \in B_g \quad (3.2)$$

$$PT_{g,i}^1 - PT_{g,i}^2 \leq \varepsilon, \quad g \in G, i \in B_g \quad (3.3)$$

$$\sum_{m=1}^2 a_{g,c}^m = 1, \quad g \in G, c \in C \quad (3.4)$$

$$\sum_{c \in C} a_{g,c}^m \leq F^m, \quad g \in G, m=1,2 \quad (3.5)$$

$$h_{g,c}^m \geq a_{g,c}^m, \quad g \in G, c \in C, m=1,2 \quad (3.6)$$

$$d_{g,c}^m \geq a_{g,c}^m - h_{g,c}^m \cdot u_{g,g}, \quad g, g' \in G, c \in C, m=1,2 \quad (3.7)$$

$$k_{g,c}^m \leq \max \left( h_{g,c}^m \cdot u_{g,g}, a_{g,c}^m \cdot u_{g,g} \right), \quad g, g', g \in G, c \in J_g^m, m=1,2 \quad (3.8)$$

$$|J_g^m| \leq F^m, \quad g \in G, m=1,2 \quad (3.9)$$

$$ST_{g,g}^m = st^m \cdot u_{g,g} \cdot \sum_{c \in C} \left( d_{g,c}^m + \left( |J_g^m| + d_{g,c}^m - F^m \right) \right), \quad g, g' \in G, m=1,2 \quad (3.10)$$

$$CT_g^m \geq \left( CT_g^m + ST_{g,g}^m \right) \cdot u_{g,g} + \sum_{i \in B_g} PT_{g,i}^m \cdot b_i, \quad g \in G, m=1,2 \quad (3.11)$$

$$O_{g,i}^m \geq (CT_{g'}^m + ST_{g',g}^m) \cdot u_{g',g} + \sum_{i' \in B_{g'}} PT_{g',i'}^m \cdot b_{i'} \cdot v_{i',i}^g + PT_{g,i}^m \cdot b_i, \\ g', g \in G, i', i \in B_g, m = 1, 2 \quad (3.12)$$

$$O_{g,i}^2 \geq O_{g,i}^1 + PT_{g,i}^2, \quad g \in G, i \in B_g \quad (3.13)$$

$$CT_g^m = \max_{i \in B_g} (O_{g,i}^m), \quad g \in G, m = 1, 2 \quad \text{s} \quad (3.14)$$

$$O_{g,i}^m - O_{g,i}^m \cdot v_{i,i}^g + L \cdot v_{i,i}^g \geq PT_{g,i}^m \cdot b_i, \quad g \in G, i, i' \in B_g, m = 1, 2 \quad (3.15)$$

$$v_{i,i}^g \in \{0, 1\}, u_{g,g} \in \{0, 1\}, d_{g,c}^m \in \{0, 1\}, a_{g,c}^m \in \{0, 1\}, h_{g,c}^m \in \{0, 1\}, k_{g,c}^m \in \{0, 1\} \\ (3.16)$$

目标函数为求平均流程时间最短。约束条件 (3.1) 确保 PCB 种类  $i$  在每台贴片机上贴片时间都大于 0；约束条件 (3.2) 表示由于两台贴片机之间没有缓冲设备，因此第一台贴片机的贴片时间不能小于第二台贴片机的贴片时间；约束条件 (3.3) 确保每种 PCB 分到各台贴片机上工作量尽量相等；约束条件 (3.4) 表示每个 PCB 组内的相同种类的元件都被安排的同一台贴片机上贴片；约束条件 (3.5) 确保每组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元件供料器容量；约束条件 (3.6) 表示各台贴片机上下一组 PCB 所需要贴装的元件已经放置上去时，则不切换此种元件；约束条件 (3.7) 确定两个组切换时是否要切换元件供料器。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 (3.8) 确定元件是否被保留。约束条件 (3.9) 确保当 PCB 组  $g$  生产时，贴片机  $m$  上的元件种类数不能超出贴片机的元件供料器容量；约束条件 (3.10) 计算小组  $g'$  安排到小组  $g$  之后生产时在贴片机  $m$  上的切换时间，即元件切换总次数乘以元件供料器的单位切换时间；约束条件 (3.11) 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 (3.12) 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， $i$  所在的小组切换时间，同组内排在  $i$  前面的 PCB 的完工时间及  $i$  的贴片时间之和；约束条件 (3.13) 表示 PCB 必须是在前一台贴片机上生产完毕后才能进入下一台贴片机进行生产；约束条件 (3.14) 每组 PCB 的完工时间为组

中完工时间最迟的那个板的完工时间；约束条件 (3.15) 表示两种板之间的完工时间之差最少为后面一种板的贴片时间；约束条件 (3.16) 为 0-1 决策变量和状态变量。

后面第 4 章主要针对各个子问题进行求解。

## 第4章 多品种PCB表面贴装生产线优化

本章将多品种PCB表面贴装产线调度问题分成四个子问题分别进行研究,即PCB分组,元件负荷分配,元件供料器切换,PCB生产排序,设计相应的算法进行求解,最后将各子问题及其算法进行集成,解决多品种PCB表面贴装产线优化问题。

### 4.1 PCB分组优化

#### 4.1.1 分组问题描述及建模

成组切换策略(Group Setup Strategy),即将类似的板分到一个组中,使得切换只存在于不同组之间进行交换时,同组内不同板之间不产生切换。本策略的优点是使得组间的切换时间与组内的贴装时间之和最小,即目标是完工时间最小。由于组内供料器配置是各板的整体最优配置,不一定是某个板的最优配置,因此,对于一些板而言,利用这种策略时的贴装时间会大于利用单一切换策略时的贴装时间。成组切换策略对于大小批量混合生产的情况比最小切换策略常用。

PCB分组问题可以表述如下:将所有的板 $I$ 进行分组, $I$ 为所有PCB种类集合,即 $I=B(1)\cup B(2)\cup\cdots\cup B(g)\cup\cdots$ , $B(g)$ 为小组 $g$ 内所有板的集合, $H(g)$ 表示小组 $g$ 内所有板所需要的元件种类集合,满足:① $B(g)\neq\emptyset$ , $\forall g$ ;② $B(g)\cap B(g')=\emptyset$ , $g'\neq g$ ;③ $|H(g)|\leq F$ , $F$ 为贴片机所能容纳的供料器个数,即每组内所需元件种类数不能超过贴片机上所能容纳的供料器数目。由于本文所涉及的是由高速贴片机和多功能贴片机组成的生产线的调度优化问题,因此供料器的容量限制这个约束,考虑两台贴片机的供料器容量之和,即 $F=30$ 。

根据分组问题的约束和目的,本文建立分组模型并设计分组策略对问题求解。

模型参数:

$I$ : PCB种类集合;

$i$ : PCB种类编号, $i\in I$ ;

$C$ : 元件种类集合;

$c$ : 元件种类编号,  $c \in C$ ;

$N$ : PCB 分组数;

$g$ : 小组编号,  $g=1,2,\dots,N$ ;

$F$ : 贴片机所能容纳的供料器个数

决策变量:

$z_g$ : 1, 小组  $g$  内至少含有一种 PCB;

0, 否则;  $g=1,2,\dots,N$

$y_{g,i}$ : 1, PCB 种类  $i$  分到小组  $g$ ;

0, 否则;  $g=1,2,\dots,N, i \in I$

$x_{g,c}$ : 1, 小组  $g$  内的 PCB 需要贴装元件种类  $c$ ;

0, 否则;  $g=1,2,\dots,N, c \in C$

目标函数: 
$$\min f = \sum_{g=1}^N g \cdot z_g$$

约束条件:

$$\sum_{g=1}^N y_{g,i} = 1, \quad i \in I \quad (4.1)$$

$$\sum_{c \in C} x_{g,c} \leq z_g \cdot F, \quad g=1,2,\dots,N \quad (4.2)$$

$$\sum_{i \in I} y_{g,i} \geq 1, \quad g=1,2,\dots,N \quad (4.3)$$

$$\sum_{g=1}^N \sum_{i \in I} y_{g,i} = |I| \quad (4.4)$$

$$y_{g,i} \in \{0,1\}, \quad (4.5)$$

$$z_g \in \{0,1\} \quad (4.6)$$

$$x_{g,c} \in \{0,1\} \quad (4.7)$$

目标函数为求分组数最少; 约束条件 (4.1) 保证每种 PCB 只能分到一个组内, 即分组时同种的 PCB 是不可分割的; 约束条件 (4.2) 表示每组内的 PCB 所要贴装

的元件种类不超过贴片机的供料器容量；约束条件（4.3）保证每组内至少含有一种PCB；约束条件（4.4）保证所有元件种类都被分组；约束条件（4.5）、（4.6）和（4.7）为0-1变量。

#### 4.1.2 已有成组策略概述

成组切换策略（Group Setup Strategy），即将类似的板分到一个组中，使得切换只存在于不同组之间进行交换时，同组内不同板之间不产生切换。本策略的优点是使得组间的切换时间与组内的贴装时间之和最小，即目标是完工时间最小。由于组内供料器配置是各板的整体最优配置，不一定是某个板的最优配置，因此，对于一些板而言，利用这种策略时的贴装时间会大于利用单一切换策略时的贴装时间。成组切换策略对于大小批量混合生产的情况比最小切换策略常用。

分组过程中涉及PCB之间的相似系数，现在已有的相似系数的求解方法有多种，如Jaccard相似系数<sup>[1]</sup>和几何相似系数<sup>[6]</sup>。分组的目标函数一般为组内的相似度最小化或者组间的相似度最大化。下面给出Jaccard相似系数和几何相似系数的求解方法：

##### （1）PCB间的Jaccard相似系数

Leon和Peters<sup>[1]</sup>提出了PCB种类*i*和*j*之间的相似系数 $s_{ij}$ ：

$$s_{ij} = \frac{|E_i \cap E_j|}{|E_i \cup E_j|}$$

其中 $E_i$ ， $i=1,2,\dots,N$ ，表示PCB种类*i*所需要贴装的元件种类的集合， $|E_i|$ 表示PCB种类*i*所需要贴装的元件种类数。这里， $s_{ij}$ 表示PCB种类*i*和*j*的通用元件种类数与PCB种类*i*和*j*所需要的所有元件种类数之比。特别的，记 $s_{ii}=0$ 。

这种相似系数有一种局限性，即没有考虑PCB的几何相似性。

##### （2）PCB间的几何相似系数

Quintana和Leon<sup>[6]</sup>提出了基于PCB种类*i*和*j*的元件相似性和板的几何相似性的贴装位置矩阵（Placement Location Matrix, PLM）。

令坐标点 $(X, Y)$ 的模为 $\sqrt{X^2 + Y^2}$ ,  $p_{ki}$ 为板 $i$ 上按升序排列的第 $k$ 个点的模;  
 $n^* = \min(n_i, n_j)$ , 其中 $n_i, i = 1, 2, \dots, N$ 表示板 $i$ 上的所有贴装点的个数;  $Xrange$ 和  
 $Yrange$ 表示最大的那张板上的笛卡尔距离。

$$s_{ij} = 0.5(1 - D_{ij})F_{ij} + 0.5 \frac{|E_i \cap E_j|}{|E_i \cup E_j|}$$

其中,  $D_{ij} = \frac{\sqrt{\sum_k^{n^*} (p_{ki} - p_{kj})^2}}{n^* \sqrt{Xrange^2 + Yrange^2}}$ ,  $F_{ij} = \frac{\min(n_i, n_j)}{\max(n_i, n_j)}$ 。公式中前一部分表示板

的几何相似性, 后一部分表示元件的相似性。

PLM的局限性是板的几何相似性与元件的相似性有相同的权重。

Shtub和Maimon<sup>[5]</sup>在1992提出一种基于Jaccard相似系数的反复分组策略, 只是这种方法每次只构成一组。除了Jaccard相似系数外, 此方法考虑了元件切换次数, 分组的目的是切换时间最小及贴片机的容量能够充分利用。

Bhaskar和Narendran<sup>[2]</sup>提出了余弦相似系数, 并利用最大支撑树算法对PCB分组。算法允许一种PCB可以分入不同的组中, 即同种PCB是可以分割的。将每种PCB所需要的元件用 $M$ 维的0-1行向量来表示,  $M$ 表示总的元件种类数。PCB种类 $i$ 和 $j$ 之间的余弦相似系数定义为对应PCB所需要的元件种类构成的向量 $\bar{i}$ 和 $\bar{j}$ 之间夹角的余弦, 即:

$$s_{ij} = \cos(\theta_{ij}) = \frac{\bar{i} \cdot \bar{j}}{|\bar{i}| \cdot |\bar{j}|} = \frac{|E_i \cap E_j|}{\sqrt{|E_i|} \cdot \sqrt{|E_j|}}$$

算法分为两个阶段; 首先, 将相似的PCB分为同一组; 然后, 算法根据元件切换时间来确定某种PCB是否要分到多个组内。

Hashiba和Chang<sup>[7]</sup>给出相似系数矩阵的同时也给出了Hamming距离成组策略。Hamming距离定义为两种PCB所需要的不同元件种类的个数。从表示元件与PCB关系的0-1矩阵中, 我们可以很容易得到Hamming距离。PCB种类 $i$ 和 $j$ 之间的

Hamming距离为： $h_{ij} = |(E_i \cup E_j) - (E_i \cap E_j)|$ ， $E_i$ 表示PCB种类*i*所需要贴装的元件种类， $E_i - E_j$ （其中 $E_i \supset E_j$ ）表示 $E_i$ 除去 $E_j$ 中元素之后的集合。从Hamming距离中可以获取两种PCB之间的相似性信息，但是也不足以解释不同PCB之间的切换问题。

Narayanaswami和Iyengar<sup>[8]</sup>也提出了一种基于Jaccard相似系数的成组策略，先找出种子PCB，然后把相似度大的放到一组中，直到供料器安排满。接下来，将与前一组有最大相似度那种PCB作为另一组的种子PCB，继续进行成组操作，直至所有的PCB都分组完成。

#### 4.1.3 相对相似系数成组策略分组

本文针对PCB品种分组问题设计成组策略，设 $U$ 表示未分组所有PCB种类的集合， $F$ 表示贴片机上供料器集合，步骤如下：

(1)  $G = \emptyset$ ， $SEED = \emptyset$ ；

(2) 确定种子PCB；

计算 $U$ 内的PCB种类*i*和*j*之间的Jaccard相似系数 $s_{ij} = \frac{|E_i \cap E_j|}{|E_i \cup E_j|}$ 。对任一PCB

种类*i*求相似系数之和 $s_i = \sum_j s_{ij}$ 。若 $s_{i^*} = \max(s_i)$ ，则确定PCB种类*i*<sup>\*</sup>为种子PCB；

(3) 令PCB种类*i*<sup>\*</sup>为组*G*中的第一种板， $G = G \cup \{i^*\}$ ，将PCB种类*i*<sup>\*</sup>所需要贴装的元件种类放入集合 $SEED$ 中， $SEED = SEED \cup E_{i^*}$ ，且更新 $U = U \setminus i^*$ ；

(4) 对 $U$ 中的任一PCB种类*j*，计算所需元件种类与 $SEED$ 中的元素的相对相似性系数：

$$rs_j = \frac{|E_j \cap SEED|}{|E_j|}$$

记 $rs_{i^*} = 0$ ；

(5) 若 $rs_{j^*} = \max(rs_j)$ ，判断 $|SEED \cup E_{j^*}|$ 与贴片机供料器容量个数 $|F|$ 的关系；

(6)若 $|E_j \cap SEED| > |F|$ ，返回步骤(1)；若 $|E_j \cap SEED| \leq |F|$ ，将PCB种类 $j^*$ 加入组 $G$ 中， $G = G \cup \{j^*\}$ ，更新 $SEED = SEED \cup E_{j^*}$ ， $U = U \setminus j^*$ ，返回步骤(4)；

(7)重复上述步骤直至 $U = \emptyset$ 。

为了说明上述成组策略，我们用以下例子来说明整个的分组过程：

有12种PCB，总共需要贴装30种不同的元件，贴片机上有20个供料槽。假设，每个供料器只占有一个供料槽位置，即贴片机的供料器容量为20。PCB种类与元件种类关系如下表4.1所示：1-表示PCB需要贴装某种元件，否则，0。

根据前面所述的算法步骤，计算PCB种类间的Jaccard系数如下表4.2所示。可以看出 $s_{B7} = 3.58 = \max(s_i)$ ， $i = B1, B2, \dots, B12$ ，于是将PCB种类B7放入小组 $G$ 中，即B7为种子PCB， $G = \{B7\}$ ， $SEED = \{C1, C3, C4, C5, C9, C12, C13, C16, C17, C18, C20, C22, C24, C25, C26, C28, C30\}$ 。然后计算 $SEED$ 中元件种类与各种未分组PCB所需元件种类的相对相似系数，可知 $rs_{B7} = 0$ 。如表4.3。

从上表4.3可以看出， $rs_{B5} = 0.8 = \max(rs_j)$ ，即PCB种类B5与小组 $G$ 中元件相似性系数最大，经过检验可知，B5加入小组 $G$ 后，组中的元件种类数为19，不超出贴片机的供料器容量。因此，将PCB种类B5并入小组 $G$ 中，此时，组中有两种PCB，即B7和B5， $G = \{B7, B5\}$ ， $SEED = \{C1, C3, C4, C5, C8, C9, C12, C13, C15, C16, C17, C18, C20, C22, C24, C25, C26, C28, C30\}$ 。

接下来重新计算PCB种类B7，B5分组之后 $SEED$ 中元件种类与各种未分组PCB所需元件种类的相对相似系数 $rs_j$ ，如表4.4，此时 $rs_{B7} = 0$ ， $rs_{B5} = 0$ 。

由表4.4可以看出 $rs_{B12} = 0.85 = \max(rs_j)$ ，即PCB种类B12与小组 $G$ 中元件相似性系数最大，但是PCB种类B12加入小组 $G$ 后，组中的元件种类数为21，已超出贴片机的供料器容量。本组分组结束。初始化各个参数，继续将未分组的PCB进行分组。最后，将12种PCB分成5组，分组结果为 $G1 = \{B7, B5\}$ ， $G2 = \{B1, B11, B8\}$ ， $G3 = \{B4, B3, B9\}$ ， $G4 = \{B2, B10\}$ ， $G5 = \{B6, B12\}$ 。

各组与元件种类的关系如下表4.5所示：

表4.1 各种PCB所需元件种类情况

Tab. 4.1 Component Type Requirements of Each Type of PCB

PCB 所需元件个数	PCB 种类												
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	
元件种类	C1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0
	C2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
	C3	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
	C4	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0
	C5	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1
	C6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	C7	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0
	C8	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1
	C9	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
	C10	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1
	C11	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0
	C12	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1
	C13	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1
	C14	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
	C15	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
	C16	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0
	C17	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1
	C18	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	C19	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	C20	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1
	C21	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
	C22	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1
	C23	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0
	C24	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
	C25	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1
	C26	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1
	C27	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	C28	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0
	C29	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0

续表4.1

PCB 所需元件个数		PCB 种类											
		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
元件种类	C30	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0
汇总		22	24	21	24	17	19	31	23	19	23	17	24

表4.2 PCB种类间的Jaccard系数

Tab. 4.2 Jaccard's Similarity between Any Two PCB Types

Jaccard 系数		PCB 种类											汇总	
		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11		B12
PCB 种类	B1	0	0.25	0.25	0.24	0.44	0.2	0.3	0.39	0.26	0.24	0.35	0.37	3.29
	B2	0.25	0	0.26	0.39	0.16	0.28	0.38	0.33	0.15	0.32	0.16	0.25	2.93
	B3	0.25	0.26	0	0.47	0.29	0.28	0.32	0.26	0.35	0.25	0.1	0.14	2.97
	B4	0.24	0.39	0.47	0	0.28	0.2	0.36	0.14	0.42	0.3	0.1	0.3	3.2
	B5	0.44	0.57	0.29	0.28	0	0.11	0.42	0.22	0.24	0.28	0.18	0.35	3.38
	B6	0.2	0.28	0.28	0.2	0.11	0	0.22	0.1	0.22	0.14	0.17	0.26	2.18
	B7	0.3	0.38	0.32	0.36	0.42	0.22	0	0.32	0.4	0.2	0.23	0.43	<u>3.58</u>
	B8	0.39	0.33	0.26	0.14	0.22	0.1	0.32	0	0.21	0.32	0.29	0.19	2.77
	B9	0.26	0.15	0.35	0.41	0.24	0.22	0.4	0.21	0	0.1	0.17	0.33	2.84
	B10	0.24	0.32	0.25	0.3	0.28	0.14	0.2	0.32	0.1	0	0.28	0.19	2.62
	B11	0.35	0.16	0.1	0.1	0.18	0.17	0.23	0.29	0.17	0.28	0	0.44	2.47
	B12	0.37	0.25	0.14	0.3	0.35	0.26	0.43	0.19	0.33	0.18	0.44	0	3.24

表4.3 PCB种类B7的相对相似系数  $rs_j$ 

Tab. 4.3 Relative Similarity of PCB Type B7

PCB	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
相对相似系数	0.54	0.67	0.58	0.62	<u>0.8</u>	0.45	0	0.58	0.73	0.38	0.5	0.69

表4.4 PCB种类B7, B5分组的相对相似系数

Tab. 4.4 Relative Similarity of PCB Type B7&amp;B5

PCB	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
相似系数	0.69	0.75	0.67	0.77	0	0.55	0	0.58	0.73	0.54	0.6	<u>0.85</u>

表4.5 各组所需要的元件种类情况

Tab. 4.5 Component Type Requirements of Each Group

分组	G1	G2	G3	G4	G5
PCB 种类	B7,B5	B1,B11,B8	B4,B3,B9	B2,B10	B6,B12
C1	1	1	1	0	1
C2	0	0	0	1	1
C3	1	1	1	1	0
C4	1	0	1	1	0
C5	1	1	1	0	1
C6	0	1	0	1	1
C7	0	1	1	1	1
C8	1	1	1	1	1
C9	1	1	0	1	0
C10	0	1	1	0	1
C11	0	1	0	1	0
C12	1	1	0	1	1
C13	1	1	0	1	1
元件 C14	0	0	1	0	0
种类 C15	1	1	1	1	1
C16	1	1	0	1	0
C17	1	0	1	0	1
C18	1	0	0	0	0
C19	0	0	0	0	1
C20	1	0	1	0	1
C21	0	0	1	1	0
C22	1	1	0	1	1
C23	0	1	0	1	0
C24	1	1	1	0	1
C25	1	1	1	0	1
C26	1	0	1	1	1
C27	0	0	1	0	1
C28	1	0	1	1	0

续表4.5

分组		G1	G2	G3	G4	G5
PCB 种类		B7,B5	B1,B11,B8	B4,B3,B9	B2,B10	B6,B12
元件	C29	0	1	1	1	1
种类	C30	1	1	1	1	0
汇总		19	19	19	19	19

将本文提出的PCB分组策略所得的分组结果与其他的分组策略进行比较,结果如表4.6所示。

表 4.6 各种分组策略结果比较

Tab. 4.6 the Result Comparison of Each Group Strategy

1	分组	G1	G2	G3	G4	G5		
	PCB 种类	B7,B5	B1,B11,B8	B4,B3,B9	B2,B10	B6,B12		
2	分组	G1	G2	G3	G4	G5	G6	
	PCB 种类	B7,B5	B12,B11	B1,B8	B10, B2	B4,B3,B9	B6	
3	分组	G1	G2	G3	G4	G5	G6	
	PCB 种类	B5,B1,B8	B11,B12	B6,B2	B9,B3,B4	B10	B7	
4	分组	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7
	PCB 种类	B6	B7	B3,B1	B5,B9	B10,B4	B8,B2	B11,B12
5	分组	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7
	PCB 种类	B1,B5,B8	B11,B12	B9,B4,B3	B6	B10	B7	B2

附注: 1表示本文提出的分组策略; 2表示Narayanaswami提出的分组策略; 3表示Hashiba和Chang提出的分组策略; 4表示Maimon和Shtub提出的分组策略; 5表示Bhaskar和Narendran提出的分组策略。

由表4.6可知, 本文提出的分组策略很明显优于其他分组策略。

## 4.2 元件均衡负荷分配

将 PCB 品种分组之后, 需要将各种板所需的元件按照均衡负荷原理配置到各

台贴片机的供料槽上。本文采用郭淑娟在其文献[29]中的方法将元件分配到生产线上两台贴片机上，在这里就不再赘述。

### 4.3 元件供料器 KTNS 部分切换

部分切换策略（partial setup strategy），即从一种板切换到另一种板进行生产时，只切换供料器的一个子集，即只切换部分供料器。有一部分供料器放置在贴片机上不动，只切换需要切换的那部分供料器。其目标是切换时间与生产时间之和最小，即求完工时间最小。元件只有在切换惩罚小于降低的贴装时间时才从贴片机当前的供料槽上移下来。很明显的，我们要充分考虑当前贴片机的切换状态。在这种切换策略下，切换时间不仅与排在其前面紧挨着的板有关，还与排在其前面所有的板及其生产顺序都有关系。它居于单一切换策略（贴装时间最小化）和最小切换策略（切换时间最小化）之间。比如，对于大批量生产，部分切换策略就可能归于单一切换策略；而对于小批量和贴装时间短的PCB进行生产时，部分切换策略就相当于最小切换策略。因此，部分切换策略更具有灵活性。部分切换策略也有很多形式。部分切换策略在确定供料器配置和贴装顺序时，考虑了切换单个供料器的时间，而其他策略都不考虑。当切换单个供料器时间很小时，会考虑利用多次切换来降低贴装时间；而切换单个供料器时间较长时，则通过适当调整贴装时间来降低切换次数。

下面主要介绍KTNS（keep tool needed soonest, KTNS）切换策略<sup>[6]</sup>。

KTNS策略用来在给定生产顺序的情况下寻求最优的元件供料器切换次数。假设每种元件供料器只占据一个供料槽位置，KTNS策略的实施步骤如下：

参数设置如下：

L：贴片机上元件种类集合，即供料器配置；

I：需要切换的元件种类集合；

C：当前PCB所需要贴装的元件种类集合；

F：贴片机的最大供料器容量；

$R_c$ ：当前PCB进行贴装所需要占据的供料槽个数；

$f$ : 空闲供料槽的个数;

$K$ : 被保留的元件种类集合;

$R_k$ : 被保留的元件种类所占据的供料槽个数;

具体步骤:

(1) 识别当前PCB进行生产时所需要贴装的元件种类,  $C$ 。如果当前PCB是生产序列中第一种被生产的板, 那么令  $C = L = I$  且  $K = \emptyset$ ; 否则, 由公式  $I = C - L$  来确定  $I$ 。

(2) 找出当前PCB进行生产时所要占据的供料槽个数,  $R_c$ 。若  $R_c < F$ , 则  $f = F - R_c$ , 进入步骤(3); 否则, 进入步骤(4);

(3) 找出在  $L$  中有但在  $C$  中没有的元件种类。对这些元件按照后面是否被最快用到进行排序, 最快被用到的元件排在最前面, 最迟被用到的元件排在最后面。将这个排列当中的第一种元件放入  $K$  中, 并且从  $L$  中除去这种元件。计算被保留的元件种类所要占据的供料槽个数  $R_k$ , 更新贴片机上的空闲供料槽个数  $f = f - R_k$ 。重复此步骤, 直至  $f = 0$ , 或者已经没有被保留的元件;

令  $L = C \cup K$  并且  $K = \emptyset$ 。如果当前考虑的PCB不是生产序列当中最后一种板, 那么考虑下一种板, 返回步骤(1); 否则, 停止。

本文采用KTNS (keep tool needed soonest, KTNS) 切换策略对PCB的元件供料器进行部分切换。切换策略步骤请见4.3节。

下面给出利用前面的小例子对KTNS策略进行说明:

经过分组之后, 12中PCB总共分为5组, 各组所要贴装的元件如表所示。不妨设5组PCB的生产顺序即为G4-G2- G1-G5-G3, 并且这里不设参照组, 假设生产之前贴片机上所有的供料槽都处于空闲状态。本文将安装一个供料器或者写下一一种供料器的作为一次切换。

(1) 对于组G4, 总共需要占据19个供料槽的位置, 需要切换19次。没有元件需要保留。此时,  $C = L = I = \{ C_2, C_3, C_4, C_6, C_7, C_8, C_9, C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{15}, C_{16}, C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{26}, C_{28}, C_{29}, C_{30} \}$ ,  $K = \emptyset$ 。

(2) 考虑组G2, 总共需要贴装19种元件, 即  $R_c = 19$ , 更新元件种类为  $C = \{ C1, C3, C5, C6, C7, C8, C9, C10, C11, C12, C13, C15, C16, C22, C23, C24, C25, C29, C30 \}$ 。比较C和L, 得出  $I = \{ C1, C5, C10, C24, C25 \}$ 。

(3) 找出存在于L中但是不在C中的元件种类, 可以被保留的元件种类有  $\{ C2, C4, C21, C26, C28 \}$ , 由于组G2所需的元件都配置到贴片机上之后剩余的空闲供料槽个数为  $f = F - R_c = 1$ , 而由表4.7可知, 3种元件种类  $\{ C4, C6, C28 \}$  在接下来生产的小组G1时要用到, 是最快被用到的可以保留的元件种类, 由于空闲供料槽的限制, 随机从其中选择1种元件种类保留在贴片机上, 在这里我们选取  $\{ C4 \}$  元件种类为保留元件。将其余4种元件  $\{ C2, C21, C26, C28 \}$  从贴片机供料槽上撤下来。这个过程当中总共切换9次元件 (安装5种元件, 撤下4种元件)。

(4) 这样直到最后一组PCB生产完毕, 切换的过程如表4.7所示。

由表4.7可以得出切换次数, 汇总之后见表4.8。

## 4.4 主动禁忌搜索算法排序

### 4.4.1 主动禁忌搜索算法简介

#### (1) 禁忌搜索算法的优缺点

同传统的优化算法相比, 禁忌搜索算法具有如下优点:

- ①能接受劣解, 具有很好的爬山能力;
- ②区域集中搜索与全局分散搜索能较好平衡;

但是, 基本的禁忌搜索也有明显的不足:

①对初始解和邻域结果有较大的依赖性, 一个好的初始解可能很快迭代得到最优解, 一个较差的初始解可能会极大的降低搜索质量。

②搜索过程是串行的, 不像遗传算法那样具有并行的搜索机制。

为了全面提高禁忌搜索算法的性能, 可以针对其中的关键策略以及参数设置等方面进行改进, 也可以与其他优化算法相结合。值得指出的是, 这些改进后的算法并没有规定必须是上述基本禁忌搜索算法的情况, 禁忌搜索算法是使用“禁忌机制”和“特赦准则”引导搜索的思想。与其说禁忌搜索算法是一种方法, 不

表4.7 总的KTNS策略切换情况

Tab. 4.7 the Result of KTNS Setup Strategy

分组	G4	G2	G1	G5	G3
PCB 种类	B2,B10	B1,B11,B8	B7,B5	B6,B12	B4,B3,B9
C1	0	1	1	1	1
C2	1	0	0	1	1
C3	1	1	1	1	1
C4	1	1	1	0	1
C5	0	1	1	1	1
C6	1	1	0	1	0
C7	1	1	1	1	1
C8	1	1	1	1	1
C9	1	1	1	0	0
C10	0	1	0	1	1
C11	1	1	0	0	0
C12	1	1	1	1	0
C13	1	1	1	1	0
C14	0	0	0	0	1
C15	1	1	1	1	1
C16	1	1	1	0	0
C17	0	0	1	1	1
C18	0	0	1	0	0
C19	0	0	0	1	0
C20	0	0	1	1	1
C21	1	0	0	0	1
C22	1	1	1	1	0
C23	1	1	0	0	0
C24	0	1	1	1	1
C25	0	1	1	1	1
C26	1	0	1	1	1
C27	0	0	0	1	1

元件  
种类

续表4.7

分组	G4	G2	G1	G5	G3
PCB 种类	B2,B10	B1,B11,B8	B7,B5	B6,B12	B4,B3,B9
元件种类	C28	0	1	0	1
	C29	1	0	1	1
	C30	1	1	0	1
汇总	19	20	20	20	20

注：表格中 $\square$ 表示新安装上去的元件种类， $\_$ 表示切换时保留的元件种类。

表4.8 生产顺序为(G4-G2-G1-G5-G3)时组间切换次数

Tab. 4.8 Group Setup Times of Sequence (G4-G2-G1-G5-G3)

组间切换	G4	G4-G2	G2-G1	G1-G5	G5-G3
安装元件种类数	19	5	5	6	5
撤下元件种类数	0	4	5	6	5
保留元件种类数	0	1	1	1	1
切换次数	19	9	10	11	10
总切换次数					60

如说是一种技术，或者说是一门艺术。只有应用的好，才能很好的解决实际问题。

禁忌搜索算法具有全局寻优能力，而且比较容易实现，自从20世纪90年代就引起了广泛的重视。但是应用中发现，基本的禁忌搜索算法有一些缺点，对于给定的世纪工程问题，可能需要大量的调试工作才能得到较好的效果，于是提出了一些改进做法。

## (2) 基本禁忌搜索算法的困惑

基本禁忌搜索算法相对于传统的优化方法而言，具有很好的爬山能力，能够避免陷入局部最优点。相对于遗传算法等其他优化方法而言，禁忌搜索算法的计算速度比较快，因而得到广泛的应用。但是，也有些困惑存在：

①参数调整比较困难。和其他元启发式算法包括遗传算法、模拟退火算法等相似，禁忌搜索算法需要设置或者调整一些参数来进行有效的搜索。然而要得到

合适的参数，不仅依赖于待求解的问题，而且相当费时。因此，参数调整的困难是各种元启发式算法需要解决的一个突出问题。

基本禁忌搜索算法中，候选解集的大小需要调整，禁忌长度需要设置。仅以禁忌长度为例，尽管已经做了大量的研究工作，从起初的与问题无关的固定常数到依赖于问题规模  $n$  的常数；到给出禁忌长度的两个极限，没有哪一种方法能适合于所有问题，常常是经过各种尝试，最后才得到一种可以接受的方案。

②不能避免循环。禁忌表的提出就是为了尽量避免迂回搜索，而禁忌表也确实很大程度上避免了循环。但是，禁忌搜索算法不能避免较大的循环。及时在引入了中期表和长期表之后，也不能彻底的避免循环。当局部最优点的周围被一些大的“吸引盆”包围的时候，禁忌搜索算法收敛相当慢。

当禁忌搜索算法得到一个局部最优点时，使用禁忌表禁止访问过的点，使得搜索逐渐远离局部最优点。这里由一个隐含的假设：从局部最优点出发，而不是从随机点出发，能更容易的达到全局最优点。但是研究表明有时候可能不是这样。

### (3) 主动禁忌搜索算法的基本原理

主动搜索 (reactive search, 简称 RS) 是一种反馈机制，是一种适合于求解离散优化问题的启发式算法。Battiti 和 Tecchiolli (1994) 将主动搜索机制引入到禁忌搜索算法中来，提出了主动禁忌搜索算法。

主动禁忌搜索算法利用反馈机制自动调整禁忌表长度，自动平衡集中化搜索和分散多样化搜索策略。算法中给出增大调节系数  $N_{IN}$  ( $N_{IN} > 1$ ) 和减小调节系数  $N_{DE}$  ( $0 < N_{DE} < 1$ )。搜索过程中，所有访问过的解都被存储起来，每当执行一步移动时，首先检查当前解是否已经访问过。如果已经访问过，说明进入了某个循环，禁忌长度变为原来的  $N_{IN}$  倍；如果经过给定的若干次迭代后，没有重复的解出现，禁忌长度变为原来的  $N_{DE}$  倍。

为了避免循环，主动搜索算法给出了逃逸机制。搜索过程中，当大量解重复出现次数超过给定次数  $R_{Ep}$  时，逃逸机制便被激活。逃逸操作一般通过从当前解执

行若干步随机移动实现，执行移动的步长在定义域随机选择。为了避免很快跳回刚搜索过的区域，所有随机操作都被禁止。

禁忌搜索算法使用历史记忆寻优，用禁忌表指导优化搜索，结合渴望水平，系统的实现了集中强化搜索和分散多样化搜索的平衡。而主动禁忌搜索算法则使用反馈策略和逃逸机制来加强这种平衡。因此，理论上说，主动禁忌搜索算法比一般的禁忌搜索算法效果更好，搜索的质量更高。

#### (4) 主动禁忌搜索算法的基本步骤

主动禁忌搜索算法的核心思想是反馈策略与逃逸机制，上面只是给出了基本思想。实际应用中，反馈策略与逃逸机制有多种实现方法。例如，如果  $num\_dec$  代内没有重复出现，则禁忌表长度变为原来的  $N_{DE}$  倍；如果重复解出现的总次数（不是哪一个解重复的次数，而是所有解重复次数的和）达到  $num\_esc$ ，则执行逃逸操作。主动禁忌搜索算法的基本步骤如下：

第1步：初始化两个计数器： $n\_dec = 0$ ， $n\_esc = 0$ ；

第2步：初始化其他参数，给定初始解；

第3步：针对当前解，给出候选解集；

第4步：根据禁忌表情况和渴望水平情况，选出一个解作为下次迭代的初始解，更新记录表（包括正常的禁忌表和所有访问过的解）；

第5步：如果该选中的解出现过，则禁忌长度  $t = t \cdot N_{IN}$ ， $n\_esc = n\_esc + 1$ ， $n\_dec = 0$ ；否则， $n\_dec = n\_dec + 1$ ；

第6步：如果  $n\_dec = num\_dec$ ，则  $t = t \cdot N_{DE}$ ， $n\_dec = 0$ ；

第7步：如果  $n\_esc = num\_esc$ ，则实施逃逸操作， $n\_esc = 0$ ， $n\_dec = 0$ ；

第8步：如果满足停止准则，则算法终止；否则转第3步。

以上步骤主要用来说明主动禁忌搜索算法中提出的反馈机制和逃逸操作，至于常规禁忌搜索算法中包括的渴望水平与选择策略等，这里没有详细描述。

#### (5) 主动禁忌搜索算法流程图

主动禁忌搜索算法的流程图如下图 4.1：

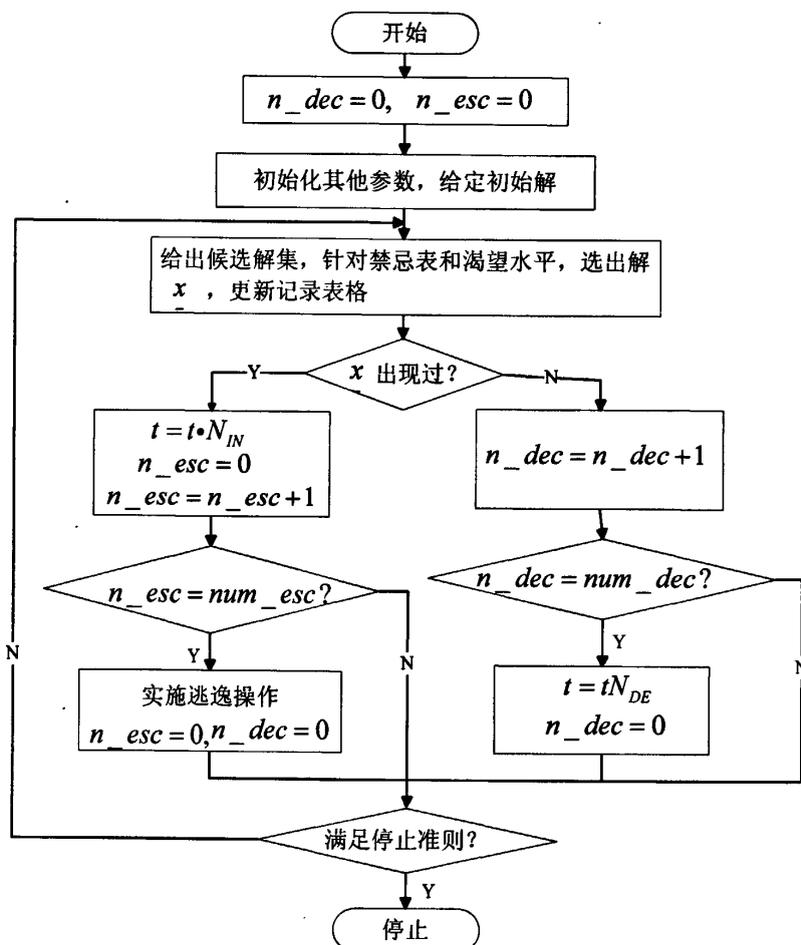


图 4.1 主动禁忌搜索算法流程图

Fig. 4.1 Flow Chart of Reactive Tabu Search

从中可以清楚的看到主动禁忌搜索算法的核心思想，看到逃逸机制的触发条件以及加大或者缩小禁忌长度的具体办法。

Battiti 和 Tecchiolli 提出主动禁忌搜索算法的时候，针对 0-1 背包问题和大规模的二次指派问题（QAP）对算法进行测试，取得了很好的效果。而后，主动禁忌搜索算法已经在很多领域得带了成功的应用，包括旅行商问题、车间调度、车辆路径问题、神经网络参数调整以及电力系统中有功/无功控制等领域。

#### 4.4.1 平均流程时间下限

由于本文采用 KTNS 部分切换策略, 只将需要但未被放置的那部分元件供料器重新放上去。因此, 计算最小切换次数时不考虑顺序依赖问题。由于利用成组切换策略, 组与组之间需要进行切换, 那么第  $m$  台贴片机上, 小组  $g$  所需要的切换次数最少为:

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

其中,  $R_g^m = |H_g^m| - \max_{g \neq g'} (|H_g^m \cap H_{g'}^m|) - (F^m - |H_g^m|)$ , 即每组最少所需要的安装或是卸下的元件种类数。这是通过假设除了小组  $g$  所需要的元件之外的那些安装到贴片机供料槽上的元件供料器都不需要切换即都是小组  $g$  需要的元件供料器来实现的。

因此, 第  $m$  台贴片机上切换时间下限为:

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

记  $ST_g^m$  为小组  $g$  在贴片机  $m$  上的切换时间, 取  $S_g^m = Q_g^m \cdot st^m$ ;  $P_g^m$  为小组  $g$  的整体贴装时间;  $P_{g,i}^m$  为 PCB 种类  $i$  在贴片机  $m$  上的整体贴装时间,  $P_{g,i}^m = PT_{g,i}^m \cdot b_i$ , 则  $P_g^m = \sum_{i \in B_g} P_{g,i}^m$ ,  $g=1, \dots, N$ ;  $n_g$  为小组  $g$  内所含 PCB 的种类数, 即  $n_g = |B_g|$ 。

本文在求平均流程时间理论下限时, 首先只考虑单台贴片机的成组调度的切换时间。将原来两台贴片机的平均流程时间最小化问题转化成两个独立的单台贴片机的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的下限。注意: 在考虑第一台贴片机时, 忽略第二台贴片机上小组间的切换时间及其贴装生产时间; 同理, 考虑第二台贴片机时, 忽略第一台贴片机上小组间的切换时间及其贴装生产时间。

采用以下方法对 PCB 进行排序来求平均流程时间理论下限:

(1) 根据最短贴装生产时间规则将每组内的流程进行排序。即, 组内按照下列规则排序: (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)按照下述规则对小组进行排序：（按照组内平均每个板的完工时间升序排列）

$$\left(\frac{ST_{(1)}+T_{(1)}}{n_{(1)}}\right)\leq\left(\frac{ST_{(2)}+T_{(2)}}{n_{(2)}}\right)\leq\cdots\leq\left(\frac{ST_{(N)}+T_{(N)}}{n_{(N)}}\right)$$

由于本文不设置参照组，即开始生产时，贴片机的供料槽是空的，没有放置元件供料器，因此，按照 Johnson 规则排好序之后，需要更改前两组的切换次数。将第一组的切换次数改为所需要的元件种类数最少的那个组的元件种类数，即  $Q_{(1)} = \min_{g \in G} (H_g)$ ；第二组的切换次数改为

$$Q_{(2)} = 2 \left( |H_{(2)}| - \max_{(g) \neq (2)} (|H_{(2)} \cap H_{(g)}|) \right) - \left( F - \min_{g \in G} (H_g) \right)。$$

设  $\sigma_0^1$  与  $f'(\sigma_0^1)$  分别为第一台贴片机上由上述算法所得的生产序列（包括组内序列和组序列）和（利用最小切换时间计算所得的）平均流程时间；同理： $\sigma_0^2$  和  $f'(\sigma_0^2)$  分别为第二台贴片机上由前述算法所得的生产序列和平均流程时间。

记  $r_1 = \max \left\{ 0, \min_{g \in G} \left\{ ST_g^1 + \min_{i \in B_g} \{ PT_{g,i}^1 \} \right\} - ST_{(1)}^2 \right\}$ ，第二台贴片机上第一组的切换操作只能在  $r_1$  之后才能进行。

$r_2 = \min_{g \in G, b \in B_g} \{ PT_{g,i}^2 \}$  表示在第二台贴片机上所有种类的板的最小生产时间。

因此，多品种 PCB 生产调度问题的平均流程时间理论下限为：

$$f = \max \left\{ f'(\sigma_0^1) + r_2 / I, r_1 + f'(\sigma_0^2) \right\}。$$

一般的，由此方法得到的平均流程时间下限值接近于实际问题的最优解。虽然仍会有个别案例值与由主动禁忌搜索算法所得的最优解的偏差不是很小，即使这个最优解是实际问题的最优解，但是这种求解平均流程时间下限的方法用来解决两台贴片机的 PCB 排序问题还是可取的。

#### 4.4.2 主动禁忌搜索算法排序步骤

本文采用主动禁忌搜索算法解决排序问题。主动禁忌搜索算法<sup>[23]</sup>已被证实是解决调度中组合问题的非常有效的方法。主动禁忌搜索算法包含两个层次：

(a)第一个层次：外搜索（outside search）组（间）顺序，找到最佳的组顺序。  
在给定的组顺序之下，

(b)第二个层次：内搜索（inside）组内顺序，即每一个组内板的顺序。

最后将组顺序和组内板顺序结合到一起，就得到了能产生最小的平均流程时间的解。

主动禁忌搜索算法的外搜索是从一个组顺序移动到另一个组顺序，内搜索是从一个板顺序移动到另一个板顺序。当外搜索找到了一个组顺序，搜索过程就转移到内搜索。目的是找到外搜索组顺序所对应的最优的板顺序，由此得到最短的平均流程时间。当找到最优的组内板顺序时，搜索程序又到外搜索，去寻找更新更优的板顺序。因此，整个主动禁忌搜索过程是在组内搜索板顺序和组间搜索组顺序两个层次来回循环，最后找到原问题的最优解。

对于给定的组顺序，若目标函数为求整体完工时间最小化，两台贴片机的作业顺序问题可以采用 Johnson 规则来求最优作业顺序。本文目标函数为求平均流程时间最小化，对于给定的组顺序，现在还没有行之有效的方法解决两台贴片机的作业顺序使得平均流程时间最小。但因为只是为了设定算法的初始解，本文采用求平均流程时间理论下限的组顺序和组内板顺序组成的解作为主动禁忌搜索算法的初始解。

初始解采用得到平均流程时间下限的 PCB 生产顺序。将 KTNS 部分切换策略穿插其中。

设置搜索邻域如下：

(a)外搜索邻域  $NG(\sigma) = \{\sigma', \sigma'$  是由解当前解  $\sigma$  所得到的一个新的组顺序。它是通过移动交换相邻两组的生产顺序，而每组内的板的生产顺序保持不变所得到的。需要注意的是，最后一组与第一组进行交换。}

(b)内搜索邻域  $NB(\sigma) = \{\sigma', \sigma'$  是由解  $\sigma$  所得到的一个新的板顺序。这是通过保持组顺序不变而移动交换组内相邻两种板的生产顺序得到的。其中组内最后一种板与第一种板交换。}

算法中用到的其他参数有：

*OLTM*: 外搜索长期记忆矩阵。在解 $\sigma^*$ 中, 若小组 $g$ 被安排到第 $p$ 个位置, 则 $OLTM[g, p]=1$ , 否则,  $OLTM[g, p]=0$ 。它是用来记忆每次迭代所得最优解中各个组排列到各个位置的次数, 每次迭代过程都进行累计更新。

*OTL*: 外搜索禁忌表。

*OIL*: 外搜索索引表。局部最优解的集合, 即若当前解比其子代解更优, 说明当前解为局部最优解, 则将其放入索引表中。

*OCL*: 外搜索候选表。可能的局部最优解的集合, 即若当前解比其父代解更优, 说明当前解有成为局部最优解的可能, 则将其放入候选表中。

*OIT*: 外搜索中那些没有使最优解改进的迭代次数。

*OAL*: 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 $\sigma^*$ 所对应的目标值, 即 $OAL = obj(\sigma^*)$ 。

同样, 设置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。

算法的适应度直接采用平均流程时间, 即目标函数值。

外搜索计算步骤如下:

(1)初始化: 确定初始解 $\sigma_0$ , 对 $\sigma_0$ 首先实施内搜索(步骤见下面的内搜索)。令 $\sigma^* = \sigma = \sigma_0$ , 初始化外搜索各参数:  $OCL = OIL = \{\sigma\}$ ,  $OIT = 0$ ,  $OAL = obj(\sigma^*)$ , 由初始解 $\sigma_0$ 产生的 $N \times N$ 的 $OLTM$ 矩阵;  $OTL = \emptyset$ , 禁忌表 $OTL$ 的长度初始设置为 $[N/2]$ , 即 $|OTL| = [N/2]$ 。

(2)生成邻域: 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。

(3)搜索最优解: 选取 $NG(\sigma)$ 中的最优解。若产生的最优解未被禁止, 即不在禁忌表中, 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 $obj(\sigma) < obj(\sigma^*)$ 的解。

(4)更新各参数：将由上一步得到的最优解放入禁忌表  $OTL$ ，更新外搜索其他各参数；若当这个解中小组  $g$  安排在  $\bar{p}$  位置，则将  $OLTM$  中  $[g, \bar{p}]$  元素作加 1 处理，即  $OLTM[g, \bar{p}] = OLTM[g, \bar{p}] + 1$ ；若当前解  $\sigma$  比其上一次迭代所得的解（即父代解）优，那么它就具有成为局部最优解的可能，因此将其放入候选表  $OCL$ ；若  $\sigma$  比下一次迭代所得的解（即子代解）优，那么它就是局部最优解，将其放入索引表  $OIL$ 。若  $\sigma$  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  $OAL = obj(\sigma^*)$ ，并且令  $OIT = 0$ ；否则， $OIT = OIT + 1$ ；

这里，我们采用主动主动禁忌搜索算法对禁忌表的长度进行设置：

①若最优解在最后  $[OIT/2]$  次迭代时没有得到更新，并且禁忌表长度  $|OTL|$  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  $|OTL| = [1.5|OTL|]$ 。令  $OIT = 0$ 。

②同样，若最优解在最后  $[OIT/2]$  次迭代时没有得到更新，并且禁忌表长度  $|OTL|$  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  $|OTL| = [|OTL|/2]$ 。

(5)终止规则：当下列任意一项满足时算法停止。

①  $OIT = [N/2]$ ，即最优解未被更新的迭代次数达到  $[N/2]$ ；

②  $|OIL| = [N^2/2]$ ，即局部最优解个数达到  $N^2/2$ 。这是由预备试验所得。

当满足任何一项时则终止本次搜索程序，否则返回到步骤(2)重新进行搜索。

(6)重新开始算法搜索：当满足任意停止准则时，为了找到全局最优解需进行调整，使得搜索集中化或是多样化。由长期记忆矩阵  $OLTM$  来寻找重新搜索的初始解。集中化和多样化搜索初始解步骤如下：

①集中化搜索：保留当前最优解所得的组内板顺序，利用长期记忆矩阵形成一个新的组顺序，重新构建新的序列。根据长期记忆矩阵中最多次放置到序列中  $\bar{p}$  位置的小组  $g$ ，在新的初始解中令小组  $g$  安排到序列中的  $\bar{p}$  位置进行生产，并且将

小组  $g$  和位置  $\bar{p}$  从长期记忆矩阵中除去。用同样的模式将其他组安排的序列中的位置上。保留由当前最优解所得的组内板顺序。

②多样化搜索：方法如集中化搜索初始解，只是将长期记忆矩阵中最少次放置到序列中  $\bar{p}$  位置的小组  $g$  安排到位置  $\bar{p}$  进行生产。

每次重新搜索时先集中化搜索初始解，如果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，并且初始化各参数  $OIT$ ， $OIT$  和  $OAL$ 。将解  $\sigma$  放入  $OCL$  和  $OIL$ 。返回步骤(2)。如果这个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初始解。

如果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，并且初始化各参数  $OIT$ ， $OIT$  和  $OAL$ 。将解  $\sigma$  放入  $OCL$  和  $OIL$ 。返回步骤(2)。如果这个初始解已经存在于初始解集合中，则放弃这个初始解，重新搜索初始解结束。

保留由当前最优解所得的组内板顺序，并转入内搜索。

外搜索流程图如图 4.2 所示：

内搜索计算步骤如下：（原理同外搜索）

(1)初始化：确定由外搜索得到的解为初始解  $\sigma_0$ ，计算  $\sigma_0$  的目标值  $obj(\sigma_0)$ ，并令  $\sigma^* = \sigma = \sigma_0$ ，初始化内搜索各参数： $ICL = IIL = \{\sigma\}$ ， $IIT = 0$ ， $IAL = obj(\sigma)$ ，对于小组  $g$ ， $ILTM_g$  是由  $\sigma$  产生的  $n_g \times n_g$  长期记忆矩阵， $n_g$  表示小组  $g$  内的 PCB 种类数。若小组  $g$  内的 PCB 种类  $i$  在解  $\sigma$  中的位置为  $\bar{p}$ ，则令  $ILTM_g[i, \bar{p}] = 1$ 。

$ITL = \emptyset$ ，根据预备试验设置禁忌表长度为  $|ITL| = \left\lceil \sum_{g \in G} n_g / N \right\rceil$ 。

(2)生成邻域：通过移动交换组内相邻两种板顺序得到当前解  $\sigma$  的内搜索邻域  $NB(\sigma)$ ，去掉  $NB(\sigma)$  已放入  $ICL$  中的解，并对  $NB(\sigma)$  中其余解进行内搜索。

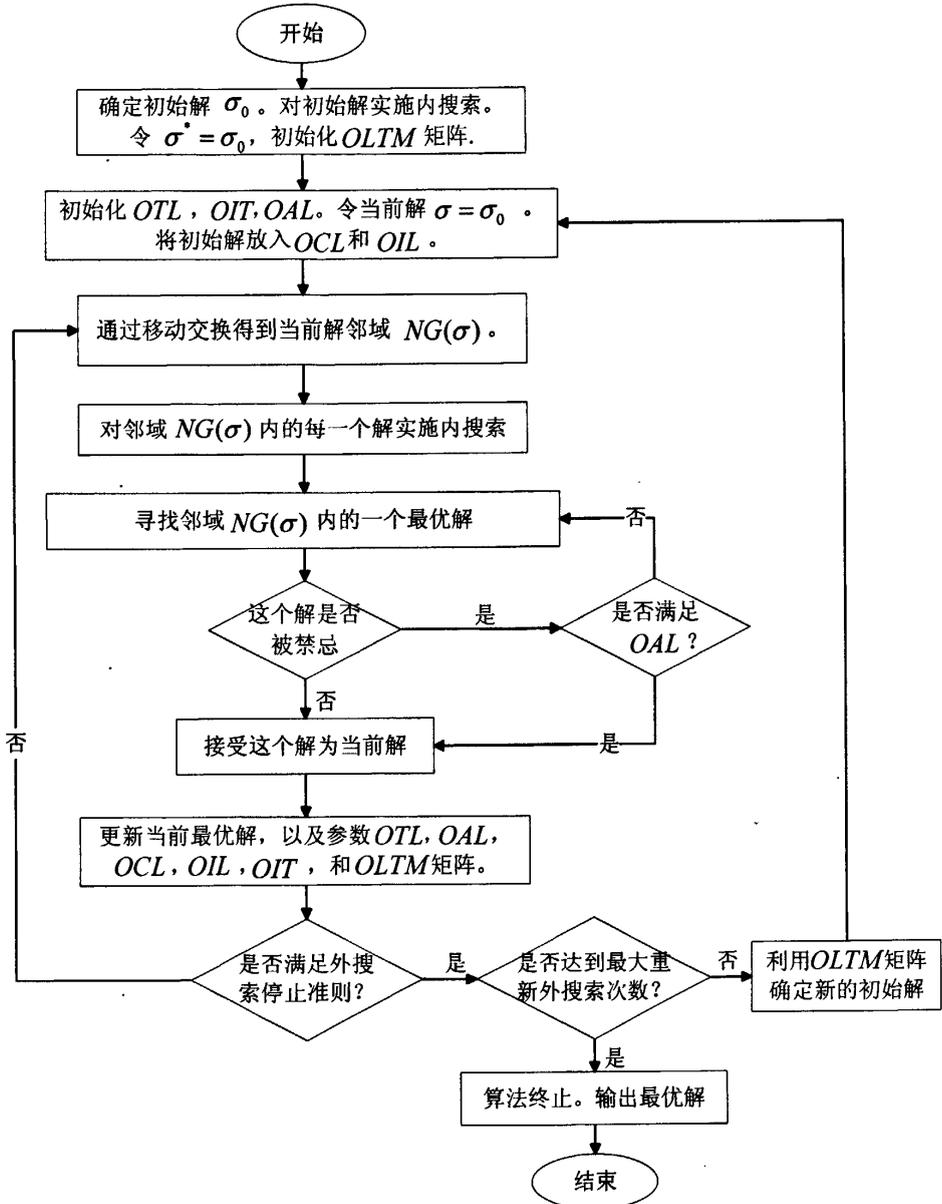


图 4.2 外搜索流程图

Fig. 4.2 Flow Chart of Outside Search

(3)搜索最优解：选取  $NB(\sigma)$  中的最优解。若产生最优解的交换未被禁止，即不在禁忌表中，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  $obj(\sigma) < obj(\sigma^*)$  的解。

(4)更新各参数：将由上一步选取的最优解放入禁忌表  $ITL$ ，更新内搜索其他各参数：若当这个解中小组  $g$  内 PCB 种类  $i$  安排在解  $\sigma$  的  $\bar{p}$  位置处，则将  $ILTM_g$  中  $[g, \bar{p}]$  元素作加 1 处理，即  $ILTM_g[i, \bar{p}] = ILTM_g[i, \bar{p}] + 1$ ；若当前解  $\sigma$  比其上一次迭代所得的解（即父代解）优，那么它就具有成为局部最优解的可能，因此将其放入候选表  $ICL$ ；若  $\sigma$  比下一次迭代所得的解（即子代解）优，那么它就是局部最优解，将其放入索引表  $IIL$ 。若  $\sigma$  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  $IAL = obj(\sigma^*)$ ，并且令  $IIT = 0$ ；否则， $IIT = IIT + 1$ ；

同样，我们采用主动主动禁忌搜索算法对内搜索禁忌表的长度进行设置：

①若最优解在最后  $[IIT/2]$  次迭代时没有得到更新，并且禁忌表长度  $|ITL|$  是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  $|ITL| = [1.5|ITL|]$ 。令  $IIT = 0$ 。

②同样，若最优解在最后  $IIT/2$  次迭代时没有得到更新，并且禁忌表长度  $|ITL|$  上一次是增大的，则将禁忌表长度缩小为原来的一半，即  $|ITL| = [|ITL|/2]$ 。

(5)终止规则：当下列任意一项满足时算法停止。

$$\textcircled{1} IIT = \left\lceil \sum_{g \in G} n_g / N \right\rceil, \text{ 即最优解未被更新的迭代次数达到 } \left\lceil \sum_{g \in G} n_g / N \right\rceil;$$

$$\textcircled{2} |IIL| = \left\lceil n \cdot \sum_{g \in G} n_g / N \right\rceil, \text{ 即局部最优解个数达到 } \left\lceil n \cdot \sum_{g \in G} n_g / N \right\rceil, \text{ 其中}$$

$n = \max_{g \in G}(n_g)$ 。这是由预备试验所得。

当满足任何一项时则终止搜索程序，否则返回到步骤(2)重新进行搜索。

(6)重新开始算法搜索：与外搜索方法相同。当满足任意停止准则时，为了找到组内最优 PCB 排序，需进行调整使得搜索集中化或是多样化。由长期记忆矩阵  $ILTM_g$  用来求解重新搜索的初始解。集中化和多样化搜索初始解步骤如下：

①集中化搜索：利用长期记忆矩阵形成一个新的组顺序。

重新构建新的序列，利用长期记忆矩阵  $ILTM_g$  中最多次放置到序列中  $\bar{p}$  位置的小组  $g$  内的 PCB 种类  $i$ ，令 PCB 种类  $i$  安排到序列中的  $\bar{p}$  位置进行生产，并且将 PCB 种类  $i$  和位置  $\bar{p}$  从小组  $g$  中除去。用同样的模式将其他 PCB 种类安排的序列中的位置上。

②多样化搜索：方法如集中化搜索，只是将长期记忆矩阵  $ILTM_g$  中最少次放置到序列中  $\bar{p}$  位置的小组  $g$  内 PCB 种类  $i$  安排到位置  $\bar{p}$  进行生产。

每次重新搜索时先集中化搜索初始解，如果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，并且初始化各参数  $ITL$ ， $IIT$  和  $IAL$ 。将解  $\sigma$  放入  $ICL$  和  $IIL$ 。返回步骤(2)。如果这个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初始解。

如果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，并且初始化各参数  $ITL$ ， $IIT$  和  $IAL$ 。将解  $\sigma$  放入  $ICL$  和  $IIL$ 。返回步骤(2)。如果这个初始解已经存在于初始解集合中，则放弃这个初始解，重新搜索初始解结束。保留由当前最优解所得的组内板顺序，并重新转入外搜索。

内搜索流程图如图 4.3 所示。

当内搜索终止后，搜索的方向就又转回到外搜索了。当外搜索的终止条件达到时，整个搜索过程就停止了。因此整个的搜索过程就是从外搜索转到内搜索，然后又转回到外搜索的过程。

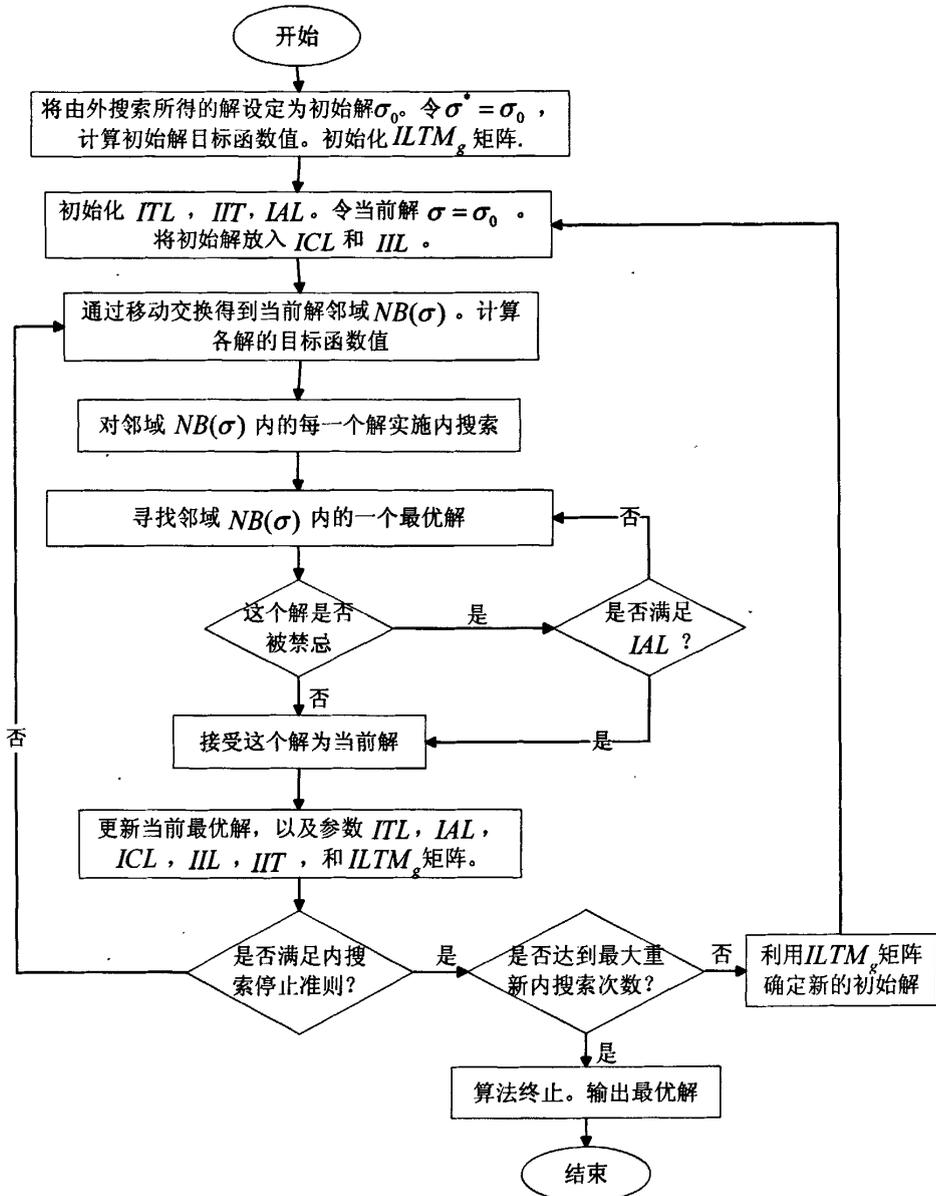


图 4.3 内搜索流程图

Fig. 4.3 Flow Chart of Inside Search

#### 4.5 算法集成

将上述分组问题的相对相似系数算法、元件均衡负荷的遗传算法、供料器切

换的KTNS部分切换策略、PCB排序问题的主动禁忌搜索算法依据实际问题之间的关系进行集成，整个集成算法程序如图4.4所示。

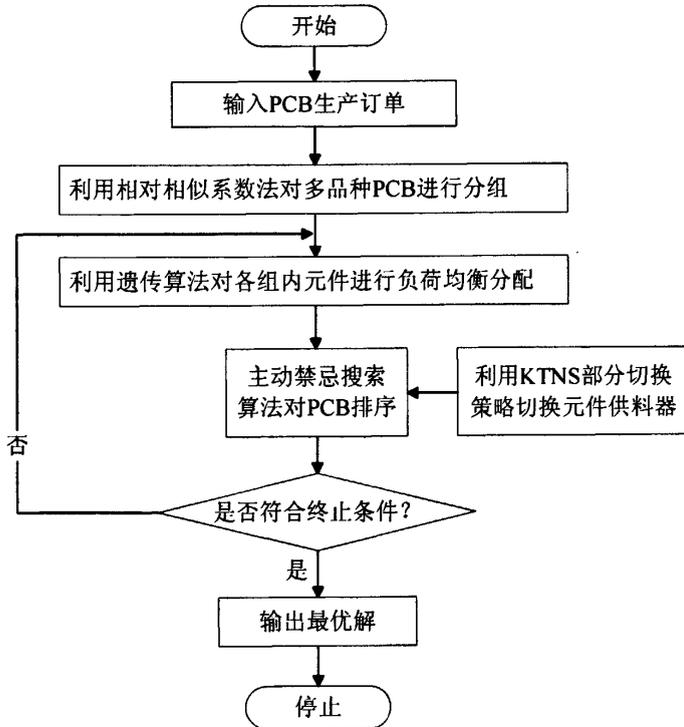


图 4.4 算法流程图

Fig. 4.4 Flow Chart of Arithmetic

## 4.6 算法评价

### 4.6.1 与基本的禁忌搜索算法比较

在求解 PCB 的生产顺序这个问题时本文使用的是基本禁忌搜索算法基础上的主动禁忌搜索算法，利用反馈机制自动调整禁忌表长度，自动平衡集中化搜索和分散多样化搜索策略，并且利用逃逸机制避免循环。

本文还设计基本的禁忌搜索算法求解 PCB 的生产顺序，将所得到的解与主动禁忌搜索算法所得解进行比较，对文中的算法进行评价。

在基本禁忌搜索算法中，内搜索和外搜索邻域的设置与主动禁忌搜索算法相同；

内搜索禁忌表长度设置为  $|ITL| = \left[ \left( 1.5 * \sum_{g \in G} n_g \right) / N \right]$ ，搜索次数为  $\prod_{j=1}^N n_j$ ；外搜索禁

忌表长度设置为  $|OTL| = [(1.5 * N) / 2]$ ，搜索次数为  $P_1^N$ ，即  $N \times (N-1) \cdots 2 \times 1$ 。

#### 4.6.2 与上限值和下限值比较

本文设计目标函数上限值和目标函数下限值对主动禁忌搜索得到的最优目标函数值进行评价。其中目标函数下限值采用前面所述的平均流程时间理论下限值，用  $f_{LB}$  表示，这个下限值与 PCB 小组的生产顺序无关。目标函数上限值则采用主动禁忌搜索算法所得的各代解得目标函数值的平均值，用  $f_{UB}$  表示。记  $f^*$  表示由主动禁忌搜索算法所得的最优目标函数值。

表中  $\mu_1$  表示主动禁忌搜索算法所得的最优目标函数值  $f^*$  相对于目标函数上限值  $f_{UB}$  提高的效率百分比， $\mu_2$  表示  $f^*$  相对于目标函数下限值  $f_{LB}$  的百分比偏差，分别计算如下：

$$\mu_1 = \frac{f_{UB} - f^*}{f_{UB}} \times 100\%$$

$$\mu_2 = \frac{f^* - f_{LB}}{f_{LB}} \times 100\%$$

通过  $\mu_1$  和  $\mu_2$  来对本文设计的算法进行评价。一般来说， $\mu_2$  的值有可能相对较大。这是因为在设计平均流程时间理论下限  $f_{LB}$  时利用了 Johnson 规则并假设各组切换时间与生产顺序无关并，它只是一个理论值，是不可能达到的，它与实际的最优解还有一定得差距，因此， $\mu_2$  有可能不是很小值。

另外，本文还采用在线比较法（每一代解）和离线比较法（当前最优解）进行算法评价。

## 第5章 数值实验

本文取规模不同的订单进行模拟实验，每次的 PCB 种类数都不相同，从 5 种 PCB 到 25 种 PCB 不等，每次实验中的 PCB 种类间的相似性也不相同，根据本文前面所述的方法进行优化，先将各 PCB 进行分组，然后根据分组结果进行元件在各台贴片机上的负荷分配，利用 KTNS 部分切换策略计算各组在各台贴片机上的切换时间并利用主动禁忌搜索算法进行排序，利用 MATLAB 编程，寻找最优解。

### 5.1 案例数值实验

以 8 种不同 PCB: {B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8} 为例，利用前述算法经过 MATLAB 编程得到最优解。各种板的属性及分组情况如表 5.1 和表 5.2 所示。

表 5.1 各种 PCB 属性

Tab. 5.1 the Attributes of Each Type of PCB

PCB 种类	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
生产批量	15	7	16	13	24	19	8	20
元件种类数	20	21	20	22	25	20	14	25
元件点数	125	141	162	187	254	211	101	287

表 5.2 分组情况

Tab. 5.2 the Result of Grouping

分组	G1	G2	G3	G4	G5
组内 PCB 种类	B8	B4,B7	B2,B6	B3,B1	B5
组内元件种类数	25	25	27	29	25

由于本文采用主动禁忌搜索算法，并且为了得到全局优化解，算法设计进行多次搜索——集中化搜索和多样化搜索。多样化搜索为了跳出局部最优，得到的初始解一般是比较劣的。

各代解目标函数值如图 5.1 所示；每次重新搜索的当前最优解对应目标函数值如图 5.2 所示；当前最优解目标函数值如图 5.3 所示。

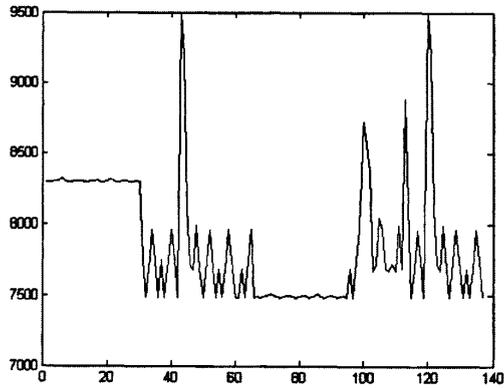


图 5.1 主动禁忌搜索算法各代解目标函数值

Fig. 5.1 The Objective of Each Generation of Reactive Tabu Search

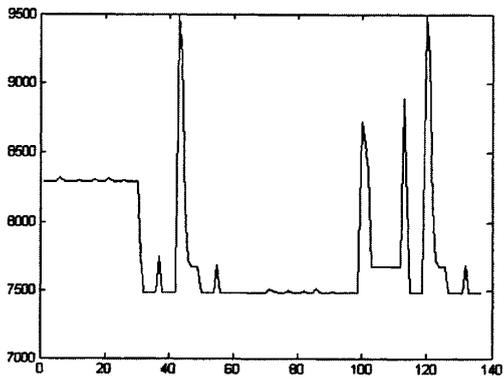


图 5.2 每次重新搜索的当前最优解对应目标函数值

Fig. 5.2 The Best Objective of Each Search

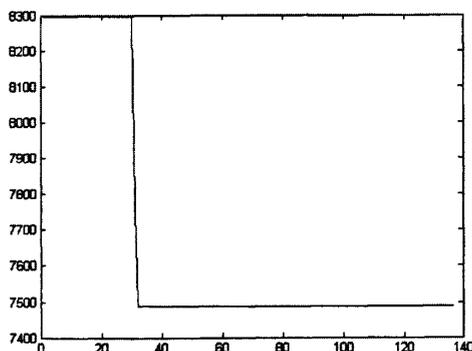


图 5.3 主动禁忌搜索算法当前最优解对应目标函数值

Fig. 5.3 The Recent Best Objective of Reactive Tabu Search

如图 5.1 所示, 前 30 代表由求解平均流程时间理论下限值的 PCB 组生产顺序为初始解的内搜索, 由于内搜索只改变组内的 PCB 种类的生产顺序, 各组之间的切换时间不变, 因此优化的空间不是很大。30 代以后不改变组内最优 PCB 种类生产顺序, 算法实施外搜索。此时, 保留组内的板顺序, 改变各组之间的生产顺序, 这样使得每组的切换次数 (切换时间) 不同, 于是 PCB 组生产顺序不同时, 目标函数值即平均流程时间的波动就比较大。从图 5.1 可知, 30-65 代为外搜索, 目标函数值有较大的波动。

达到外搜索的终止条件时, 外搜索又转入内搜索。图 5.1 中的 65-97 代为内搜索所得解的目标函数值。当达到内搜索的终止条件时, 算法又一次返回到外搜索并且保留内搜索得到的最优组内 PCB 生产顺序。图 5.1 中的 97-138 代为外搜索所得解的目标函数值。当此次的外搜索达到终止条件时, 主动禁忌搜索排序结束。这时算法找到的最优解为: G2(B7-B4)-G3(B2-B6)-G4(B1-B3)-G1(B8)-G5(B5), 最优目标函数值为 7488.4 秒。

从图 5.2 中可以看出, 由求解平均流程时间理论下限值的 PCB 组生产顺序为初始解的内搜索算法开始总共搜索了 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。如图 5.2 中，内搜索转向外搜索后，第 45 次迭代的解，即第三次搜索的初始解远远劣于之前找到的解，这就是多样化搜索的结果。

由图 5.3 可知，主动禁忌搜索算法在第 32 代即找到最优解。

## 5.2 与基本禁忌搜索算法结果比较

为了说明主动禁忌搜索算法的优点，本文还设计了基本的禁忌搜索算法来求解 PCB 的排序问题。仍然以上面的 8 种 PCB 的生产情况为例。将内搜索禁忌表长度

度设置为  $|ITL| = \left\lceil \left[ \left( 1.5 * \sum_{g \in G} n_g \right) / N \right] \right\rceil = 2$ ，搜索次数为  $\prod_{j=1}^N n_j = 8$ ；外搜索禁忌表长度

设置为  $|OTL| = \lceil (1.5 * N) / 2 \rceil = 4$ ，搜索次数为  $P_1^N = 120$ ，其中  $N = 5$ 。

基本禁忌搜索算法各代解目标函数值如图 5.4 所示；当前最优解目标函数值如图 5.5 所示。

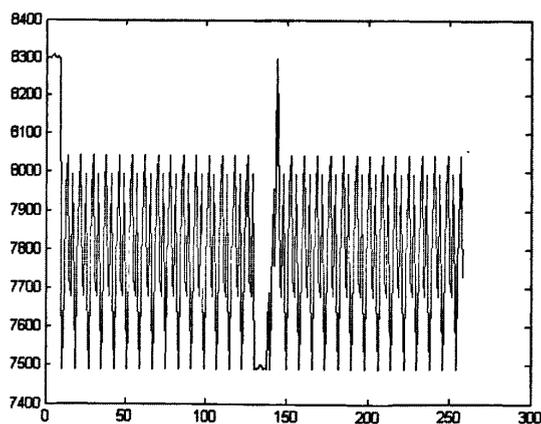


图 5.4 基本禁忌搜索算法各代解目标函数值

Fig. 5.4 The Objective of Each Generation of Tabu Search

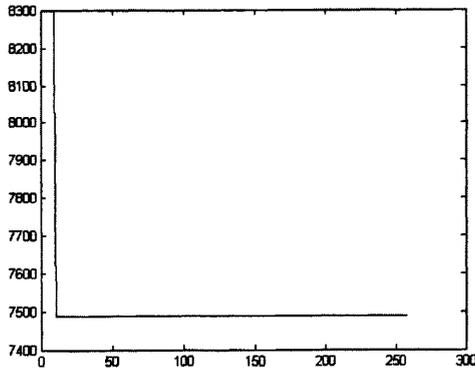


图 5.5 各代解目标函数值的折线图

Fig. 5.5 The Objective of Each Generation of Tabu Search

由图 5.4 和 5.5 可以看出，基本禁忌搜索算法因为没有采用集中化或多样化初始解的重新搜索，所以能够较早的找到最优解（第 10 代解），但是它不能避免陷入循环及局部最优解的可能。另外，主动禁忌搜索算法总共的迭代次数只有 138 代，而基本禁忌搜索算法却是 256 代，就算法本身而言，迭代次数和迭代时间而言，主动禁忌搜索算法要优于基本禁忌搜索算法。

### 5.3 与上、下限值比较

利用设计目标函数上限值和目标函数下限值对主动禁忌搜索得到的最优目标函数值进行评价。经过对比，结果如表 5.3 所示。

由表 5.3 可知， $f^*$  相对于  $f_{UB}$  提高效率百分比  $\mu_1$  平均为 6.02%， $f^*$  相对于  $f_{LB}$  的百分比偏差  $\mu_2$  平均值为 6.82%。由于本文在设计平均流程时间理论下限值时利用了 Johnsonson 规则并假设各组切换时间与生产顺序无关并，这个值是不可能达到的。

为了说明主动禁忌搜索算法找到的解是比较优的，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，得出主动禁忌搜索算法能够找到全局最优解。因为，理论上，如果禁忌表长度足够长，禁忌搜索的寻优过程能够遍历整个解空间，一定能够找到全局的最优解<sup>[27]</sup>。

表 5.3 模拟试验结果

Tab.5.3 The result of experiments

PCB 种 类数	所需元件 种类数	分组数	每次迭代目标函 数平均值 $f_{UB}$	主动禁忌搜索最 优目标函数值 $f^*$	最优下限 值 $f_{LB}$	$\mu_1$	$\mu_2$
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%

仍然以上面的 8 种 PCB 为例。在分组数为 5，组内的 PCB 种类数分别为 2, 2, 2, 1, 1 的情况下，所有的 PCB 排序种类总共有 960 种。在这里，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现实最优解。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 7488.40 秒。

由此可以看出，本文设计的主动禁忌搜索算法所得的最优解是比较优的。

另外，采用在线比较法（每一代解）和离线比较法（当前最优解）进行算法评价，结果表明本文所设计的算法比较有效地解决了多品种 PCB 生产线优化问题。

## 结 论

近年来,为了更有效的提高企业的生产效率,PCB 生产物流调度已经成为一个重要研究的课题。印刷电路组装业面临多品种,小批量的生产环境必须适应多用户,多任务,多品种的生产要求,以最低的成本和最小的缺憾在最短的时间内获得最大的产出。因此 SMT 生产线的优化就非常重要。在同一生产线中,考虑 PCB 的生产时间的时候不仅要考虑到 PCB 的贴装时间,还要考虑到不同品种 PCB 之间交换生产时的机器准备切换时间和元件供料器的切换时间。因此如何对 PCB 分组,怎样安排生产线上各台贴片机的元件负荷,采用什么切换策略对元件供料器进行切换以及怎样安排 PCB 的生产顺序都能影响到生产线上 PCB 的生产效率。

本文在理论与实践结合的基础上,对 SMT 生产物流调度问题的优化问题主要做了以下几个方面的工作:

(1) 首先,文章在系统介绍的基础上,详细的归纳了 SMT 优化问题的分类。指出本文所研究的问题是 SMT 优化问题第二层次的多品种 PCB 在生产线上的优化问题,即主要解决的是由高速贴片机和多功能贴片机组成的表面贴装生产线上多品种、少批量 PCB 的生产物流调度问题:目标函数是求生产线的平均流程时间(Mean Flow Time)最短。

(2) 针对多品种 PCB 在 SMT 生产线上所涉及的单品种 PCB 的优化问题和多品种 PCB 的优化问题进行描述及建模,并且将生产线调度优化问题分解成了以下四个子问题分别设计算法进行求解:PCB 分组问题;贴片机上元件负荷分配问题;元件供料器切换问题;PCB 生产排序问题。

(3) 对各种切换策略进行总结并介绍了已有的成组切换策略和 KTNS 部分切换策略。

(4) 针对多品种 PCB 在生产线上的优化问题所涉及的各个子问题进行算法设计并求解,最终目标是使得生产线的平均流程时间最小。

对于成组问题,设计了相对相似系数法求解。通过将相对相似系数成组的结果与其他的成组策略结果进行比较,得出此方法能够将 PCB 分成更少的组,这样

就保证了贴片机在切换元件供料器时的机器准备切换时间就会少，即分组越少，切换时间中的机器准备切换时间就会越短。

分组之后，利用遗传算法将元件均衡分配到各台贴片机上。

对于给定的 PCB 生产顺序，利用 KTNS 部分切换策略对不同组进行生产时的元件供料器进行切换。部分切换策略，在一种板切换到另一种板进行生产时，只切换供料器的一个子集，即只切换部分供料器。有一部分供料器放置在贴片机上不动，只切换需要切换的那部分供料器。这样就大大降低了切换时间，提高了 PCB 的生产效率。KTNS 部分切换策略在进行元件供料器的切换时，会保留那些最快被用到的那些通用元件种类，这样使得这些元件供料器不必每次都被撤下来并且在后面有需要重新切换上去，大大缩短了切换时间。

最后利用主动禁忌搜索算法分组内搜索和组间搜索两个层次对 PCB 的排序问题进行优化。外搜索是对 PCB 生产小组的进行排序，而内搜索是对每组内的 PCB 种类的生产顺序进行排序。最后找到使得生产线平均流程时间最短的 PCB 生产顺序。采用成组策略和部分切换策略结合的方法解决多品种 PCB 生产过程中的切换问题。并利用主动禁忌搜索算法分两个层次对 PCB 排序：组间搜索和组内搜索。最后将算法集成，找到使平均流程时间最小的解。并且分与上、下限值比较和与基本禁忌搜索算法所得解进行比较，以此来评价算法的优劣。

(6) 根据实际生产过程当中的多品种优化问题进行优化，利用各代解的平均值作为目标函数值的上限，平均流程时间理论下限为目标函数值的下限，通过 MATLAB 编程实现，得出较满意的解。实验数据结果验证了模型和算法的可行性和高效性。

进一步的研究方向是在对单条 SMT 组装流水线的 PCB 生产物流调度的研究基础上，考虑不同品种 PCB 在多条平行生产线上的生产物流调度优化问题，使得研究更具有现实意义。

## 参 考 文 献

- [1] 靳志宏, 关志民, 马钦海. 集成电路板组装系统优化问题及其研究动态, 中国管理科学, 2004, 12:63-66, .
- [2] Brandeau, M.L., Billington, C.A., Desigh of Manufacturing Cells: Operation Assignment in Printed Circuit Board Manufacturing, Journal of Intelligent Manufacturing, 1991, 2:95-106.
- [3] Hashiba, S., Chang, T.C., Heuristic and Simulated Annealing Approaches to PCB Assembly Setup Reduction, in Olling, G.J., Kimura, F., editors, Human Aspects in Computer Integrated Manufacturing, IFIP Transactions B-3, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, the Netherlands, 76977, 1992.
- [4] Bhaskar, G. and Narendran, T. T., "Grouping PCBs for Set-up Reduction: A Maximum Spanning Tree Approach". International Journal of Production Research, 1996, 34(3):621 - 632.
- [5] Leon, V.J., Peters, B.A., Preplanning and Analysis of Partial Setup Strategies in PCB Assembly Systems, International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 1996, 8 (4):389-412.
- [6] M.Gronalt, M.Grunow, H.O.Günther. A Heuristic for Component Switching on SMT Placement Machines. International Journal of Production Economics, 1997, 53:181-190.
- [7] Leon, V. Jorge and Peters, Brett A., A Comparison of Setup Strategies for Printed Circuit Board Assembly, Computers & Industrial Engineering, 1998, 34 (1): 219 - 234.
- [8] K.Salonen, J.Smed, M.Johnsson, O.Nevalainen. Grouping and Sequencing PCBs Assembly Jobs with Minimum Feeder Setups. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2006, 22:297-305.
- [9] Rossetti M.D., Stanford K.J.A. Group Sequencing a PCB Assembly System via an Expected Sequence Dependent Setup Heuristic. Computers and Industrial Engineering, 2003, 45 (1):231-254.
- [10] R.Narayanaswami, V.Iyengar. Setup Reduction in Printed Circuit Board Assembly by Efficient Sequencing. International Journal Advertisement of Manufacturing Technology, 2005, 26:276-284.
- [11] V. Jorge Leon, In-Jae Jeong. An Improved Group Setup Strategy for PCB Assembly.

ICCSA 2005, LNCS 3483:312-321.

[12] Jitti Jungwattanakit, Manop Reodecha et. A Comparison of Scheduling Algorithms for Flexible Flow Shop Problems with Unrelated Parallel Machines, Setup Times, and Dual Criteria. *Computers & Operations Research*, 2009, 36:358-378.

[13] Gunther, H.O., Gronalt, M., Zeller, R. Job Sequencing and Component Setup on a Surface Mount Placement Machine, *Production Planning and Control*, 1998, 9(2):201-211.

[15] Rasaratnam Logendran, Cumhur A.Gelogullari, Chelliah Sriskandarajah. Minimizing the Mean Flow time in a Two-Machine Group-Scheduling Problem with Carryover Sequence Dependency, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2003, 19:21 - 33.

[16] 吴兆华, 周德俭. SMT 产品组装生产系统的组成与控制. *电子机械工程*. 2002, 18(5):35-45.

[17] 周德俭, 吴兆华, 李春泉. SMT 组装系统. 北京: 国防工业出版社. 2004.

[18] 张文典. 实用表面组装技术. 北京: 电子工业出版社. 2006.

[19] 徐大林. 表面贴装工艺(SMT)其趋势和未来. 1999, 22(6).

[20] 孙嘉德. SMT 组装工艺. *航空精密制造技术*. 1991, (4).

[21] 黄晓宁, 王清. 谈谈 SMT 工艺流程的优化设计和现场质量控制. *电子质量*. 1998(9)

[22] Johnson M. and Smed J., Observation on PCB Assembly Optimization, *Electronoc Packaging and Production*, 2001, 41 (5):38-42.

[23] Askin, R.G., Dror, M., Vakharia, A.J., Printed Circuit Board Family Grouping and Component Allocation for a Multimachine Open Shop Assembly Cell, *Naval Research Logistics*, 1994, 41:587-608.

[24] Maimon O, Shtub A. Grouping Methods for Printed Circuit Boards. *Int J Prod Res* 1991, 29 (7):1370 - 90.

[25] Quintana, R., Leon, V. J.: An Improved Group Setup Management Strategy for Pick and Place SMD Assembly. Working paper, 1997.

[26] Manual D. Rossetti, Keith J.A. Stanford. Group Sequencing a PCB Assembly System via an Expected Sequence Dependent Setup Heuristic. *Computers & Industrial Engineering*, 2003, 45: 231-254.

[27] 靳志宏, 计明军. 物流实用优化技术[M]. 中国物资出版社. 2008

[28] 汪定伟等. 智能优化算法[M]. 高等教育出版社. 2007.

[29] 郭淑娟. 表面贴装生产线贴片负荷均衡优化. *计算机集成制造系统*, 2009, 15(4):817-822.

- [30] Jin, Z.H., Ito, T., Ohno, K., Elghraby. Scheduling Hybrid Flowshops in Printed Circuit Board Assembly Lines. *International Journal of Production and Operation Management*, 2002, 11(2):216-230.
- [31] Ohno, K., Jin, Z.H., Elmgbraby, S.S.. An Optimal Assembly Mode of Multi-type Printed Circuit Board Assembly. *International Journal of Computer & Industrial Engineering*, 1999, 50(4):451-471.
- [32] 大野胜久, 靳志宏, 野村浩之, 大石清彦. 部品軸を考慮した多品種プリント基板実装スケジューリング. *日本経営工学会誌*, 50(4), 198-206, 1999.
- [33] 荆少英. 基于大型并行系统的 PCB 贴装生产调度优化:(硕士论文). 大连: 大连海事大学. 2008.
- [34] 楼顺天, 姚若玉, 沈俊霞. MATLAB 7.x 程序设计语言[M]. 西安电子科技大学. 2007
- [35] 求是科技. MATLAB 7.0 从入门到精通[M]. 人民邮电出版社. 2006
- [36] Ammons JC, Carlyle M, Cranmer L, DePuy G, Ellis K, McGinnis F, Tovey CA, Xu H. Component Allocation to Balance Workload in Printed Circuit Card Assembly Systems. *IIE Trans*, 1997, 29 (4):265-275.
- [37] Balakrishnan, A., Vanderbeck, F.. A Tactical Planning Model for Mixed-Model Electronics Assembly Operations, *Operations Research*, 1999, 47 (3):395-409.
- [38] C. Wang, L. Ho, D.J. Cannon. Heuristics for Assembly Sequencing and Relative Magazine Assignment for Robotic Assembly. *Comput. Ind. Eng.* 1998, 34:423 - 431.
- [39] Carmon, Tali F., Maimon, Oded Z., and Dar-El, Ezey M.. Group Set-up for Printed Circuit Board Assembly. *International Journal of Production Research*, 1989, 27(10):1795 - 1810.
- [40] Crama Y, Kolen AWJ, Spieksma FCR. Production Planning Problems in Printed Circuit Board Assembly. *Discrete Appl Math*, 2002, 123:339 - 61.
- [41] Cumhuriyet Gelogullari, Group-Scheduling Problems in Electronics Manufacturing, Oregon State University, 2005. 10.
- [42] Daskin MS, Maimon O, Shtub A, Braha D. Grouping Components in Printed Circuit Board Assembly with Limited Components Staging Capacity and Single Card Setup: Problem Characteristics and Solution Procedures. *Int J Prod Res*, 1997, 35 (6):1617 - 38.

- [43] Dillon, S., Jones, R., Hinde, C. J., Hunt, I.. PCB Assembly Line Setup Optimization Using Component Commonality Matrices, *Journal of Electronics Manufacturing*, 1998, 82: 77-87.
- [44] Gupta JND, Krüger K, Lauff V, Werner F, Sotskov YN. Heuristics for Hybrid Flow Shops with Controllable Processing Times and Assignable Due Dates. *Computers & Operations Research*, 2002, 29 (10):1417 - 39.
- [45] H.O. Gtunther, M. Gronalt, R. Zeller. Job Sequencing and Component Set-up on a Surface Mount Placement Machine. *Production Planning Control*, 1998, 9:201 - 211.
- [46] Johri, P.K.. A Heuristic Algorithm for Loading New Work on Circuit Pack Assembly Lines, *International Journal of Production Research*, 1990, 28 (10): 1871-1883.
- [47] Leon, V. J., Peters, B. A.. A Comparison of Setup Strategies for Printed Circuit Board Assembly. *Computers and Industrial Engineering*, 2001, 34 (1): 219-234.
- [48] Rajkumar, K. and Narendran, T. T.. A Heuristic for Sequencing PCB Assembly to Minimize Set-up Times. *Production Planning & Control*, 1998, 9 (5): 465 - 47.
- [49] Shtub A, Maimon. Role of Similarity Measures in PCB Grouping Procedures. *International Journal of Production Research*, 1992, 30 (5):973 - 983.
- [50] Smed J. *Production Planning in Printed Circuit Board Assembly*. PhD thesis, University of Turku (TUCS Dissertations 36).
- [51] Smed, Jouni, Johnsson, Mika, Puranen, Mikko, Leipälä, Timo, and Nevalainen, Olli. Job Grouping in Surface Mounted Component Printing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 1999, 15 (1):39 - 49.
- [52] Smed, J., Johtela, T., Puranen, M., Nevalainen, O.. An Interactive System for Scheduling Jobs in Electronics Assembly. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2000, 16:450-459.
- [53] Smed J, Salonen K, Johnsson M, Johtela T, Nevalainen O. Grouping PCBs with Minimum Feeder Changes. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 2003, 15:19 - 35.
- [54] Wang H. Flexible Flow Shop Scheduling: Optimum, Heuristics, and Artificial Intelligence Solutions. *Expert Systems*, 2005, 22 (2):78 - 85.

参考文献

---

- [55] W.-L. Lin, V. Tardif. Component Partitioning under Demand and Capacity Uncertainty in Printed Circuit Board Assembly, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 1999,11:159 - 176.
- [56] Y. Crama, O.E. Flippo, J.J. van de Klundert, F.C.R. Spieksma. The Assembly of Printed Circuit Boards: a Case with Multiple Machines and Multiple Board Types. *European J. Oper. Res*, 1997,98:457 - 472.

## 致 谢

值此论文完成之际，谨向我的导师靳志宏教授致以最诚挚的感谢！本学位论文从选题到完成都是在靳老师的精心指导下完成的。靳老师渊博的知识，忘我的工作热情，求实的治学态度、缜密的思维，将使我终身受益。在接受靳老师指导的这两年里，我不仅学到了许多知识，更重要的是学到了精益求精、学无止境的治学精神。我的每一点进步都与靳老师的言传身教分不开。

我还要感谢在论文上给予指导与帮助计明军老师。计老师孜孜不倦的科研精神、耐心细致的教学态度是我学习的榜样。

感谢调研单位详细讲解，以及试验数据的提供，使得本论文顺利完成。同时本文得以完成，也离不开同窗学友给予的热心帮助和支持。最后对本文审阅和参加论文答辩的专家教授付出的辛勤劳动，表示诚挚的谢意！