

# PCB Assembly Optimization Based on Ant Colony Algorithm\*

Xuan Du, Hongwei Cao, Chong Guan

College of Mechanical & Material Engineering, China Three Gorges University, Yichang  
Email: xdu@ctgu.edu.cn

Received: Mar. 22<sup>nd</sup>, 2013; revised: Apr. 2<sup>nd</sup>, 2013; accepted: Apr. 8<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2013 Xuan Du et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract:** The component placement sequence and feeder arrangement are the critical factors determining assembly time of chip shooter (CS) machine. In addition, the different size of component and different arrangement strategy affect the feeder arrangement and component placement sequence. Based on the engineering analysis, an integrated optimization model of printed circuit board (PCB) assembly for CS machine is established. According to the parallel placement character of CS machine, “Max-Min Ant Colony Algorithm with Communication function” is designed based on traditional Ant Colony Algorithm. The idea that two ants with different duties collaborate to solve the optimization problem is presented. Guide ants optimize placement sequence while executant ants optimize feeder arrangement according to the components placement sequence. The component placement sequence and feeder arrangement are optimized simultaneously.

**Keywords:** Component Placement Sequence; Feeder Arrangement; Ant Colony Algorithm; Chip Shooter Machine; PCB Assembly Optimization

## 基于蚁群算法的 PCB 组装过程优化\*

杜 轩, 曹宏伟, 关 冲

三峡大学机械与材料学院, 宜昌  
Email: xdu@ctgu.edu.cn

收稿日期: 2013 年 3 月 22 日; 修回日期: 2013 年 4 月 2 日; 录用日期: 2013 年 4 月 8 日

**摘 要:** 在转塔式贴片机的印制电路板(PCB)组装过程中, 元件贴装顺序和装载有不同类型元件的供料器在供料架上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上 PCB 组装的集成优化模型, 对蚁群算法进行了改进, 提出了相互通信的最大-最小蚂蚁算法, 用两种不同职能的蚂蚁相互协作, 以元件组装顺序来驱动供料器布置, 引导蚂蚁实现元件贴装顺序的优化, 而执行蚂蚁根据引导蚂蚁选择元件的结果来实现供料器布置优化。算法可对元件贴装顺序和供料器的布置进行同时优化, 从而提高转塔式贴片机上 PCB 组装的效率。最后通过实例验证了算法的有效性。

**关键词:** 元件贴装顺序; 供料器布置; 蚁群算法; 转塔式贴片机; PCB 组装优化

### 1. 引言

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<sup>[1-3]</sup>。单台贴片机的 PCB 组装过程优化主要包括以下两个子问题: 电子元件的贴装顺序问题;

\*基金项目: 湖北省教育厅自然科学研究重点项目(D20121306), 三峡大学科研基金(KJ2010B020)。

装载不同类型电子元件的供料器在供料架上的布置问题(简称为供料器布置问题)。这 2 个子问题中,元件的贴装顺序可视为旅行商问题(TSP),供料器布置问题可视为二次分配问题(QAP)<sup>[3,4]</sup>。目前,国内外学者采用不同的方法来解决元件贴装顺序和供料器布置问题。文献[5]实现了供料器布置优化,文献[6-8]实现了元件组装顺序优化,文献[9,10]利用遗传算法实现了元件组装顺序和供料器布置优化。由于蚁群算法在求解 TSP 和 QAP 问题方面具有良好的适应性,近年来在此类优化问题中得到了广泛应用<sup>[11]</sup>。在实际的 PCB 组装过程中,元件组装顺序和供料器布置之间联系紧密,互相影响,且依赖于具体的装配设备和技术环境,因此建立一个能描述复杂工程实际情况的贴装过程集成优化模型,并用合适的方法来实现高效求解是目前的一个研究热点。

本文以 PCB 自动化组装常用的高速组装设备——转塔式贴片机为研究对象,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优化数学模型,并在模型中描述了 PCB 组装过程中元件尺寸和同一供料器多次布置等工程实际问题对供料器布置和元件贴装顺序的影响,用改进的蚁群算法实现了转塔式贴片机的贴装过程中元件贴装顺序和供料器布置的集成优化。

### 2. 转塔式贴片机结构

PCB 自动化组装的贴片机类型较多,各自具有不同的运动机构,本文所讨论的转塔式贴片机是一种高速组装设备,在组装过程中同时进行元件的贴装和拾取,适合小型元件的大批量组装。其结构如图 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,装载有不同类型元件的供料器放置在不同的供料槽位置上;有一个装载 PCB 的工作台,能够实现 x-y 方向移动;还有一个可旋转的转盘,转盘上装有多贴装头,贴装头通过上下运动来实现元件的拾取和贴装,每一个贴装头上有几个不同型号的吸嘴,根据元件的尺寸大小,可以自动更换不同的吸嘴。在 PCB 组装过程中,三个运动机构的运动,根据事先编制好的程序,同时实现元件的拾取与贴装。

### 3. 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

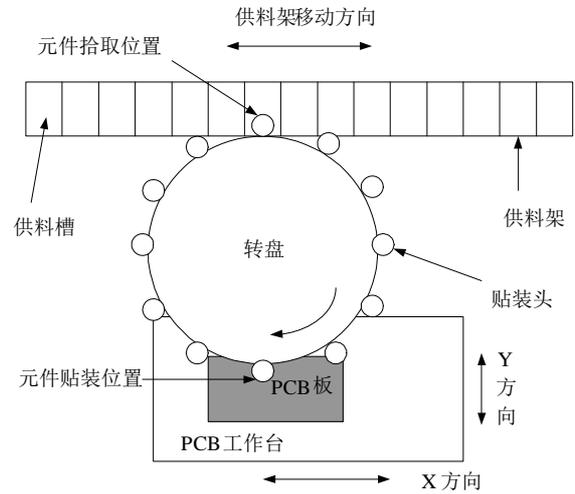


Figure 1. Diagram of chip shooter machine  
图 1. 转塔式贴片机运动机构示意图

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为 MBTD (Moving-Board-with-time-Delay)问题<sup>[1]</sup>。

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,传统的 TSP 和 QAP 模型不能很好地表达 MBTD 问题中的元件贴装顺序和供料器布置,如果 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器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,对其进行优化。具体优化数学模型可用一个整数规划模型表示为:

$$\min T = t_p + \sum_{s=1}^N \max \begin{cases} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N t_{ij} \cdot x_{i(s-1)} \cdot x_{js}, \\ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^P \sum_{h=1}^L \sum_{k=1}^L t_{fhk} x_{i(s+M/2)} x_{j(s+M/2+1)} x_{tih} x_{ijk} \\ t_r \end{cases} \quad (1)$$

满足约束:

$$\sum_{i=1}^N x_{is} = 1, \sum_{s=1}^N x_{is} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{h=1}^L x_{ih} \geq 1 \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^L x_{ijk} \geq 1 \quad (4)$$

$$i \neq j, P \leq L$$

$$i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, N; s = 1, 2, \dots, N$$

$$t = 1, 2, \dots, P; h = 1, 2, \dots, L; k = 1, 2, \dots, L$$

#### 4. 改进蚁群算法的设计

蚁群算法对旅行商问题和二次分配问题具有很好的适应性，因此在求解这一类问题中得到了很好的应用。通过对 CS 贴片机贴装过程的分析，由于元件组装顺序优化及供料器布置优化两个子问题间相互联系，相互影响，因此更加大了问题求解的难度。本文通过对蚁群算法的改进，提出了基于相互通信的蚂蚁算法，用元件的选择来驱动供料器位置的选择。引入蚂蚁对概念，蚂蚁对中的一只蚂蚁负责元件的贴装顺序的选择，另一只蚂蚁为每个元件进行供料槽编号的匹配选择，他们是通过信息交流来完成任务的。改进的蚂蚁算法引入了蚂蚁交流协作的模式，可将元件贴装顺序和供料器布置同时优化，从而实现转塔式贴片机上电子元件组装过程优化。具体的算法结构如图 2 所示。

##### 4.1. 蚂蚁分类

算法将蚂蚁分为引导蚂蚁和执行蚂蚁两种职能的蚂蚁，来完成不同的子任务，从而完成总体任务。以下来介绍蚂蚁的分类和它们之间的协作方式。

- 1) 引导蚂蚁的任务是选择贴装元件，给执行蚂蚁发送引导信息。引导蚂蚁的路径是元件的贴装顺序。
- 2) 执行蚂蚁的任务是接受引导信息，选择供料槽，并反馈所选择的供料槽的信息。执行蚂蚁来确定供料槽的布置，它的路径是与引导蚂蚁选择的元件匹配的供料器位置顺序。

##### 4.2. 参数初始化

将一个引导蚂蚁和一个执行蚂蚁视为一个蚂蚁对。将蚂蚁对初始化：执行蚂蚁按元件编号随机选择一个元件  $i$ ，执行蚂蚁按供料槽编号随机选择一个供料槽  $j$ 。

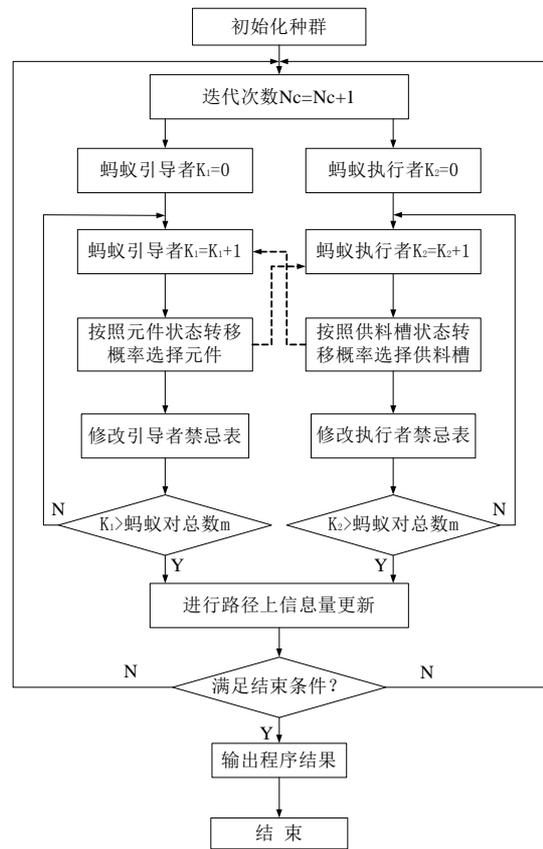


Figure 2. Flow of algorithm  
图 2. 算法流程图

令时间  $t = 0$  和循环次数  $N_c = 0$ ，设置最大循环次数  $N_{cMAX}$ ，令两两元件间的信息量  $\tau_{ij}(t)$  在初始时刻使为  $\Delta\tau_{ij}(0) = \text{const}$ ，const 为一个相对大的常数。经过一次循环后，令

$$\Delta\tau_{ij}(1) = \tau_{\max}, \tau_{\max} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{1}{T^{gb}}$$

##### 4.3. 蚂蚁通信原则

通信过程分为两步：

第一步：引导蚂蚁每选择一个元件  $i$ ，就向执行蚂蚁发送一条信息，信息内容包括：本次选择元件的编号  $i$ ；上次选择元件的编号  $i'$ ；编号为  $i$  的元件的类型  $Y_i$ ；和  $Y_i$  对应的供料槽的编号  $n_{Y_i}$ 。

第二步：执行蚂蚁按照引导蚂蚁传递的信息内容进行供料槽的选择，然后将  $n_{Y_i}$  返回给引导蚂蚁。

引导蚂蚁结合元件之间的信息素和选择元件的启发因子按编号选择贴装元件，执行蚂蚁根据信息内容结合元件与供料槽之间的信息素和选择供料槽的

启发因子，为元件选择匹配的供料槽。引导蚂蚁的状态转移概率为：

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{s \in \text{allowed}_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha [\eta_{is}(t)]^\beta}, & j \in \text{allowed}_k \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

式中： $P_{ij}^k(t)$  表示  $t$  时刻引导蚂蚁  $k$  由元件  $i$  转移到元件  $j$  的转移概率； $\tau_{ij}(t)$  表示在  $t$  时刻元件  $i$  和元件  $j$  之间的信息量的大小；启发函数  $\eta_{ij}(t) = 1/TT_{ij}$ ； $TT_{ij}$  表示 PCB 工作台从元件  $i$  的贴装位置移动到元件  $j$  的贴装位置的运动贴装定位时间； $\text{allowed}_k$  表示可以选择的元件集合，如果选择了元件  $i$ ，将其放入禁忌表  $\text{tabu}_k$  中。

执行蚂蚁的状态转移概率为：

$$q_{ij}^k(t) = \frac{[\delta_{ij}(t)]^\alpha [\lambda_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{s \in \text{allowed}'_k} [\delta_{is'}(t)]^\alpha [\lambda_{is'}(t)]^\beta}, j \in \text{allowed}'_k$$

式中： $q_{ij}^k(t)$  表示在  $t$  时刻执行蚂蚁  $k$  由供料槽  $i$  转移到供料槽  $j$  的转移概率； $\delta_{ij}(t)$  表示在  $t$  时刻供料槽  $i$  和供料槽  $j$  之间的信息量的大小。

在转塔式贴片机的元件组装过程中，根据各运动机构的情况，可将其分为三个阶段。第一阶段是指在组装开始的时候，对最先组装的  $M/2$  个元件，通过转盘转动和供料架的移动拾取元件，而工作台不动，此时启发函数  $\lambda_{ij}(t) = 1/TF_{ij}$ ； $TF_{ij}$  表示从编号为  $i$  的供料槽移动到编号为  $j$  的供料槽所需的时间；第二阶段是转盘拾取了  $M/2$  个元件后，转盘、供料架和工作台同时运动，此时启发函数  $\lambda_{ij}(t) = 1/|TT_{cj} - TF_j|$ ， $TT_{cj}$  表示 PCB 工作台从上一个元件移动到和供料槽  $j$  所对应的元件  $c_j$  的位置所需要的时间， $TF_j$  表示从上一个供料槽移动到编号为  $j$  的供料槽所需的时间；第三阶段是指组装结束阶段，最后组装的  $M/2$  个元件，元件已经拾取，只是通过转盘的转动和工作台的移动组装元件，供料架不动，因此转移概率在此不起作用。

#### 4.4. 路径信息更新策略

通过蚂蚁对之间的相互交流，引导蚂蚁可以获得每次元件的贴装顺序以及每个元件相对应的供料槽的编号。这为路径上的信息素更新提供了条件。路径信息量更新完全由引导蚂蚁来完成，它要完成两部分

信息量的更新，更新部分及其更新规则如下：

1) 元件选择路径上信息量的更新

$$\tau_{ij}(t+n) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}^{\text{best}}$$

式中，当最好的蚂蚁对在本次循环中经过元件  $(i, j)$  时， $\Delta\tau_{ij}^{\text{best}} = Q_1/T^{ib}$  否则为 0。 $Q_1$  表示元件间信息素的强度， $T^{ib}$  为最好蚂蚁对完成贴装优化的时间。

2) 元件与供料槽匹配关系的信息量更新

元件与供料槽匹配关系的信息量更新主要是由供料架移动时间和 PCB 工作台移动时间的差值与总的贴装时间共同决定的。

$$\delta(t+n) = (1-\rho)\delta_{ij}(t) + \Delta\delta_{ij}^{\text{best}}$$

$\Delta\delta_{ij}^{\text{best}}$  与元件组装顺序有关，且体现了节约时间的理念，供料器和工作台运动时间差异越小，元件与供料槽之间匹配关系的信息素就增加的越多。

### 5. 计算实例分析

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了计算，计算结果如图 3 所示。曲线 A 为一种元件只在供料架上放置一次的计算结果，曲线 B 为装载有 4、9、10 三种元件的供料器分别放置两次的计算结果。

结果显示，本文所提出的基于通信的蚂蚁算法能实现元件贴装顺序和供料器布置的集成优化，得到的优化结果 27.25 s，要优于文献[10]中采用的传统遗传算法和混合遗传算法得到的优化结果 33.58 s 和 27.58 s。

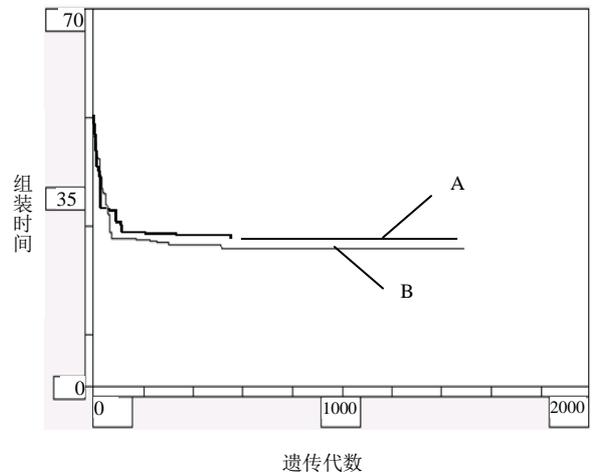


Figure 3. Result of calculation  
图 3. 实例计算结果

## 6. 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优化中，同时考虑了元件贴装顺序问题和供料器布置的问题，并考虑了 PCB 组装中元件尺寸及不同布置策略对供料器布置的影响。建立了转塔式贴片机贴装过程的集成优化模型，用改进的蚁群算法实现了元件贴装顺序和供料器布置的集成优化。通过实例的比较，证明采用基于相互通信的蚂蚁算法，能很好的解决转塔式贴片机贴装过程优化中，元件组装顺序和供料器布置两个复杂组合优化问题的集成优化，并能得到较好的优化结果，有利于提高 PCB 的组装效率。同时也为复杂工程实际问题的优化提供了一种较好的方法。

## 参考文献 (References)

- [1] M. C. Leu, H. Wong and Z. Ji. Planning of component placement/insertion sequence and feeder setup in PCB assembly using genetic algorithm. *Journal of Electronic Packaging*, 1993, 115(4): 424-432.
- [2] K. P. Ellid, F. J. Vites and J. E. Kobza. Optimizing the performance of a surface mount placement machine. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 2001, 24(3): 160-170.
- [3] W. Ho, P. Ji. A genetic algorithm approach to optimizing component placement and retrieval sequence for chip shooter machines. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, 28(5-6): 556-560.
- [4] E. Duman, I. Or. The quadratic assignment problem in the context of the printed circuit board assembly process. *Computer and Research*, 2007, 34(1): 163-179.
- [5] 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): 955-958.
- [6] 袁鹏, 刘海明, 胡跃明. 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.
- [7] 曾又姣, 金焯. 基于遗传算法的贴片机贴装顺序优化[J]. *计算机集成制造-CIMS*. 2004, 10(2): 206-209.
- [8] 闫红超, 姜建国. 一种基于改进混合遗传算法的贴片机装配工艺优化方法[J]. *微电子学与计算机*, 2006, 23(6): 213-216.
- [9] W. Ho, P. Ji. An integrated scheduling problem of PCB components on sequential pick-and-place machines: Mathematical models and heuristic solutions. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(3): 7002-7010.
- [10] W. S. Chen, C. C. Chyu. A hybrid genetic algorithm for solving feeder arrangement and placement sequencing decisions in PCB assembly. <http://machinevision.iem.yzu.edu.tw/pcb2002/paper/A2.pdf>
- [11] 唐秋华等. 基于改进蚁群算法的装配序列规划研究[J]. *机械设计与制造*, 2012, 5: 42-44.