

基于遗传算法的复合式贴片机贴装过程优化

杜轩¹, 李宗斌¹, 贾晓晨²

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 中国电子科学研究院 EDMC 中心, 100041, 北京)

摘要: 针对复合式贴片机的贴装过程优化问题, 将其分解为元件分配、供料器布置和元件取贴顺序 3 个子问题. 在分析实际工程应用的基础上, 以动臂的负荷平衡和最小移动距离为目标, 建立了双动臂转塔式贴片机的贴装过程集成优化模型, 采用遗传算法和元件分配启发式方法相结合的方式实现了贴装过程的优化. 算法中提出了一种分段二元实数编码方法, 在一条染色体中同时描述了元件分配、供料器布置和元件取贴顺序. 针对提出的编码方式, 采用改进的顺序交叉和自适应的变异操作, 结合轮盘赌选择和精英选择策略以及适应度函数的设计, 在满足贴片机运动机构约束条件的情况下, 使得遗传搜索能够快速进入有效解空间进行搜索. 实例计算结果表明, 该算法能实现双动臂转塔式贴片机贴装过程的优化, 从而提高印刷电路板的装配效率.

关键词: 印刷电路板装配; 遗传算法; 复合式贴片机

中图分类号: TH166; TP18 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)05-0080-05

Component Placement Process Optimization for Dual-Gantry Placement Machine Based on Hybrid Genetic Algorithm

DU Xuan¹, LI Zongbin¹, JIA Xiaochen²

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. EDMC Center of China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China)

Abstract: Based on the analysis of dual-gantry turret machine, the optimization problem of placement process is decomposed to component allocation, feeder arrangement and component placement sequence. Via an engineering analysis, an integrated optimization model of dual-gantry multi-head turret placement machine is formulated. The minimum displacement of arm and workload balance are taken as the objective. Combined with heuristic method and genetic algorithm (GA), hybrid GA (HGA) is adopted to optimize the placement process. A two-dimensional piece-wise coding method is proposed. In the individual chromosome, component allocation, feeder arrangement and component placement sequence is described simultaneously. HGA contains improved order crossover, adaptive mutation and contains a reasonable fitness function. Under the condition of constraint satisfying of movement mechanisms, HGA guarantees that the genetic research can enter the available solution space quickly and research the optimal solution. The component allocation, component placement sequence and feeder arrangement are optimized simultaneously to improve the printed circuit board assembly efficiency.

Keywords: printed circuit board assembly; genetic algorithm; dual-gantry placement machine

单台贴片机的贴装过程优化问题一般被分解为 元件贴装顺序和供料器布置优化 2 个子问题, 通常

可以看作旅行商问题(TSP)和二次分配问题(QAP)来求解^[1]. Duman 和 Or^[2]在假设元件贴装顺序预先确定的情况下,将供料器布置问题作为二次整数规划问题,并采用启发式算法来求解. Ong 和 Khoo^[3]在假定供料器布置已经确定的情况下,采用遗传算法(GA)实现了元件贴装顺序的优化. Wihelm 等^[4]采用一组启发式算法,首先确定供料器布置,然后再确定元件贴装顺序. Deo 等^[5]针对动臂式贴片机的元件贴装顺序和供料器布置问题,建立了一个非线性整数规划模型,但由于贴装路径容易产生回路,因此使得计算结果无效. Ellis 等人^[6]用一个替代函数把具有相近的 PCB 平台移动速度和贴装头旋转速度的元件组合在一起,当初始的供料器布置和元件贴装顺序确定之后,采用 2-opt 启发式算法搜索更优的解来改进贴装时间. William 和 Ji^[7]建立了元件的贴装顺序和供料器布置的整数规划模型,然后用混合遗传算法实现了转塔式贴片机上元件的贴装顺序和供料器布置的同时优化.

本文对动臂转塔式贴片机(也称复合式贴片机)的贴装过程^[8]进行了分析,将其贴装过程优化问题分解为元件分配、供料器布置和元件贴装顺序 3 个子问题,以动臂的负荷平衡和最小移动距离为目标,建立了双动臂复合式贴片机的贴装过程集成优化模型,并提出了一种分段二元实数编码方法,在一条染色体中同时描述元件分配、供料器布置和元件取贴顺序,将 GA 和元件分配启发式方法相结合,实现了贴装过程的优化.

1 模型建立

如图 1 所示,在贴装过程中,复合式贴片机^[9]的 2 个动臂能在各自的取贴循环中取贴多个元件,为避免动臂间相互碰撞,同一时间只能有一个动臂在 PCB 上贴装元件. 因此,除了优化元件的取贴顺序和不同类型元件在供料架上的布置,还必须考虑元件在不同供料架上的分配、平衡动臂在相邻取贴循环间拾取元件和贴装元件时的工作负荷,以减少在贴装过程中动臂间相互等待的时间.

多次计算及试验的结果表明,在优化以后,动臂在供料架上移动拾取元件和动臂在 PCB 上贴装元件时,动臂间移动的距离差异不大,可以认为在拾取元件和贴装元件时,动臂的移动速度是相同的. 因此,在文中直接使用动臂的移动距离来描述动臂的工作负荷,以便于问题的建模及求解.

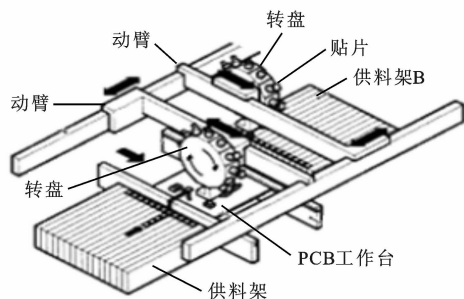


图1 双动臂复合式贴片机结构图

1.1 元件取贴顺序

采用合适的元件取贴顺序可以有效地缩短贴装过程中动臂移动的距离,在双动臂多头贴片机的贴装过程中,每个取贴循环都能对多个元件进行拾取和贴装操作,实际上将 PCB 上需要组装的元件分为多个元件组,元件的取贴顺序包括元件组内各元件的取贴顺序和元件组之间的取贴顺序.

1.2 供料器布置与元件分配

由于 PCB 上不同类型元件在供料架上的布置也会影响动臂在元件取贴时的移动距离,因此供料器布置问题需要解决的是不同类型的元件在供料架上布置的位置和顺序. 不同的元件布置策略和元件尺寸对元件在供料架上的布置会产生重要影响,但为了简化问题,很多文献都以元件具有相同的尺寸、同一种元件只在供料架上布置一次等假设为前提,虽然能够实现贴装过程的优化,但是影响了优化结果的实用性. 在实际的 PCB 装配中,复合式贴片机具有较大的元件贴装范围,而不同尺寸的元件所用供料器的宽度是不一致的,所以必须考虑到元件尺寸对供料器布置的影响^[9].

由 2 个动臂分别在各自对应的供料架上拾取元件,元件分配问题决定了 PCB 上的元件由哪个动臂进行取贴,合理地将元件分配给不同的动臂来进行元件的取贴操作是双动臂复合式贴片机贴装过程优化的关键,它能减少相邻取贴循环间动臂的等待时间. 确定了元件的分配才能确定供料器在供料架上的布置,进而确定各取贴循环中的元件和取贴循环的顺序.

1.3 优化模型

通过解决元件分配、供料器布置和元件取贴顺序的问题,不仅能减少取贴元件时动臂移动的距离,还可以平衡动臂在不同取贴循环间的工作负荷,从而缩短在 PCB 贴装过程中动臂的移动距离和等待时间,实现贴装过程的优化.

双动臂复合式贴片机的贴装过程优化模型可以用下式表达

$$\begin{aligned} \min d = & \sum_{k=1}^{K-1} \max(d_p^k, d_f^{k+1}) = \\ & \sum_{k=1}^{K-1} \max \left[\begin{aligned} & \sum_{i=1}^H \sum_{j=2}^H d_{ij}^k x_{ij} + d_{pf} \\ & \sum_{h=1}^{H-1} |f_h^{k+1} - f_{h+1}^{k+1}| + D y_{h,h+1} + d_{fp} \end{aligned} \right] \\ & k = 1, 2, \dots, K-1 \end{aligned} \quad (1)$$

满足

$$\sum_{i=1}^H x_{ij} = 1, \sum_{j=1}^H x_{ij} = 1, \sum_{i=1}^H y_{ij} = 1, \sum_{j=1}^H y_{ij} = 1$$

$$j = 1, 2, \dots, H, i = 1, 2, \dots, H-1 \quad (2)$$

$$d_{ij} = \max(|x_j - x_i|, |y_j - y_i|) \quad (3)$$

$$\sum_{r=1}^N x_{rs} = 1, \sum_{s=1}^N x_{rs} = 1, \sum_{l=1}^L x_{il} \geq 1 \quad (4)$$

式中: d 表示动臂移动的距离; N 表示 PCB 上元件的数量; L 表示供料架上供料器位置的数量; K 表示取贴循环的次数; k 表示取贴循环的编号; H 表示一个转盘上贴装头的数量; h 表示一个循环内拾取元件顺序的编号; d_p^k 表示第 k 次循环中贴装元件时动臂在 PCB 上移动的距离; d_f^{k+1} 表示第 $k+1$ 次循环中拾取元件时动臂在供料架上移动的距离; d_{fp} 表示从当前循环中最后一个拾取元件位置到第 1 个贴装位置之间的距离; d_{pf} 表示从当前循环中最后一个贴装元件位置到下一个循环中第 1 个拾取贴装位置之间的距离; f_h^{k+1} 表示在组内第 h 个元件所在供料架上的位置; d_{ij}^k 表示组内 2 个相邻贴装元件间的动臂移动距离; $x_{ij} = 1$ 表示元件 j 在元件 i 后贴装, 否则 $x_{ij} = 0$; $y_{ij} = 1$ 表示元件 i, j 在一个供料架上, 否则 $y_{ij} = 0$; $x_{il} = 1$ 表示元件 i 属于元件类型 t , 位于供料器位置 l 中, 否则为 0; D 表示一个给定的大距离值, $D \gg d_{ij}$. 动臂 A 只能在供料架 A 上拾取元件, 动臂 B 只能在供料架 B 上拾取元件, 当供料架上的元件布置导致元件分配和取贴循环中的元件拾取位置冲突出现不可行解时, 施加一个惩罚因子, 使得动臂移动距离增加一个较大的值。

2 混合遗传算法

本文所描述的复合式贴片机的贴装过程优化问题, 包含了元件分配、供料器布置和元件贴装顺序优化 3 个相互联系子问题, 问题的优化模型中包含了动臂数量、供料架上供料器位置的最大数量、元件

的数量、元件的种类和元件在 PCB 上的位置等多个参数. 同时, 元件间尺寸的差异、不同元件的布置策略等影响实际贴装过程的各种因素更加大了优化求解的难度. 实现这个问题的优化求解远比传统的 TSP 和 QAP 问题要困难, 但采用合适的方法实现这些子问题的同时优化也是可行的: ① 基于搜索的优化方法, GA 能通过相应的编码方法, 很好地解决供料器布置和元件贴装顺序这样的复杂组合优化问题; ② 对 GA 的遗传操作进行改进, 并与启发式方法结合, 能解决供料器布置和元件分配之间的约束优化; ③ 元件尺寸、元件重复布置等问题能通过适当的编码方法进行描述. 因此, 本文提出采用 GA 来实现多动臂复合式贴片机的贴装过程优化, 用元件分配启发式算法和近邻法(NNH)初始化种群, 用分段二元编码的方式结合改进的遗传操作方法, 实现了双动臂转塔式贴片机的贴装过程优化。

2.1 编码与解码

本文中染色体的具体编码方法如图 2 所示, 元件的顺序部分通过元件编号在染色体中表示元件的贴装顺序, 供料器布置部分用元件类型编号和供料器位置编号表示不同类型元件在供料架上布置的顺序和位置, 并通过元件类型编号描述元件贴装顺序和供料器布置之间的联系。

元件 编号	元件贴装顺序										供料器布置							元件类型
	1	8	4	10	9	7	5	3	2	6	1	2	3	4	5	1	2	
元件 类型	1	1	2	3	4	2	5	6	2	1	3	4	5	6	14	15	16	17
																		供料器位置编号

图 2 染色体编码示意图

2.2 种群初始化

本文算法在种群初始化时, 对元件顺序部分采用了 NNH 法生成初始的元件顺序, 对供料器布置部分染色体采用了元件分配启发式方法. 具体步骤如下。

步骤 1 计算元件分组数量, $K = N/H$.

步骤 2 将 PCB 上各种类型元件, 按元件数量的降序排列, 生成 PCB 元件类型表。

步骤 3 根据元件分组数量和元件类型表中不同类型元件的数量, 初步确定每个供料架上的最大元件数量 N_1 和 N_2 。

步骤 4 初始化每个供料架上的元件数量为 $p_1 = 0$, $p_2 = 0$. 建立 2 个供料架的元件类型列表, 初始化为空表。

步骤 5 选择 PCB 元件类型列表中的第 1 个元件类型, 将其分配到元件数量较小的供料架上, 并计算将

这个元件类型分配到该供料架上以后的元件的数量.判断:①如果 $p_1 < N_1$ 且 $p_2 < N_2$, 则将该元件类型添加到该供料架的元件类型列表中, 修改 p_1 (p_2), 将分配的元件类型从 PCB 元件类型列表中删除, 并转步骤 5; ②如果 $p_1 > N_1$, 或 $p_2 > N_2$, 则将该元件类型添加到另一个供料架的元件类型列表中, 转步骤 5; ③如果 $p_1 = N_1$, 或者 $p_2 = N_2$, 则将该元件类型添加到该供料架的元件类型列表中, 修改 p_1 (p_2), 将分配的元件类型从元件类型列表中删除, 将 PCB 元件类型表中余下的元件全部添加到另一个供料架上的元件类型表中, 转步骤 6.

步骤 6 按元件分配的结果, 将各供料架元件类型列表中的元件随机布置到各自供料架的各个供料器位置中, 生成供料器布置部分染色体.

步骤 7 重复步骤 6, 结合元件顺序初始化, 生成初始种群.

2.3 遗传操作

2.3.1 选择策略与交叉操作 本文使用“轮盘赌”选择法和最优保存策略来进行个体的选择^[8]. 交叉操作针对本文提出的编码方式, 为了保证染色体的有效性, 算法中采用了改进的顺序交叉方法. 在交叉操作执行过程中, 分别对染色体的元件取贴顺序部分和供料器布置部分进行操作. 新生成的 2 个子个体分别保留了 2 个父代染色体中的部分供料器布置的位置和顺序信息, 实现了基因重组. 父代和子代染色体中不同供料器的数量一致, 只是排列顺序和位置发生了改变, 如果由于元件尺寸不同造成供料器布置干涉, 不同供料器所在位置的编号可根据不同类型的元件在供料架上的排列顺序重新调整生成. 对元件顺序部分, 由于部分元件的顺序发生了变化, 因此基因值在染色体中不重复.

2.3.2 变异 本文采用交换变异和翻转变异的方法, 不同的变异方法和较多的新染色体能够减少过早陷入局部最优解的可能性. 在 GA 计算过程中, 随着迭代次数的增加, 染色体之间的差异逐渐减小, 此时加大变异率, 有助于脱离局部最优, 最终获得全局最优解. 为此, 本文采用了自适应的变异率, 每次变异都会根据自适应的变异率分别选择染色体进行这 2 种变异.

2.3.3 适应度函数 算法的适应度函数根据下式进行计算

$$F = Q - d; \quad d = \sum_{k=1}^{K-1} \max(d_p^k, d_f^{k+1}) \quad (5)$$

式中: Q 表示一个给定的阈值. 两动臂在取贴循环中

拾取和贴装元件时的移动距离越短, 适应度函数值就越大. 该适应度函数结合改进的遗传操作, 能加快收敛的速度, 保证遗传搜索能快速进入有效解空间, 并能一直在有效解空间中进行优化搜索.

3 实例分析

用本文提出的混合遗传算法(HGA), 将一块需要贴装 65 个元件的 PCB 作为计算实例进行计算. 算法的基本参数: 种群大小为 50, 遗传代数为 1 200, 交叉率为 0.6, 变异率的变化范围为 0.2~0.4, PCB 上有 22 种类型的元件, 重复计算 20 次, 并取平均值. 图 3 显示了采用不同的初始化和变异方法时, 每代种群的平均动臂的最大负荷变化曲线.

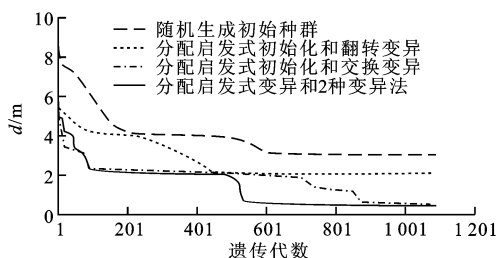


图3 动臂移动距离的计算结果比较

在遗传搜索过程中, 由于编码的特殊结构, 交换式变异比翻转变异的效果明显, 将这 2 种方法结合起来使用, 则可以加快算法收敛的速度, 有助于得到更好的优化结果. 通过对元件分配、供料器布置和元件取贴顺序的优化, 缩短了动臂在 PCB 装配过程中的总移动距离, 同时减小了 2 个动臂在相邻取贴循环间动臂负荷的差异.

表 1 列出了本文提出的 HGA 和分步解法^[3] (DA) 的比较结果. 分步求解虽然也能得到有效解, 但是没有考虑到 3 个子问题之间的相互影响. 通过对 5 块 PCB 的计算结果比较, 本文提出的集成优化方法明显优于分步求解方法. 表 2 列出了本文提出的 HGA 的贴装过程优化结果和 S20 贴片机实际贴装数据的比较. 比较结果表明, 采用本文的混合遗传算法能够明显缩短 PCB 贴装过程中动臂的移动距离, 从而可以有效地减少 PCB 的贴装时间, 提高 PCB 装配的生产效率.

4 结 论

本文对复合式贴片机的运动机构和贴装过程进行了分析, 根据贴装过程的特点, 将贴装过程优化分解为元件分配、供料器布置和元件取贴顺序优化问

表 1 2 种算法的计算结果比较

PCB	元件数	类型数	HGA		DA	
			d_m/mm	d/mm	d_m/mm	d/mm
1	50	10	380	3 095	390	3 395
2	54	18	455	4 287	490	4 441
3	65	21	365	3 855	379	4 113
4	66	20	465	5 030	515	5 825
5	98	25	1 015	11 205	1 045	11 475

d_m :动臂在单个取贴循环中的最大移动距离.

表 2 本文算法与计算结果实际生产数据的比较

PCB	元件数	类型数	HGA		S20	Δd
			d_m/mm	d/mm	d/mm	
1	93	18	1 375	12 519	15 279	2 760
2	112	19	2 030	17 783	21 469	3 686
3	108	12	1 510	11 955	15 036	3 081
4	98	25	1 015	11 205	12 475	1 270

Δd :HGA 与 S20 实际贴装移动距离的差值.

题,并考虑了 PCB 组装中元件尺寸、元件布置策略等实际影响因素,以减小动臂的移动距离和负荷平衡为目标,建立了多动臂转塔式贴片机贴装过程集成优化模型.针对多动臂转塔式贴片机贴装过程的优化问题,充分发挥了 GA 的优势,用元件分配启发式方法对遗传种群进行了初始化,用分段二元编码方法描述了多动臂转塔式贴片机的贴装过程,结合改进的遗传操作方法和适应度函数解决了运动机构之间的约束问题,从而保证了遗传搜索能在有效解范围内进行搜索.通过实例计算证明,采用本文的方法能够实现元件分配、供料器布置和元件取贴顺序的同时优化,且得到了较好的优化结果.

参考文献:

[1] WILLIAM H, JI Ping. A genetic algorithm to optimize the component placement process in PCB assembly [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 26(12): 1397-1401.

[2] DUMAN E, OR I. The quadratic assignment problem in the context of the printed circuit board assembly process [J]. Computer and Operations Research, 2007, 34(1):163-179.

[3] ONG N S, KHOO L P. Sequence placement planning for high-speed PCB assembly machine [J]. Integrated Manufacturing Systems, 2002, 13(1):35-46.

[4] WILHELM W E, TARMY P K. Circuit card assembly on tandem turret-type placement machines [J]. IIE Transactions, 2003, 35(7):627-645.

[5] DEO S, JAVADPOUR R, KNAPP G M. Multiple setup PCB assembly planning using genetic algorithms [J]. Computers and Industrial Engineering, 2002, 42(1):1-16.

[6] ELLISS K P, VITES F J, KOBZA J E. Optimizing the performance of a surface mount placement machine [J]. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, 2001, 24(3): 160-170.

[7] WILLIAM H, JI Ping. Component scheduling for chip shooter machines: a hybrid genetic algorithm approach [J]. Computers and Operations Research, 2003, 30(14): 2175-2189.

[8] 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]. 西安交通大学学报, 2008, 42(3):295-299.

DU Xuan, LI Zongbin, GAO Xinqin. Component placement process optimization for chip shooter machine based on genetic algorithm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(3):295-299.

[9] SIEMENS. Specification siplace S-27 HM [EB/OL]. (2007-08-01)[2007-10-01]. <http://ea.automation.siemens.com>.

(编辑 管咏梅)