

基于2-opt蚁群算法优化掩膜版缺陷点路径的应用研究

徐智俊^{1*}, 王亚腾¹, 熊启龙^{1,2}

(1. 合肥清溢光电有限公司, 合肥 230011; 2. 深圳清溢光电股份有限公司, 广东 深圳 518053)

摘 要: 针对现有激光化学气相沉积设备在寻找掩膜版缺陷点时存在镜头移动行程长、镜头频繁失焦的问题, 采用基于2-opt邻域搜索的蚁群算法来优化设备的修复缺陷点顺序。相对于传统的X/Y轴升序排列, 此方法能够有效缩短镜头寻点时间、降低失焦概率。为加快处理大规模缺陷点时的算法速度, 提出设置蚁群近邻搜索范围、2-opt固定半径邻域搜索以及设置不检测标记的加速策略来改善2-opt蚁群算法的收敛时间和优化质量。实验证明, 改善后的2-opt蚁群算法路径优化率超过92.5%, 最快算法时间仅为5.72 s, 失焦率仅仅为0.28%, 相比基本蚁群算法和基本2-opt蚁群算法, 改善后的2-opt蚁群算法在路径优化质量、优化时间以及保证镜头焦距稳定方面更具优势。

关键词: 掩膜版; 缺陷点; 激光化学气相沉积; 两元素邻域搜索; 蚁群算法; 路径优化

中图分类号: TN209 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2021)04-0274-09

Research on Photomask Defects Path Optimization Based on Ant Colony Algorithm Mixed with 2-opt

XU Zhijun¹, WANG Yateng¹, XIONG Qilong^{1,2}

(1. Hefei Qingyi Photomask Ltd., Hefei, 230011, CHN; 2. Shenzhen Qingyi Photomask Ltd., Shenzhen Guangdong, 518053, CHN)

Abstract: To solve the long lens moving distance and lens defocusing when Laser Chemical Vapor Deposition (LCVD) equipment traces defect points in photomask defect repairing, a kind of ant colony optimization (ACO) algorithm mixed with 2-opt neighborhood search was proposed to optimize the sequence of defect coordinates. The method could effectively reduce the points tracing time and lens defocus rate, compared with the traditional ascending sequence of X or Y axis. To enhance the algorithm processing time in the case of large-scale defects, several acceleration tactics were applied in the ACO algorithm mixed with 2-opt neighborhood search, including nearest neighborhood searching tactic in ACO algorithm, fixed radius searching setting and “don't look bits tactic” in 2-opt algorithm.

收稿日期: 2021-05-12

作者简介: 徐智俊(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事掩膜版光刻工艺和检修工艺方面的研究; (E-mail: xzj@hf.supermask.com)

王亚腾(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事掩膜版检修设备与工艺方面的研究;

熊启龙(1972—), 男, 主要从事掩膜版制造工艺方面的研究。

* 通讯作者

The experimental results showed that the improved ACO algorithm mixed with 2-opt neighborhood search could reveal over 92.5% improvement than raw AOI distance, with only 5.72 s time consumption and 0.28% defocus rate. The improved algorithm demonstrates better performance in path optimization quality, optimization time and maintaining lens focusing than basic ACO and basic ACO mixed 2-opt algorithm.

Key words: photomask; defect; LCVD; 2-opt neighborhood search; ACO; path optimization

引言

掩膜版在平板显示、集成电路、印刷电路板以及微机电系统行业扮演着不可或缺的角色,高精度掩膜版研发和制造长期被日本、美国、韩国等发达国家垄断,研发和生产高精度掩膜版,打破国外垄断局势势在必行。掩膜版在光刻、湿法制程和清洗过程中可能出现脏点、黑缺陷、白缺陷等膜层异常,如图1所示。高精度掩膜版的最小缺陷尺寸要求在 $0.75\ \mu\text{m}$ 以下,而由于自动光学检查设备(AOI, Automated Optical Inspection)的镜头精度原因,无法现场确认缺陷类型,势必会导致假缺陷增多。目前行业内主要利用激光化学气相沉积(LCVD, Laser Chemical Vapor Deposition)法对膜层缺陷进行修复,利用特定波长激光的光热分解对基板表面的图层冗余和图形缺失进行加工,使异常图层恢复为规整图形。因此,LCVD设备的修复效率决定着掩膜

版的质量与产品交期。由于掩膜版的高精度与高成本特点,为保护掩膜版和设备镜头,LCVD设备在掩膜版上寻点速率较慢,一般在 $8\sim 15\ \text{mm/s}$ 。AOI设备在检测缺陷时,是采用上下两个光学镜头同时扫描图层,其检查的缺陷点是呈上下各自分布的特点,如图2,LCVD设备在寻点时会浪费很多时间,导致缺陷修复效率低下。由于掩膜版在机台上只有四周边缘固定(距离边缘 $10\sim 20\ \text{mm}$),其版身会存在不同幅度的下沉,意味着当镜头长路径移动时,无法实现自动对焦,需要手动调整焦距,自动化程度低。目前,掩膜版行业没有具体的缺陷点排序优化方法,参考平板显示行业的LCVD设备^[1],其膜层缺陷点是根据阵列基板面积将整版分成若干区域,并对各区域的X轴或Y轴进行升序排列。由于存在行业差异,面板行业LCVD设备在修复缺陷时镜头移动速度很快($>500\ \text{mm/s}$),故对其寻点顺序也无特定要求。

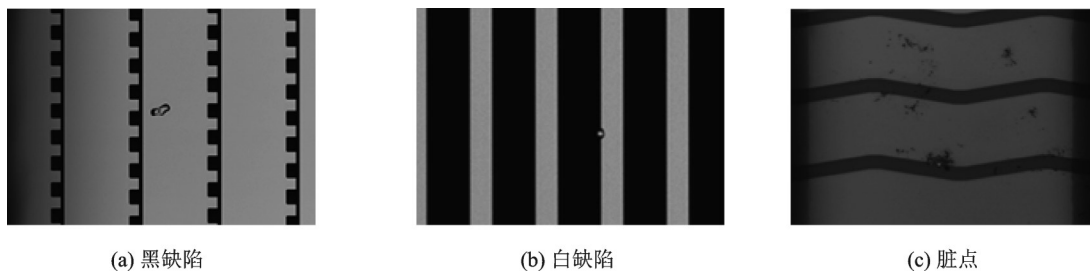


图1 常见的掩膜版膜层异常

Fig.1 Common abnormalities of mask layers

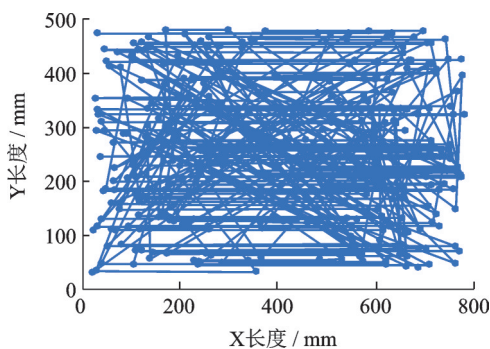


图2 AOI设备检查缺陷点的路径

Fig.2 Defect path inspected by AOI machine

蚁群算法是一种基于蚂蚁觅食行为研究而提出的新型种群寻优算法,最早由意大利学者Dorigo M提出,该算法具有分布计算、信息正反馈、启发式搜索等特点。蚁群算法广泛应用在组合优化领域,如车辆调度^[2-3]、路径规划^[4-5]、物流优化^[6-7],SMT加工路径优化^[8-9]等,诸如此类问题,均可归于TSP (Traveling Salesman Problem)问题。文章借鉴TSP问题模型,结合蚁群算法,采用一种基于邻域搜索的蚁群优化算法,对掩膜版缺陷点进行排序,用以优化LCVD设备镜头寻点路径,使寻点耗时最

小化,路径最优,降低镜头失焦率。

1 TSP问题与蚁群算法原理

TSP问题^[10]是数学领域中著名问题之一,TSP模型可以用完全带权图 $G=(N,A)$ 表示,其中 N 是城市的结点集合, A 是所有边的集合,每条边 $(i,j) \in A$ 均分配一个权值 $d(i,j)$,表示城市 i 和城市 j 之间的距离, $i,j \in N$ 。在访问图 G 中经过每一个结点一次且仅经过一次而形成的回路称为哈密顿回路,假设优化的城市结点序列为 π ,其对应的城市总长为 $f(\pi) = \sum_{i=1}^{n-1} d_{\pi(i)\pi(i+1)} + d_{\pi(n)\pi(1)}$,TSP问题就是要寻求代价最小 $f(\pi)$ 对应的序列 π 。

结合自然界中蚂蚁觅食行为,在蚂蚁爬行过程中会释放信息素,通过信息素累积更新,后续蚂蚁会通过信息素的浓度来选择各自的行走路线,通过多只蚂蚁的循环累积行为,可以得出最优的觅食路线。假如将 m 只蚂蚁放到 n 个坐标中,每只蚂蚁根据一定概率选择下一个没有访问过的坐标。选择下一个坐标的依据主要是某时刻 t 坐标点 i 和 j 路径上的信息浓度 τ_{ij} 和启发信息 η_{ij} ,在TSP问题中,一般取 $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$ ^[11]。在 t 时刻,位于坐标点 i 的蚂蚁 k 选择坐标点 j 的概率可表示如下,

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{j \in allowed_k} [\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}, & j \in allowed_k \\ 0, & j \in tabu_k \end{cases} \quad (1)$$

如式(1)所示, $allowed_k$ 表示第 k 只蚂蚁未经过的缺陷点集合, $tabu_k$ 为当前已完成访问的缺陷点集合。蚂蚁 k 选择下一个目标的概率取决于问题本身提供的启发信息 $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$ 和路径上残留信息素 $\tau_{ij}(t)$, α 和 β 分别为信息素和启发信息的相对重要程度参数。为了利于快速收敛,文章采用ant-cycle模型用于更新信息素,即所有蚂蚁完成每次循环后,需要更新信息素矩阵,更新规则如下:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \rho\Delta\tau_{ij}(t) \quad (2)$$

其中

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \sum \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (3)$$

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} Q/L_k, (i,j) \in \text{tour by ant } k \\ 0, \text{ otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

式中的 ρ 为信息素的蒸发率, Q 为信息素强度常量, L_k 为第 k 只蚂蚁所走过的路程。

由于基本蚁群算法具有收敛速度慢,优化时间长的天生缺陷,采用k-opt的领域搜索算法对其进行

优化^[12]。该算法旨在原有初始路径 T 的基础上,寻找两个集合 X 和 Y , $X = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$, $X \in T$, $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_k\}$, $Y \notin T$,并在一定条件下用 Y 替换 X ,使得新的集合产生的代价变小。目前用于优化蚁群算法的局部搜索一般 $k=2$ 或者 $k=3$,尽管相关文献表明^[13-15],3-opt求解的质量要优于2-opt,但是其算法复杂,结合计算量和时间成本,文章将选择2-opt算法改善蚁群优化的路径。2-opt算法可描述如下:设 T 为一条TSP回路($a \rightarrow b \rightarrow e \rightarrow d \rightarrow c \rightarrow f \rightarrow g \rightarrow a$), b 、 f 为选中的两个不同坐标, c 和 e 分别为其后续坐标,对应的边集合为 $\{(b,e), (f,c)\}$,如图3所示,通过寻找更优的坐标点,形成新的边集合 $\{(b,c), (f,e)\}$,使得新的坐标序列 $T'(a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow f \rightarrow g \rightarrow a)$ 路径更短。

2-opt蚁群算法实现流程如图4所示,所有蚂蚁在每一次循环后,需要对整体的信息素进行更新,2-opt算法会对蚂蚁得出的路径进行所有点的两两交换处理,并得出最优的路径。

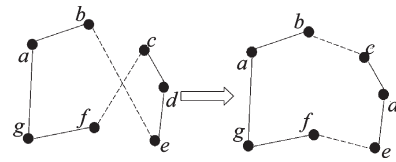


图3 2-opt算法搜索策略示意图

Fig. 3 Schematic of searching tactics in 2-opt algorithm

2 改进2-opt蚁群算法

对于高精度大尺寸或者制程工艺波动加工的掩膜版,可能会存在大量的假不良或者脏点。由于AOI镜头精度原因,需要LCVD设备判断是否为假缺陷,在特殊情况下,需要确认的缺陷数可能会超过200个。对于这种大规模的缺陷点路径优化,其算法复杂度为 $O(\text{循环数} \times \text{蚂蚁数} \times \text{缺陷点数}^2)$,若采用基本的2-opt+ACO算法(2-opt+ACO-DFT),其蚂蚁数 m 等于缺陷点数 n ,那么其算法复杂度为 $O(\text{循环数} \times \text{缺陷点数}^3)$ 。尽管使用2-opt领域搜索可以在降低循环次数的同时保证蚁群搜索的质量,但对于大规模的缺陷点数,算法效率必定大打折扣。基于TSP问题最优解的每个坐标连接的都是附近坐标的事实,文章结合相关文献^[16-18],提出采用以下加速策略优化大规模缺陷点数时的算法收敛速度:

a. 采用近邻搜索策略。设置蚂蚁对未爬行过坐

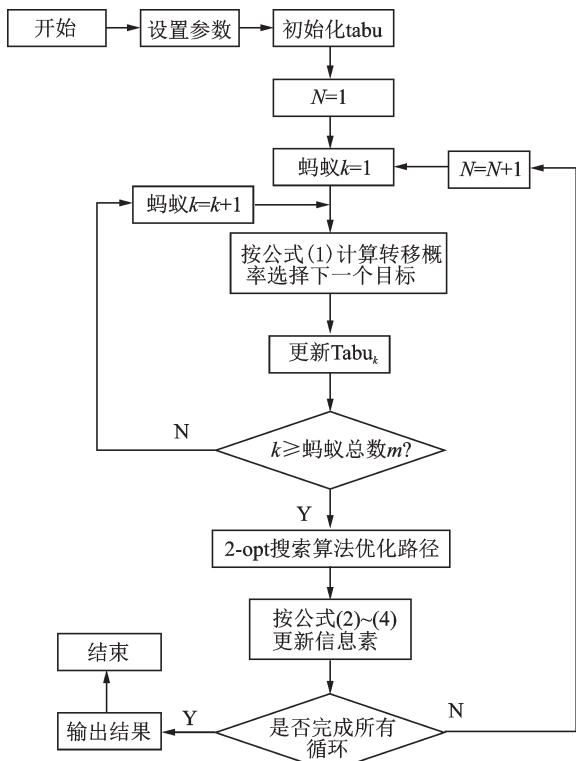


图4 2-opt蚁群算法流程图

Fig. 4 Flow chart of ACO mixed with 2-opt algorithm

标的搜索范围,蚂蚁 k 从缺陷点 i 到 j 时,定义离缺陷点 i 最近的若干个(n_a)作为搜索范围,并按概率转移条件选择下一个点。如果最近的 n_a 个缺陷点均已走过,则将最近的未经过的点作为下一个目标点;

b. 采用固定半径邻域搜索策略。在2-opt领域搜索时,仅对需要交换点位附近的若干个 n_b 分别进行交换处理,无需对所有缺陷点依次交换,降低邻域搜索复杂程度;

c. 采用邻域搜索不检测标识策略。如果某个缺陷点 i 采用固定半径搜索策略后所得到的解不比原来的好,则标记该缺陷点 i 为不检测,当该坐标最近的 n_b 个缺陷点在实施固定半径近邻搜索策略时,忽略缺陷点 i 。

3 试验设计与结果分析

对实际生产中的掩膜版缺陷情况,截取不同缺陷点的规模,模拟环境为 Intel Core I3 9th Gen。由于掩膜版在LCVD设备机台上存在不同程度的弯曲下沉,结合实际的生产情况,若两个缺陷点之间距离超过一定值 R ,镜头便会失去自动聚焦, R 称为失焦距离,失焦后需要人工调整焦距,每次调整约

耗时15~40 s。综合版材材料特性,设置平均失焦距离 $R=100$ mm,并定义在一个序列中,失去焦距的对应的边数占缺陷点总边数的比例为该路径中的镜头失焦率。结合实际掩膜版修补效率,采用算法耗时、优化路径长度、相对于AOI原始路径优化率以及镜头失焦率作为优化指标。

3.1 基本参数设置

关于参数 α 、 β 和 ρ 的选择, α 值越大,蚂蚁选择以前经过的路线的可能性越大,但过大会使搜索过早陷于局部最小解; β 值越大,蚂蚁选择离它近的缺陷点的可能性也越大^[11];过大的 α 和 β 会导致算法复杂,优化时间长,文章选择 $\alpha=1$, $\beta=2$ 。此外,当 ρ 取值小时,路径信息素蒸发度小,蚂蚁再次选择已经被搜索过的路径的可能性较大,很容易出现局部收敛;反之,当 ρ 取值大时,尽管提高了算法的随机性能和全局搜索能力,但算法的收敛速度会降低^[19]。兼顾算法收敛和全局搜索能力,文章中选择 $\rho=0.6$ 。

3.2 基本蚁群算法和基本2-opt蚁群算法试验、结果与分析

以X升序、Y升序、基本蚁群优化以及2-opt优化后的蚁群算法对不同缺陷点数量订单进行寻点优化,参数设置如下:基本蚁群算法参数设置 $\alpha=1$, $\beta=2$, $\rho=0.6$,蚂蚁数 m 等于缺陷点数 n 。鉴于基本蚁群算法(Basic ACO)优化精度较差,需要很大的循环次数,此处,循环次数设置为10 000次。而采用2-opt领域搜索的蚁群算法(2-opt+ACO_DFT),可以集中更多精力在比较好的蚂蚁路线上,通过比较少的循环次数优化蚁群路径,设置循环100次,蚂蚁数 m 等于缺陷数 n , $\alpha=1$, $\beta=2$, $\rho=0.6$ 。

表1是AOI排序、X/Y升序、基本蚁群优化(Basic ACO)和2-opt领域搜索蚁群算法(2-opt+ACO_DFT)优化缺陷点路径后的效果,其中,A1964391、A1955328和A1964382分别为不同缺陷点数(分别有80个、124个和157个缺陷点)的订单号。可以看出,X/Y升序尽管在一定程度上可以节省设备镜头移动路程,但是降低幅度有限,最大63.8%,而用Basic ACO优化,可以明显提升镜头搜索效率,最多节省路程87.2%。但是Basic ACO具有收敛速度慢的天然缺陷,需要大规模的

表 1 AOI 排序、X/Y 升序、Basic ACO 和 2-opt+ACO_DFT 算法优化效果对比

Tab.1 Optimization comparison among AOI order, X/Y ascending order, basic ACO and 2-opt+ACO_DFT

| | A1964391 | | | A1955328 | | | A1964382 | | |
|---------------|----------|---------|------|----------|---------|------|----------|---------|-------|
| | 总行程/mm | 优化率/(%) | 耗时/s | 总行程/mm | 优化率/(%) | 耗时/s | 总行程/mm | 优化率/(%) | 耗时/s |
| AOI 排序 | 18 904 | 0 | / | 39 282 | 0 | / | 53 837 | 0 | / |
| X 升序 | 17 656 | 6.6 | / | 14 203 | 63.8 | / | 36 647 | 31.9 | / |
| Y 升序 | 11 641 | 38.4 | / | 32 547 | 17.1 | / | 29 044 | 46.1 | / |
| Basic ACO | 6 748 | 64.3 | 270 | 5 027 | 87.2 | 656 | 7 659 | 85.8 | 2 044 |
| 2-opt+ACO_DFT | 5 246 | 72.3 | 19 | 5 009 | 87.3 | 92 | 7 160 | 86.7 | 194 |

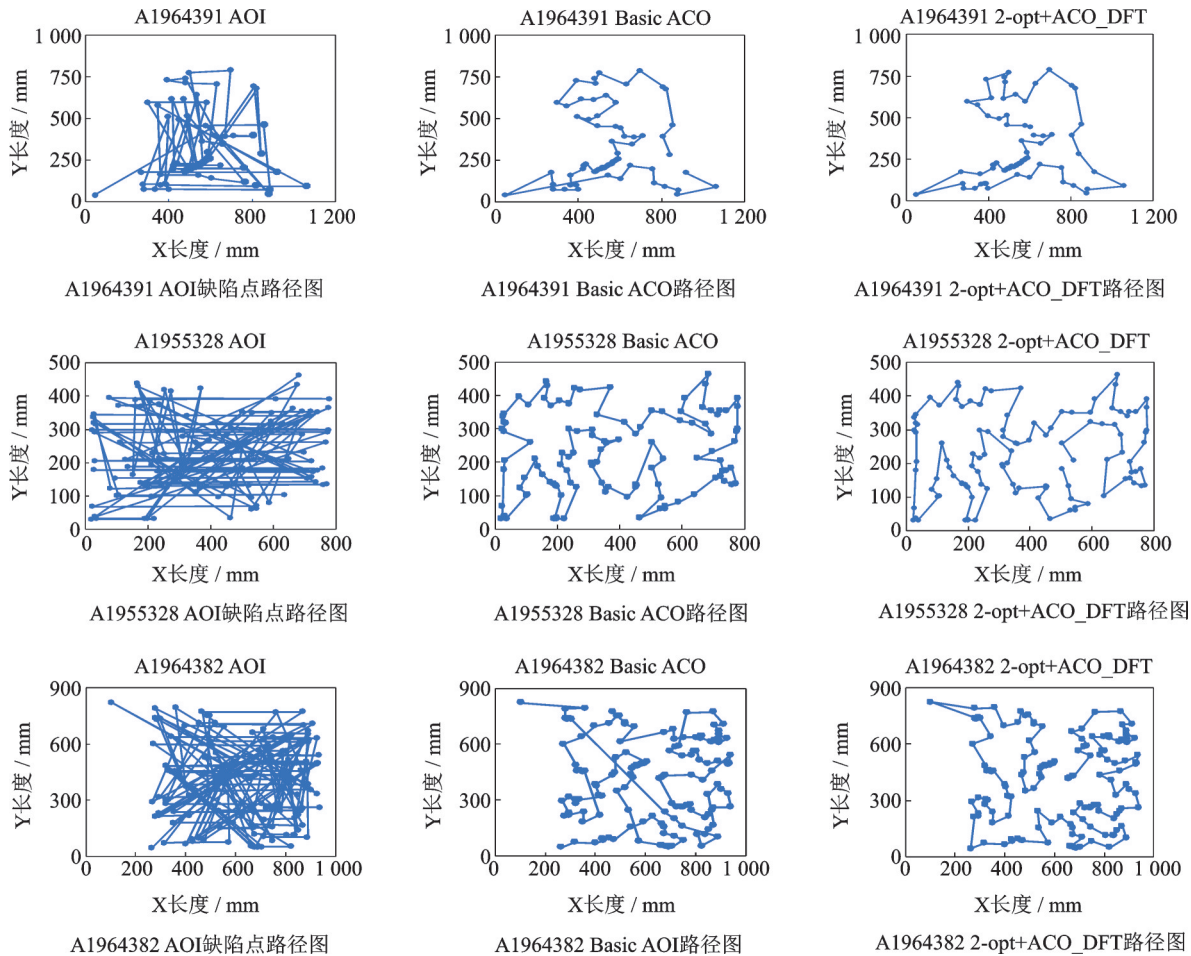


图 5 AOI 路径、Basic ACO 和 2-opt+ACO_DFT 优化路径图

Fig.5 Optimized paths of AOI, basic ACO and 2-opt+ACO_DFT

循环次数才能达到预期效果,导致算法耗时长,最长耗时达 2 044 s 之多。而采用 2-opt+ACO_DFT 算法最多可优化 87.3% 的路径路程,有效缩短算法优化时间,相对 Basic ACO 最多可节约 92.9% 的时间。图 5 为 Basic ACO 和 2-opt+ACO_DFT 的优化路径图,前者明显存在路径交叉、路径重复现象,路径优化没有后者理想。对比图 6 中的各算法优化路径存在的镜头失焦率,2-opt+ACO_DFT 算法兼顾了优化速度快,路径重复性低、镜头失焦率低的优点。

3.3 改进 2-opt 蚁群算法优化试验、结果与分析

为继续优化算法时间和优化质量,根据所提出的加速策略优化 2-opt 蚁群算法,先采用国际通用 TSP 测试库^[20]内的 TSP pr299 和 fl417 测试数据验证该算法的性能,分别用基本 2-opt 蚁群算法(2-opt+ACO_DFT)、少蚂蚁数的 2-opt 蚁群算法(2-opt+ACO_less ant)以及采用加速策略的 2-opt 蚁群算法(2-opt+ACO_acc),根据测试数据大小设置不同的蚁群近邻搜索范围 n_a 和 2-opt 交换缺陷点范围 n_b 。为验证加速策略不同蚂蚁数和循环数对测试

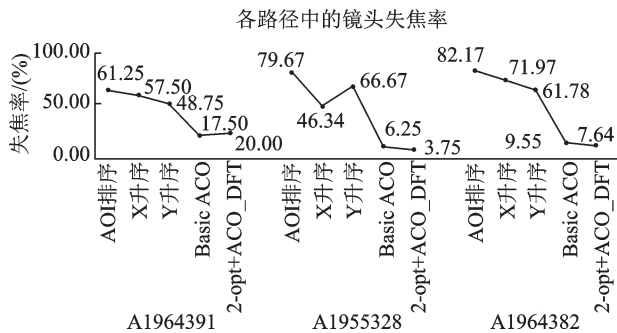


图6 AOI排序、X/Y升序、Basic ACO和2-opt+ACO_DFT算法优化后镜头失焦率(R=100 mm)

Fig.6 Defocus rates of AOI order, X/Y ascending order, Basic ACO and 2-opt+ACO_DFT algorithms (R=100 mm)

结果的影响,对2-opt+ACO_acc_1和2-opt+ACO_acc_2设置不同的蚂蚁数和循环次数,具体的参数设置见表2。每组算法测试三次,选择各自综

合最优结果,测试结果如表3。

从表3可知,2-opt+ACO_acc算法在收敛时间和优化结果方面优势明显,对于TSP pr299和fl417数据,2-opt+ACO_acc_1仅耗时4.28 s和8.32 s,便超越基本的2-opt蚁群算法,采用2-opt+ACO_acc_2的算法误差更是低于1.5%。

选取实际生产异常订单A1966104的缺陷点进行优化排序,其缺陷点数321个,AOI路径行程104 808.92 mm,失焦距离R=100 mm时失焦率为81.93%。采用表2中的算法参数,并结合实际机台情况,将离机台原点(X:0,Y:0)最近的缺陷点作为每次路径优化的起点,每组试验10次,并取平均值。测试结果如表4和表5。

对比表4中试验结果,在相同的循环次数(循环数=100)情况下,2-opt+ACO_DFT算法耗时平均

表2 四种2-opt蚁群算法的参数设置

Tab.2 Parameter settings of four ACO algorithms mixed with 2-opt

| | α, β, ρ | 蚂蚁数 m | 循环数 c | n_a | n_b |
|--------------------|-------------------------------------|----------|---------|-------|-------|
| 2-opt+ACO_DFT | | 取坐标数 n | 100 | / | / |
| 2-opt+ACO_less ant | $\alpha = 1, \beta = 2, \rho = 0.6$ | 10 | 100 | / | / |
| 2-opt+ACO_acc_1 | | 10 | 100 | 20 | 20 |
| 2-opt+ACO_acc_2 | | 20 | 200 | 20 | 20 |

表3 四种2-opt蚁群算法优化效果对比

Tab.3 Optimization results comparison of four ACO algorithms mixed with 2-opt

| | pr299 | | | | fl417 | | | |
|--------------------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| | 最优解 | 耗时/s | 结果 | 误差/(%) | 最优解 | 耗时/s | 结果 | 误差/(%) |
| 2-opt+ACO_DFT | | 1293 | 49 250 | 2.2 | | 4 909 | 12 052 | 1.61 |
| 2-opt+ACO_less ant | 48 191 | 44 | 49 129 | 1.95 | 11 861 | 112 | 12 034 | 1.46 |
| 2-opt+ACO_acc_1 | | 4.28 | 49 030 | 1.74 | | 8.32 | 12 032 | 1.44 |
| 2-opt+ACO_acc_2 | | 14.96 | 48 904 | 1.48 | | 28.26 | 12 018 | 1.32 |

表4 2-opt+ACO_DFT和2-opt+ACO_less ant算法路径优化结果

Tab.4 Optimized paths of 2-opt+ACO_DFT and 2-opt+ACO_less ant

| 序号 | 2-opt+ACO_DFT | | | | 2-opt+ACO_less ant | | | |
|-----|---------------|----------|---------|---------|--------------------|----------|---------|---------|
| | 耗时/s | 行程/mm | 失焦率/(%) | 优化率/(%) | 耗时/s | 行程/mm | 失焦率/(%) | 优化率/(%) |
| 1 | 1 923 | 7 954.03 | 0.31 | 92.41 | 52 | 7 839.32 | 0.31 | 92.52 |
| 2 | 1 740 | 7 768.36 | 0.62 | 92.59 | 53 | 7 882.88 | 0.62 | 92.48 |
| 3 | 1 747 | 7 806.21 | 0.31 | 92.55 | 52 | 7 819.07 | 0.31 | 92.54 |
| 4 | 1 718 | 7 846.97 | 0.62 | 92.51 | 53 | 7 832.07 | 0.62 | 92.53 |
| 5 | 1 719 | 7 708.77 | 0.31 | 92.64 | 53 | 7 850.98 | 0.62 | 92.51 |
| 6 | 1 818 | 7 847.72 | 0.31 | 92.51 | 53 | 7 951.2 | 0.62 | 92.41 |
| 7 | 1 735 | 7 802.49 | 0.31 | 92.56 | 52 | 7 860.31 | 0.31 | 92.50 |
| 8 | 1 686 | 7 779.74 | 0.31 | 92.58 | 53 | 7 855.55 | 0.31 | 92.50 |
| 9 | 1 663 | 7 850 | 0.31 | 92.51 | 52 | 7 902.88 | 0.31 | 92.46 |
| 10 | 1 718 | 7 800.7 | 0.31 | 92.56 | 52 | 7 767.46 | 0.31 | 92.59 |
| Ave | 1 746.7 | 7 816.5 | 0.37 | 92.54 | 52.5 | 7 856.17 | 0.43 | 92.50 |

表 5 2-opt+ACO_acc_1 和 2-opt+ACO_acc_2 算法路径优化结果
 Tab.5 Optimized paths of 2-opt+ACO_acc_1 and 2-opt+ACO_acc_2

| 序号 | 2-opt+ACO_acc_1 | | | | 2-opt+ACO_acc_2 | | | |
|-----|-----------------|----------|---------|---------|-----------------|----------|---------|---------|
| | 耗时/s | 行程/mm | 失焦率/(%) | 优化率/(%) | 耗时/s | 行程/mm | 失焦率/(%) | 优化率/(%) |
| 1 | 5.59 | 7 792.38 | 0.62 | 92.57 | 19.22 | 7 806.15 | 0.31 | 92.55 |
| 2 | 5.63 | 7 801.62 | 0.31 | 92.56 | 19.36 | 7 738.88 | 0.62 | 92.62 |
| 3 | 5.47 | 7 805.7 | 0.31 | 92.55 | 19.22 | 7 802.37 | 0.00 | 92.56 |
| 4 | 5.66 | 7 830.86 | 0.00 | 92.53 | 19.23 | 7 739.23 | 0.00 | 92.62 |
| 5 | 5.54 | 7 823.87 | 0.00 | 92.5 | 19.09 | 7 786.99 | 0.31 | 92.57 |
| 6 | 5.53 | 7 845.53 | 0.31 | 92.51 | 19.1 | 7 700.44 | 0.62 | 92.65 |
| 7 | 5.64 | 7 768.19 | 0.31 | 92.59 | 19.29 | 7 792.98 | 0.31 | 92.56 |
| 8 | 5.53 | 7 836.91 | 0.31 | 92.52 | 19.26 | 7 813.04 | 0.31 | 92.55 |
| 9 | 5.54 | 7 756.25 | 0.31 | 92.60 | 19.57 | 7 802.21 | 0.31 | 92.56 |
| 10 | 5.59 | 7 779.59 | 0.31 | 92.58 | 19.7 | 7 812.41 | 0.31 | 92.55 |
| Ave | 5.57 | 7 804.09 | 0.28 | 92.55 | 19.3 | 7 779.47 | 0.31 | 92.58 |

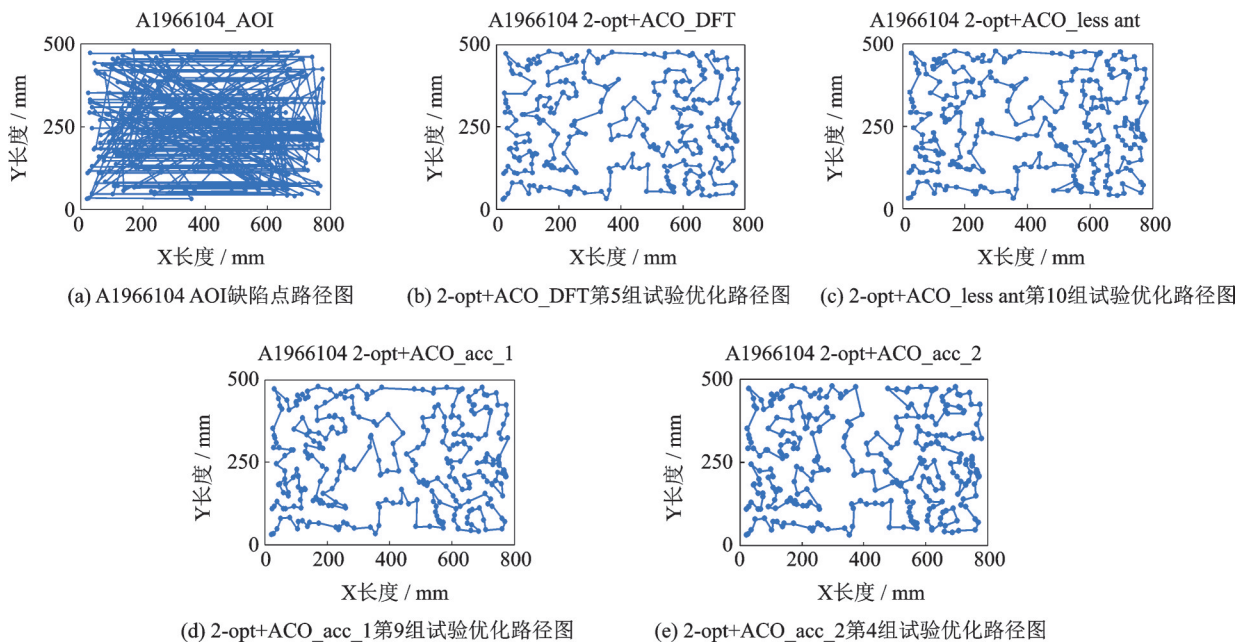


图 7 四种 2-opt+ACO 算法优化路径图

Fig.7 Optimized paths of four 2-opt+ACO algorithms

值为 1 746.7 s,原因是蚂蚁数多,算法优化的路径量大,2-opt 需要对更多路径进行交换对比,大大降低了算法的优化速度。在 2-opt+ACO_less ant 中,只采用 10 只蚂蚁对所有缺陷点进行寻优,2-opt 搜索的路径数在一定程度上有所减少,其优化时间大大缩短,平均为 52.5 s,而其平均失焦率和优化率并未受到明显影响。此外,在表 5 中可以看出,在应用加速策略后,算法优化时间大幅缩短,得益于限定蚁群搜索和 2-opt 的交换范围,2-opt+ACO_acc_1 和 2-opt+ACO_acc_2 算法耗时平均分别为 5.57 s 和 19.3 s,对比 2-opt+ACO_DFT,分别节省 99.6% 和 98.8% 的时间。路径路程有一定幅度的优化,相对

于 2-opt+ACO_less ant,路径路程分别降低 0.66% 和 0.97%。此外,2-opt+ACO_acc 算法在镜头焦距稳定方面也有一定的改善,最低失焦率为 0.28%。对比 2-opt+ACO_acc_1 和 2-opt+ACO_acc_2,前者由于较少的蚂蚁数和循环次数,优化了蚂蚁搜索、2-opt 交换量,提高了收敛速度,不仅如此,对比镜头失焦和路径优化程度,两种方案也大致相当。图 7 为 10 组试验中各优化算法综合性能最优的一组路径图,所有路径图中均不存在路径交叉现象,这得益于 2-opt 在对蚁群优化路径中不断局部交换缺陷点以形成最优路径。此外,使离设备机台原点最近的缺陷点作为路径的起点,可以一定幅度降低

镜头起始点移动距离。

在实际生产中的掩膜版缺陷点修复过程中,2-opt+ACO_acc算法足以完成缺陷点路径优化,对于不同规模的缺陷点数,2-opt+ACO_acc均比X/Y向升序、Basic ACO、2-opt+ACO_DFT以及2-opt+ACO_less ant算法的收敛速度快、路径优化率高,而且设备镜头焦距更加稳定。

表6是将2-opt+ACO_acc算法运用到实际不

同订单生产中的效果对比,其基本参数为 $\alpha=1$, $\beta=2$, $\rho=0.6$ 。将设备镜头沿着原始缺陷点顺序和算法优化后缺陷顺序移动,统计每次镜头走完路径后的时长,镜头移动时长包含镜头沿相应路径移动所消耗时间和焦距调整消耗时间。根据不同的缺陷点规模,设置不同的蚂蚁数和循环次数,由表中数据可知,2-opt+ACO_acc算法能够明显提高实际生产中镜头的寻点效率。

表6 2-opt+ACO_acc算法在实际生产中的应用效果

Tab.6 Application results of 2-opt+ACO_acc algorithm applied in practical production

| 订单号 | 蚂蚁数 m & 循环数 c | 路径长度/mm | | 镜头寻点时长/min | | 节省时长/min |
|----------|-------------------|---------|--------|------------|------|----------|
| | | 优化前 | 优化后 | 优化前 | 优化后 | |
| A1960798 | $m=10$ & $c=100$ | 9 118 | 5 377 | 11.3 | 3.1 | 8.2 |
| A1960799 | | 16 850 | 5 521 | 17.5 | 5.1 | 12.4 |
| A1964778 | | 29 518 | 4 399 | 29.8 | 8.9 | 20.9 |
| A1964136 | | 45 080 | 7 762 | 40.0 | 12.2 | 27.8 |
| A1964115 | $m=20$ & $c=200$ | 66 310 | 7 780 | 75.9 | 19.8 | 56.1 |
| A1964407 | | 77 333 | 15 088 | 83.7 | 24.3 | 59.4 |
| A1973844 | | 111 524 | 11 966 | 102.7 | 26.7 | 76 |
| A1972959 | $m=25$ & $c=250$ | 134 565 | 12 772 | 173.3 | 67.8 | 105.5 |

4 结 论

针对激光化学气相沉积设备在掩膜版扫描缺陷点路径混乱、寻点时间长、镜头失焦率高的问题,文章采用一种基于2-opt邻域搜索的蚁群算法对缺陷点进行路径优化。试验表明,相较于原始缺陷点、X/Y向升序方法以及仅仅采用基本蚁群算法,2-opt优化后的蚁群算法在优化时间、优化路径、镜头失焦降低以及降低路径交叉方面展示了明显的优势,最多优化87.25%的路径路程,有效缩短算法优化时间,相比Basic ACO最多可节约92.9%的时间。此外,针对大规模缺陷点情况,提出采用设置蚁群近邻搜索范围策略、2-opt固定半径搜索以及设置邻域搜索不检测标识的加速策略。实际订单试验结果表明,采取加速策略后,对比2-opt+ACO_DFT,分别节省99.6%和98.8%的时间;相对于2-opt+ACO_less ant,路径路程分别降低0.66%和0.97%,失焦率也低至0.28%。在日常实际订单的生产中,针对不同订单的缺陷数量,采用调整改进的2-opt蚁群算法参数,明显缩短了镜头的寻点时长。

参 考 文 献

- [1] 张伟,陈小英,马永生,等.激光化学气相沉积法在TFT-LCD电路缺陷维修中的应用[J].液晶与显示,2019,34(8):755-763.
- [2] Wahyuningsih S, Satyananda D, Hasanah D. Implementation of TSP-VRP variants for distribution problem[J]. Global Journal of Pure and Applied Mathematics, 2016, 12(1): 723-732.
- [3] 王晓东,张永强,薛红.基于改进蚁群算法对VRP线路优化[J].吉林大学学报(信息科学版),2017,35(2):198-203.
- [4] 游晓明,刘升,吕金秋.一种动态搜索策略的蚁群算法及其在机器人路径规划中的应用[J].控制与决策,2017,32(3):552-555.
- [5] Wang Z Q, Zhu X G, Han Q Y. Mobile robot path planning on parameter optimization ant colony algorithm[J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 2738-2741.
- [6] 张勇.基于改进蚁群算法物流配送路径优化的研究[J].控制工程,2015,22(2):252-256.
- [7] 康凯,韩杰,普玮,等.生鲜农产品冷链物流低碳配送路径优化研究[J].计算机工程与应用,2019,55(2):259-265.
- [8] 王超学,孙有田,董惠,等.改进的基于蜜蜂进化型遗传算法和蚁群系统混合的元件贴装优化[J].微电子学与计算机,2012,29(8):158-163.
- [9] 潘云峰.垂直旋转式高速贴片机贴装路径优化研究[D].镇江:江苏大学,2017.
- [10] Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. Ant system: Optimization

- by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics-Part B, 1996, 26(1):29-41.
- [11] 叶志伟, 郑肇葆. 蚁群算法中参数 α 、 β 、 ρ 设置的研究[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2004, 29(7):597-601.
- [12] Helsgaun K. General k-opt submoves for the Lin-Kernighan TSP heuristic [J]. Mathematical Programming Computation, 2009, 1(2/3):119-163.
- [13] 马文霜, 张洪伟. 基于改进 ACS-3-opt 蚁群算法的 TSP[J]. 计算机工程, 2008, 34(19):200-202.
- [14] Mahi M, Baykan Ö K, Kodaz H. A new hybrid method based on Particle Swarm Optimization, Ant Colony Optimization and 3-Opt algorithms for Traveling Salesman Problem [J]. Applied Soft Computing, 2015, 30:484-490.
- [15] Gülcü Ş, Mahi M, Baykan Ö K, et al. A parallel cooperative hybrid method based on ant colony optimization and 3-Opt algorithm for solving traveling salesman problem [J]. Soft Computing, 2018, 22:1669-1685.
- [16] Bentley J L. Fast algorithms for geometric traveling salesman problems [J]. ORSA Journal on Computing, 1992, 4(4):387-411.
- [17] Dumitrescu A, Mitchell J S B. Approximation algorithms for TSP with neighborhoods in the plane [J]. Journal of Algorithms, 2003, 48(1):135-159.
- [18] Wong L P, Low M Y H, Chong C S. Bee colony optimization with local search for traveling salesman problem [J]. International Journal on Artificial Intelligence Tools, 2010, 19(3):305-334.
- [19] Twomey C, Stützle T, Dorigo M, et al. An analysis of communication policies for homogeneous multi-colony ACO algorithms [J]. Information Sciences, 2010, 180(12):2390-2404.
- [20] Reinelt G. TSP library [EB/OL]. <http://comopt.ifi.uni-heidelberg.de/software/TSPLIB95/>, 2013.1.1.

(上接第 273 页)

- [48] Rohr J A, Moia D, Haque S A, et al. Exploring the validity and limitations of the Mott-Gurney law for charge-carrier mobility determination of semiconducting thin-films [J]. J. Phys. Condens. Matter, 2018, 30(10):105901.
- [49] D E Bruyn P, Van Rest A H, Wetzelaer G A, et al. Diffusion-limited current in organic metal-insulator-metal diodes [J]. Phys. Rev. Lett., 2013, 111(18):186801.
- [50] Rhr J A. Direct determination of built-in voltages in asymmetric single-carrier devices [J]. Physical Review Applied, 2019, 11(5), 054079.
- [51] Wetzelaer G. Improved determination of the mobility and built-in voltage in asymmetric single-carrier devices [J]. Physical Review Applied, 2020, 13(3), 034069.
- [52] Rose A. Space-charge-limited currents in solids [J]. Physical Review, 1955, 97(6):1538-1544.
- [53] Mark P, Helfrich W. Space-charge-limited currents in organic crystals [J]. Journal of Applied Physics, 1962, 33(1):205-215.
- [54] Kirchartz T. Influence of diffusion on space-charge-limited current measurements in organic semiconductors [J]. Beilstein J Nanotechnol., 2013, 4:180-188.
- [55] Murgatroyd P. Theory of space-charge-limited current enhanced by Frenkel effect [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1970, 3(2):151.
- [56] Frenkel J. On pre-breakdown phenomena in insulators and electronic semi-conductors [J]. Physical Review, 1938, 54(8):647.
- [57] Boer R, Morpurgo A F. Influence of surface traps on space-charge limited current [J]. Phys.Rev.B, 2005, 72(7), 073207.