**《SMT贴片机优化》**

**贴装过程优化调研报告**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 文件状态：  [√] 草稿  [√] 正式发布  [√] 正在修改 | 文件标识： | 贴装过程优化调研报告 |
| 当前版本： | 1.0 |
| 作 者： | 李政锴 王旭东 |
| 保密等级： | 无 |
| 完成日期： | 2016-12-29 |

智能控制与系统研究所

Research Institute of Intelligent Control and System

|  |
| --- |
| C:\Users\Robert\Pictures\HIT.jpg |

# 目 录

[目 录 I](#_Toc470789209)

[1 问题陈述 1](#_Toc470789210)

[1.1 各机构简介 2](#_Toc470789211)

[1.2 贴装过程优化简介 4](#_Toc470789212)

[2 优化方法概述 9](#_Toc470789213)

[2.1建模方法 9](#_Toc470789214)

[2.2启发式搜索法 10](#_Toc470789215)

[3 文献分析 13](#_Toc470789216)

[3.1贴装过程分解策略 13](#_Toc470789217)

[3.2贴装过程优化方法 14](#_Toc470789218)

[3.3文献中的其他差别 16](#_Toc470789219)

[3 文献综述 19](#_Toc470789220)

[4 下一步的工作 23](#_Toc470789221)

[5 参考文献 25](#_Toc470789222)

# 1 问题陈述

现代人们的生产生活中充斥着各类电子设备，电路板(PCB)正是这些电子设备的核心部件，流水线式、大规模的PCB生产装配对贴装生产效率提出了更高的要求，等时间内能否产出更多的PCB，直接关乎生产厂商的竞争力与效益。对于特定结构的贴片机，贴装精度及速度都很难进一步提升，所以贴装生产效率提高的一个关键瓶颈在于元件贴装过程是否更优，这也就带来了贴装过程优化问题(PCB assembly problems)。

贴片机分为很多类型，研究者们针对各不同机型的贴装优化开展了广泛研究，本报告调研对象为多头拱架式贴片机(Overhead gantry-style positioning system 或 beam type placement machine 或 beam-type gantry tools)，也被称为收集贴装贴片机或者拾取贴装贴片机(sequential pick-and-place machine)。多头拱架式贴片机的贴装头安装在拱架式悬臂上，悬臂在与贴装平面平行的面内提供了两个运动自由度(X轴Y轴运动)。一套成像系统通过识别全局和局部的基准点在XY面内定位PCB。安装有真空吸嘴的贴装头沿着其轴向运动，或者绕其轴转动，完成自飞达吸取元件，以及在电路板上指定位置按任意角度贴装元件。在拾取之后贴装之前，另有一套成像系统被用来检查和校准元件。电路板和飞达在贴装过程中保持静止，从而消除了额外的定位误差。多头拱架式贴片机在所有类型的贴片机中拥有最高的精度，使用范围广(可以贴装大尺寸或者异形芯片)，是目前市场上的主流机型。但是速度相对较低，如果给一台多头拱架式贴片机配置多个悬臂，速度可呈现倍数式提高。

如图1-1及图1-2所示，一个典型的多头拱架式贴片机由以下几个主要机构组成：吸头组件、吸头、吸嘴、飞达、吸嘴库、固定相机、飞达架。

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\Robert\Pictures\PAPM0.tif | |
| 图1-1 多头拱架式贴片机结构示意图 | |
| C:\Users\Robert\Pictures\PAPM1.tif | C:\Users\Robert\Pictures\PAPM2.tif |
| 图1-2 研发中的贴片机实物图 | |

## 1.1 各机构简介

本节参考了《SM482\_Introduction(Chi\_Ver1)》(即文献[1])，由于之前术语使用混乱，在此重新声明，作为各机构的标准名称。

|  |
| --- |
|  |
| 图1-3 贴片机贴装机构 |

吸头组件(Head Assembly)：如图1-4所示，吸头组件上装配有六个吸头单元以及六个飞行相机(Fly Camera，用于贴装途中同步进行元件检测)。图1-3所示为贴片机贴装运动机构，其中①为X轴悬臂，②即为吸头组件，③为Y轴框架，三者构成了X/Y轴运动平台，由悬臂带动吸头组件做X轴Y轴运动，

吸头(Head)：吸头用于安装吸嘴。如图1-4所示，吸头组件包含6个吸头单元，每个吸头包含一个旋转轴 (Spindle)。旋转轴可以做Z轴上下运动及R轴旋转运动，旋转轴上方与真空泵相连通，可以吸气或者吹气，通过底部的吸嘴座(Nozzle Holder)安装吸嘴，通过建立或者破坏真空可以吸取或者贴装元件。为了实现同时拾取，相邻两吸头之间的轴间距为30mm。

吸嘴(Nozzle)：用于吸取匹配尺寸的元件。共有九种类型的吸嘴，依照不同的尺寸吸嘴与元件有明确的对应关系，详见文献[1]。为了更准确的吸着和贴装，选择吸嘴时，根据各元件的最小吸着面积，适当选择吸嘴，吸嘴选择不当会导致元件吸取/贴装不良。所以吸嘴除了提供建议选项以外，还可由用户手动设置。

|  |
| --- |
| C:\Users\Robert\Pictures\Head_assembly.tif |
| 图1-4 吸头组件的构成 |

吸嘴库(Automatic nozzle changer，ANC)：ANC是在设备的运行当中，根据部品需要更换吸嘴时自动拆卸吸嘴或安装吸嘴的交换装备。它靠气缸的驱动来开/关开闭器(Shutter)。开闭结果通过装在气缸的限位传感器（Limit Sensor）来检测。ANC Shutter的开/关速度是靠安装在气缸的速度控制阀而调节。ANC可装37个吸嘴和1个误差补偿工具。它的吸嘴交换时间约为约0.5秒左右。在贴装开始之前，需要将所有用到的吸嘴放到吸嘴洞中，并在贴片机软件中进行相应的配置。图1-5为吸嘴库的实物图，从图中可见，吸嘴洞有大有小，用于安装不同尺寸的吸嘴，共有四列吸嘴洞，同一列中的相邻吸嘴间距(15mm或者30mm)与相邻吸头间距满足倍数关系，所以如果安排得当，可以同时进行吸嘴更换。

飞达(Feeder) ：又称喂料器，用于供应不同的元件。在优化问题中，需要考虑的飞达类型包括三种：带式飞达、盘式飞达、杆式飞达。带式飞达是传送卷带包装(tape and reel)的元件的供应装置。每个带式飞达上可安装一种元件的料卷带，带式飞达包括九种型号。盘式飞达供应托盘包装(TRAY)的QFP或大的SOP等元件。杆式飞达通过震动器震动使由管状包装(TUBE)供应的SOP、SOJ、PLCC等元件沿着直线方向移送，沿横向排列的料杆最多可以放置四根。如果用到盘式或者杆式飞达，必须在优化之前将其插好，并且在软件中进行配置，即其位置不参与优化，仅作为机械尺寸约束。上述三种飞达都无差别的参与拾取贴装顺序优化。

固定相机(Fix Camera)：用于飞行相机无法识别的大型元件、异型元件识别及分割识别。

飞达架(Feeder Rack)：两个飞达架分别被平行安装在贴片机平台的两侧，飞达架上等间距的开有飞达槽，用于飞达的安装固定。如图1-6所示为前飞达架，由图中可见，每个飞达占据一个或者多个飞达槽，两相邻飞达槽的间距为15mm，所以如果飞达位置安排得当，可以进行同时拾取操作。

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\Robert\Pictures\ANC.tif | C:\Users\Robert\Pictures\Feeder.tif |
| 图1-5 吸嘴库(ANC) | 图1-6 飞达架 |

## 1.2 贴装过程优化简介

生产实践中，为提高生产效率，在一条贴装流水线上，常配置有不止一台贴片机，甚至有不止一类贴片机，贴装生产过程所需考虑的优化问题有如下几个[1]：

贴装过程优化(PCB assembly problems/single machine optimization problems)；

贴片机分组(Machine grouping)；

电路板分组(PCB grouping)；

电路板顺序(PCB sequencing)；

贴装流水线上各贴片机所分配板类型优化(Line assignment)；

贴装流水线上各贴片机所分配元件类型优化(Component allocation)。

其中贴装过程的优化(PCB assembly problems)特指对单台贴片机贴装过程的优化，也是本文所要研究的问题，更具体地说是多头拱架式贴片机的贴装过程优化问题，通常认为该问题包括两个子问题：

元件贴装顺序(Component sequencing)；

飞达槽位安排(Feeder arrangement)。

贴片机的一个贴装总周期对应一块PCB的贴装生产过程。当贴片机在可用状态时，一块PCB被传入并固定在贴装平台上的指定位置，贴装过程开始(详见图1-7)，贴装子周期包含四个子步骤：元件拾取、元件贴装、更换吸嘴、图像检测。在一个贴装子周期中，四个子步骤的执行流程为：

(更换吸嘴) → 元件拾取 → 图像检测 → 元件贴装

|  |
| --- |
|  |
| 图1-7 贴装过程流程图 |

四个子步骤中，元件拾取、元件贴装、图像检测是必然要执行的，更换吸嘴视需要执行。图像检测分为飞行相机检测与固定相机检测，飞行相机检测在吸头组件移动中可同步完成，所以不会额外消耗时间，而固定相机检测需要吸头组件专程飞行到固定相机上方，会额外耗时，故属于路径优化对象，Samsung软件产生的优化结果中，固定相机检测不会与飞行相机检测在同一子周期内出现。

备注：贴装过程中的元件贴装动作耗时、固定相机拍照耗时由机器固有参数决定，飞行相机检测时间、R轴旋转动作在X轴Y轴运动时同步进行，这些量不在优化考虑范围内。元件贴装与固定相机检测属必然经历过程，不参与优化，但仍需要其消耗时间用于估算完成贴装总周期耗时。

贴装过程可以通过优化节省的时间包括：

* 由贴装点移动到拾取点的耗时；
* 由拾取点移动到贴装点的耗时；
* 由拾取点移动到固定相机检测点的耗时；
* 贴装点间移动耗时；
* 拾取点间移动耗时；
* 多头元件拾取耗时(即是否同步拾取)；
* 更换吸嘴次数；
* 多头吸嘴更换耗时(即是否同时更换吸嘴)。

贴装过程优化是多变量组合优化难题，对贴装过程中所用到的各变量进行分析非常必要，理清各变量之间的关系，区分主次变量，为贴装过程的建模做准备。

**已知量(包括运动参数及约束)** [1]

单个吸嘴更换耗时；

单个元件的拾取耗时(用于计算同时拾取节省的时间)；

拱架移动速度；

不同飞达的拾取点位置(用于判断同时吸取)；

飞达占据飞达插槽个数(用于判断是否有机械干涉，属于机械尺寸约束)；

尺寸过大(>30mm)的元件限制相邻吸头吸取元件(极个别情况，最后考虑)。

移动范围约束(如1号吸头到不了60号飞达，属于机械尺寸约束，见图1-8)；

|  |
| --- |
|  |
| 图1-8 各吸头可接近的飞达插槽区域 |

**输入量**

导入的PCB信息(.opt或者.pcb文件)，其中包含的是所用元件信息，包括：

元件类型、元件数量；

元件尺寸(厚元件后贴)；

在PCB上的贴装位置信息；

各元件对应吸嘴类型；

各元件对应飞达类型；

是否需要固定相机检测；

手动输入的其他信息：

各元件对应飞达的数量；

手动设置部分或全部带式飞达位置；

各元件对应吸嘴数量及所在吸嘴洞；

杆式或盘式飞达尺寸及槽位号；

飞达槽位是否可用(故障、被杆式或盘式飞达占用导致不能使用)；

各吸头是否可用(故障导致不能使用)；

**输出量**

即各优化结果：

未分配的带式飞达的优化槽位号；

各子周期的贴装顺序。

**优化目标**

1、最小化一些量：优化设置耗时、贴装过程总周期耗时、吸头组件移动距离(吸头组件移动耗时)、更换吸嘴次数、子周期数。

2、最大化一些量：贴装生产量、各吸头工作负荷的均衡、同时拾取次数。

3、在一定约束条件下：机械约束、吸头个数、贴装元件个数、是否使用固定相机、是否使用后飞达。

以上各量之间有很强的相关性，两两之间有的相互促进，有的又相互制约，变量数目超多，且彼此耦合严重，所以属于多变量组合优化难题。以上各量虽不能同时满足最大或最小化，但最终目标只有一个，就是贴装生产量最大。优化目标最终反映为目标函数(Fitness/Objective function)的选取。

在大批量生产时，较长的优化设置耗时可以容忍，指标为贴装过程耗时最短；

在小批量生产时，需要快速得到一个优化结果，指标需要在优化设置耗时最短与贴装过程总周期耗时最短之间再做权衡。

优化结果的验证，使用相同的PCB数据进行优化，优化完之后的贴装顺序，飞达槽位配置，贴装总周期耗时与Samsung优化结果对比分析。

参考Samsung SM482的操作手册，其中给出优化结果的评价标准如下:

(a)Gantry之间配平(对应有多个悬臂的情况)；

(b)使吸嘴更换次数最小化；

(c)飞达的同时吸取次数最大化；

(d)配置飞达时尽可能使XY臂的移动距离达到最小化；

(e)决定最合适的贴装作业顺序。

# 2 优化方法概述

## 2.1建模方法

优化问题常采用数学规划方法建模，包括线性规划模型(linear programming models，LP)、整数规划或称整数线性规划模型(integer linear programming models，ILP)、非线性规划模型(nonlinear programming models，NLP)。多头拱架式贴片机的元件拾贴顺序及飞达槽位分配问题可以使用这些模型进行公式化，接下来介绍这三类模型。

**线性规划**

线性规划(LP)的目标函数与约束包括的线性表达式与决策变量都是连续的，与非线性规划模型相比(NLP)优势在于易于求解。LP的典型案例是运输模型：

一定数量供应商()向一定数量的客户()提供货物。运输问题也即，如何在不超过任何供应商的供应能力的前提下，满足客户的需求，并且追求最小花销。用表示从供应商提供给客户。其数学模型如下：





**整数规划**

整数规划(ILP)是线性规划(LP)的一个子集，ILP额外的约束在于其所有或部分决策变量受限于整数值，在工程实际中，许多变量是整数但不是连续的，所以ILP的应用更广泛。ILP的一个典型应用是旅行商问题(traveling salesman problem，TSP)，TSP描述的是如何在总路径最短的前提下使得旅行商遍历所有城市各一次，以下给出TSP的ILP模型：

总共有各城市，代表选择了从城市出发到城市的路径。





所有的值取0或1。所有的是整数集。最后一个约束的作用是屏蔽某个路径。

TSP易于描述，但是难以求最优解，共包含各可能路径。

**非线性规划**

当目标函数是非线性的，或者部分约束是非线性的，这时对应的就是非线性规划(NLP)。NLP的一个典型问题是二次分配问题(quadratic assignment problem，QAP)，QAP是线性分配问题的一个推广，推广在于QAP的目标函数是非线性表达式。QAP的NLP模型如下：

设施集 ()需要一一对应地放置到位置集()。设施对(与)间的物质流强度为，位置对(与)间距离为。设施放置到位置的固定成本为。





所有的值取0或1，表示设施放置到位置。目标函数表示物质流的移动距离最短，且放置成本最低。

## 2.2启发式搜索法

运筹学中，启发式搜索法(heuristic)是一种简化求解法，依据经验法则和常识指导搜索，或者通过简化模型使其适合采用精确方法。在优化问题中，启发式搜索法使用将解引向最优解或者近似最优解的策略进行搜索，其特点是实用快速。启发式搜索法可以分为两类，一类是贪心算法(greedy heuristics)，一类是局部搜索算法(local search heuristics)。

贪心算法(比如最近邻搜索法)搜索所研究问题的所有可行解，并将其代入目标函数进行评估，挑选其中最优的作为解。由于要完全列举，所以非常低效，不适合解决组合优化问题。

局部搜索算法搜索当前解近邻区域的更优解，新解通过代际迭代机制产生。如果产生的新解对应目标函数值的改进，就用其更新当前解，否则当前解不变。该方法不断迭代直到不能再提高，此时便得到了局部最优解，但局部最优未必是全局最优解，见图2-1。

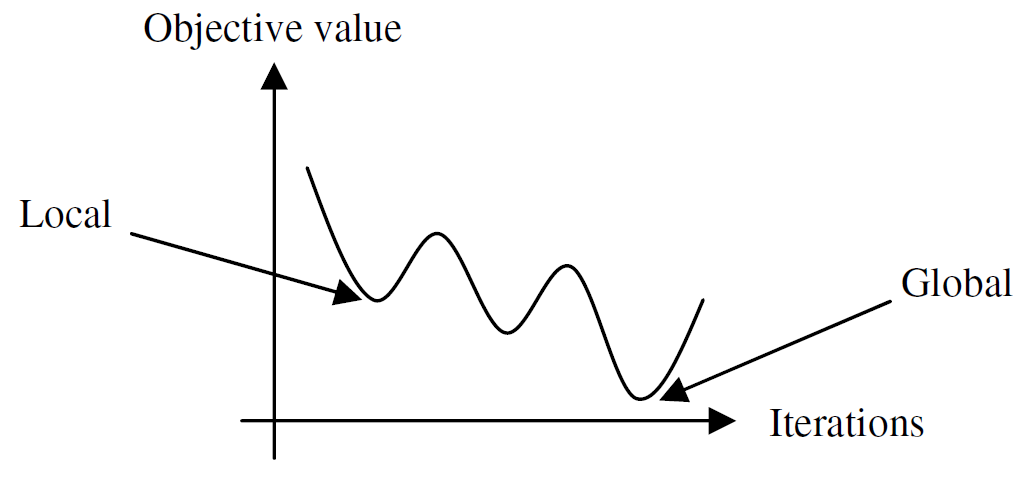


图2-1 局部与全局最优解

为了避免陷入局部最优解，一些元级策略被加入局部搜索算法，由此得到了元启发式搜索法(metaheuristics)，又称智能优化方法。智能优化方法通过融合生物进化、神经系统、统计机制等智能策略在搜索空间进行搜索，具有学习策略来高效地求解近似最优解。智能优化方法包括：遗传算法(Genetic algorithms，GA)，贪婪随机自适应搜索算法(Greedy randomized adaptive search procedure，GRASP)，神经网络(Neural networks)，模拟退火(Simulated annealing，SA)，禁忌搜索(Tabu search，TS)，阈值算法(Threshold algorithms)以及这些算法的混合算法。

这些算法之中，遗传算法(GA)、模拟退火(SA)、禁忌搜索(TS)在求解速度及解的优化效果方面更具优势，在工程实际中应用广泛，将作重点介绍。

模拟退火(SA)借助于退火过程和解组合优化问题的相似性被提出，融入了统计机制的概念。SA从初始解开始，不断产生近邻解。如果目标函数值有改进，新解就被接受；如果目标函数值变差，将依据控制参数(温度)来确定是否接受。应用到实际问题中的SA需要做两类选择：全局选择和代际选择。

全局选择回答的问题包括：怎么描述解？如何选择目标函数？如何选择相邻代的产生机制？如何确定一个初始解？

代际选择回答的问题包括：如何决定一个初始温度？如何选择温度更新规则？在各温度条件下做多少次迭代？如何选择停止准则？

禁忌搜索(TS)也是一种能够避免局部最优解的启发式算法，其决策方式仿照人类记忆过程，即融合了人工智能的概念。TS自初始解出发，随机产生新的解，从而得到一个近邻解列表，选择该表中的最优解。若最优解在禁忌记忆列表中，则不会被选择，退而选择第二最优解，但也有例外，如果禁忌记忆列表中的某个解的目标函数值优于当前的最优解或者预设的期望值，则将其清出禁忌列表，并将其作为当前解。列表被分为两部分：短期记忆和长期记忆。两类记忆都存储搜索历史，尤其是存储解的产生步骤(解的属性)，这种机制可以避免方法的周期性。

遗传算法(GA)借助于遗传算子变异跳出局部最优解。事实上，GA的基本思想是维持按照给定压力进化的待选解数量(population of candidate solutions)。与TS或者SA解产生围绕单个解的属性开展不同，GA通过操作一个解集来产生解。当问题规模很大时，单纯的GA效果差强人意。于是研究者将其他局部搜索算法融合到GA中，得到遗传局部搜索法(genetic local search，GLS)，用于TSP和QAP的求解，实验结果验证了GLS的有效性。用于得到GLS的局部搜索算法包括2-opt、3-opt、Lin-Kernighan (LK)。2-opt将当前解的两条边删除，然后通过颠倒顺序重新连接得到新的路径。如果发生改变的边变为三条，则得到3-opt。3-opt更有效，但是由于近邻范围更大了，搜索起来更加耗时。进一步地，Lin和Kernighan提出了一种复杂的边交换方法，从而使被交换的边数量是可变的。

上述启发式搜索法或智能优化方法可高效地得到优化解，但是在优化解得到之前，优化效果好坏无法预知。还有一种求解优化问题的方法，即首先进行数学模型公式化，并且使用精确算法或者商业软件包求取最优解。例如单纯型法(the simplex algorithm)常用于解LP，而分支定界算法(Branch-and-bound algorithm)常用于解IP问题。贴装过程优化是多变量组合优化NP-hard问题，不具有多项式时间解，目前的研究以及实际生产中多是采用启发式搜索法或者智能优化方法。精确算法求最优解的方式可以用于优化结果的评估与比较分析。

# 3 文献分析

国内外许多文献都研究了多头拱架式贴片机贴装过程的优化方法，各文献采用了相似的研究流程：

首先，对贴装过程采用某种分解策略，分解得到几个子动作；

然后，针对所研究的子动作建立数学模型，表征目标函数；

最后，提出相应的求解算法。

以上三个步骤相互承接，有效的优化结果依赖于三个步骤的配合，本章也按照该研究流程进行总结与分析。

## 3.1贴装过程分解策略

由1.2节可知，多头拱架式贴片机的贴装过程包含许多可优化子问题，研究时首先要对贴装过程进行分解，有主次之分地选取优化子问题，将各文献中常用的分解策略进行汇总，表3-1所示为各优化子问题与优化目标之间的耦合关系。

表3-1 优化子问题与优化目标关系

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 子步骤 | 优化目标 | 优化子问题 |
| 更换吸嘴 | 总更换次数最少 | 吸嘴分配  子周期次序优化 |
| 同时更换次数最多 | 吸嘴分配  子周期次序优化 |
| 元件拾取 | 同时吸取次数最多 | 吸嘴分配  飞达槽位分配 |
| 避免前后飞达折返 | 子周期次序优化 |
| 吸取移动距离最小，  吸取点间距离最近； | 飞达槽位分配；  子周期内元件吸取顺序 |
| 吸取位置与贴装位置最近 | 飞达槽位分配；  子周期内元件吸取顺序；  子周期内元件贴装顺序 |
| 元件贴装 |
| 贴装点距离最近 | 子周期内元件贴装顺序 |
| 固定相机元件检测  (固检) | 同时固检次数最多 | 子周期次序优化(需要固检的放同一子周期) |
| 固检元件距离固定相机最近 | 飞达槽位分配 |

(a)飞达槽位分配(Assignment of component feeders)。

(b)子周期内元件贴装顺序(Pick and place sequence problem)。。

b-1：子周期内元件拾取顺序(Sequencing the component pickups)。

b-2：子周期内元件贴装顺序(Sequencing the placement operation)。

(c)吸嘴分配(assignment of nozzles)。

(d)子周期次序优化(Sequencing the subtours)。追求总周期数最少。

d-1：贴装元件分配(assignment of the components)。

d-2：各吸头工作负荷的平衡(Workload balance)。

d-3：吸嘴更换顺序(Sequencing the nozzle changes)。

## 3.2贴装过程优化方法

查阅的各种文献中，绝大多数都认为贴片机的贴装优化问题由(a) 、(b)两个高度关联的子问题组成构成，因此研究主要集中在这两个问题上。在求解问题的策略上，多数文献采用分解和简化问题、逐层求解的策略。

飞达槽位分配可视作二次分配问题(Quadratic Assignment Problem，QAP)。

元件拾贴顺序问题可视为旅行商问题 (Travelling Salesman Problem，TSP)。TSP找寻最优的次序来访问各个吸取点获取元件，然后返回起点，目标为贴装路径或者贴装时间最短。而元件拾贴顺序问题又不同于TSP，因为每个周期的终点与起点皆不相同。

QAP与TSP都属于不具有多项式时间解的NP-hard组合优化问题[14]，因此贴片机贴装过程优化问题同样属NP-hard问题。NP\_hard问题计算复杂度大，在时间和计算资源有限的情况下，无法求解到最优解，只能去尽可能逼近最优解，得到一个可以接受的优化解。NP\_hard问题都要采用启发式搜索法或者智能优化方法求解，所以贴装过程优化解的求解过程就是不断迭代求相对更优的过程。

目前对于贴片机贴装过程优化有如下三种思路：

(1)把贴片机的贴装优化分解成两个独立的子问题并分别求解，即把贴片机贴装优化分解为：假设元器件贴装顺序已知的前提下的飞达槽位分配优化问题和假设飞达槽位分配已知前提下的元器件贴装顺序优化问题[15]。

(2)采用分解问题的方法求解把贴片机贴装过程优化，求解思路是先将贴片机贴装过程优化问题分解为上述两个子问题，然后再对这两个子问题分阶段求解，从而得到优化问题的一个次优解[2]。

(3)考虑到飞达槽位分配和元器件贴装顺序的优化相互依赖并且相互影响，采用智能优化方法同时解决两个子问题实现贴装过程的优化[33]。

总结国内外现有的贴片机贴装优化求解算法，主要集中在构造性的启发式算法、遗传算法等智能优化算法：

(1)构造性的启发式算法[2,3,4,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,42,27,45]几乎可以用于所有类型的贴片机贴装过程优化。一般来说，启发式算法主要基于启发推理，从当前角度出发，根据优化时刻环境、任务所处的状态进行优化，保证局部最优，但难以保证全局最优，并且启发式算法一般只产生可行的优化方案，很难保证最优性和通用性。

(2)遗传算法[28,29,30,31,32,34,35,37,38,39,40,41,49]也可以用于所有类型的贴片机的贴装过程优化。遗传算法(GA)是一种传统的智能优化算法，具有如下优点：

第一，GA以参变量集编码得到的染色体为运算对象，而与参变量集本身无关，因而应用领域广泛；

第二，GA使用群体到群体搜索，使得遗传算法具有较好的全局搜索性能；

第三，GA不需要任何启发式信息，直接以目标函数作为搜索信息，无需目标函数的导数值等其他一些辅助信息，因此适用范围广，鲁棒性好，应用范围广；

第四，GA使用概率搜索技术。GA的选择、交叉、变异等运算都是以一种概率的方式来进行的，从而增加了其搜索过程的灵活性和多样性。并且，采用何种交叉类型，交叉概率和变异概率等需要反复尝试[49]；

第五，GA具有固有的并行性和并行计算能力；

第六，GA具有可扩展性，易于同别的技术混合。

另一方面，GA也存在着如下不足：

第一，单一的GA难以全面地将优化问题的约束表示出来，需要采用一些措施对不可行解进行处理，计算时间因此会有所增加；

第二，GA通常的计算效率比其它优化方法低；

第三，GA不能利用系统反馈信息。因此单一的GA难以保证生产的快速性。

(3)只有很少一部分文献把蚁群算法[7,8]、粒子群算法[5,6]、禁忌算法[29]、混合蛙跳算法[9-13]、2-opt[26, 45]等用于贴片机优化问题的求解。

蚁群算法的优点是计算精度高、计算速度快且易于实现，其缺陷是易出现停滞现象。

粒子群算法是一种基于迭代的优化方法，系统初始化为一组随机解，通过迭代搜寻最优值，其优点是染色体数目少、计算简单、鲁棒性好，缺点是容易陷入局部最优。

禁忌搜索算法的优点是计算速度较快，能很快找到问题的满意解，缺点是对初始解有较强的依赖性，且解的质量高度依赖于算法的运行次数。

混合蛙跳算法作为一种新型的仿生物学智能优化算法，具有高效的计算性能、优良的全局搜索能力和参数简单等优点，但同样具有容易陷入局部最优的缺点。

综上所述，现有的启发式算法和一些智能优化算法各有利弊，随着市场环境的变迁和技术的进步，过去的贴片机生产优化理论及相关研究成果也逐渐显示出一些不足，若要真正在实践中得到广泛应用，尚需进一步改进和完善。因此应用时设计和改进符合贴片机贴装过程特点和工作特性的搜索算法，或者根据贴片机优化问题的特点将多种搜索方法相结合以扬长避短，对提高算法搜索性能，有效的求解贴片机优化问题，提高生产效率是非常有必要的。

## 3.3文献中的其他差别

**机器验证vs计算机仿真**

一些理论方法，仅考虑吸头组件运动距离最短。而关注工程实践的论文中，会将同时吸取以及减少更换吸嘴次数的情况考虑在内[44]。

在此给出一组贴片机参数：吸头组件的运动速度为1.5 m/s。拾取(或者贴装)时间是0.15秒，吸嘴更换时间为0.85。可见拾取/贴装操作及吸嘴更换操作耗时所占权重较大，相当于六个头分别拾取所耗时间。

**在线优化vs离线优化**

在线优化可以在短时间内给出优化结果(Minimize the setup time)，对于小批量生产，没必要耗费太多时间寻找最优解，可以选择在线优化方式，快速得到次优可行解，然后直接进行生产。

离线优化追求最优解，期望能够在尽量少的时间内寻找到一个近似最优解。

文献[45]提出在线与离线优化的一种折中办法，首先快速提供一种可行解，在机械运动过程中上位机的等待时间内，利用CPU空闲时间持续优化。

**TSP vs VRP**

文献[26]将贴装过程分为：(1)飞达槽位分配；(2)子周期内帖装点分配；(3)子周期内贴装顺序；(4)子周期间执行顺序。其中第一步采用最近邻法，后三步一并建模为车辆运输路径问题(VRP)，最后将所有模型代入随机离散两元素交换优化过程(random descent 2-opt swapping procedures)求解。

车辆运输路径问题(Vehicle Routing Problem, VRP)，又称多回路运输问题，在物流中的解释是对一系列客户的需求点设计适当的路线，使车辆有序地通过它们，在满足一定的约束条件下，如货物需求量、发送量、交发货时间、车辆载重量限制、行驶里程限制、时间限制等，达到一定的优化目标，如里程最短、费用最少、时间最短，车队规模最少、车辆利用率高。VRP问题和TSP问题的区别在于：客户群体的数量大，只有一辆车或一条路径满足不了客户的需求，必须是多辆交通工具以及运输工具的行车顺序两个问题的求解。相对于TSP问题，VRP问题更复杂，求解更困难，但也更接近实际情况，并且与拾取贴装过程更接近。目前在各文献中，VRP使用相对较少。

**多头与单头**

文献[51]通过给料带与元件分组的方法，将多吸头问题转换为单吸头问题进行求解。文献[33,49]仅考虑单吸头式贴片机(single-headed placement machine)。

**问题规模**

文献[48]根据不同的问题规模，采用不同的方法。

**吸嘴的优化**

文献[50]专门对元件使用的吸嘴类型与数量进行优化，有些元件可以被多种吸嘴吸取，所以通过设计可减少吸嘴更换，优化的目标是吸嘴更换次数最少，并且同步拾取次数最多。但如果仿照samsung SM482优化过程，则不优化吸嘴。

**机械尺寸约束**

文献[52]在优化元件拾取贴装顺序和吸嘴设置问题的同时，将机械尺寸的约束(元件高度限制、拾取位置限制、贴装位置限制、同步拾取)作为优化对象，采用一种高效混合GA进行优化。

# 4 文献综述

到目前为止，已经有许多的参考文献针对多头拱架式贴片机建立了不同的数学模型，并提出相应的求解算法。多吸头拱架式贴片机优化问题已被证明是NP-hard组合优化问题[14]，研究者几乎都一致从飞达槽位分配问题和元件贴装顺序问题优化多头拱架式贴片机。

Lee等人[2,3,4]有多篇文献对多头拱架式贴片机的PCB贴装时间优化问题作了比较深入的研究和阐述。文献[2]把贴片机的贴装优化问题分解为飞达的分配优化和元器件贴装顺序优化归纳为两个阶段并分别求解。首先把飞达槽位分配问题归纳为整数规划问题，以最大化同时拾取元器件数目与最小化元件拾取点与元件贴装点间距之和为目标，采用启发式算法确定吸头在每个拾取和贴装周期中要处理的元件组；在上一问题的求解基础上，把元器件的贴装顺序优化问题归纳成非对称的TSP问题，以最小化吸头的贴装移动距离为目标，利用最近邻TSP方法确定每一个元件组中元件的贴装顺序和不同元件组之间的贴装顺序。实验结果表明，相比随机产生的飞达槽位分配和元器件贴装顺序，文中算法贴装时间平均要节约31%以上。文献[3]考虑多个吸头同时拾取多个元器件的特点，通过启发式算法构造元件组以使每次拾贴循环中吸头拾取元件时的移动距离最小，建立飞达位置分配问题(Reel Assignment Problem，RAP)的整数规划模型，采用基于动态规划的启发式分阶段求解方法解决飞达槽位分配优化问题。文献[4]提出了一种基于动态规划和最近邻旅行商的启发式算法，该算法首先构建飞达组，然后确定飞达组在喂料槽上的分配，最后确定元器件贴装顺序。算法中每一组飞达用相同的吸嘴，使吸嘴数尽量最少的吸嘴选择原则和每个吸头有相同的工作量飞达槽位分配给吸头的原则。考虑到吸嘴更换很耗时且吸嘴更换的次数与所用到的吸嘴数成正比，因此Lee首次提出了在优化拾取和贴装之前首先确定吸嘴更换次序的算法。实验仿真结果显示了文中方法比 Yamaha 贴片机本身提供的算法平均节省了 18%贴装时间。

Magyar等人[24]把贴片机的优化问题分成元器件贴装顺序问题、吸嘴分配到吸头和飞达槽位分配等三个子问题解决。他们主要研究多吸头贴片机(每个吸头配有4个吸嘴，每个吸嘴可吸取一个元器件)。在方法上，首先利用贪婪法解决飞达槽位分配以获得最大的同时拾取元器件数目，得到的飞达槽位分配方案主要用来决定吸嘴的选择，而吸嘴更换策略用于决定元器件的贴装顺序选择，最后同样利用贪婪启发式算法获得元器件的贴装顺序。并把算法利用到实际工业过程，证明了算法能有效缩短贴装时间和提高生产效率。

文献[40]采用分链遗传算遗传算法求解多头贴片机PCB贴装时间优化。作者采用先简单后复杂的策略，先用分链遗传算法针解决单头贴片机的贴装时间优化，由两个分链分别表示飞达槽位分配方式和元件贴装顺序，然后通过合并两个分链构造出一个完整链作为染色体，再通过分链运算和参数调整的方法求解问题。在单头贴片机优化中，主要以吸头的运动时间和吸嘴更换次数最小化为目标。在解决单头贴片机的优化问题后，通过一系列预处理方法将多头贴片机优化问题转化为单头贴片机优化问题再应用分链GA算法求解多头贴片机优化问题。在多头贴片机优化中，除了减少吸头的运动时间和吸嘴更换次数还力求减少吸头吸取元器件的时间为优化目标。其仿真数据表明，采用分遗传算法优化后的PCB贴装时间比启发性算法减少了14.4％。而且，随着吸头数量、元件种类和数量的增加，算法的优化效果会更好。

Altinkemer等人[19]使用chebychev距离作为X或Y方向移动的最大距离。该方法考虑了喂料机构运动与静止两种情况。若喂料机构是运动的，把吸头的运动路径归纳为独立的多回路运输问题(vehicle routing problem)。当若喂料机构静止，文献把问题看成是类似指派问题和类似运输问题的结合。计算证明该综合算法所提供的一个可行解，其误差间隔不超过VRP代价的最大误差间隔。

Burke等人[25]介绍了一个三阶段启发式算法来解决单台贴片机在贴装不同批量大小多种类型的PCB，且不同类型PCB之间不需要重新安装喂料架情况下的贴片机优化问题。实验结果证明他们的方法是行之有效的。

Jeevan等人[41]采用了遗传算法(GA)解决多头贴片机的元器件贴装顺序问题。他们以拾取和贴装所有元器件吸头移动距离最小为优化目标，但是文献未能清晰的讨论数学模型和染色体的含义。

Ho和Ji[35]以吸头运动的总距离为目标函数，把他们在文献[34]中同样的遗传算法，用于解决多头贴片机元器件贴装顺序和飞达槽位分配问题。实验结果表明，该方法远远优越于文献[36]中单一的遗传算法。

文献[26]把多头贴片机的优化问题分成：(1)飞达槽位分配问题；(2)各个吸头贴装元器件组分配；(3)各个吸头元器件组内部元器件贴装顺序以及(4)所有元器件组的顺序优化等四个子问题。文中采用三个步骤解决四个子问题，首先利用贪婪算法解决飞达槽位分配问题，然后把子问题(2)、(3)和(4)视为车辆路径问题(vehicle routing problem)，在第一步已获得的飞达槽位分配方案的基础上，利用different adaptation of saving heruistic启发式方法解决元器件拾取和贴装顺序问题，最后利用随机2-opt策略改进飞达槽位分配方案和元器件贴装顺序。

Huang等人[53]提出了一种基于知识的专家系统用于求解多头贴片机的贴装优化问题。该专家系统为减少吸嘴更换次数以及避免两个吸头之间可能出现的冲突，以各类元件按照元件数量将较靠近PCB板的喂料槽位置分配给数量较多的元件类型为原则确定各类元件的飞达槽位分配方式。然后利用爬山下降(hill climbing)法实现元件贴装顺序的优化。

Kim等[54]认为可以根据需要为同一种元件分配多个飞达，考虑了多飞达槽位分配的PCB贴装时间优化算法。他们将贴片机贴装优化问题分解为飞达槽位分配问题和元件拾取/贴装顺序问题这两个子问题分别求解。文中首先采用聚类算法将贴装点进行分组处理，然后分别采用Hungarian算法和欧拉巡回算法分别求解飞达槽位分配问题和元件拾取和贴装顺序问题。实验结果表明，采用多飞达槽位分配方式能够很好地节省PCB贴装时间。

曾又姣等人[42]针对拱架型贴片机采用了一种遗传算法来解决贴装顺序优化。该遗传算法有其独特的染色体编码解码方式和交叉算子。仿真结果表明该遗传算法对于解决多头贴片机贴装顺序问题非常有效。 曾又姣等[43]用一种启发式的解决方法，解决贴片机中的飞达槽位分配优化问题，在该算法中，在决定供料器的分配位置时采取以下两个原则:(1)尽可能使所有的吸头同时取料；(2)在吸取元器件的过程中，吸头沿着水平坐标增加或减少的方向移动。在一台4头贴片机上的相关实验表明，该模型和算法能大幅度地降低生产时间。

Liu 等[27]提出了一种分步求解的启发式算法，该算法中放宽优化问题的约束条件，采用灵活分配飞达和吸头的优化配置方法，通过减少拾取和贴装循环、构造同时拾取组和就近贴装来短贴装时间。与文献[41]给出的分阶段求解方法(Hierarchical Method, HM)的优化结果进行了比较，数值实验结果表明，本章提出的优化算法的优化性能平均比HM算法提高了10％～20％，能够较好地提高贴片机的生产效率。

文献[55]设计了一种随机选择交叉因子和包含交换操作和倒置操作的变异因子的遗传算法，主要用于解决飞达槽位分配确定情况下的拱架式贴片机的元器件贴装顺序优化。仿真结果表明，该种遗传算法能较有效的解决元器件贴装顺序。

除了启发式方法、遗传算法、2-opt和基本局部搜索算法之外，一些学者还将其它一些计算智能算法用于求解贴片机贴装优化问题。

袁鹏等[56]以多吸头直列式贴片机为研究对象，在飞达已分配情况下采用伞布搜索法(scatter search，SS)算法进行元件贴装顺序优化。Chen等人[5]结合吸头吸嘴分配算法、飞达组分配优化等一些启发式算法解决飞达槽位分配，在此基础上采用自适应微粒子群算法解决元器件贴装顺序问题，仿真结果表明文中的自适应微粒子群算法效果远优于一般粒子群算法，并且不比遗传算法差。伍楷舜等[6]将粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization，PSO)用于表面贴装过程调度问题，并根据问题特征构造了相应的编码方式，以及适用于该问题编码特征的两阶段粒子更新机制；朱光宇等[12,13]将蛙跳算法(Shuffled Frog-leaping Algorithm, SFLA)用于求解元件贴装顺序优化问题，混合蛙跳算法实现过程中，通过将元器件的编号进行编码表达贴装顺序,利用算法的局部深度搜索及全局广度搜索得到元器件贴装问题的优化贴装顺序，并利用三角概率策略对基本蛙跳算法进行了改进。实验表明,改进后的算法具有比文献[35]中的GA算法更好的准确性及更快的收敛速度，可以有效解决多头贴片机元器件贴装顺序问题。张坤等[8]基于蚁群算法，提出了一种适应于贴片机的路径优化算法,文中根据实际情况给出了新的状态转移策略以减少贴片机吸嘴的更换次数和以元器件尺寸比为参数的启发式函数以及一种适应于贴片机实际贴装情况的信息素更新策略，算法有效地克服了以往贴片机路径优化算法的约束条件多，而简化算法又与实际相脱离的缺点。理论分析和实际仿真实验，都证明了该算法优于传统的贴片机贴装路径的优化算法。以上文献涉及的研究都属于离线的生产计划与调度方法，

Ayob和Kendall[44-47]研究了贴片机的实时调度问题，开辟了贴片机实时动态优化的新思路。在Grunow[26]的基础上，他们认为影响多头贴片机贴装效率的因素有：(1)元器件组的分配；(2)吸嘴的分配；(3)各元器件组中吸头吸取元器件顺序；(4)各元器件组中元器件的贴装顺序；(5)所有元器件组的顺序。文献[45]首先运用贪婪法构建初始元器件组分配方案(仅考虑元器件组的分配)，并把该方案用于第一块PCB板，当贴片机在贴装这些元器件时，利用2-opt方法改进初始元器件组分配方案，并把改进后的元器件组分配方案用于下一块 PCB板的安装，通过2组实验数据的结果表明文中算法各自比初始方案有36.6%和43.29%的改进。文献[47]在文献[46]的基础上分别运用线性蒙特卡洛法(Linear Monte Carlo，简称LMC)、指数蒙特卡洛法(Exponential Monte Carlo，简称 EMC)以及带计数器的指数蒙特卡洛法等(Exponential Monte Carlo with counter，简称 EMCQ)三种元启发式蒙特卡洛法)进行贴片机贴装优化并进行了性能比较，结果表明EMCQ算法速度更快、鲁棒性更好，能获得最佳的优化方案。文献[47]在上述研究的基础上，结合了变邻域搜索技术，设计了变邻域搜索蒙特卡洛法，实验结果表明，这种变邻域搜索蒙特卡洛法获得的元件贴装顺序稳定并令人满意。

# 5 下一步的工作

由于个人能力限制以及时间限制，拟采用目前文献中比较流行的方法开展下一步的工作，先找出其中影响力较大的文献用matlab进行复现。这样可以先得到一个能给出可行解的优化算法，方便以后对比分析，同时也可以避免采用小众方法跌入时间陷阱导致返工的情况。

1、按照飞达槽位分配问题为QAP，元件拾贴顺序问题为TSP建立模型。

2、接下来的工作中，将首先研究使用遗传算法(genetic algorithm，GA)解决贴装过程优化问题。原因如下：

GA已经在TSP及QAP求解中成功地得到了应用，在贴装过程优化问题的求解研究中也是主流的研究方法；

另外，GA还有如下优点：计算复杂性小，易于操作，灵活性，易扩展性。

虽然GA本身计算速度较慢，将其他启发式搜索法与GA结合可以在快速性和性能方面获得改进，即所谓的混合遗传算法(hybrid genetic algorithm，HGA)。

# 6 参考文献

[1]三星泰科株式会社. SM482\_Introduction(Chi\_Ver1). 2012.

[2]Lee S.H., Hong J.M., Kim D.W. and Lee BH. An effective algorithm for a surface mounting machine in printed circuit board assembly[C]. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1997, 2: 932-937.

[3]Lee S.H., Park T.H., Lee B.H., Kwon W.H. and Kwon W.. A dynamic programming approach to a reel assignment problem of a surface mounting machine in printed circuit board assembly[C]. Proceedings of the 1998 IEEE, International Conference on Robotics & Automation, Leuven, Belgium, May, 1998, 227-232.

[4]Lee S.H., Lee B.H and Park T.H.. A hierarchical method to improve the productivity of a multi-head surface mounting machine[C]. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation Detroit, Michigan, 1999, 2110-2115.

[5]Chen Y.M.,Lin Ch.T. A particle swarm optimization approach to optimize component placement in printed circuit board assembly[J], International Joural Advance Manufacture Technolg . 2007,35:610–620

[6]伍楷舜, 郝井华, 刘民, 吴澄. 表面贴装过程调度问题的粒子群优化算法[J]. 控制工程, 2007, 14(2): 132-134.

[7]Chen W.S.,Chyu C.C.. A hybrid genetic algorithm for solving feeder arrangement and placement sequencing decisions in PCB assembly[C]. Proceedings of 2002 PCB Manufacturing and Management Conference, 2002.

[8]张坤, 姜建国, 刘斌峰等. 贴片机路径优化研究[J]. 微计算信息.2009,28(5-3): 196-198.

[9]朱光宇, 林蔚清. 基于改进混合蛙跳算法的贴片机贴装顺序优化[J]. 中国工程机械学报, 2008, 6(4): 428-432.

[10]Guang-Yu Zhu, Wei-Bo Zhang. An improved Shuffled Frog-leaping Algorithm to optimize component pick-and-place sequencing optimization problem. Expert Systems with Applications 41 (2014) 6818–6829.

[11]Tiemei Chen, Jiaxiang Luo, Yueming Hu. Component Placement Process Optimization for Multi-head Surface Mounting Machine Based on Tabu Search and Improved Shuffled Frog leaping Algorithm. [Intelligent Systems and Applications (ISA), 2011 3rd International Workshop on](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=5871829). 2011.

[12]朱光宇, 林蔚清. 基于改进混合蛙跳算法的贴片机贴装顺序优化[J]. 中国工程机械学报, 2008, 6(4): 428-432.

[13]朱光宇. 模因内三角概率选择混合蛙跳算法[J]. 计算机集成制造系统, 2009,15(10):1979-1985.

[14]Laarhoven P. V., Zijm, P. V. Production preparation and numerical control in PCB assembly[J]. Internation Journal of Flexible Manufacturing System, 1993, 5(3): 187-207.

[15]陈铁梅. 精密电子表面贴装生产优化问题研究[D]. 广州：华南理工大学, 2012.

[16]Mc Ginnis L.F., Ammons J.C, Carlyle M., et al. Automated process planning for printed circuit card assembly[J]. IIE Transactions: Scheduling and Logistics.1992,24, 18-30.

[17]Moyer L.K., Gupta S.M.. SMT feeder slot assignment for predetermined component placement paths[J]. Journal of Electronics Manufacturing,1996, 6, 173–192.

[18] Ahmadi R H, Maner J W. Routing heuristics for automated pick and place machines[J].

European Journal of Operational Research, 1999, 117: 533-552.

[19]Altinkemer, K., Kazaz B., Koksalan M.,et al. Optimisation of printed circuit board manufacturing: Integrated modeling and algorithms[J]. European Journal of Operational Research, 124, 2000, pp. 409-421.

[20]Ahmadi J.,Grotzinger S.,Johnson D. Componet allocation an dpartitioning for a dual delivery placemetmachine[J].Operations Research,1998,36,176-191

[21]Ahmadi J.,Ahmadi R.,Matsuo H.,and et al. Component fixture positioning for printed circuit board assembly with concurrent operations [J]. Operations research, 1995,43:444- 457.

[22]Safai F.. Cycle time improvement for Fuji IP2 pick and place machines[J]. Hewlett–Packard Journal,1996, 47 (4), 80-86.

[23]Bard J.F., layton,R.W.,Feo T.. A Machine setup and component placement in printed circuit board assembly[J]. International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 1994, 6(1): 5-31.

[24]Magyar,G., Johnsson,M., Nevalainen,O.. On solving single machine optimization problems in electronics assembly.Journal of Electronics Manufacturing ,1999.9(4),249-267.

[25]Burke,E.K.,Cowling,P.I.,Keuthen,R..The printed circuit Board assembly problem: Heuristic approaches for multi-headed placement machinery[J]. Proceedings of the IC-AI2001, Las Vegas,CSREA Press.2001.1456-1462.

[26]Grunow M., Gunther H.O., Schleusener, M.,and etal. Oerations planning for collect-and-place machines in PCB assembly[J]. Computers and Industrial Engineering, 2004. 47 (4),409–429.

[27]Liu H.M, Hu Y.M., Yuan P., and et al. Heuristic Optimization Algorithm for Multi-head Mounter[C], 22nd IEEE International Symposium on Intelligent Control Part of IEEE Multi-conference on Systems and Control, Singapore, 2007:379-383.

[28]Deo S, Javadpour R, Knapp GM. Multiple setup PCB assembly planning using genetic algorithms[J]. Computers & Industrial Engineering, 2002, vol. 41: 1-16.

[29] Fu H. P., Su C. T.. A comparison of search techniques for minimizing assembly time in printed wiring assembly[J]. Journal of Production Economics, 2000, 63: 83-98.

[30]Sun D.S.,Lee,T.-E.,Kim,K.-H..Component allocation and feeder arrangement for a dual-gantry multi-head surface mounting placement tool[J]. International Journal of Production Economics. 2005,95(2),245-264

[31]Leu M.C., Wong H. Planning of component placement/insertion sequence and feeder setup in PCB assembly using genetic algorithm[J]. Journal of Electronic Packaging ,1993,115, 424-432.

[32]Khoo L.P.,Loh K.M.. A genetic algorithms enhanced planning system for surface mount pcb assembly. International Journal of Advanced Manufacturing Technology ,2000,16(4), 289-296.

[33]W. Ho. and P. Ji, "Optimal Production Planning for PCB Assembly," Springer Series in Advanced Manufacturing, Pham D.T. 2007,London: Springer. 131.

[34]Ho W.,Ji P..Component scheduling for chip shooter machines:A hybrid genetic algorithm approach[J].Computers and Operations Research,2003,30,2175-2189.

[35]Ho W.,Ji P..A hybrid genetical gorithm for componen tsequencing and feeder arrangement. Journal of Intelligent Manufacturing, 2004, 15(3),307-315.

[36]Ong N.S.,Khoo L.P..Genetic algorithm approach in PCB assembly[J]. Integrated Manufacturing Systems,,1999,10(5),256-265

[37]杜轩, 李宗斌, 高新勤, 等. 基于遗传算法的转塔式贴片机贴装过程优化[J], 2008, 西安交通大学学报, 42(3):295-299.

[38]田福厚, 李少远. 贴片机喂料器分配的优化及其遗传算法求解[J]. 控制与决策, 2005,20(8):955-959.

[39]Li S., Hu C., Tian F.. Enhancing optimal feeder assignment of the multi-head surface mounting machine using genetic algorithms[J]. Applied Soft Computing, 2008, 8(1): 522-529.

[40]Lee W.S., Lee S.H., Lee Y.D. and Lee B.H.. Improving the productivity of a multi-head surface mounting machine with genetic algorithms[C]. Proceedings of the 1999 IEE/RSJ, International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1999,1780-1785.

[41] Jeevan K., Parthiban A., et al. Optimization of PCB Component Placement Using Genetic Algorithms[J]. Journal of Electronics Manufacturing, 2002, 11(1): 69-79.

[42]曾又姣, 严隽琪. 贴片机贴装印刷电路板中供料器的分配问题[J]. 上海交通大学学报, 2003,34(11), 1719-1722.

[43]曾又姣, 金烨, 严隽琪. 印刷电路板装联过程中元器件贴装的优化模型[J]. 计算机工程. 2003, 29( 21), 156-158.

[44]Masri Ayob, Graham Kendall.A survey of surface mount device placement machine optimisation:Machine classification.European JournalofOperational Research186(2008)893–914.

[45]Ayob, M., Kendall, G., 2003a. Real-time scheduling for multi headed placement machine. In: Proceedings of the 5th IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning, ISATP’03, Besancom, France, 9–11 July, pp. 128–133.

[46]Ayob M., Kendall,G.,.A Monte Carlo hyper-heuristic to optimise component placement sequencing for multi headplacement machine[C]. Proceedings of the International Conference on Intelligent Technologies, Thailand, 2003,132-141.

[47]Ayob M., Kendall G.. A variable neighbourhood monte carlo search for component placement sequencing of multihead placement machine[J],. Technical Report at School of Computer Science and Information Technology, University of Nottingham, NOTTCS-TR-2005-5.

[48]S.A. Torabi, M. Hamedi, J. Ashayeri. A new optimization approach for nozzle selection and component allocation in multi-head beam-type SMD placement machines. Journal of Manufacturing Systems 32 (2013) 700– 714

[49]Hardas CS,Doolen TL. Development of a genetic algorithm for component placement sequence optimization in printed circuit board assembly.Comput IndEng (2008)55(1):165– 182

[50]Shujuan Guo, Katsuhiko Takahashi, and Katsumi Morikawa. Nozzle assignment in PCB assembly considering one component type picked up by multiple nozzle types. APIEMS2009

[51] Wonsik Lee, Sunghan Lee, Beomhee Lee, Youngdae Lee. An Efficient Planning Algorithm for Multi-head Surface Mounting Machines using a Genetic Algorithm. Journal of Universal Computer Science, vol. 5, no. 12 (1999), 833-854.

[52]Hsueh-Yi Lin, Cheng-Jian Lin, Mei-Ling Huang. Optimization of printed circuit board component placement using an efficient hybrid genetic algorithm. Appl Intell (2016) 45:622–637.

[53]Huang Y. W., Srihari K., et al. A solution methodology for the multiple batch surface mount PCB placement sequence problem[J]. J. Electronics Packaging, 1994, Vol. 116, pp. 282-289.

[54]Kyung-Min Kim, K.M., Park T.H.. PCB assembly optimisation of chip mounters for multiple feeder Assignment[C]. SICE Annual Conference, 2004, pp. 1425-1430.

[55]LIN W.Q, ZHU G.Y.. A genetic optimization approach to optimize the multi-head surface mount placement machine[C].International Conference on Intelligent Robotics and Applications, Lecture Notes in Artificial Intelligence:PartⅡ.Berlin:Spring Press ,2008 :1003- 1012.

[56]袁鹏, 刘海明, 胡跃明等. 基于伞布搜索法的贴片机贴装顺序优化算法[J]. 电子工艺技术, 2007,28(6):316-320.