

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.08.004

# 基于混合遗传蚁群算法的数字 微流控芯片测试路径规划\*

汪杰君<sup>1,2,3</sup> 刘江宽<sup>1</sup> 黄喜军<sup>1</sup> 许川佩<sup>1,3</sup> 莫玮<sup>1</sup>

(1. 桂林电子科技大学电子工程与自动化学院 桂林 541004; 2. 广西高校光电信息处理重点实验室 桂林 541004;  
3. 广西自动检测技术与仪器重点实验室 桂林 541004)

**摘要:**数字微流控芯片在生化检测领域的应用越来越广泛,为保障芯片的可靠性必须对其进行全面且高效的故障测试。随着芯片规模的扩大,故障测试问题也越来越复杂。针对数字微流控芯片的灾难性故障测试,为提高故障测试方法的时间效率,本文提出了一种基于混合遗传蚁群算法的测试路径规划方案。首先,该方案优化了芯片故障测试模型的转化过程;其次,先利用遗传算法的全局特性生成全局较优测试路径,并根据较优测试路径形成蚁群算法的初始信息素分布;最后,再利用蚁群算法搜索最优测试路径。该方案适用于离线测试和在线测试,能够兼容规则和非规则芯片。实验仿真结果表明,该方案提高了测试模型转化的效率,在获得较优测试路径的同时改善了测试算法的收敛特性,提高了测试方法的时间效率。

**关键词:**数字微流控芯片;混合遗传蚁群算法;测试路径规划;时间效率

中图分类号: TP306; TN407 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.3040

## Test path scheduling of digital microfluidic biochips based on combined genetic and ant colony algorithm

Wang Jiejun<sup>1,2,3</sup> Liu Jiangkuan<sup>1</sup> Huang Xijun<sup>1</sup> Xu Chuanpei<sup>1,3</sup> Mo Wei<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;  
2. Guangxi College and University Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing, Guilin 541004, China;  
3. Guangxi Key Laboratory of Automatic Detecting Technology and Instruments, Guilin 541004, China)

**Abstract:** As digital microfluidic biochip is widely applied in biochemical detection fields, it is required to test the biochips completely and efficiently to guarantee the reliability of biochip. With the expansion of the size of biochip, the fault testing problem of digital microfluidic biochip is getting more and more complex. Aiming at the catastrophic faults of biochip, a test path scheduling based on combined genetic and colony algorithm is proposed to improve time efficiency of testing method. Firstly, the scheduling optimizes the conversion process of fault testing model. Then, some global excellent test paths are generated by using the global property of genetic algorithm, and the initial pheromone distribution of ant colony algorithm is formed according to these excellent test paths. Finally, the optimal test paths are searched by using ant colony algorithm. This scheduling is suitable for off-line and on-line testing, and it can also be used for rectangle and non-rectangular biochip. The experiment results show that this scheduling can improve the efficiency of the conversion process of fault testing model. At the same time, this scheduling can improve the astringency and the time efficiency of testing algorithm in the case of getting optimized testing paths.

**Keywords:** digital microfluidic biochips; genetic and ant colony algorithm; test path scheduling; time efficiency

## 0 引言

数字微流控芯片(digital microfluidic biochips,

DMFBs)或称芯片实验室(lab-on-a-chip, LoC)是一种新型的生化实验平台,和传统的生化实验设备相比,它具有体积小、灵敏度高、易于集成化等优点。在医学工程、司法鉴定、环境监测等领域有着广阔的应用前景。数字微

收稿日期:2017-03 Received Date: 2017-03

\* 基金项目:国家自然科学基金(61540014, 61671164)、广西自然科学基金(2014GXNSFAA118398)、广西自动检测技术与仪器重点实验室基金(YQ16105)资助项目

流控芯片利用介电润湿原理在二维电极阵列单元上操纵离散实验液滴,实现实验液滴的运输、混合和检测等操作<sup>[1-2]</sup>。芯片涉及微电子、微机械、微流体精确操控等技术,横跨多个技术学科,结构复杂且较容易出现故障。并且芯片的应用对可靠性要求非常严苛,因此必须对芯片进行充分且高效的测试。

针对数字微流控芯片的故障测试问题,Su 等人<sup>[3]</sup>将芯片的故障分为灾难性故障和参数性故障,指出可以通过追踪测试液滴的运动来检测芯片的灾难性故障,并提出了一种汉密尔顿回路测试法,实现了主要的灾难性故障的检测,但该方法不能检测出相邻电极短路故障。因此,Su 等人<sup>[4]</sup>又提出了欧拉回路测试法,该方法能够检测出相邻电极短路故障,但在线测试效率较低。Xu 等人<sup>[5]</sup>提出了一种并行扫描式的测试方法,通过多个液滴并行遍历芯片阵列单元的行和列,缩短了测试时间,但该方法只适用于规则矩形阵列芯片,且在线测试效率不高。Zhao 等人<sup>[6]</sup>在并行扫描式测试方法的基础上,提出了内建自测试法(built in self test, BIST),提高了多个测试液滴的检测效率,但增加了额外的硬件开销。Mitra 等人<sup>[7]</sup>针对非规则阵列的芯片,改进了欧拉回路测试法,使欧拉回路法能够适用于非规则阵列的数字微流控芯片,但在线测试效率同样较低。张玲等人<sup>[8]</sup>提出一种多液滴并行的在线测试策略,将芯片阵列分成等大的子阵列块,对相应的子阵列块进行合并与调度,提高了在线测试效率,但该方法只适用于规则矩形阵列的芯片,且无法检测相邻电极的短路故障。许川佩等人<sup>[9]</sup>提出一种基于蚁群算法的优化测试路径的方法,能够检测相邻电极短路故障,并且兼容规则与非规则芯片,在线测试效率较高,但测试模型的转化过程较复杂,且单一的蚁群算法收敛性较差。

对于数字微流控芯片的灾难性故障测试问题,基于蚁群算法的优化测试路径的方法在故障覆盖和兼容性等方面效果都较好,但仍然存在一些不足。针对其存在的测试模型转化过程复杂、收敛性差的问题,本文提出一种基于混合遗传蚁群算法(GAAA)的测试方案。该方案优化了测试模型的转化过程,并利用混合遗传蚁群算法搜索测试路径,在获得较优测试路径的情况下,提高了算法的收敛性和时间效率。

### 1 数字微流控芯片测试问题的描述

数字微流控芯片的灾难性故障包括电极板开路、相邻电极短路、绝缘体击穿等,灾难性故障会导致芯片完全无法工作。通过追踪测试液滴的运动可以实现芯片灾难性故障的检测,为实现对相邻电极短路故障检测的覆盖,不仅需要测试液滴遍历芯片的电极阵列单元,还需要遍历芯片上相邻电极阵列单元之间的边。测试液滴从液滴

源出发,遍历整个芯片后,到达废液池,废液池处有电容检测电路检测液滴的到达。如果芯片存在故障,会导致液滴在芯片上的停滞,如图1所示。废液池处的电容检测电路如图2所示。

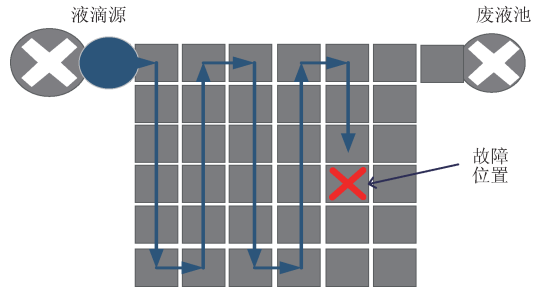


图1 灾难性故障测试

Fig. 1 Schematic diagram of catastrophic fault test

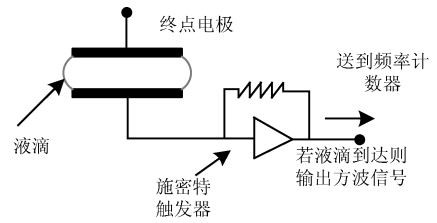


图2 电容检测电路

Fig. 2 Capacitive detection circuit

芯片的灾难性故障测试是一种遍历阵列单元之间边的问题,因此可以将芯片结构抽象为无向图模型  $G(V, E)$ ,其中电极单元抽象为顶点,如果两个电极单元之间是直线相邻关系,则对应顶点之间存在一条边,一个  $6 \times 6$  规则阵列芯片的模型转化如图3所示。对于非规则阵列的芯片,转换的方法相同。

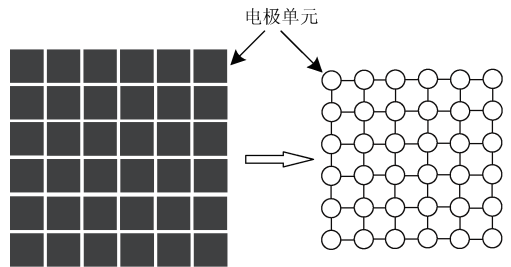


图3  $6 \times 6$  阵列无向图模型转化

Fig. 3 Transformation of undirected graph model for a  $6 \times 6$  microfluidic array

设顶点的集合为  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ , 边的集合为  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ ,  $m$  和  $n$  分别是顶点数和边数。设  $v_{res}$  和  $v_{sink}$  分别代表液滴源和废液池所在的顶点,测试液滴的测试路径可以表示为:

$$Tour = v_{res} e_i \dots e_j v_{sink} \quad (1)$$

设液滴从一个单元移动到直线相邻的另一个单元所用的时间是  $T_{slot}$ , 此为单元时间。定义  $H_{e_i}^l = 1$  表示在某单位时间片  $l$  内, 测试液滴经过边  $e_i$ ,  $H_{e_i}^l = 0$  表示在时间片  $l$  内没有测试液滴经过  $e_i$ 。设  $T$  为一足够大的时间, 表示测试时间的上限。则测试的目标为:

$$\min : z = \sum_{l=1}^T \sum_{i=1}^n H_{e_i}^l \quad (2)$$

测试要求每条边都被访问至少一次, 公式表示为:

$$H_{e_i}^l \geq 1 \quad (3)$$

在线测试和多液滴测试时, 为防止液滴间的意外融合, 还需满足液滴间的静态约束和动态约束。如图 4 所示, “×”表示此单元此时不能被测试液滴访问。

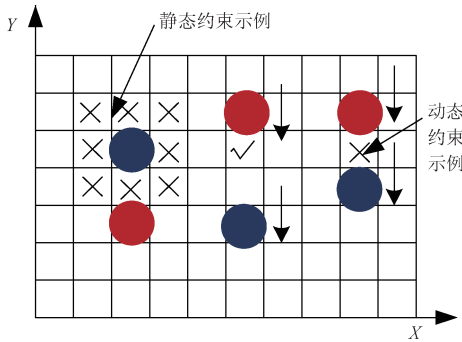


图 4 液滴约束规则  
Fig. 4 Constraint rules of droplets

设两个液滴分别为  $D_i$  和  $D_j$ , 芯片的阵列单元用  $(X, Y)$  坐标表示,  $(X_i^t, Y_i^t)$  表示液滴  $D_i$  在  $t$  时刻的位置。静态约束条件是指, 液滴周围直线相邻和对角相邻的单元上, 同一时间内不能同时存在其他液滴, 即液滴之间需要保持一定的距离, 用公式可表示为:

$$|X_i^t - X_j^t| \geq 2 \text{ 或 } |Y_i^t - Y_j^t| \geq 2 \quad (4)$$

动态约束条件是指液滴下一时刻移动的位置不能与其他液滴相邻, 用公式可表示为:

$$\begin{cases} |X_i^{t+1} - X_i^t| \geq 2 \text{ 或 } |Y_i^{t+1} - Y_i^t| \geq 2 \\ |X_i^t - X_i^{t+1}| \geq 2 \text{ 或 } |Y_i^t - Y_i^{t+1}| \geq 2 \end{cases} \quad (5)$$

离线测试是指芯片上没有进行生化实验时的测试, 在线测试是在进行生化实验的同时进行的测试, 离线测试和在线测试都是保障芯片可靠性必不可少的测试手段。如何在满足液滴约束条件下, 搜索花费测试时间最少的最优测试路径是测试问题的关键。随着芯片规模的不断扩大, 测试问题越来越复杂, 在获得较优测试路径的同时提高测试算法的执行效率对于芯片的测试也至关重要。

## 2 基 GAAA 算法的测试路径规划

### 2.1 芯片故障测试模型

首先, 将数字微流控芯片抽象为以电极阵列单元为

顶点的无向图  $G(V, E)$ 。然后, 对无向图  $G(V, E)$  进行转换, 使实际测试中需要遍历的边转化为动态 TSP 模型中的节点。根据无向图  $G(V, E)$  两条边  $e_i$  与  $e_j$  是否相邻, 确定其转换后的两个节点之间的连通关系。由转换后的节点间的连通关系, 得到非完全连通图  $G'(V', E')$ , 顶点  $V'$  代表原来无向图  $G(V, E)$  的边, 边  $E'$  代表无向图  $G(V, E)$  中边与边之间的连通关系, 非规则芯片阵列模型转化的示意图如图 5 所示。

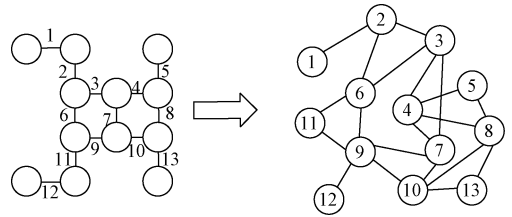


图 5 无向图模型转化  
Fig. 5 Transformation of undirected graph model

文献[9]中的转换方法是对  $G(V, E)$  的所有边手动编号, 根据边与边是否相邻, 列出所有边的连通路程表, 再由连通路程表得到图  $G(V, E)$  的邻接矩阵。当芯片阵列规模较大时, 这种转换方法自动化程度不高, 效率较低。因此本文提出了一种基于一定规则的转换算法, 由初始的无向图  $G(V, E)$  的邻接矩阵通过算法计算得到  $G'(V', E')$  的邻接矩阵, 能够提高测试模型的转换效率, 具体过程如下。

1) 已知  $G(V, E)$  的邻接矩阵为  $A$ , 令图  $G$  中的顶点的编号依次对应顶点在邻接矩阵  $A$  中的行号。

2) 从编号最小的顶点开始, 依次搜索与其他顶点之间是否存在一条边。按照顶点搜索的顺序, 程序自动对搜索到的边从小到大进行编号, 并存储每条边的两个顶点。

3) 按照边的编号, 从小到大进行循环判断边与边之间是否相邻, 判断的依据是存储的两个边的顶点中是否有相同的顶点。由此可得任意两边的连通关系, 并得到图  $G'(V', E')$  的邻接矩阵  $B$ 。

文献[10]中利用 Floyd 算法计算图  $G'(V', E')$  中任意两点间的最短路径, 以此作为两点间边的权值, 构造出一个完全连通图  $G''(V'', E'')$ 。为了进一步提高模型转换的效率, 本文对 Floyd 算法做了一些优化, 优化思路如下。

1) 计算两点  $v'_i$  和  $v'_j$  之间最短路径时, 对待插入的节点  $v'_r$  先进行路长比较, 如果  $d_{ir} \geq d_{ij}$  或  $d_{rj} \geq d_{ij}$  ( $d_{ij}$  代表两个顶点之间的距离), 则说明插入节点  $v'_r$  后,  $v'_i$  经过  $v'_r$  到达  $v'_j$  的路径不会比原来两点之间的路径短, 于是不再计算  $d_{ir} + d_{rj}$ , 直接进行下一节点的搜索, 减少了算法运行中实际的计算量。

2) 无向图中  $v'_i$  到  $v'_j$  的距离与  $v'_j$  到  $v'_i$  的距离相等, 若已计算  $v'_i$  到  $v'_j$  的距离, 则不需再重复计算  $v'_j$  到  $v'_i$  的距离, 可使 Floyd 算法的复杂度由  $O(n^3)$  降为  $O(n^3/2)$ 。

上述方法对测试模型的转化过程进行了优化, 提高了测试模型转化的效率, 能够减少模型转化的复杂度, 且基于一定规则的转化方法更适用于大规模阵列的芯片。

将得到的无向完全连通图  $G''(V'', E'')$  作为数字微流控芯片故障测试的模型, 该测试模型能够检测出相邻电极短路故障, 在满足液滴约束条件下搜索遍历  $G''(V'', E'')$  所有顶点的最优测试路径。

### 2.2 基于 GAAA 算法的测试液滴路径规划

数字微流控芯片的灾难性故障测试是求解在一定约束条件下的最短测试路径的优化问题, 与动态 TSP 问题模型类似<sup>[11]</sup>。GAAA 算法在求解 TSP 等优化问题上具有结果较优, 收敛较快等特点, 改善了单一的蚁群算法由于前期信息素缺乏而导致收敛过慢的情况, 能够提高算法求解测试路径的时间效率。

结合数字微流控芯片的故障测试模型  $G''(V'', E'')$ , 重新定义 GAAA 算法的目标函数, 并重新设置遗传算法阶段的选择算子、交叉算子、变异算子, 蚁群算法阶段的概率选择策略、信息素更新机制、禁忌规则, 求解数字微流控芯片的测试路径。

#### 2.2.1 GAAA 算法应用中遗传算法的定义与设置

测试液滴从液滴源出发, 遍历无向图模型  $G''(V'', E'')$  的顶点后到达废液池, 形成一个起点和终点固定的测试路径序列, 设为  $T = \{v''_0 v''_1 \cdots v''_{n-1} v''_n\}$ , 测试路径的长短决定了测试花费的时间。结合芯片的故障测试模型, 定义遗传算法的相关策略如下。

1) 编码与适应度函数。采用十进制整数编码, 以测试液滴路由路径的一个节点次序作为一条染色体。设染色体  $X_k = \{x_0 \cdots x_i x_j \cdots x_n\}$ ,  $x_i$  代表测试路径中节点  $v''_i$  的十进制编号。设适应度函数为每个染色体对应的测试路径长度的倒数  $1/L_k$ , 测试路径越短则适应度越高。

$$L_k = \sum_{i=0}^{n-1} d_{x_i x_{i+1}} \quad (6)$$

式中:  $d_{x_i x_{i+1}}$  为染色体  $X_k$  代表的测试路径中两个相邻路由节点  $x_i$  和  $x_{i+1}$  之间的距离。

2) 种群生成与选择算子。随机生成一定数量的种群  $N$ , 种群  $N$  即为随机生成的测试路径的集合。采用适应度比例方法从种群  $N$  中选择  $M/2$  对染色体进行交叉操作。设种群  $N$  的个体数为  $n$ , 其中个体  $k$  的适应度函数为  $f_k$ , 则个体  $k$  被选择的概率  $P_k$  为:

$$P_k = f_k / \sum_{j=1}^n f_j \quad (7)$$

3) 交叉算子。按照设定的交叉概率  $P_c$ , 采用顺序交叉法对选择的染色体进行交叉操作。由于测试路径的起

点和终点代表液滴源和废液池, 因此起点和终点是固定的, 不参与交叉操作。具体交叉过程以 10 个基因的染色体为例说明如下。

(1) 随机在父串上选择一个交叉区域, 如两父串和交叉区域为:

$$X_1 = x_0 x_1 x_2 \mid x_3 x_4 x_5 x_6 \mid x_7 x_8 x_9 \quad (8)$$

$$X_2 = x_0 x_8 x_4 \mid x_7 x_6 x_2 x_1 \mid x_3 x_5 x_9 \quad (9)$$

(2) 将  $X_2$  的交叉区加到  $X_1$  中起点  $x_0$  后面, 同样将  $X_1$  的交叉区加到  $X_2$  中起点  $x_0$  后面, 可得:

$$X'_1 = x_0 \mid x_7 x_6 x_2 x_1 \mid x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6 x_7 x_8 x_9 \quad (10)$$

$$X'_2 = x_0 \mid x_3 x_4 x_5 x_6 \mid x_8 x_4 x_7 x_6 x_2 x_1 x_3 x_5 x_9 \quad (11)$$

(3) 依次删除  $X'_1$  和  $X'_2$  中与交叉区相同的基因, 得到最终的子串:

$$X''_1 = x_0 x_7 x_6 x_2 x_1 x_3 x_4 x_5 x_8 x_9 \quad (12)$$

$$X''_2 = x_0 x_3 x_4 x_5 x_6 x_8 x_7 x_2 x_1 x_9 \quad (13)$$

4) 变异算子。根据变异概率  $P_m$ , 采用逆转变异方法, 如染色体  $x_0 x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6 x_7 x_8 x_9$  在区间  $x_2 x_3$  和区间  $x_6 x_7$  处发生断裂, 断裂片段又以反向顺序插入, 于是逆转后的染色体变为  $x_0 x_1 x_2 x_6 x_5 x_4 x_3 x_7 x_8 x_9$ 。这种策略也保证了起点和终点位置是固定的。

遗传算法迭代完成后, 在最后一代种群中按照适应度值从大到小的顺序依次选择  $u$  个适应度值较高的测试路径的解, 根据这  $u$  个较优的测试路径形成蚁群算法的初始信息素分布。

#### 2.2.2 GAAA 算法应用中蚁群算法的定义与设置

蚁群算法采用最大最小蚁群算法, 并结合芯片故障测试问题, 对算法做出一定优化。根据遗传算法得到的较优测试路径, 设置信息素的初始分布。结合故障测试问题, 最大最小蚁群算法的相关策略如下。

1) 目标函数。测试路径是起点和终点固定的非环路路径序列  $T = \{v''_0 v''_1 \cdots v''_{n-1} v''_n\}$ , 目标函数为:

$$\min z = \sum_{i=0}^{n-1} d_{v''_i v''_{i+1}} \quad (14)$$

式中:  $d_{v''_i v''_{i+1}}$  为测试路径中两个相邻的路由节点之  $v''_i$  和  $v''_{i+1}$  间的距离。

2) 信息素上下界与信息素初始分布设置。为了改善蚁群算法收敛较慢的不足, 采用动态更新信息素上下界的策略。设初始时刻信息素的上限  $\tau_{\max}(0)$  和下限  $\tau_{\min}(0)$  为:

$$\tau_{\max}(0) = \frac{1}{1 - \rho} \frac{1}{L_{\text{best}}^{\text{ga}}} \quad (15)$$

$$\tau_{\min}(0) = \frac{\tau_{\max}(0) (1 - \frac{m}{\sqrt{P_{\text{best}}}})}{(\text{avg} - 1) \frac{m}{\sqrt{P_{\text{best}}}}} \quad (16)$$

式中:  $L_{\text{best}}^{\text{ga}}$  是遗传算法求得  $u$  个解中最短路径的长度,  $P_{\text{best}}$  表示蚁群算法收敛时构造最优解的概率,  $\text{avg} = m/2$ ,  $m$  是设置的蚂蚁数量,  $\rho$  是信息素残留系数。动态更新

信息素上下界的策略即每次迭代后都更新信息素上下界,按照式(17)和(18)进行更新,  $L_{ls}$  为本次迭代中最优测试路径的长度。

$$\tau_{\max}(t) = \frac{1}{1 - \rho L_{ls}} \quad (17)$$

$$\tau_{\min}(t) = \frac{\tau_{\max}(t)(1 - \sqrt[m]{P_{\text{best}}})}{(avg - 1)\sqrt[m]{P_{\text{best}}}} \quad (18)$$

根据遗传算法的  $u$  个较优测试路径的解,形成信息素的初始分布,任意路径  $(i, j)$  上的信息素初值设为:

$$\tau_{ij}^g(0) = \tau_c + \tau_{ij}^g \quad (19)$$

式中:  $\tau_c$  是一个常数,  $\tau_{ij}^g$  是根据遗传算法的求解结果转换的信息素值。它们的定义分别如式(20)、(21)。

$$\tau_c = \frac{\tau_{\max}(0) + \tau_{\min}(0)}{2} \quad (20)$$

$$\tau_{ij}^g = \sum_{k=1}^u h_{ij}^k \quad (21)$$

$$h_{ij}^k = \begin{cases} 1/L_k^{ga}, & \text{若解 } k \text{ 中包含路径 } (i, j) \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (22)$$

式中:  $L_k^{ga}$  为  $u$  个较优测试路径中的一个解  $k$  所代表的测试路径的长度。

3) 信息素更新规则。最大最小蚁群算法中只允许最优路径增加信息素,更新规则如下:

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho\tau_{ij}(t) + \sum \Delta\tau_{ij}(t) \quad (23)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \begin{cases} 1/f(S^{\text{best}}), & \text{若最优路径包含 } (i, j) \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (24)$$

式中:  $\rho$  是信息素残留系数,  $\Delta\tau_{ij}(t)$  表示路径  $(i, j)$  上的信息素增量。 $f(S^{\text{best}})$  为本次迭代最优路径的长度  $L_{ls}$  或当前全局最优路径的长度  $L_{gs}$ 。在结合测试问题的应用中,为了减少收敛于局部最优测试路径的概率,本文对  $f(S^{\text{best}})$  采取混合更新策略,即每次迭代都使用局部最优路径  $L_{ls}$ , 仅在固定迭代次数使用全局最优路径  $L_{gs}$ 。

4) 概率选择策略。在时刻  $t$  每只蚂蚁在单元  $i$  选择下一个测试路由由节点单元  $j$  时按照伪随机比例策略选择:

$$j = \begin{cases} \operatorname{argmax}_{l \in allowed_k} \{ [\tau_{il}(t)]^\alpha [\eta_{il}(t)]^\beta \}, & \text{若 } q \leq q_0 \\ J, & \text{否则} \end{cases} \quad (25)$$

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{l \in allowed_k} [\tau_{il}(t)]^\alpha [\eta_{il}(t)]^\beta}, & \text{若 } j \in allowed_k \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (26)$$

式中:  $q_0 \in (0, 1)$  是常数,  $q \in (0, 1)$  是随机数。 $\tau_{ij}(t)$  表示  $t$  时刻节点  $i$  与  $j$  之间的信息素,  $\eta_{ij}(t)$  表示启发信息,  $\eta_{ij}(t) = 1/d_{ij}$ , 本文  $d_{ij}$  为芯片故障测试模型  $G^m(V^m, E^m)$  中两节点间的距离,  $\alpha$  和  $\beta$  分别表示信息素和启发信息的相对强弱。在选择下一节点时,先随机生成  $q$ , 若

$q \leq q_0$ , 则选择使  $[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta$  最大的节点。否则根据式(26),按概率选择下一个路由节点,且所选择的节点要满足  $l \in allowed_k$ , 即此节点当前是满足禁忌规则的。

5) 禁忌判断规则。在线测试需要满足静态约束和动态约束条件。根据芯片上实验液滴的移动路径,把实验液滴及其下一步所走的单元、实验液滴周围邻近的单元存放到一个禁忌表  $tab(t)$  中。实验液滴在不同时刻所处的位置不同,因此禁忌表是随时间变化的。若蚂蚁寻找的下一个节点处于禁忌表中,则查询此节点被禁止的时间,设此为等待时间,并重新搜索节点。将原节点的距离权值加上等待时间与新搜索节点的距离权值作比较,若新节点距离权值较小,则测试液滴向新节点移动,否则测试液滴在原节点等待。

综上,测试方案的整体流程如图 6 所示。

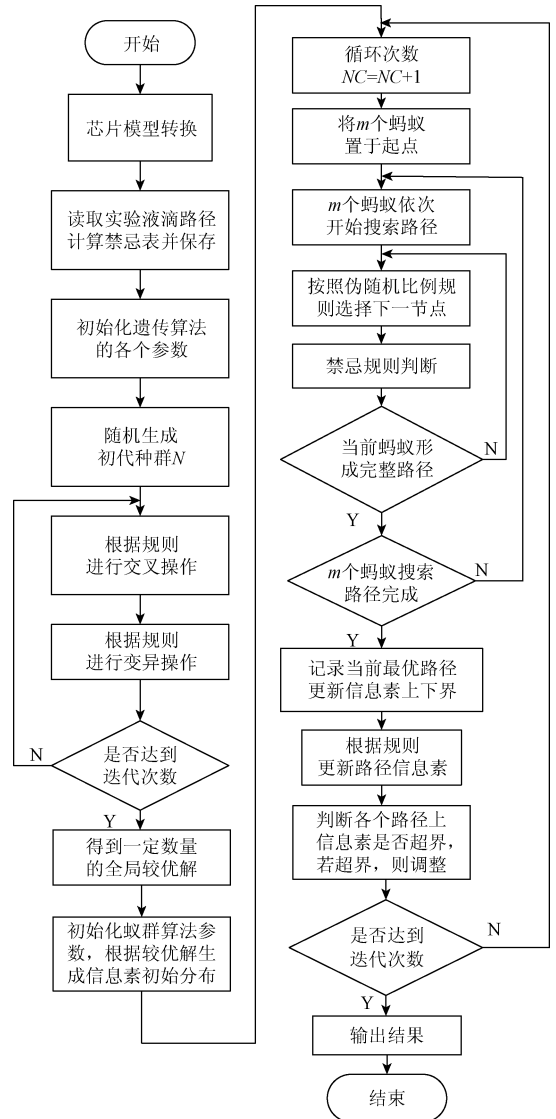


图 6 算法流程

Fig. 6 Flow chart of algorithm



### 3 实验结果与分析

本文以多元生化实验数字微流控芯片为模型<sup>[4]</sup>,验证本文的测试方法的可行性和有效性。芯片阵列模型如图7所示,该芯片包括4个储存实验液滴的储液池和一个用于分发测试液滴的液滴源。样本1是葡萄糖溶液,试剂1中含有葡萄糖氧化酶。样本1和试剂1分别从储液池出发,按照设定的移动路径到达混合区,在混合区混合反应,最后移动到检测位置1。样本2是乳酸稀释液,试剂2中含有乳酸氧化酶,操作流程同上。芯片上的液滴在50 V的驱动电压,16 Hz的变换频率下,从一个单元移动到直线相邻的另一个单元的时间约为62.5 ms,此为液滴移动的单位时间。芯片上混合操作消耗时间约6 s,检测操作花费时间约13 s。具体的操作流程如表1所示。

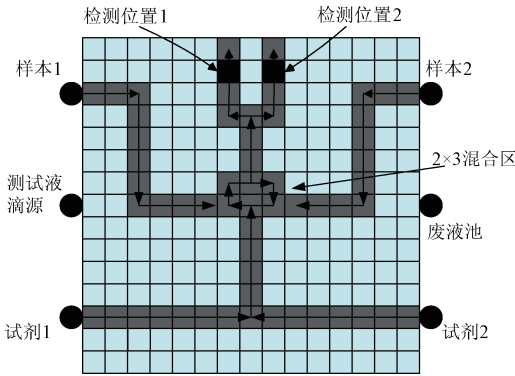


图7 多元生化试验芯片

Fig.7 A 15 × 15 microfluidic array used for multiplexed bioassays

表1 多元生化实验步骤

Table 1 Experiment schedule of multiplexed bioassay

时刻/s	操作步骤
0	样本2和试剂2开始向混合区移动
0.8	样本2和试剂2开始混合
6.0	样本1和试剂1开始向混合区移动,样本2和试剂2继续混合
6.8	样本2和试剂2混合结束,向检测区2移动,样本和试剂1开始混合
12.8	样本1和试剂1混合基数,向检测区1移动,检测区2继续检测
19.8	实验2检测结束,向废弃池移动,实验1继续进行检测操作
25.8	实验1检测结束,向废弃池移动,整个实验结束

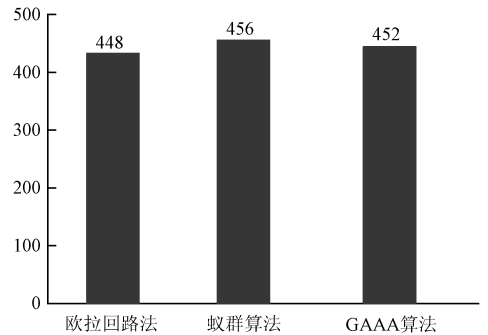
根据芯片的结构建立故障测试模型,并由实验液滴的移动路径获得对应的在线测试禁忌表  $tab(t)$ 。然

后,应用GAAA算法分别进行离线测试和在线测试仿真,对结果分析和评估。结合蚁群算法和遗传算法相关文献[12-16]以及程序调试经验,设置算法的各个参数如下。

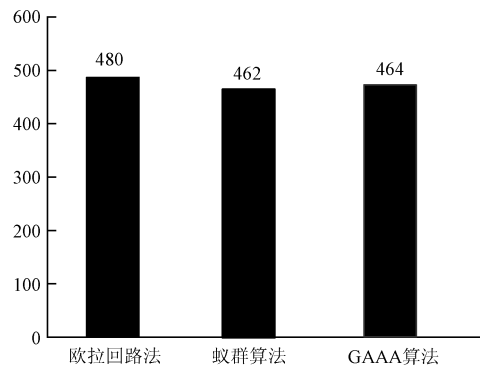
1) 遗传算法部分。初始种群数量  $N = 50$ , 交叉概率  $P_c = 0.85$ , 变异概率  $P_m = 0.08$ , 遗传算法迭代次数为  $N_1 = 150$ , 从最后一代中选择  $u = 30$  个适应度较高测试路径, 形成最大最小蚁群算法的初始信息素分布。

2) 最大最小蚁群算法部分。蚂蚁数量  $m = 30$ , 伪随机比例规则中的  $q_0 = 0.1$ , 信息素启发系数  $\alpha = 1.2$ , 启发因子系数  $\beta = 0.3$ , 信息素残留系数  $\rho = 0.92$ , 收敛最优解的概率  $P_{best} = 0.05$ ; 蚁群算法迭代次数  $N_2 = 1850$ 。

由于欧拉回路法和基于蚁群算法的测试方法同样能够覆盖相邻电极短路故障的检测, 兼容规则与非规则芯片, 故将本文测试方法的结果与这两种测试方法进行比较, 仿真结果如图8所示, 其中纵坐标表示芯片测试所花费的单位时间。



(a) Comparison of off-line test based on testing droplet



(b) Comparison of on-line test based on testing droplet

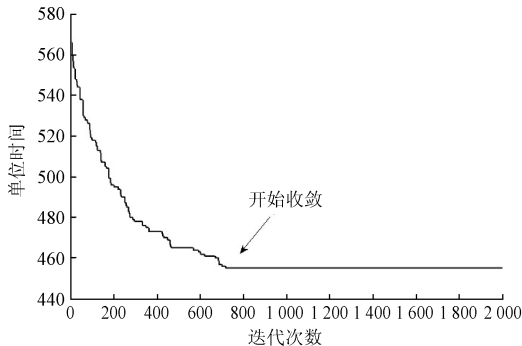
图8 测试结果对比

Fig.8 Comparison of testing results

由结果可知,GAAA算法离线测试结果优于蚁群算法,测试花费的单位时间缩短了4个单位时间,但不如欧拉回路算法。GAAA算法在线测试结果比欧拉回路法少花费18个单位时间,与蚁群算法相接近,结果仅相差2个单位时间。在线测试存在约束条件,应用GAAA算法

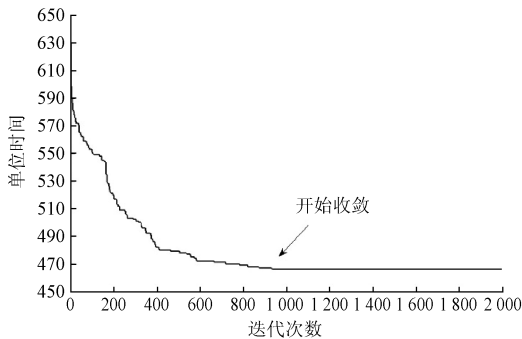
的前过程使用遗传算法时,在随机获得的初始种群中,可能存在由于约束条件而产生等待时间较长的路径。根据遗传算法生成的较优解在形成信息素的初始分布时,测试等待时间较长路径上的信息素被加强了,增加了较长路径被选择的概率,因此,在线测试结果不如蚁群算法。而单液滴离线测试不存在约束条件,遗传算法求得的较优解,直接反映了测试路径所花费的时间,因此能够收敛于更优的解,得到较短的测试路径。

应用 GAAA 算法进行离线测试和在线测试的迭代收敛图如图 9 所示。



(a) GAAA算法离线测试收敛图

(a) Convergence map of off-line test based on GAAA



(b) GAAA算法在线测试收敛图

(b) Convergence map of on-line test based on GAAA

图 9 GAAA 算法测试收敛图

Fig. 9 Convergence map of test based on GAAA

应用 GAAA 算法进行离线测试时在迭代 750 次左右收敛,在线测试在迭代 950 次左右收敛。文献[10]中单一的蚁群算法在应用离线测试时在 1190 次左右收敛,在线测试在 1310 次左右收敛。GAAA 算法在求解测试路径的应用中,算法离线测试的收敛性相比单一的蚁群算法提高了 36.9%,在线测试的算法收敛性提高了 27.4%。由于数字微流控芯片的遍历测试问题是 NP 难的,当芯片规模增大时,欧拉回路测试法的计算量将呈突发式的增长,时间效率较低故不作比较。本文的方法在离线测试结果优于蚁群算法,在线测试结果和蚁群算法相近的情况下,算法收敛性优于蚁群算法,能够更快的求得较优的测试路径,测试方案的时间效率

得到了提高。

## 4 结 论

本文主要通过研究数字微流控芯片的灾难性故障测试模型优化和基于混合遗传蚁群算法的测试路径规划问题,提高了故障测试模型的转化效率,改善了单一蚁群算法求解测试路径时收敛性较差的问题。通过实验验证了该方案的可行性和有效性,且该方案可以检测出灾难性故障中的相邻电极短路故障,兼容规则与非规则芯片。实验结果表明本文的方法在获得较优测试路径的情况下,算法收敛更快,时间效率更高,在应用于大规模芯片测试时可以提高测试方案的执行效率。

## 参考文献

- [1] 凌明祥, 陈立国. 基于介电润湿效应的微液滴操控[J]. 压电与声光, 2013, 35(4): 604-608.  
LING M X, CHEN L G. Manipulation and control of droplets based on EWOD[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2013, 35(4): 604-608.
- [2] 杨敬松, 左春桢, 徐春风, 等. 数字微流控生物芯片的架构级综合算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(5): 1083-1088.  
YANG J S, ZUO CH CH, XU CH F, et al. Research on architectural-level synthesis algorithm of digital microfluidics biochips[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(5): 1083-1088.
- [3] SU F, OZEV S, CHAKRABARTY K. Testing planning and test resource optimization for droplet-based microfluidic systems[J]. Journal of Electronic Testing: Theory and Applications, 2006, 22(2): 199-210.
- [4] SU F, HWANG W, MUKHERJEE A, et al. Testing and diagnosis of realistic defects in digital microfluidic biochips[J]. Journal of Electronic Testing: Theory and Applications, 2007, 23(2): 219-233.
- [5] XU T, CHAKRABARTY K. Parallel scan-like testing and fault diagnosis techniques for digital microfluidic biochips[J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits System, 2007, 1(2): 148-158.
- [6] ZHAO Y, XU T, CHAKRABARTY K. Built-in self-test and fault diagnosis for lab-on-chip using digital microfluidic logic gates [C]. IEEE International Test Conference, 2008: 1-10.
- [7] MITRA D, GHOSH S, RAHAMAN H, et al. Test planning in digital microfluidic biochips using efficient eulerization techniques [J]. Journal of Electronic Testing, 2011, 27(5): 657-671.

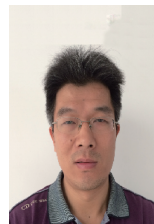
- [ 8 ] 张玲, 邝继顺, 林静, 等. 数字微流控生物芯片的并行在线测试[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(1): 98-102, 107.  
ZHANG L, KUANG J SH, LIN J, et al. Parallel on-line testing for digital microfluidic biochips [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2013, 47 ( 1 ): 98-102, 107.
- [ 9 ] 许川佩, 蔡震, 胡聪. 基于蚁群算法的数字微流控生物芯片在线测试路径优化[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6): 1417-1424.  
XU CH P, CAI ZH, HU C. On-line test path optimization for digital microfluidic biochips based on ant colony algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(6): 1417-1424.
- [10] ZHAO Y, CHAKRABARTY K. On-line testing of lab-on-chip using reconfigurable digital microfluidic compactors[J]. International Journal of Parallel Programming, 2009, 37(4): 370-388.
- [11] 许川佩, 陈春艳, 汪杰君. 引脚约束的数字微流控生物芯片在线并行测试[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(9): 2265-2271.  
XU CH P, CHEN CH Y, WANG J J. Online parallel testing of pin-constrained digital microfluidic biochips[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(9): 2265-2271.
- [12] 石刚, 井元伟, 徐皓冬, 等. 利用改进的遗传算法解决全局寻优问题[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(s3): 2329-2332.  
SHI G, JING Y W, XU AI D, et al. Using an improved genetic algorithm to solve global optimization [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(s3): 2329-2332.
- [13] 张成, 凌有铸, 陈孟元. 改进蚁群算法求解移动机器人路径规划[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(11): 1758-1764.  
ZHANG CH, LING Y ZH, CHEN M Y. Path planning of mobile robot based on an improved ant colony algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(11): 1158-1764.
- [14] 马学森, 曹正, 韩江洪, 等. 改进蚁群算法的无线传感器网络路由优化与路径恢复算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9): 1320-1327.  
MA X S, CAO ZH, HAN J H. et al. Routing optimization and path recovery algorithm in wireless sensor network based on improved ant colony algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(9): 1320-1327.
- [15] 林基明, 班文娇, 王俊义, 等. 基于并行遗传-最大最

小蚁群算法的分布式数据库查询优化[J]. 计算机应用, 2016, 36(3): 675-680.

LIN J M, BAN W J, WANG J Y, et al. Query optimization for distributed database based on parallel genetic algorithm and max-min ant system[J]. Journal of Computer Applications, 2016, 36(3): 675-680.

- [16] 梁旭, 刘才慧. 基于混合粒子群算法的在线检测路径规划[J]. 国外电子测量技术, 2015, 15(12): 30-34.  
LIANG X, LIU C H. Path planning for on machineverification system based on hybrid particle swarm o-ptimization[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 15(12): 30-34.

## 作者简介



**汪杰君**, 1997年于沈阳建筑大学获得学士学位, 2005年于桂林电子科技大学获得硕士学位, 现为桂林电子科技大学副教授, 主要研究方向为光电检测和 Information 处理等方向。

E-mail: wangjiejun@guet.edu.cn

**Wang Jiejun** received B. Sc. from Shenyang Jianzhu University in 1997, and M. Sc. from Guilin University of Electronic Technology in 2005, respectively. Now he is an associate professor in Guilin University of Electronic Technology. His main research interests include optoelectronic information testing and processing.



**刘江宽**, 2013年于河南理工大学获得学士学位, 现为桂林电子科技大学硕士研究生, 主要研究方向为数字微流控芯片测试技术。

E-mail: 942061050@qq.com

**Liu Jiangkuan** received B. Sc. from Henan Polytechnic University in 2013. He is currently a M. Sc. candidate in Guilin University of Electronic Technology. His main research interest includes digital microfluidic biochips test technology.



**黄喜军**(通讯作者), 分别在2000年和2005年于桂林电子工业学院分别获得学士学位和硕士学位, 现为桂林电子科技大学讲师, 主要研究方向为智能优化、集成电路测试。

E-mail: 1506535346@qq.com

**Huang Xijun** (Corresponding author) received B. Sc. and M. Sc. from Guilin University of Electronic Science and Technology in 2000 and 2005, respectively. Now, he is a lecturer in Guilin University of Electronic Science and Technology. His main research interests include intelligent optimization and integrated circuit test.





许川佩, 分别在 1990 年和 2001 年于桂林电子科技大学分别获得学士学位和硕士学位, 2006 年于西安电子科技大学获得博士学位, 现为桂林电子科技大学教授, 主要研究方向为集成电路测试、自动测试系统。

E-mail: xcp@guet.edu.cn

**Xu Chuanpei** received B. Sc. and M. Sc. from Guilin University of Electronic Technology in 1990 and 2001, and Ph. D. from Xidian University in 2006, respectively. Now she is a professor in Guilin University of Electronic Technology. Her main research interests include integrated circuit test and automatic test system.



莫玮, 1988 年于北京邮电学院获得硕士学位, 2000 年于西安电子科技大学获得博士学位, 现为桂林电子科技大学大学教授, 主要研究方向为智能信息处理与测试技术。

E-mail: kf\_fan@163.com

**Mo Wei** received M. Sc. from Beijing University of Posts and Telecommunications in 1988, and Ph. D. from Xidian University in 2000, respectively. Now he is a professor in Guilin University of Electronic Technology. His main research is intelligent information processing and testing technology.