

文章编号: 1001-0920(2013)03-0363-06

带扰动和变异因子的改进禁忌搜索算法 求解贴片机贴装过程优化

陈铁梅^{1,2}, 罗家祥², 杜娟², 胡跃明²

(1. 广东商学院 信息学院, 广州 510320; 2. 华南理工大学 a. 精密电子制造
装备教育部工程研究中心, b. 自动化科学与工程学院, 广州 510640)

摘要: 以多贴装头拱架式贴片机为研究对象, 利用带扰动和变异因子的改进禁忌搜索算法, 实现贴片机贴装过程优化. 算法在传统禁忌搜索算法的基础上, 利用以长期记忆为基础的多元化扰动策略和块变异算子来扩大贴片机贴装顺序优化搜索空间, 并结合局部下降搜索策略优化喂料器分配, 最终实现贴片机贴装整体优化. 仿真实验表明, 改进算法能快速有效地获得较好的贴片机贴装优化解. 与其他文献中的算法相比, 所提出的算法在求解质量和求解速度上有较大的优越性.

关键词: 多样化扰动; 禁忌搜索算法; 块变异算子; 喂料器分配优化; 元器件贴装顺序优化

中图分类号: TP202.7

文献标志码: A

Improved tabu search with diversification perturbation and mutation operator for component placement process optimization of multi-head surface mounting machine

CHEN Tie-mei^{1,2}, LUO Jia-xiang², DU Juan², HU Yue-ming²

(1. Information Science School, Guangdong University of Business Studies, Guangzhou 510320, China;
2a. Engineering Research Center for Precision Electronic Manufacturing Equipments of Ministry of Education,
2b. College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640,
China. Correspondent: LUO Jia-xiang, E-mail: luojx@scut.edu.cn)

Abstract: A modified tabu search with the diversification perturbation operator and mutation operator is developed based on the mounting process optimization problem for the multi-head surface mounting machine. Based on the traditional tabu search algorithm, the diversification perturbation based on long-term frequency information and a mutation operator are used to expand the search place. A local descent search strategy is embedded into the algorithm to optimize the feeder assignment. Experimental results show that the proposed algorithm can obtain satisfied near-optimal solutions to the mounting process optimization in a short length of time and is superior to the algorithms presented in literature in terms of both solution quality and computation speed.

Key words: diversification perturbation; tabu search algorithm; block mutation operator; feeder assignment; component mounting sequence optimization

0 引言

贴片机是将各种片式元器件贴装到 (PCB) 上或将裸芯片贴到封装基板上的工作母机, 是 PCB 组装生产线中的重要设备^[1], 其贴装效率的提高对提高整条生产线的生产效率具有重要影响.

提高贴片机的贴装效率一般需要解决两个子问

题: 一是喂料器分配优化问题, 二是元器件贴装顺序优化问题. 大部分研究者将贴片机的贴装优化分成两个独立的子问题^[2-5]并分别求解: 如文献[2]提出了一种基于混合优化策略的分阶段的启发式算法来求解优化问题; 文献[3]采用动态规划和最近邻的启发式算法解决这两个子问题; 文献[4]分别用拉格朗日松

收稿日期: 2011-11-15; 修回日期: 2012-03-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60835001, 60804053, 61105081); 广东省教育部产学研结合项目 (2009A090100027).

作者简介: 陈铁梅(1973—), 女, 副教授, 博士, 从事智能优化的研究; 胡跃明(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 从事精密电子制造的研究.

弛法和带权重的最近邻法分别解决上述两个问题. 与该独立求解子问题不同的是, 另一些研究者^[5-7]认为贴片机优化的两个子问题高度关联, 同时进行优化会比分别解决两个子问题具有更好的优化效果: 如文献[5]利用自适应的微粒子群优化方法同时实现了贴片机贴装过程优化; 文献[6]利用混合遗传算法实现了贴片机上元件的贴装顺序和喂料器分配的同时优化; 文献[7]认为两个子问题分别具有各自的特点, 用同一种优化方法同时实现二者的优化势必会影响贴片机优化效果, 因此提出了一种利用禁忌算法进行喂料器分配和混合蛙跳算法对元器件贴装顺序优化的协同迭代算法, 该算法可获得比文献[6]更好的优化效果, 但缺点是需经过多重迭代, 这导致贴装过程优化求解耗时较长.

本文提出了一种带多样化扰动、块变异因子和禁忌算法相结合的算法来同时解决贴片机的两大问题, 从而实现贴片机贴装过程的整体优化. 禁忌搜索算法(TS)是一种全局逐步寻求最优算法^[8-9], 具有计算速度快等优点, 但初始解的好坏会影响算法的搜索结果, 因此, 在实际应用中需要对传统的禁忌搜索算法不断进行改进. 如文献[10]设计了一种长期记忆的多样化扰动禁忌算法, 用于解决带约束的二进制二次规划问题. 该算法的主要思想为: 首先, 利用传统的禁忌算法得到一个局部最好解; 然后, 利用基于长期记忆频率信息的多样化扰动策略对局部最好解进行扰动, 扩大搜索空间, 得到当前最好解, 再进行下一轮的传统禁忌算法搜索, 如此循环反复. 实验结果表明, 该算法在解决不带约束的二进制二次规划问题时, 在求解质量和计算效率上与其他算法比较具有一定的优越性^[11]. 受该算法的启发, 本文采用与文献[10]算法完全不同的适用于贴片机的贴装优化问题的记忆频率信息来改进禁忌算法. 为了进一步提高算法的分散搜索能力, 在利用改进多样化扰动禁忌算法得到局部最好解后, 采用符合贴片机贴装过程特点的块变异算子进一步扩大搜索空间. 算法从用启发式方法构造喂料器分配的初始解出发, 首先假设在喂料器分配一定的情况下, 利用禁忌算法求出贴片机的元件贴装顺序优化问题的局部最好解; 然后, 利用搜索过程中的各种记忆信息对元件贴装顺序优化问题局部最好解进行扰动, 以及利用符合贴装过程的块变异因子进一步提高算法的分散搜索能力, 从而获得元器件贴装优化的当代最好解; 最后, 假设在元器件顺序一定的情况下, 利用局部搜索策略实现喂料器的分配优化. 如此循环反复, 最终实现贴片机贴装整体优化. 该算法既利用了禁忌算法的计算速度快的优点, 又利用了多样化扰动和“块”变异因子来扩大改进算法的搜索空间,

从而弥补传统的禁忌算法的不足. 最后, 以 15 块实际生产的 PCB 为例进行了仿真测试. 结果表明, 利用本文算法求贴片机贴装最好解的质量优于文献[6-7]中算法. 与文献[6]中 HGA 算法相比, 平均效率提高了 14.02%; 与文献[7]中 TS-SFLA 算法相比, 平均效率提高了 2.36%, 并且利用本文算法求贴片机贴装最好解的时间少于文献[6-7].

1 算法的提出

拱架式贴片机的数学模型采用文献[7, 11]中已经建立的数学模型. 其优化目标同样为寻找贴装顺序序列和喂料器分配序列, 使所有的元器件从喂料器上吸取和贴装完毕时贴片头移动的总距离最小.

禁忌算法具有强大的局部搜索能力和计算速度快的优点, 而多样化扰动因子和变异因子具有能扩大算法的搜索空间的优点, 因此, 本文将禁忌算法和扰动以及变异因子结合起来, 提出了一种带扰动和变异因子的改进禁忌搜索算法. 该算法主要用在元器件贴装顺序优化过程中, 其主要思想如下: 首先, 利用启发式方法构造喂料器分配的初始解; 然后, 在假设喂料器分配一定的情况下, 利用禁忌算法对贴片机的元件贴装顺序优化问题进行求解, 为了提高算法的分散搜索能力, 在禁忌算法中结合了以长期记忆为基础的多元化扰动策略和块变异算子; 最后, 在每次禁忌搜索得到元器件贴装顺序的当前最优解后, 用局部搜索策略实现喂料器分配优化, 再进行下一轮的禁忌搜索, 如此循环反复, 最终实现贴片机贴装优化.

1.1 喂料器的初始分配

本文通过构造一种启发式算法来确定元器件在喂料槽的初始分配位置. 其基本思想如下: 优先考虑元器件个数较多的种类, 将与同类元器件在与 PCB 板上贴装位置最近的空喂料槽分配给该类型的元器件, 其目的是使贴装头从喂料器上拾取完所贴装的元器件所在的喂料槽位置到元器件在 PCB 板上贴装位置的平均距离尽量最短.

1.2 元器件贴装顺序优化

元器件贴装顺序优化问题一般被看成 TSP 问题来求解, 带扰动和变异因子的改进禁忌搜索算法主要用于实现元器件的贴装顺序优化. 其主要思想为: 利用传统禁忌算法进行搜索, 得到局部最好解; 构造符合贴片机贴装顺序优化的记忆频率信息, 对局部最好解进行多样化扰动得到新的局部最好解; 将新的局部最好解作为块变异的父代进行块变异, 得到迄今最好解作为下一轮的禁忌搜索算法的元器件贴装顺序初始解; 如此循环迭代实现贴片机元器件贴装顺序优化. 实验结果表明, 利用带长期记忆的多样化扰动和

块变异算子禁忌搜索算法能快速有效地求出贴片机贴装顺序优化解。

1.2.1 邻域

目前广泛使用的邻域有交换(Swap)、插入(Insert)等邻域结构。在贴片机元器件贴装顺序优化中,为了避免多个取贴循环的顺序同时改变,本文采用2-Swap交换邻域结构,即在贴片机元器件顺序解序列中随机选择两个元器件,然后交换元器件在解序列中的位置。

1.2.2 禁忌表

禁忌表是禁忌搜索算法的重要部分,决定了禁忌对象的任期和搜索范围,其大小在很大程度上影响搜索速度和解的质量^[9-10]。在贴片机元器件顺序优化中,一旦两个元器件的贴装顺序进行交换并且被接受,逆交换就会被记录到禁忌表中,在此后一定的任期内该交换会被禁忌。在迭代过程中,当某一交换被禁忌但该交换得到的目标函数优于当前最好解时,运用特赦规则让禁忌对象解禁。

1.2.3 多样化扰动策略

在每次传统的禁忌搜索得到贴片机元器件优化顺序的局部最好解后,首先利用多样化扰动策略扩大禁忌搜索算法搜索空间,从而帮助禁忌算法跳出局部最优^[10]。多样化扰动策略主要体现在算法运行过程中对传统禁忌算法的各种频率信息进行存储,并通过建立扰动评分函数来决定参与扰动的有效元器件交换对。为了使多样化扰动禁忌算法能更好地解决元器件贴装顺序优化问题,本文采取以下各种频率信息。矩阵 Sf 主要用于记忆传统禁忌算法中2-Swap交换频率信息,其中 $Sf(i, j)$ 用于记录在禁忌算法中的元器件 i 和元器件 j 的交换次数。 Es 用来记录利用传统禁忌算法得到的局部最好解集合,该矩阵主要描述参与扰动的搜索参考集,表示为 $[Sol_1, Sol_2, \dots, Sol_T]$ 。其中: T 为该集合存储的局部最好解的个数, Sol_1 为禁忌算法迭代第1次得到的局部最好解, Sol_i 为禁忌算法迭代第 i 次得到的不同于该集合已经得到的其他局部最好解,依次类推。当该集合 Es 达到最大个数 T 以后,每次禁忌算法得到的局部最好解与该集合的最差解比较,如果优于最差解,则取代该集合的最差解。 Nf 用来记录 Sol_i 元器件的相邻信息矩阵,假设元器件的总个数为 n 个,用一个 $n \times n$ 阶“相邻矩阵”来记录这些相邻信息,其中矩阵元素 $Nf(i, j)$ 的值代表在扰动搜索参考集中元器件 i 和元器件 j 相邻的次数。在扰动策略中,本文从 Es 参考集中共随机选取一个局部最好解作为扰动初始解。扰动的步骤如下:

1) 建立一个扰动评分函数^[10],并计算所有元器

件交换对的扰动值

$$Ps(i, j) = \frac{Nf(i, j) \times (ns - Nf(i, j))}{ns^2} + \beta \times \left(1 - \frac{Sf(i, j)}{\max f}\right). \quad (1)$$

扰动评分函数是用来衡量所有元器件交换对参与扰动的机会大小,一般情况下,扰动函数 $Ps(i, j)$ 的值越大,元器件 (i, j) 的交换参与扰动的机会越大。扰动函数中第1部分表示当相邻矩阵中元器件 i 和元器件 j 一次不相邻或者次次都相邻,这意味着元器件 i 和元器件 j 的交换参与扰动的几率为0,只有当两元器件在扰动参考集中相邻次数等于 $ns/2$ (ns 为当前的局部最好解在 Es 集合中的序号)时,这两元器件的交换参与扰动的机会最大。扰动函数中的第2部分意味着在禁忌算法中元器件 i 和元器件 j 交换的次数越多,两元器件之间的交换对参与扰动的几率越小。式(1)中, $\max f$ 为矩阵 Sf 中交换频率信息的最大值,即 $\max_{i,j=1,2,\dots,n} (Sf(i, j))$, β 为扰动权重因子,本文的所有实例取 $\beta = 0.5$ 。对扰动目标值进行降序排列,运用轮盘赌选择方法选择 $pr = \lceil n/4 \rceil$ 个参与扰动的交换对,其中 n 为元器件的总个数。

2) 对扰动初始解进行 pr 次 Swap 交换,扰动得到的最好解作为块变异的父代。

这种扰动策略是由禁忌算法的交换频率信息,最好解集合以及最好解的相邻信息来指导的关键元器件交换对之间的交换,旨在扩大禁忌算法搜索区域,从而跳出局部最优。

1.2.4 块变异算子

在多样化扰动改进禁忌算法得到当前迭代局部最好元器件贴装顺序后,为了进一步扩大算法的搜索空间,将所得到的元器件贴装顺序优化解作为父代进行块变异,这里的块指的是元器件贴装过程中的取贴循环。在禁忌搜索的邻域中采用在两个元器件之间进行相互交换,在多样化扰动阶段也是利用参与扰动的元器件在2者之间进行交换,如果在变异阶段还采取元器件之间的交换进行变异,扩大搜索空间的能力会有一定的局限性;而贴片机元器件的贴装过程是由若干个取贴循环组成的,因此把不同取贴循环进行位置交换,来扩大搜索空间的方法称为块变异。在块变异中,只改变取贴循环的顺序,每个块之间的取贴顺序不会改变,其主要思想如下:

1) 随机选取3个取贴循环序号(只取3个取贴循环序号主要为了节省计算时间)。

2) 两个块之间相互交换,形成不同的元器件贴装顺序,如图3所示。图中,子代1是通过将父代中的第6个取贴循环和第8个取贴循环相互交换位置得到的。

3) 在 5 个子代元器件贴装顺序中找出最优化的解, 如果块变异后的最好解优于父代, 则该最好解取代当前迭代最好解, 且该子代作为下一轮禁忌搜索的元器件贴片机顺序优化的初始解。

父代:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
子代 1:	1	2	3	4	5	8	7	6	9
子代 2:	1	2	6	4	5	3	7	8	9
子代 3:	1	2	6	4	5	8	7	3	9
子代 4:	1	2	8	4	5	3	7	6	9
子代 5:	1	2	8	4	5	6	7	3	9

图 1 块变异算子

1.2.5 动态候选集

候选集的规模对算法的收敛效果和搜索时间都有很大的影响^[12]。当带扰动和变异因子的改进禁忌搜索算法在一定搜索次数内(本文取 200)得到的当前最好解连续无任何变化时, 则增加 n (元器件的总个数) 个候选集。

1.3 喂料器分配优化

喂料器的分配优化问题, 实际上是优化元器件所在喂料器分配到贴片机的喂料槽位置。在实际生产中需满足两个约束条件: 1) 每个喂料槽最多只能放置一个喂料器, 每个喂料器只能安放同一类元器件; 2) 同一类元器件只能分配一个喂料器。在 2.2 节中得到迄今最优元器件贴装顺序的基础上, 利用局部下降搜索算法对喂料器分配进行优化, 其基本思想如下:

Step 1: 利用 2-Swap 算法产生喂料器分配 L_2 个邻域;

Step 2: 计算目标函数;

Step 3: 找出优于 2.2 节中得到的迄今最好值的最优值, 则该最好解取代迄今最好解, 并将该喂料器分配方案取代迄今最优喂料器分配方案。

1.4 带块变异算子的多样化扰动禁忌算法在贴片机贴装优化中的应用

利用带块变异算子的多样化扰动禁忌算法求解贴片机贴装过程优化的主要思想如下: 首先, 利用 1.2.3 节中的带扰动和变异的改进禁忌搜索算法进行优化, 得到迄今最优元器件贴装顺序, 并利用局部下降搜索算法进行喂料器分配优化得到迄今最优喂料器分配方案; 然后, 进行新一轮的改进禁忌搜索算法, 如此循环反复直至算法迭代终止。

Step 1: 初始化各种参数。算法迭代次数为 $into$, 禁忌表为 $Tlist$, 禁忌长度为 tl , 元器件顺序优化候选集合为 cl , 元器件顺序优化邻域为 L_1 , 喂料器分配邻域为 L_2 , 交换频率信息为 Sf , 局部最好解集合为 Es , 该集合中解的最大个数为 T 以及包含解的序号为 rs , 毗

邻信息矩阵为 Nf 等。

Step 2: 利用启发式算法构建喂料器分配初始方案 FA_0 , 利用最近邻法构建元器件贴装顺序的初始路径为 S_0 。

Step 3: 判断 ns 是否小于 T , 如果是, 则利用传统禁忌搜索算法得到局部最好解 S^* , 更新 Sf 矩阵和迭代次数, 否则转 Step 8。

Step 4: 判断 S^* 是否包含在 Es 中, 如果不在, 则把 S^* 放在集合 Es 中, 即 $Es = Es + \{S^*\}$; $ns = ns + 1$; 更新毗邻矩阵 Nf , 否则转 Step 5。

Step 5: 在 Es 集合中随机选取一个局部优化解, 进行多样化扰动得到当前最好解 S_c , 如果该解优于 S^* , 则 $S^* = S_c$ 。

Step 6: 对 S^* 进行块变异, 得到迄今最好解 S_b , 判断该解是否优于 S^* , 如果是, 则 $S_0 = S_b$, 否则 $S_0 = S^*$ 。

Step 7: 利用局部下降搜索算法进行喂料器分配优化, 得到迄今最优喂料器分配方案 FA_b , $FA_0 = FA_b$, 转 Step 3。

Step 8: 判断禁忌搜索的迭代次数是否满足。如果不满足则转下一步, 否则转 Step 12。

Step 9: 从局部最好解集合 Es 中随机选取一个局部最好解 S' 进行多样化扰动得到最好解 S_0 , 作为下一轮禁忌搜索的初始解。

Step 10: 进行新一轮的禁忌搜索得到局部最好解 S_c 。

Step 11: 如果局部最好解 S_c 优于 Es 扰动集中最差的解 S_w , 则将 S_c 代替 S_w 更新扰动集合 Es , 从而更新毗邻矩阵 Nf ; 在 Es 集合中找到当前最好解, 进行块变异获得迄今最好解 S_b ; 最后通过计算连续不改进的次数来决定是否增加候选邻域, 从而更新迭代次数, 转 Step 7。

Step 12: 输出贴片机元器件顺序的最好解和喂料器最优分配方案。

2 实验结果

为了验证本文算法能快速且有效地求出贴片机优化解, 本文在每块 PCB 板已知元器件种类和元器件数目并且在元器件种类和元器件数目相同情况下, 分别对 15 块 PCB 板利用文献 [6] 中的混合遗传算法 (HGA)、文献 [7] 中的禁忌-混合蛙跳算法、传统禁忌算法, 以及本文算法进行贴片机的贴装过程优化并进行性能比较。由于每次运行的结果不同, 针对每一块 PCB 板, 分别给出运行 10 次的统计结果。实验仿真中, 贴片机的贴片头个数 H 为 4, 贴片头吸嘴之间的间距为 16 mm, 供料槽之间的距离为 16 mm, 两侧分

别有 50 个共 100 个槽位(只考虑单边槽位). 本文的所有算法程序在 Pentium 2.93 GHz CPU, 3.45 GB 内存的 PC 机上用 Matlab 语言实现. 表 1 为本文所用 15 块 PCB 板的参数, 主要包括每块 PCB 板上元器件种类和元器件的数目.

表 1 15 块 PCB 板的参数

序号	种类	数目	序号	种类	数目	序号	种类	数目
1	5	24	6	4	60	11	22	121
2	14	34	7	6	72	12	43	162
3	19	49	8	15	93	13	34	171
4	20	50	9	29	110	14	16	189
5	8	57	10	20	117	15	35	195

本文算法的参数如下: 禁忌长度 $tl = 30$, 迭代次数 $into = 1000$, 候选集合 $cl = 400$, $L_1 = 400$, $L_2 = 100$, 连续不改进解最大值 $count = 200$, 集合 Es 存储的局部最好解的最大个数 $R = 8$, 扰动函数中 $\beta = 0.5$, 扰动交换对个数 $pr = \lceil n/4 \rceil$, 实验中多样化扰动参数主要参考文献[10]中的参数, 考虑算法的执行时间及求解问题的精度并结合实验得到传统禁忌算法和本文算法的参数一致. HGA 算法中的参数采用文献[6]中的参数, 禁忌-混合蛙跳算法采用文献[7]中的参数. 表 2 为 4 种算法求解质量的性能比较. 表 2 中: Y_{HGA} 为 HGA 算法的结果, $Y_{TS-SFLA}$ 为禁忌-混合蛙跳算法的结果, Y_{DDMTA} 为本文算法的结果, 主要包括算法运行 10 次的最好解, 平均最好解以及获得最好解的平均时间; Y_{TA} 表示传统禁忌算法的结果, 主要包括: 传统算法运行 10 次的最好解和平均最好解; 提高效率 1 为混合遗传算法和本文算法比较提高平均最好解和最好解的效率, 通过公式

$$(Y_{HGA} - Y_{DDMTA}) \times 100\% / Y_{HGA}$$

来计算; 提高效率 2 为禁忌-混合蛙跳算法和本文算法比较提高平均最好解和最好解的效率, 通过下式来计算:

$$(Y_{TS-SFLA} - Y_{DDMTA}) \times 100\% / Y_{TS-SFLA}.$$

由表 2 可以看出, 带变异的多样化扰动禁忌算法在平均解和最好解上 87% 超过传统禁忌算法, 这说明带扰动和变异的改进禁忌算法能有效求解贴片机贴装过程优化, 与传统的禁忌算法相比具有更好的求解精度, 同时也说明多样化扰动策略和块变异因子这两种策略能有效地扩大元器件数目较大的 PCB 贴装过程优化的搜索空间. 当然本文算法要得到更好的最好解需要比传统禁忌算法更长的搜索时间.

为了更好地验证带扰动和变异的禁忌搜索算法具有较好的求解质量和较快的求解速度, 将本文算法与文献[6]中的混合遗传算法、文献[7]中的禁忌-混合蛙跳算法进行比较. 由表 2 可见, 带扰动和变异的禁忌搜索算法与 HGA 算法相比平均效率提高了 14.02%, 最好解的效率提高了 12.49%; 与 TS-SFLA 算法相比平均效率提高了 2.36%, 最好解的效率提高了 1.95%, 因此带扰动和变异的禁忌搜索算法的全局搜索性能比 HGA 算法和 TS-SFLA 算法好. 此外随着 PCB 板上元器件数目的增多, 该算法的全局搜索性能越来越好, 这也说明随着元器件数目增多, 多样化扰动因子和变异因子扩大搜索空间的能力越来越好. 为了进一步验证本文算法能够较快速地求出最好解的性能, 本文将 3 种算法运行 10 次获得最好解的平均时间进行比较. 由表 2 可见, 文献[6]和[7]中的算法获

表 2 几种算法求解质量性能比较

序号	Y_{HGA}			$Y_{TS-SFLA}$			Y_{DDMTA}			Y_{TA}		提高效率 1/%		提高效率 2/%	
	平均/mm	最优/mm	时间/s	平均/mm	最优/mm	时间/s	平均/mm	最优/mm	时间/s	平均/mm	最优/mm	平均	最优	平均	最优
1	3 509	3 419	1 077	3 423	3 374	84	3 389	3 371	15	3 419	3 377	3.42	1.40	0.99	0.09
2	6 147	5 968	2 905	5 578	5 464	117	5 597	5 511	9	5 501	5 451	8.95	7.66	-0.34	-0.86
3	8 988	8 527	3 005	8 033	7 883	809	7 728	7 639	56	7 711	7 631	14.02	10.41	3.8	3.1
4	10 238	9 932	2 874	8 176	8 085	948	7 948	7 832	62	8 030	7 887	22.37	21.14	2.79	3.13
5	11 413	11 235	307	10 894	10 830	809	10 786	10 736	44	10 816	10 752	5.49	4.44	0.99	0.87
6	9 640	9 562	1 064	9 604	9 467	477	9 504	9 412	21	9 518	9 420	1.41	1.57	1.04	0.58
7	11 486	11 331	1 190	11 218	11 097	794	11 070	11 013	75	11 075	10 982	3.62	2.81	1.32	0.76
8	15 017	14 687	1 825	13 818	13 590	741	13 550	13 386	240	13 643	13 501	9.77	8.86	1.94	1.50
9	20 882	19 765	6 489	18 272	18 092	2 128	17 608	17 484	426	17 783	17 633	15.68	11.54	3.63	3.36
10	21 512	20 821	1 976	18 530	18 211	1 084	17 816	17 668	639	17 904	17 688	17.18	15.14	3.85	2.98
11	19 854	19 220	2 487	17 510	17 311	3 772	16 897	16 743	831	121	17 084	14.89	12.89	3.50	3.28
12	35 285	34 418	4 331	25 015	24 658	2 731	24 443	24 013	1 735	24 606	24 199	30.73	30.23	2.29	2.62
13	37 963	36 983	2 779	28 891	28 335	3 207	28 120	27 812	1 895	28 365	27 846	25.93	24.8	2.67	1.85
14	38 034	37 331	6 678	31 942	31 487	3 389	30 515	30 104	3 719	30 689	30 369	19.77	19.36	4.47	4.39
15	34 298	33 185	2 186	29 180	28 657	5 276	28 457	28 195	3 652	28 526	28 308	17.03	15.04	2.48	1.61
15 块 PCB 板平均效率												14.02	12.49	2.36	1.95

得最好解的平均时间长于本文算法. 然而随着元器件数目的增多, 这种优势慢慢变弱, 这主要由于多样化扰动函数中相邻信息矩阵明显增大, 算法的运行时间会明显增加. 尽管如此, 本文算法在求解贴片机优化最好解的速度比 HGA 算法和 TS-SFLA 快, 因此, 本文提出的带扰动和变异的禁忌搜索算法能快速有效地求出贴片机贴装优化解, 在求最好解的质量和求最好解速度这两方面都优越于文献 [6] 和 [7] 中的算法.

3 结 论

本文以多贴装头拱架式贴片机为研究对象, 利用带扰动和变异因子的改进禁忌搜索算法实现贴片机贴装过程优化. 该算法在考虑了两个子问题各自不同的特点和相互关联的基础上, 结合了禁忌算法的全局搜索能力, 以及多样化扰动因子和变异因子能进一步扩大搜索空间的优点. 为了验证算法的有效性, 以 15 块实际生产的 PCB 为实例进行测试, 实验结果表明所提出的算法能快速有效地获得较好的贴片机贴装优化解, 在求解质量上本文算法与文献 [6] 中 HGA 算法相比, 平均效率提高了 14.02%; 与文献 [7] 中 TS-SFLA 算法相比, 平均效率提高了 2.36%. 在求解速度上, 本文算法求贴片机贴装最好解的时间少于文献 [6] 和 [7] 中的算法.

参考文献(References)

- [1] 胡以静, 胡跃明, 吴忻生. 高速高精度贴片机的贴装效率优化方法[J]. 电子工艺技术, 2006, 27(4): 191-196.
(Hu Y J, Hu Y M, Wu Y S. Mounting optimization approaches of high-speed and high-precision surface mounting machines[J]. Electronics Process Technology, 2006, 27(4): 191-196.)
- [2] Liu H M, Hu Y M. A heuristic optimization algorithm for multi-head mounter[C]. The 22nd IEEE Int Symposium on Intelligent Control Part of IEEE Multi Conf on Systems and Control. Singapore: IEEE Press, 2007: 279-384.
- [3] Lee S H, Lee B H, Park T H Park. A hierarchical method to improve the productivity of a multi-head surface mounting machine[C]. Proc of the 1999 IEEE Int Conf on Robotics & Automation. Detroit: Michigan, 1999: 2110-2115.
- [4] Bard J F, Clayton R W, Feo T. A machine setup and component placement in printed circuit board assembly[J]. Int J of Flexible Manufacturing Systems, 1994, 6(1): 5-31.
- [5] Chen Y M, Lin Ch Ta. A particle swarm optimization approach to optimize component placement in printed circuit board assembly[J]. The Int J Advanced Manufacturing Technolog, 2007, 35(5/6): 610-620.
- [6] William Ho, Ping Ji. A hybrid genetic algorithm for component sequencing and feeder arrangement[J]. Intelligent Manufacturing, 2004, 15(15): 307-315.
- [7] Chen T M, Luo J X, Hu Y M. Component placement process optimization for multi-head surface mounting machine based on tabu search and improved shuffled frog leaping algorithm[C]. 3rd Int Workshop on Intelligent Systems and Applications. Wuhan, 2011: 43-46.
- [8] Fred G. Tabu search-part II[J]. ORSA J on Computing, 1990, 2(1): 4-32.
- [9] Fred G. Tabu search-PartI[J]. ORSA J on Computing, 1989, 1(3): 190-206.
- [10] Fred G, LüZH P, Hao J K. Diversification-driven tabu search for unconstrained binary quadratic problems[J]. 4OR-A Quarterly J of Operations Research, 2010, 8(3): 239-253.
- [11] 陈铁梅, 罗家祥. 禁忌搜索-混合蛙跳算法的贴片机优化[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(26): 14-20.
(Chen T M, Luo J X. Optimization for multi-head surface mounting machine based on tabu search and shuffled frog-leaping algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(26): 14-20.)
- [12] 傅成红, 符卓. 一种毗邻信息改进的车辆路径问题禁忌搜索算法[J]. 系统工程, 2010, 28(5): 81-84.
(Fu C H, Fu Z. An improved tabu search algorithm with adjacent information for capacitated vehicle routing problem[J]. Systems Engineering, 2010, 28(5): 81-84.)
- [13] Lu Z P, Hao J K. Critical element-cuided perturbation strategy for iterated local search[C]. Ninth European Conf on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization. Tübingen: Springer, 2009: 1-12.
- [14] 陈铁梅, 罗家祥, 胡跃明. 基于蚁群-蚁群算法的贴片机喂料器分配优化研究[J]. 控制与决策, 2011, 26(3): 929-932.
(Chen T M, Luo J X, Hu Y M. Research of feeder allocation of surface mounting machine based on ant-colony algorithm and fenetic algorithm[J]. Control and decision, 2011, 26(3): 929-932.)