

基于遗传算法的转塔式贴片机贴装过程优化

杜轩, 李宗斌, 高新勤, 闫利军

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 在转塔式贴片机的贴片过程中, 元件贴装顺序和元件在供料槽中的布置是影响转塔式贴片机贴装时间的主要因素. 在分析实际工程应用的基础上, 建立了转塔式贴片机的集成优化模型, 在改进的遗传算法中, 提出了一种二维符号编码方法, 用元件编号描述元件贴装顺序, 用供料槽编号描述元件在供料架中的布置情况, 并用元件类型编码实现了两者之间的联系. 针对提出的编码方式, 采用了基于顺序的交叉和自适应的变异操作, 并在算法内采用了并行结构, 结合局部搜索策略, 实现了元件贴装顺序和供料槽布置可同时优化. 与其他方法的比较结果表明, 该算法可实现贴装过程的优化, 因此提高了印刷电路板的组装效率.

关键词: 元件贴装顺序; 供料槽布置; 遗传算法; 转塔式贴片机

中图分类号: TH166; TP18 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)03-0295-05

Component Placement Process Optimization for Chip Shooter Machine Based on Genetic Algorithm

DU Xuan, LI Zongbin, GAO Xinqin, YAN Lijun

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

Abstract: The component placement sequence and feeder arrangement are the critical factors determining assembly time of chip shooter machine. Based on the engineering analysis, an integrated optimization model of chip shooter machine is formulated, and a two-dimensional coding method is proposed with improved genetic algorithm (IGA). In the individual chromosome, the component number describes the component placement sequence, the feeder number describes the feeder arrangement, and the component type number describes the relation between the component placement sequence and feeder arrangement. The IGA with order-based crossover, adaptive mutation and local search, contains a parallel structure. The component placement sequence and the feeder arrangement are optimized simultaneously to improve the assembly efficiency.

Keywords: component placement sequence; feeder arrangement; genetic algorithm; chip shooter machine

随着电子产品组装技术的发展, 表面贴装技术(SMT)正在成为印刷电路板(PCB)电路组装技术的主流. SMT能够使产品结构更加紧密, 组装速度更快. 为了减少电子元件贴装过程中PCB的装配时间, 提高生产效益, PCB组装的优化问题便受到了人们越来越多的关注^[1-3]. 许多研究工作者将PCB的组装优化问题分解为子问题来进行求解, 对单台贴片机的贴装过程优化主要包括以下2个子问题:

① 电子元件的贴装顺序; ② 电子元件在供料槽中的布置问题(简称供料槽布置问题).

在这2个子问题中, 元件的贴装顺序可视为旅行商问题(TSP), 元件在供料槽中的布置问题可视为二次分配问题(QAP). 目前, 国内外学者均采用不同的方法来解决元件贴装顺序和供料槽布置的问题. 文献[4]在假定其中的一个子问题已经解决的情况下解决另一个子问题, 文献[5]用单头贴片机对多

贴装头的转塔式贴片机进行了模拟,并设计了一种启发式方法来求解,文献[6]介绍了一个基于规则的框架系统,结合启发式方法用于解决转塔式贴片机的元件贴装顺序和供料槽布置问题.由于遗传算法(GA)在求解 TSP 和 QAP 问题方面具有良好的适应性,近年来在贴片机贴装过程优化中得到了广泛的应用^[1,3,7-9].

本文分析了转塔式贴片机的运动机构,建立了转塔式贴片机贴装过程的集成数学模型,并在模型中描述了电子元件在贴装过程中,元件尺寸和元件多次布置等工程实际问题对供料槽布置和元件贴装顺序的影响,用改进的遗传算法(IGA)同时解决了转塔式贴片机在贴装过程中,元件贴装顺序和供料槽布置的优化问题.

1 转塔式贴片机结构

贴片机类型较多,各自具有不同的运动机构,本文所讨论的转塔式贴片机可以同时进行元件的贴装和拾取.如图1所示,转塔式贴片机有一个可以移动的供料架,供料架上有多个供料槽,元件放置在供料槽中,有一个能够实现 x - y 方向移动装载 PCB 的工作台,还有一个可旋转的转盘,转盘上装有多个贴装头,贴装头通过上、下运动来实现元件的拾取和贴装.在每一个贴装头上都有几个不同型号的吸嘴,根据元件的尺寸,可以自动更换不同的吸嘴,转塔式贴片机的 PCB 工作台移动、供料架移动和转盘转动是同时进行的.

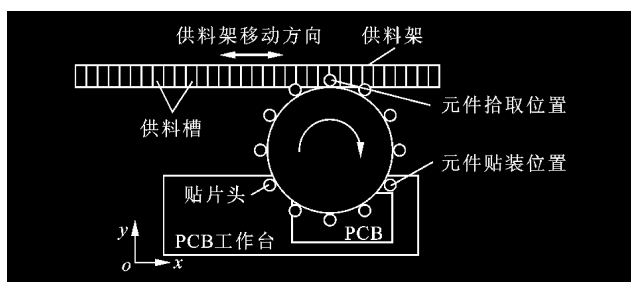


图1 转塔式贴片机运动机构示意图

2 转塔式贴片机贴装过程模型

在一个元件的贴装过程中,转塔式贴片机并行运动机构的时间包括 PCB 工作台沿 x - y 方向移动的时间、供料架的移动时间和转盘旋转时间,其中最长的一个决定了这个元件的贴装时间,而 PCB 上全部元件贴装时间的总和就是 PCB 的组装时间.解决 PCB 组装过程优化问题的目标就是减少 PCB 的组装时间,以提高贴片机的效率.这类贴片机的优化问

题^[1]为 MBTD(Moving-Board-with-Time-Delay).

2.1 PCB 工作台的移动

装载 PCB 的工作台在 x 和 y 方向上同时移动,从第 $i-1$ 个元件的贴装点移动到第 i 个元件的贴装点的移动时间为

$$t_i(s) = \max\left(\frac{|x_s - x_{s-1}|}{V_x}, \frac{|y_s - y_{s-1}|}{V_y}\right) \quad (1)$$

$$s = 1, 2, \dots, N$$

式中: V_x 是 x 方向上的移动速度; V_y 是 y 方向上的移动速度; s 表示元件贴装顺序的编号; N 表示 PCB 上元件的数量.

2.2 供料架移动

供料架的移动时间与相邻拾取元件所在供料架上位置之间的供料槽个数相关,转塔式贴片机的供料架移动一个供料槽位置的时间是固定的.供料架的移动时间为

$$t_f(s) = (F(s) - F(s-1))t_s$$

$$s = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2)$$

式中: $F(s)$ 、 $F(s-1)$ 分别是第 s 个和第 $s-1$ 个元件所在供料槽的位置.

在 PCB 组装中,贴装元件的尺寸存在着差异,大尺寸的元件有可能会占用 2 个或更多的供料槽位置,使得供料架上相邻元件之间的供料槽数量可能并不相同.按式(2)计算供料架的移动时间时,必须清楚各种类型的元件所在供料槽的位置,在实际组装中,为了提高效率,往往将一些贴装量大的同一类型元件布置在多个供料槽中.因此,在组装过程中,就必须考虑从多个供料槽中选择一个合适的供料槽拾取元件的问题.具体的方法如下.

(1) 设元件贴装顺序中的第 $s-1$ 、 s 和 $s+1$ 个元件中,所在供料槽的编号分别为 $F(s-1)$ 、 $F_1(s)$ 、 $F_2(s)$ 和 $F(s+1)$, $F_1(s)$ 、 $F_2(s)$ 表示在 2 个供料槽中同时放置了第 s 个元件.

(2) 用式(2)计算供料槽的距离,当

$$|F(s-1) - F_1(s)| + |F_1(s) - F(s+1)| < |F(s-1) - F_2(s)| + |F_2(s) - F(s+1)| \quad (3)$$

时,从供料槽 $F_1(s)$ 中拾取第 s 个元件,否则从供料槽 $F_2(s)$ 中拾取第 s 个元件.

2.3 转盘转动

设转塔式贴片机转盘上有 M 个贴装头,转盘转动时间 t_r 是指转盘每转动一个角度 ($360^\circ/M$) 所需的时间.当贴装某个元件时,如果工作台的移动时间和供料架移动时间均小于转盘的转动时间,转盘的

转动时间就是这个元件的主要贴装时间. 否则, 就不用考虑转盘的转动时间.

除了上述的 3 个并行运动机构外, 转塔式贴片机还包括贴装头在垂直方向上的运动, 即从供料槽中拾取元件和将元件贴装到 PCB 上. 因此, 在元件的贴装时间中还包含贴装头从供料槽中拾取元件和将元件贴到 PCB 上的元件位置所需的时间 t_p .

2.4 PCB 组装时间的优化数学模型

转塔式贴片机的单个元件的贴装时间为

$$T(s) = \max\{t_t(s), t_f(s), t_r\} + t_p \quad (4)$$

由于 PCB、供料槽和转盘同时移动, 元件贴装顺序的问题和供料槽的布置问题相互联系, 因此传统的 TSP 和 QAP 模型不能很好地表达 MBTD 中的元件贴装顺序和供料槽布置的问题, 如果这 2 个问题各自独立求解, 则必须以另一个问题的解为前提. 为了实现转塔式贴片机的贴片过程优化, 必须建立包含元件贴装顺序和供料槽布置问题的集成优化模型, 一般以减少 PCB 的组装时间为目标, 并进行优化. 具体优化数学模型可用一个 0-1 的整数规划模型表示为

$$\min T = t_p + \sum_{s=1}^N \max \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N t_{ij} x_{i(s-1)} x_{js} \\ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^P \sum_{h=1}^L \sum_{k=1}^L t_{ijk} x_{i(s+M/2)} x_{j(s+M/2+1)} x_{th} x_{ijk} \\ t_r \end{array} \right. \quad (5)$$

满足约束

$$\sum_{i=1}^N x_{is} = 1; \sum_{s=1}^N x_{is} = 1 \quad (6)$$

$$\sum_{h=1}^L x_{th} \geq 1 \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^L x_{ijk} \geq 1 \quad (8)$$

$$i \neq j; \quad P \leq L$$

$i = 1, 2, \dots, N$; $j = 1, 2, \dots, N$; $s = 1, 2, \dots, N$
 $t = 1, 2, \dots, P$; $h = 1, 2, \dots, L$; $k = 1, 2, \dots, L$
 式中: M 表示贴装头的数量; L 表示供料槽的数量; P 表示元件类型数量; i, j 表示元件编号; h, k 表示供料槽编号. $x_{is} = 1$, 表示元件 i 的贴装顺序是 s , 否则为 0; $x_{th} = 1$, 表示元件 i 属于元件类型 t , 位于供料槽 h 中, 否则为 0.

式(6)表示每个元件在贴装过程中只在一个贴装位置上贴装一次, 式(7)和式(8)表示每种类型的

元件至少在一个供料槽中放置一次. 如果一个元件只在一个供料槽中布置, 则 $P=L$, 而本文考虑了一个元件在多个供料槽中布置, 同时还考虑了元件尺寸对供料槽布置的影响, 即一个元件可能占据多个供料槽, 所以 $P \leq L$, 而且在计算供料架的移动时间时, 元件所在供料槽的编号是不连续的. 在实际贴装过程中, 当 PCB 移动到第 1 个元件的贴装位置时, 转盘上已经有 $M/2$ 个元件被拾取, 在向 PCB 上贴装第 1 个元件时, 转盘上的第 $(M/2+1)$ 个贴装头从供料槽中拾取第 $(M/2+1)$ 个元件, 模型中描述了取贴元件之间的顺序差, 即 $M/2$.

3 算法设计

3.1 染色体编码与解码

编码与解码是用 GA 解决问题的关键, 为了实现 PCB 组装过程的优化, 需要在染色体中同时表示元件的贴装顺序和供料槽的布置. 元件的贴装顺序可在染色体中用元件的编号来表示, 而供料槽的布置是和元件的类型对应的, 由于 PCB 在实际组装中应考虑元件的尺寸问题, 以及频繁使用的相同类型元件在供料架上多次布置的情况, 因此用供料槽的编号能更好地表达不同类型的元件在供料架上的位置. 为了表达 PCB 组装中的各个子问题及其相互间的联系, 本文采用了二维符号编码的方式(见图 2).

元件顺序部分										供料槽布置部分					
元 件 编 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6
	1	1	1	2	2	3	4	5	6	1	2	3	5	8	10
元 件 类 型															

图 2 染色体编码结构示意图

采用评价函数求适应度值时, 先利用元件的编号提取贴装点的位置坐标, 然后计算工作台的移动时间, 供料槽的移动时间则可以利用染色体中提供的供料槽编号进行计算. 元件编号和供料槽编号之间可以用元件类型来实现对应关系, 这样就能在染色体中同时描述元件的贴装顺序问题和供料槽的布置问题及其相互间的联系, 以便于将这 2 个问题作为一个整体来同时求解.

由于不同类型元件在供料槽中占用供料槽的数量不同, 当不同类型元件在供料槽中布置的顺序改变时, 其对应的供料槽编号也会发生较大变化. 在染色体解码时, 必须根据供料槽编码矩阵的元件类型及顺序来重新计算对应供料槽的编号.

如果在供料架上的 2 个供料槽中放置了相同类

型的元件,在计算供料架的移动时间时,可以根据染色体中的供料槽来布置部分编码,用同一类型元件对应的不同供料槽编号进行计算.选取供料架移动所需时间较小的一个供料槽来拾取元件,具体选择方法见式(3).

3.2 遗传操作和评价函数

3.2.1 评价函数 为了实现元件的贴装顺序和供料槽布置问题的同时优化,应以最小化 PCB 的装配时间为目标,在建立评价函数时,必须考虑影响装配时间的各种因素.为了简化模型,不考虑取贴装时间的评价函数为

$$T = \sum_{s=1}^N \max \left(\frac{|x(s) - x(s-1)|}{V_x}; \frac{|y(s) - y(s-1)|}{V_y} \right); \\ \left(F\left(s + \frac{M}{2} + 1\right) - F\left(s + \frac{M}{2}\right) \right) t_s; t_r$$

3.2.2 选择策略 本文使用了轮盘赌选择法和最优保存策略来进行个体的选择.采用轮盘赌选择法从父代种群中选择进行交叉和变异操作的个体,交叉和变异产生的新个体和父代种群中的个体同时采用最优选择策略,用适应度较高的个体生成下一代种群,并保持种群数量不变.

3.2.3 交叉和变异 针对本文提出的二维矩阵编码,采用了基于顺序的交叉方法,以及交换变异和翻转变异的变异方法.在交叉操作执行过程中,元件编号部分的染色体能保证元件编号不重复,重新生成的染色体都能对应一个有效的元件贴装顺序,且元件类型和元件编号相对应.供料槽部分的染色体能够保证父代和子代中不同元件类型的数量一致,供料槽编号则根据元件类型编码重新生成.

在 GA 计算过程中,随着遗传次数的增加,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,在计算过程中,根据相邻 2 代种群的平均适应度值的差值 $\Delta F(i)$ 来决定变异率的大小.针对 GA 局部搜索能力较差的缺陷,本文采用了三点交换操作方式来改进 GA 局部搜索的能力.

3.3 算法步骤

算法的具体实现步骤如下:

(1)设置 GA 参数,包括种群数量(P_n)、遗传代数(I_n)、交叉概率(P_c)和变异概率(P_m);

(2)按照二维编码方式产生 P_n 个初始染色体,

染色体的元件贴装顺序部分采用近邻法产生,供料槽布置部分则随机产生;

(3)计算种群中染色体的适应度值;

(4)用轮盘赌法在父辈种群中选择交叉染色体,对其进行基于顺序的交叉操作;

(5)用轮盘赌法在父辈种群中选择变异染色体,对其进行交换变异和翻转变异操作,在计算过程中采用自适应的变异率;

(6)计算通过变异和交叉新生成的染色体的适应度值;

(7)将新生成的染色体和父辈中的染色体进行比较,去除重复的染色体,保留最好的 P_n 个染色体;

(8)用三点交换操作方式对新生成的染色体进行局部搜索,生成新一代种群;

(9)重复步骤(3)至(8),直至执行完 I_n 代遗传.

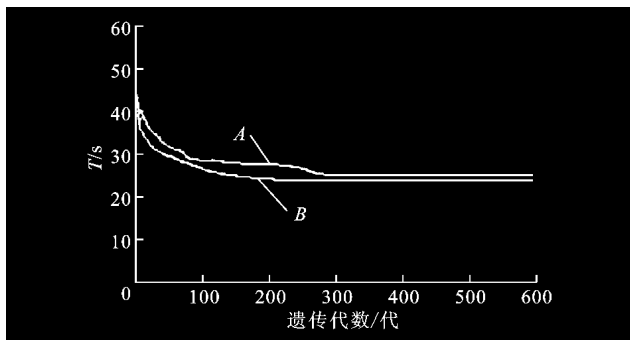
为了用 GA 同时解决元件贴装顺序和供料槽的布置问题,实现转塔式贴片机的贴装过程优化,本文对传统的 GA 进行了改进:①采用 $2 \times n$ 的整数矩阵编码方法,因为它能够很好地表达元件的贴装顺序和供料槽的布置及其联系;②结合新的编码方式,改进的 GA 引入了三点交换操作方式进行局部搜索,采用轮盘赌选择法和最优保存策略进行选择操作;③将最优选择策略和轮盘赌选择法相结合,采用自适应的变异率进行交换变异和翻转变异操作;④本算法在进行交叉和变异操作时,均从父辈染色体中按交叉概率和变异概率选取交叉染色体和变异染色体.因此,在算法执行过程中体现了并行的思想,更有利于优良模式的遗传和生成.

4 实例分析

首先,利用本文提出的改进遗传算法(IGA),对文献[1]中提供的计算实例进行计算,计算结果如图3所示.本文的 IGA 和 GA 与 HGA^[7] 计算结果的比较见表1.

表1 计算结果比较

比较项	GA	HGA	IGA
初始种群平均值/s	81.39	35.16	44.27
初始种群最小值/s	72.58	30.00	37.75
最后一代平均值/s	34.25	27.96	24.99
T/s	33.58	27.58	24.99
种群大小/个	100	50	40
遗传代数	1 650	2 100	319



A:1种元件只放置在1个供料槽中的计算结果;B:3种元件分别放置在2个供料槽中的计算结果

图3 实例计算结果

研究结果显示,本文所提出的 IGA 在种群数量、收敛速度和计算结果等方面要明显优于另外 2 种算法。此外,最终的优化结果($T=24.99\text{ s}$)还优于文献[1]($T=51\text{ s}$)、文献[8]($T=25.5\text{ s}$)和文献[9]($T=32.2\text{ s}$)得到的最优贴装时间。

在考虑了将 3 种贴装最频繁的元件分别放置在 2 个供料槽中的情况后,计算结果有明显改进,最优贴装时间为 23.5 s ,因此缩短了 PCB 的组装时间。特别是在大批量组装 PCB 时,可进一步提高贴装效率。此外,本算法还能考虑不同元件尺寸对供料槽布置的影响,使得计算结果具有更好的实用性。通过对某大型转塔式贴片机进行实测,得到了转塔式贴片机运动机构的实际计算参数。利用 IGA 对一块实际 PCB 进行了贴装过程的优化,在这块 PCB 上有 30 个元件,其中有 18 种不同类型的元件(有 3 种不同的尺寸),PCB 上元件位置等信息从 Protel 的 PCB 图形文件中提取。考虑元件尺寸对供料槽布置的影响,1 种元件能在 2 个供料槽中拾取,但可以同时得到元件的贴装顺序和供料槽布置的优化结果。通过测试,PCB 的贴装时间为 4.96 s ,与该设备的自动设置结果相比,其时间缩短了 10% 以上,而且不影响 PCB 的贴装质量。

5 结束语

本文对转塔式贴片机的运动机构进行了分析,在转塔式贴片机的贴装过程中,同时考虑了元件的贴装顺序和供料槽的布置问题。同时,还考虑了 PCB 组装中元件尺寸对供料槽布置的影响,以及在供料架上将频繁贴装的元件放置到多个供料槽的情

况,建立了转塔式贴片机贴装过程的集成优化模型,用改进的遗传算法同时解决了元件贴装顺序问题和供料槽布置问题。通过实例的比较,证明采用本文的方法能够得到较好的优化结果。

参考文献:

- [1] LEU M C, WONG H, JI Z. Planning of component placement/insertion sequence and feeder setup in PCB assembly using genetic algorithm [J]. Journal of Electronic Packaging, 1993, 115(4):424-432.
- [2] 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.
- [3] MONYER L K, GUPTA S M. Simultaneous component sequencing and feeder assignment for high speed chip shooter machines [J]. Journal of Electronics Manufacturing [J], 1996, 6(4):271-305.
- [4] DIDOS A, NELSON P C. Optimization of high-mix printed circuit card assembly using genetic algorithms [J]. Annals of Operations Research, 1997, 75(1):303-324.
- [5] SOHN J, PARK S. Efficient operation of a surface mounting machine with a multi-head turret [J]. International Journal of Production Research, 1996, 34(4):1131-1143.
- [6] YEO S H, LOW C W, YONG K H. A rule-based frame system for concurrent assembly machines [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1996, 12(5):370-376.
- [7] CHEN Weisheng, CHYU C C. A hybrid genetic algorithm for solving feeder arrangement and placement sequencing decisions in PCB assembly [EB/OL]. (2003-11-25)[2007-06-10]. <http://machinevision.iem.yzu.edu.tw/pcb2002/pap/A2.pdf>
- [8] WILLIAM H, JI Ping. Component scheduling for chip shooter machines: a hybrid genetic algorithm approach [J]. Computers & Operations Research, 2003, 30(14):2175-2189.
- [9] OONG N S, KHOO L P. Sequence placement planning for high-speed PCB assembly machine [J]. Integrated Manufacturing Systems, 2002, 13(1):35-46.

(编辑 管咏梅)