

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.08.005

# 基于粒子群算法的数字微流控芯片 在线测试路径优化\*

许川佩<sup>1,2</sup> 吕莹<sup>1,2</sup> 黄喜军<sup>1,2</sup> 莫玮<sup>1,2</sup>

(1. 桂林电子科技大学电子工程与自动化学院 桂林 514004; 2. 广西自动检测技术与仪器重点实验室 桂林 514004)

**摘要:**数字微流控生物芯片的稳定性和安全性在生化实验中具有很高的要求,为保证实验结果的准确,需要对芯片进行检测。通过分析芯片结构、实验液滴的路径,提出一种基于粒子群算法的针对数字微流控芯片灾难性故障在线测试路径优化方案。通过自适应调整算法惯性权值,设置算法的收敛速度因子和解的聚集程度因子,将收敛速度和局部解聚集程度可视化改进算法。增加液滴移动序列的交换机制,在芯片的约束条件下规划测试液滴的移动路径,从而缩短测试路径长度。仿真实验选择 $15 \times 15$ 阵列模型、 $7 \times 11$ 阵列模型、 $7 \times 7$ 阵列模型进行仿真实验,结果表明,该方案完成了对芯片的测试,提高了算法收敛速度,并有效缩短了测试路径,提高测试效率。

**关键词:**数字微流控芯片;路径优化;粒子群算法

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

## On-line test route optimization of digital microfluidic chip based on particle swarm optimization

Xu Chuanpei<sup>1,2</sup> Lv Ying<sup>1,2</sup> Huang Xijun<sup>1,2</sup> Mo Wei<sup>1,2</sup>

(1. School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;  
2. Guangxi Key Laboratory of Automatic Detection Technology and Instrument, Guilin 541004, China)

**Abstract:**The stability and safety of digital microfluidic biochip have high requirements in biochemical experiments. To ensure the accuracy of the experimental results, the chip needs to be tested. In this paper, proposed an algorithm for optimize online test route, based on particle swam optimization and the scheme established constraints path which used in the experimental process, application of exchange mechanism in test route sequence in order to satisfy the constraints in the biochemical process, in order to improving the algorithm's convergence speed and balance the gobal search abilty and local search abilty, this paper adjusting the inertia weight of the algorithm and set the convergence rate factor and degree of aggregation of the algorithm. Simulation experiments were carried out to select  $15 \times 15$  array model,  $7 \times 11$  array model,  $7 \times 7$  array model for simulation experiments, the experimental results show that the method can be used for chip online testing, effectively shortening the test route, and improve the test efficiency.

**Keywords:**digital microfluidic system; route optimization; particle swarm optimization algorithm

## 0 引 言

数字微流控生物芯片,又称为片上实验室(lab-on-a-chip)<sup>[1]</sup>,主要应用在生物化学领域以及对可靠性要求非常严格的医学领域,对芯片的在线测试是保证实验正确

的重要途径。文献[1]提出利用数字逻辑与门,在液滴路径的终点添加检测电路,检测输出波形,从而辨别芯片中是否有故障。该方案简化了检测电路,但存在电容传感器灵敏度带来的误差,对测试的时间没有优化。文献[2]将数字微流控芯片转换为有向图模型,将其分为若干不重叠的子图,且每个子图独立测试,根据哈密尔顿

收稿日期:2017-03 Received Date: 2017-03

\* 基金项目:国家自然科学基金(61671164,61540014)、广西自然科学基金(2014GXNSFAA118398)资助项目

路径问题测试规划路径,减少总的测试时间,但不能检测电极短路故障。文献[3]使用整数线性规划法,定义液滴从一个阵列单元移动到相邻单元的时间为单位时间,确定微流控芯片单元被访问的所有时间段,限制总时间成本。该方法有效减少测试时间,但是检测的故障类型有限。文献[4]提出并行扫描测试的方法,先用单个液滴检测外围单元,再用多个液滴同时检测奇数列,同样方法再检测偶数列,缩短了测试时间,但是仅能用于离线测试。文献[5]将芯片阵列分为若干子阵列,利用实验没有用到的单元实现并行测试,但是具体实现复杂。

目前对于数字微流控芯片的测试研究中,主要分为离线测试和在线测试,离线测试实现简便但应用受限,在线测试中主要对测试路径进行优化,主要划分子阵列分别测试,整体规划比较复杂。因此本文提出一种在线测试路径优化的方案,即在进行生化实验的同时进行芯片故障的检测,通过优化测试路径而减少测试时间,使测试液滴在遍历所有单元阵列的条件下所行走的路径最短,该测试问题属于 NP 难问题<sup>[2]</sup>。在求解规模较大的 NP 问题时,可削减搜索范围使用局部搜索,但容易陷入局部极值,为得到更好的最优解可使用全局搜索的方法,但运行时间较长。综合局部搜索的全局搜索能力的粒子群算法可兼顾二者的优点,且粒子群算法具有收敛速度快,建模简单等特点,本文将其用于解决芯片在线测试路径优化问题。

## 1 数字微流控芯片

### 1.1 数字微流控生物芯片特点

数字微流控芯片利用电润湿原理操纵纳升级的液滴在电极阵列单元间移动,实现生化实验功能<sup>[3]</sup>。电润湿原理如图 1 所示,通过对液滴施加电场,改变液滴的表面张力,利用在疏水聚合物表面的液体和固体的表面张力的变化,从而驱动液滴。通过对芯片阵列单元上的电极施加线性变化的电势差,可以控制液滴沿电极变化的方向移动,也可以用时钟电压控制液滴按照自定义模式在二维阵列单元上任意移动<sup>[4]</sup>。通过调节控制电压(0 ~ 90 V)改变液滴的移动速度,最高可达到 20 cm/s<sup>[5]</sup>。

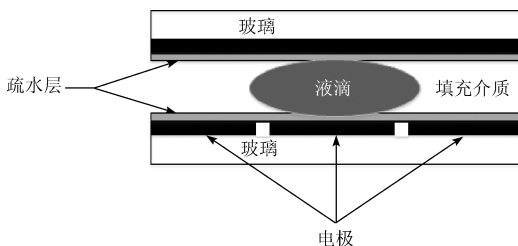


图 1 电润湿原理图

Fig. 1 Schematic diagram of electrowetting

### 1.2 数字微流控芯片故障分类

数字微流控芯片的故障分为灾难性故障和参数性故障<sup>[6]</sup>。灾难性故障是由于绝缘体击穿、相邻电极短路、电极板断路等一些原因造成液滴停留在芯片系统的表面不能移动,造成系统不能正常工作。参数性故障是由于液滴和包容介质的黏性发生变化,或由于尺寸参数误差造成系统在运行时出现比较大的偏差,参数性故障并不会对系统的工作产生很大的影响<sup>[7]</sup>。

本文研究灾难性故障测试路径优化,由于灾难性故障会造成液滴停留在系统表面,因此使用测试液滴遍历芯片所有阵列单元的方法进行检测。给定测试液滴的起点和终点,通过调整电极阵列的电势控制液滴在电极阵列单元上的移动,在终点设置检测电路,检测测试液滴是否到达。如图 2 所示,在终点设置 RC 检测电路。对于没有故障的芯片,液滴能到达终点,液滴的包容介质与空气的介电常数不同,终点单元的电容值发生改变,检测电路有信号输入,但是对于有故障的单元,测试液滴会被卡住,无法到达终点,检测电路没有信号输入<sup>[8]</sup>。

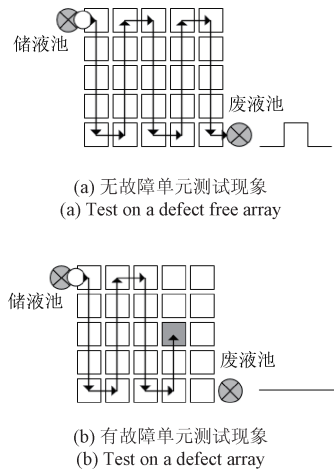


图 2 测试过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of testing process

## 2 测试方案

### 2.1 测试数学模型

数字微流控芯片在线测试路径优化是在固定起点和终点情况下,寻找遍历所有阵列单元成本最低的路径<sup>[9]</sup>。这种遍历问题可以转换为图论模型,将阵列单元抽象为图论中非完全连通图  $G(V, E)$  模型,  $V$  表示微流控芯片中的每个阵列单元,  $E$  表示两个直接相邻单元是否直接连通,如果点  $V_1, V_2$  是连通的,则  $E(V_1, V_2)$  存在,如图 3 所示。

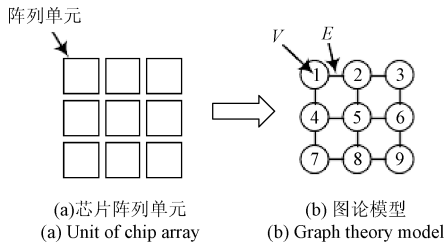


图3 芯片单元和图G模型

Fig.3 Chip unit and graph G model

抽象的图论模型图  $G(V, E)$  为无向图,对于芯片测试问题是基于带权连通图建立的,需要将非完全连通图转换为带权连通图<sup>[10]</sup>。本文使用 Floyd 算法计算出图  $G$  中任意两点间的最短路径长度,并作为两点间的权值,构建一个有向图  $G'(V', E')$  的邻接矩阵。

将阵列单元转化为  $G(V, E)$  后,以  $3 \times 3$  阵列为例,对各阵列单元编号(图3)。若点  $i$  与点  $j$  相通,则令  $E_{ij} = 1$ ,点  $i$  与点  $j$  不相通,则令  $E_{ij} = 0$ 。建立邻接矩阵。无向图的邻接矩阵如下所示:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

采用 Floyd 算法求出任意两点间的最短路径,将图中任意两点间的最短长度作为两点间边的权值,以此构建出一个有向图  $G'^{[11]}$ 。基本思想为从任意一点开始,两点间的距离为边的权值,如果两个点之间没有相连,则权值为无穷大。对于任意顶点  $u, v, w$ ,定义  $u$  到  $w$  的距离为  $d_{uw}$ ,  $w$  到  $v$  的距离  $d_{wv}$ ,如果  $u$  到  $w$  的距离  $d_{uw} > d_{uw} + d_{wv}$ ,则  $u$  到  $v$  的权值为  $d_{uw} + d_{wv}$  的值。使用 Floyd 将无向图转换为有向图  $G'(V', E')$  后的带权邻接矩阵如下所示:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 3 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 3 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 0 & 1 & 2 & 1 & 4 & 3 & 2 \\ 1 & 2 & 1 & 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 1 & 2 & 1 & 2 \\ 3 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 1 & 2 & 1 \\ 2 & 3 & 4 & 1 & 2 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 2 & 3 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 1 \\ 4 & 3 & 2 & 3 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

设芯片的阵列单元有  $n$  个,当液滴经单元  $i$  到单元  $j$  时,用  $x_{ij} = d_{ij} (i \neq j)$ ,  $d_{ij}$  表示单元  $i$  到单元  $j$  的权值,  $x_{ij} = 0 (i \neq j)$  表示未经过单元  $i, j$ 。定义目标函数为:

$$f(x) = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad i \neq j; i, j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

该目标函数表示测试液滴遍历全部的芯片阵列单元后总路径长度最短,由于液滴移动的速度一定,在路径最短的前提下测试所花费的时间最少。

微流控芯片在线测试由于实验和测试同时进行,测试必须满足多个约束条件<sup>[12]</sup>。将测试过程中的约束条件表示如下。

芯片阵列所有单元被测试液滴访问至少一次,表示为:

$$\sum_{i=1}^n X_i \geq 1 \quad (2)$$

测试液滴的出发点和终点仅被访问一次,  $s$  表示液滴起始点,  $e$  表示液滴遍历终点,表示为:

$$\sum_{i=1}^n x_{si} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, n; i \neq s \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ie} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, n; i \neq e \quad (4)$$

如果测试液滴和实验液滴相邻时,两液滴可能会融合,因此定义流体约束条件,以保证两液滴之间的距离,防止出现实验要求之外的融合<sup>[13]</sup>。

流体约束条件包括静态流体约束条件和动态流体约束条件,静态流体约束条件定义为:两个或多个液滴不能同时使用两个相邻的或对角相邻的阵列单元,否则会导致两液滴融合<sup>[14]</sup>。动态流体约束条件定义为:一个液滴下一步移动到的单元,不能接近另一个液滴,否则会导致液滴相邻单元激活,影响液滴操作<sup>[15]</sup>。令  $X_1^k, X_2^k$  分别表示  $k$  时刻实验液滴和测试液滴占用的行,  $Y_1^k, Y_2^k$  分别表示  $k$  时刻实验液滴和测试液滴占用的列。

则静态约束条件表示为:

$$|X_1^k - X_2^k| \geq 2 \text{ 或 } |Y_1^k - Y_2^k| \geq 2 \quad (5)$$

动态流体约束条件表示为:

$$|X_1^{k+1} - X_2^k| \geq 2 \text{ 或 } |Y_1^{k+1} - Y_2^k| \geq 2 \quad (6)$$

## 2.2 基本粒子群算法

粒子群算法是由 Kennedy 和 Eberhart 提出的基于群智能的演化算法,源于对鸟群觅食行为的研究,采用群体进化和适应度函数评价优化结果。标准粒子群算法的进化方程为:

$$V_i(t+1) = \omega V_i(t) + c_1 r_1 (P_i(t) - X_i(t)) + c_2 r_2 (P_g(t) - X_i(t)) \quad (7)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (8)$$

算法中每个粒子代表问题的一个可行解,具有位置和速度两个属性,  $V_i(t+1)$  表示当前粒子在解空间中的

移动速度,而  $X_i(t+1)$  表示当前粒子在解空间中的位置。以粒子位置坐标对应的适应度函数值确定粒子的好坏<sup>[7]</sup>。粒子运行的速度根据粒子经验和周围粒子的经验调整粒子飞行的方向,以此使粒子能朝着更好的方向发展。在搜索最优解的过程中,对算法收敛起着重要作用的是全局搜索能力与局部搜索能力的平衡关系。

其中  $\omega$  为惯性权值,惯性权值的设置影响了粒子的历史速度对当前速度的影响,决定上次迭代中速度的保留程度,在标准粒子群算法中  $\omega$  的值随机选取; $c_1$ 、 $c_2$  称为加速因子,是两个自然数; $r_1$ 、 $r_2$  是两个 0 ~ 1 的随机数,用来限制粒子的速度,改善搜索结果。

$P_i(t)$  是粒子个体  $i$  迭代  $t$  代时经历的最好位置,称为个体最优解。设  $f(x)$  为粒子的适应度值,则:

$$P_i(t+1) = \begin{cases} P_i(t), f(X_i(t+1)) > f(P_i(t)) \\ X_i(t+1), f(X_i(t+1)) \leq f(P_i(t)) \end{cases} \quad (9)$$

$P_g(t)$  是有  $m$  个粒子的粒子群体在迭代  $t$  代时所经历的最好的位置,称为全局最优解。 $P_g(t)$  为:

$$P_g(t) = \underset{P_m(t), i \in \{1, m\}}{\operatorname{argmin}} (f(P_1(t)), f(P_2(t)), \dots, f(P_m(t))) \quad (10)$$

### 2.3 基于粒子群算法的数字微流控生物芯片在线测试路径优化

满足约束条件的测试路径优化为一个组合优化问题,本文引入交换子和交换序的概念,对基本粒子群算法进行改进,使其适用于数字微流控芯片的检测。算法的解  $X$  表示检测液滴遍历阵列单元的顺序,算法的速度影响粒子群算法的收敛,本文对基本算法进行重新定义,自适应调整惯性权值,使得算法快速收敛,避免陷入局部解。为满足测试的约束条件,将受约束的路径按时间序列读取存储,采用解路径和约束路径按时间序列对比判断的方法实现。

#### 2.3.1 交换序列的定义

根据芯片的流体约束条件和在线测试的特点,选择对比交换的方法实现在线并行测试。更新公式定义如下:

$$V_i^{t+1} = \omega V_i^t + \alpha(P_i^t - X_i^t) + \beta(P_g^t - X_i^t) \quad (11)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (12)$$

算法中位置  $X_i^{t+1}$  表示液滴遍历阵列单元的顺序序列,速度  $V_i^{t+1}$  是多个交换子组成的交换序。设  $n$  个单元的微流控芯片测试的路径解为  $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ , 表示液滴遍历路径单元的顺序,为了将粒子群算法应用于液滴遍历阵列单元的问题中,需对各项参数进行新的定义。算法的解表示液滴遍历阵列单元的顺序。定义交换子  $sp(i_1, i_2)$ , 表示路径序列中对应的点  $i_1$  和  $i_2$  的交换。设  $X$  是一个路径解,  $X' = X + sp(i_1, i_2)$  表示路径序

列  $X$  通过交换子  $sp(i_1, i_2)$  运算,使单元  $i_1$ 、 $i_2$  遍历顺序互换之后获得的新的路径,例  $X = (1, 2, 3, 4, 5)$ , 交换算子为  $sp(1, 4)$ , 则  $X + sp(1, 4) = (4, 2, 3, 1, 5)$ 。

算法的速度是由  $n$  个交换子组成的队列,  $V = (sp_1, sp_2, \dots, sp_n)$ 。速度和路径解序列相加表示速度中的交换子依次作用在路径解序列上。交换子之间相加的意义是多个交换序合并成一个新的交换序。设  $\eta \in (0, 1)$ , 速度序列  $V$  中有  $n$  个交换子,  $\eta \times V$  的意义是  $\eta \times n$  取整为  $m$  后,取  $V$  的前  $m$  个交换子构成新的交换序列。

$P_i^t - X_i^t$ 、 $P_g^t - X_i^t$  得到的都是交换序列,其中  $P_i^t$  表示当前粒子个体最优路径,  $P_g^t$  表示第  $t$  代全局最优路径。速度  $V_i^{t+1}$  是一个交换序,由多个交换子组成,粒子的解序列  $X_i^t + V_i^{t+1}$  表示对解路径的更新。 $\alpha$ 、 $\beta$  为 0 ~ 1 的随机数,  $\alpha(P_i^t - X_i^t)$  表示交换序  $(P_i^t - X_i^t)$  中的交换子以  $\alpha$  的概率保留;同理  $\beta(P_g^t - X_i^t)$  表示交换序  $(P_g^t - X_i^t)$  中的交换子以  $\beta$  的概率保留。因此,  $\alpha$ 、 $\beta$  的值越大,保留的交换子就越多,影响就越大。其中  $\alpha$  的值大,说明粒子的当前最优解  $P_i^t$  的影响大,  $\beta$  的值大则说明粒子群的全局最优解  $P_g^t$  的影响大。

#### 2.3.2 自适应调整惯性权值

惯性权值  $\omega$  控制粒子的历史速度对当前速度的影响,并且平衡局部和全局搜索最优路径的能力。当  $\omega$  取值较小时,粒子局部搜索能力强,加快收敛速度。当  $\omega$  取值较大时,有利于提高粒子全局搜索的能力,跳出局部最优。为了能取得粒子群位置的全局最优解,下次迭代的全局最优解一定要优于或等于本次迭代的全局最优解,而无论是否陷入局部最优,都会出现聚集现象,即所有的粒子聚集在某个或某几个特定位置。在标准粒子群算法中,惯性权值是随机选取或是根据经验选取,粒子群的收敛速度有同一性。

根据粒子群算法运行中的收敛特性和聚集特性,使粒子群快速收敛并防止陷入局部最优。本文设计一种自适应调整惯性权值的方法,定义如下。

自适应惯性权值  $\omega = \omega_0 - s\omega_1 + J\omega_2$ , 其中  $\omega_0$  是初始惯性权值,取值 0.9,  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  分别是速度因子,聚集因子影响下的惯性权值,初始状态下,分别取值 0.15 和 0.105。

$s$  为收敛因子,设  $f(P_g^t)$  是粒子群在  $t$  次迭代全局最优解的适应度值,即液滴以  $P_g^t$  序列按顺序遍历阵列单元的路径长度,记  $s = \frac{f(P_g^{t+1})}{f(P_g^t)}$ ,  $s$  值反应了粒子到粒子群当前最优解的距离,  $s$  值越大表示越靠近当前最优解,此时需要减小  $\omega$  以加速收敛,反之,则应增大  $\omega$  值,提高算法全局搜索能力,增加搜索范围。

聚集程度是影响算法性能的一个重要因素,设粒子群中  $m$  个粒子的局部最优解适应度平均值为  $f_{\text{meat}} =$

$\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m f(P_i^t)$ , 聚集因子  $J = \frac{f(P_g^t)}{f_{meat}}$ ,  $f(P_g^t)$  表示粒子第  $t$  次迭代的全局最优解适应度值。 $J$  值较大时说明粒子聚集在某处程度高, 此时提高  $\omega$  值扩大搜索能力, 避免陷入局部最优。在初始状态下,  $s, J$  取值为 0。

2.3.3 约束条件实现方法

测试过程中为避免测试液滴对实验试剂液滴产生干扰, 需要满足约束条件, 按时间序列读取实验液滴移动路径, 由式(5)、(6), 分别计算出按时间序列排序的实验液滴占用单元的左、右、上、下、左上、右上、左下、右下方向的约束单元组成约束路径, 设约束路径为  $C = (c_1, c_2, \dots, c_k)$ ,  $c_k$  表示在  $k$  时刻受约束的单元, 粒子群算法的解空间在本测试案例中表示测试液滴的移动路径, 设为  $X = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ , 同理,  $x_k$  表示在  $k$  时刻检测液滴占用单元  $x_k$ , 对比  $C = (c_1, c_2, \dots, c_k)$  和  $X = (x_1, x_2, \dots, x_k)$  同维度的值, 如果在第  $i$  时刻和  $t$  时刻,  $c_i = x_i, c_t = x_t$ , 则说明测试液滴和实验液滴发生了冲突, 将所有在同维度下相等的值提取出排列成交换序列与原位置进行运算。举例说明: 若  $C = (1, 2, 3, 4, 5), X = (3, 2, 1, 4, 5)$  则交换子为  $(4, 5)$ , 进行交换后, 位置  $X = (3, 2, 1, 5, 4)$ , 与禁忌路径没有重合。为避免交换序列重复交换, 对每个提取的交换子设置 bool 值, 出现过的交换序列设置其 bool 值为 true, 在粒子群算法进行更新时, 如 bool 值为 true, 跳过该交换子。使用粒子群算法解决约束问题时, 较多的研究使用增将冲突单元直接进行交换, 加约束函数的操作, 但会使运算过程变得更为繁琐, 本文利用算法离散化的交换子和交换序的概念, 将约束问题按时间序列排序, 避免增加约束函数的复杂运算, 提高算法计算效率。

2.3.4 算法流程

根据上文所述, 本文定义的粒子群算法基本流程如下。

- 1) 初始化粒子群, 初始化惯性权值及各项参数, 群体中每个粒子赋一个初始解, 该解为随机的解。
- 2) 算法的初始解与禁忌单元序列对比, 相同维度下有重合, 将重合单元取出作为交换子。
- 3) 根据式(1) 计算每个粒子的目标函数值, 即每个粒子代表的路径长度。
- 4) 计算每个粒子的适应度值的平均值, 求出聚集因子。
- 5) 求收敛因子, 计算惯性权值。
- 6) 判别交换序列中是否有 bool 值为 true 的交换子, 存在, 则删除。
- 7) 根据式(11) 更新粒子速度。
- 8) 根据式(12) 更新粒子最优位置。
- 9) 迭代周期  $t = t + 1$ 。
- 10) 判断是否达到终止条件, 没达到则返回步骤 2)。

11) 达到终止条件, 结束。  
优化测试路径流程如图 4 所示。

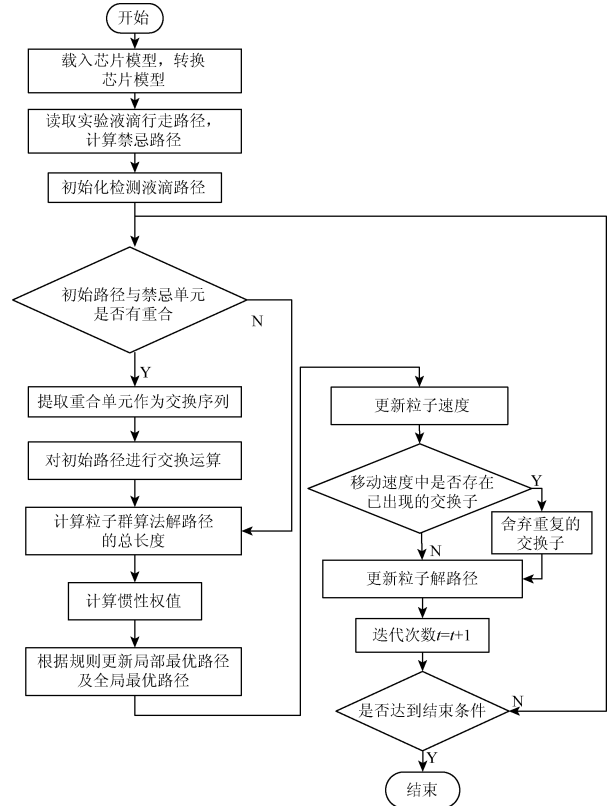


图 4 测试路径优化流程

Fig. 4 Flow chart of optimize the test route

3 实验与分析

为验证粒子群算法的有效性, 本文选用多功能液体检测的实验作为仿真对象, 用于多功能液体实验的微流控芯片如图 5 所示, 在该液体测试实验中共有两组实验液滴分别进行葡萄糖检测实验和乳酸检测试验。S1 为含有葡萄糖的液体, 作为样本, R1 为含有氧化酶的检测

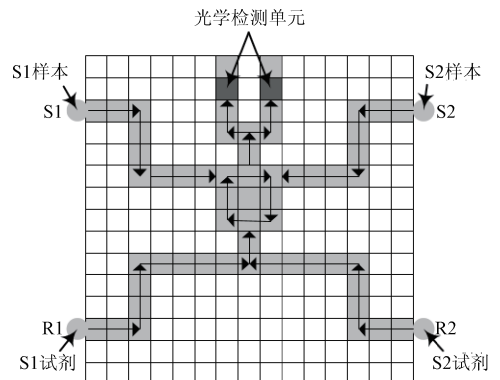


图 5 多功能液体测试示意图

Fig. 5 Schematic of multiple body fluid experiment

液滴,进行葡萄糖检测试验。S2 和 R2 是作为乳酸检测试验的样本,其中 S2 是含有乳酸的液滴,R2 是含有乳酸脱氢酶的液滴。两组液滴分别在混合池中混合反应,再分别送往光学检测点进行检测,随后送到废液池。

本文实验在 Inter i5 2.6 GHz,4 G 内存的硬件,Visual Studio2015 的软件环境下,使用 C++ 编程仿真测试。实验选取粒子群体数为 500,惯性权值  $\omega_0 = 0.9$ ,受收敛因子所用的惯性权值  $\omega_1 = 0.15$ ,受聚集因子作用的惯性权值  $\omega_2 = 0.105$ ,使用粒子群迭代更新按式(11)、(12)更新。式(12)中,学习因子  $\alpha, \beta$  的值同为 0.2 时算法性能较好,迭代次数为 1000 次。输出结果为测试液滴遍历阵列单元的路径序列,以及遍历所有单元后液滴所行走的路径单位长度。单位长度定义为相邻路径间距离长度为 1。重复运行 30 次取平均值。采用寻找欧拉回路的方法进行在线测试同样采用将芯片阵列转化为图论模型遍历,为说明本文算法对路径优化的有效性,将实验结果与欧拉回路测试法及标准粒子群算法进行对比。采用本文所述方法遍历全阵列的总路径约为 628 单位长度,采用文献[4]中寻找欧拉回路的方法遍历所有的单元,路径长度为 648 单位,路径缩短 3.09%,对比基本粒子群算法遍历所有单元,路径长度 636 单位,路径缩短 1.26%,如图 6 所示。

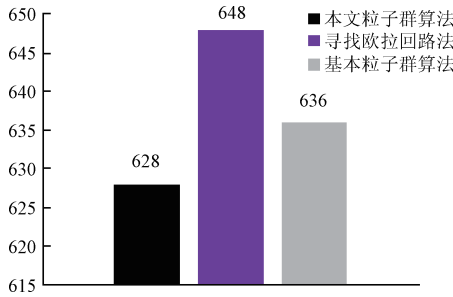


图 6 15 × 15 阵列模型测试路径长度

Fig. 6 Length of test route in 15x15 array model

使用文献[7]中实验模型,分别使用上述算法遍历测试,优化粒子群算法得到的液滴路径长度为 194 单位,欧拉路径法为 210 单位长度,本文算法路径优化 7.62%,基本粒子群算法为 203 单位长度,本文算法路径缩短 4.43%,如图 7 所示。

使用文献[9]中实验模型,优化粒子群算法的路径长度为 79,欧拉路径法为 91 单位长度,使用本文算法路径缩短 13.19%,基本粒子群算法为 84 单位长度,路径被优化 5.95%,实验结果如图 8 所示。

综上,自适应惯性调整的粒子群算法在缩短路径问题上稍显优势。为比较改进的粒子群算法与标准粒子群算法的收敛速度,在 3 种阵列模型中分别使用标准粒子群算法和自适应惯性权值的粒子群算法进行测试,收敛结果分别如图 9 ~ 11 所示,由图可见,使用自适应惯性权

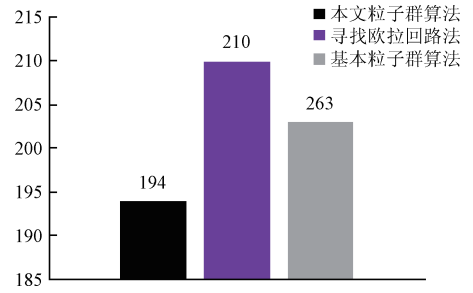


图 7 7 × 11 阵列模型测试路径长度

Fig. 7 Length of test route in 7 × 11 array model

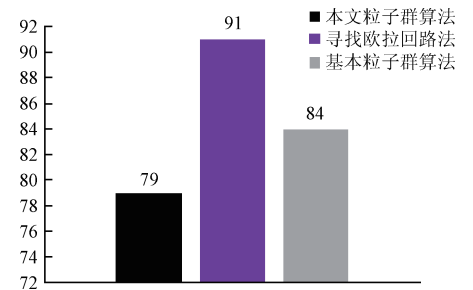


图 8 7 × 7 阵列模型测试路径长度

Fig. 8 Length of test route in 7 × 7 array model

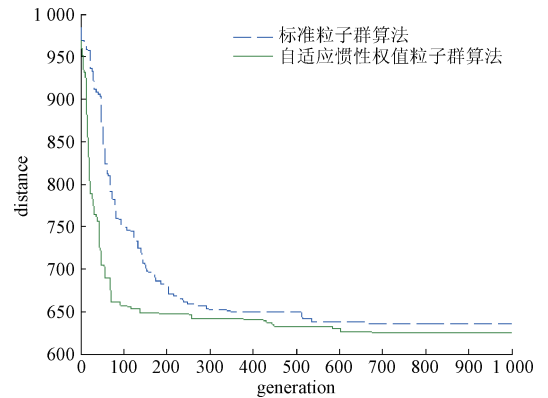


图 9 15x15 阵列测试路径长度收敛性

Fig. 9 Convergence of test route length in 15 × 15 array model

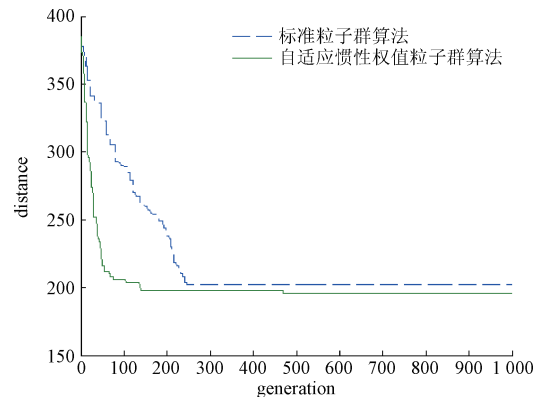


图 10 7 × 11 阵列测试路径长度收敛性

Fig. 10 Convergence of test route length in 7 × 11 array model

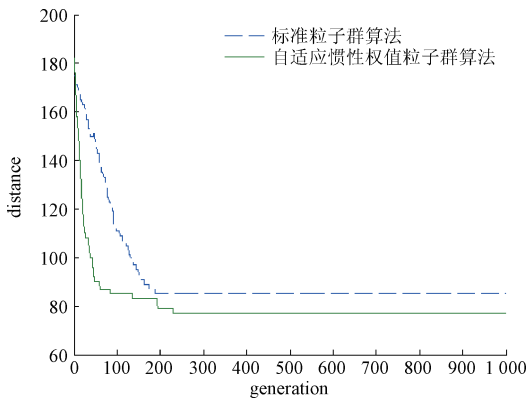


图 11 7×7 阵列测试路径长度收敛性

Fig. 11 Convergence of test route length in 7×7 array model

值的粒子群算法收敛速度快于标准粒子群算法。基于几种芯片模型试验,有效说明了粒子群算法在线测试微流控芯片测试中,有效的缩短了液滴行走的路径长度。

## 4 结论

本文提出基于粒子群算法的数字微流控生物芯片测试路径优化,寻找测试液滴遍历芯片阵列单元的最短路径。通过自适应调整粒子群算法惯性权值,加快算法收敛速度,避免粒子群算法最短路径解序列陷入局部最优值。将路径序列的维度抽象为时间单位,通过解序列与禁忌序列的对比交换策略,满足多重约束条件,实现在线测试路径优化。对比寻找欧拉路径法,基本粒子群算法,在同环境下进行仿真实验,结果显示本文使用的粒子群算法能快速收敛并有效缩短测试路径,为数字微流控芯片测试问题的研究提供一定的参考。

## 参考文献

- [ 1 ] 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.
- [ 2 ] SU F, OZEV S, CHAKRABARTY K. Test planning and test resource optimization for Droplet-based microfluidic systems[ J ]. Journal of Electronic Testing, 2006, 22(2): 199-210.
- [ 3 ] TRUNG A D, SHIGERN Y, HO T Y, et al. Testing of digital microfluidic biochips with arbitrary layouts [ C ]. 20th IEEE European Test Symposium, 2015: 7603-7604.
- [ 4 ] JUNEIDI Z, TORKI K, MATRINEZ S, et al. Global modeling and simulation of system-on-chip embedding MEMS devices [ C ]. International Conference on ASIC, 2001: 666-669.
- [ 5 ] MITRA D, GHOSHAL S, RAHAMAN H, et al. Testing

of digital microfluidic biochips using improved eulerization techniques and the Chinese postman problem [ C ]. 19th IEEE Asian Test Symposium, 2010: 111-116.

- [ 6 ] SU F, OZEV S, CHAKRABARTYK. Concurrent Testing of Droplet-based microfluidic systems for multiplexed biomedical assays [ C ]. International Test Conference, 2004: 883-892.
- [ 7 ] YANG J S. A personification heuristic genet algorithm for digital microfluidics-based biochips placement [ J ]. Teklanika Indonesian Journal of Electrical Engineering, 2013, 11(6): 3187-3193.
- [ 8 ] KAI H, TSUNG Y H. Testing of flow-based microfluidic biochips: Fault modeling, test generation, and experimental demonstration [ J ]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated, 2014, 10(33): 1463-1474.
- [ 9 ] DEBASIS D, PIYALI D, ARPAN C, et al. An algorithm for parallel assay operations in a restricted size chip in digital microfluidics [ C ]. IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI, 2014: 142-147.
- [ 10 ] 郭文忠, 陈国龙. 求解 TSP 问题的模糊自适应粒子群算法 [ J ]. 计算机科学, 2006, 33(6): 161-162.
- [ 11 ] GUO W ZH, CHEN G L. Fuzzy adaptive particle swarm optimization for solving TSP problem [ J ]. Computer Science, 2006, 33(6): 161-162.
- [ 12 ] 张玲, 王伟征, 晏伯武. 数字微流控生物芯片并行测试分析和优化 [ J ]. 微电子学与计算机, 2014, 31(10): 103-106.
- [ 13 ] ZHANG L, WANG W ZH, YAN B W. Analysis and optimization of parallel microfluidic biochip [ J ]. Microelectronics and Computer, 2014, 31(10): 103-106.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] XU CH P, CAI ZH, HU C. On-line testing optimization for digital microfluidic biochips based on ant colony algorithm [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(6): 1417-1424.
- [ 16 ] ROY P, RAHAMAN H, DASGUPTA P, et al. A new look ahead technique for customized testing in digital microfluidic biochips [ J ]. Test Symposium, 2012: 25-30.
- [ 17 ] 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, 67(9): 2265-2271.
- [ 18 ] XU CH P, CHEN CH Y, WANG J J. Online parallel

testing of pin-constrained digital microfluidic biochips[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2015, 67(9):2265-2271.

- [15] 许川佩,刘磊振,万春霆. 基于蚁群算法的数字微流控生物芯片污染故障在线清除[J]. 电子测量与仪器学报,2017,31(2):193-199.

XU CH P, LIU L ZH, WAN CH T. Online routing optimization of contamination removal in digital microfluidic biochips based on ant colony algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017,31(2):193-199.

## 作者简介



**许川佩**,分别在1990和2001年于桂林电子工业学院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理论与技术  
E-mail:xcp@guet.edu.cn

**Xu Chuanpei** received B. Sc. and M. Sc. degrees both from Guilin University of Electronic Science and Technology in 1990 and 2001, respectively, and Ph. D. from Xi'an University of Electronic Science and Technology. Her research interest is IC

test theory and technology.



**吕莹**,2014年于湖南工业大学获得学士学位,现为桂林电子科技大学硕士研究生,主要研究方向为集成电路测试。

E-mail:25345761@qq.com

**Lv Ying** received B. Sc. from Hunan University of Technology in 2014. Now she is a M. Sc. candidate in Guilin University of Electronic Technology. Her main research interest includes integrated circuit test.



**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. degrees from Guilin University of Electronic Science and Technology in 2000 and 2005. Now, he is a lecturer in Guilin University of Electronic Science and Technology. His main research interests include intelligent optimization and integrated circuit test.