

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.02.005

基于蚁群算法的数字微流控生物芯片 污染故障在线清除^{*}

许川佩^{1,2} 刘磊振^{1,2} 万春霆^{1,2}

(1. 桂林电子科技大学 桂林 541004; 2. 广西自动检测技术与仪器重点实验室 桂林 541004)

摘要:生化分析领域对数字微流控生物芯片的可靠性要求严格,对实验中污染故障进行清除,能够保证复杂生化实验分析结果的准确性。提出基于最大最小蚁群算法的污染故障在线清除策略,完成污染清除,同时降低清洗污染单元时间。方案针对数字微流控生物芯片污染故障建立 MTSP 模型,建立基于流体和时间约束的禁忌判断策略,采用最大最小蚁群算法,重新定义概率选择函数与信息素更新策略,实现清洗液滴路径规划、快速清除污染故障的目的。实验结果表明,该方案能有效地减少清洗时间,且与 MCC 方案相比较,能够有效减少阵列单元使用数目。

关键词:数字微流控生物芯片;污染故障;最大最小蚁群算法

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

Online routing optimization of contamination removal in digital microfluidic biochips based on ant colony algorithm

Xu Chuanpei^{1,2} Liu Leizhen^{1,2} Wan Chunting^{1,2}

(1. Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Automatic Detecting Technology and Instruments, Guilin 541004, China)

Abstract: The requirement for the reliability of the chip in the area of biochemical analysis is very strict. In order to ensure the precision of complex biochemical experimental analysis results, the contamination should be cleaned. In this paper, the online contamination removal based on Max-min ant colony algorithm has been proposed to realize reducing the time of washing contamination. Establishing MTSP model for digital microfluidic biochips contamination, establishing tabu judgement strategy based on fluid and time constraints and the selection strategy of the ant colony algorithm to achieve the purpose of optimizing the path planning of wash droplet and cleaning up contamination. The experiment results show that the scheme can reduce the time of clearing contamination, comparing with MCC algorithm it can reduce the used cells effectively.

Keywords: digital microfluidic biochips; contamination; max-min ant colony algorithm

1 引言

微流控技术是在微机械、微电子、生物工程以及纳米技术基础上发展起来的一门全新的交叉学科^[1-2]。和传统的桌面实验相比,数字微流控芯片极大地缩短了分析时间,减少了样品和试剂的消耗。数字微流控芯片实验的媒介是液滴,所以会产生液体交叉污染故障,影响检测

结果准确性,并可能会导致严重的后果,尤其在如临床诊断、健康评估以及传染病的筛查等安全苛求高的应用中。因此,对污染故障进行清除对于保证生化实验检测分析结果的准确性至关重要。

2 数字微流控生物芯片污染故障清除方法研究进展

由于生物分子在运动时会吸附在疏水面导致液滴残

留在电极单元^[3],当另一种不同的液滴再次经过该单元时,会受到残留液滴的影响而被污染。Roy 等人^[5]、Zhao 等人^[6]和 Pranab 等人^[7]提出在芯片设计时,通过避免液滴在芯片上的移动路径产生交叉,来避免交叉污染。这种方法在简单的生化分析实验中有效,随着芯片设计复杂度的提高,越来越多的生物实验检测都在同一个数字微流控生物芯片中进行,要想找到互不相交的路径异常困难,而且也会因此占用大量单元,造成浪费。

Zhao 等人^[6]、Mitra 等人^[8]和 Pan 等人^[9]提出在芯片设计时,先用算法优化液滴路径降低污染单元的数目,然后采用清洗液清洗污染单元。但是,在两个连续的实验阶段之间进行污染单元清除操作会增加实验的执行时间。Huang 等人^[10]对两个连续的实验阶段采用超前预测算法确定相邻阶段的污染单元,在当前阶段清洗下个阶段中由当前阶段的液滴残留引起的污染,同时把污染单元清除问题转化成 TSP 问题,采用最小代价循环算法策略(minimum cost circulation, MCC)获得多清洗液滴对污染单元清除的路径规划,可有效减少阵列单元的使用数目以及清洗时间。

目前关于污染故障清除的研究中,优化功能液滴路径避免污染,并不能完全避免污染单元的产生,使用清洗液滴清除污染单元,也都是在芯片设计阶段进行,增加了设计成本。因此,本文提出一种针对数字微流控生物芯片污染故障的在线清除策略。鉴于最大最小蚁群算法(MMAS)是对传统蚁群算法的一种改进,是解决 TSP、MTSP 等问题最好的蚁群优化算法之一^[11-12],本文将数字微流控芯片污染单元转换成 MTSP 模型,将 MMAS 用于污染故障清除,快速获得最短清洗时间。

3 数字微流控生物芯片污染故障清除问题描述

3.1 污染故障清除约束

在液滴路由时存在两种路由约束,流体约束和时间约束。流体约束是为了避免在两个液滴传输的过程中出现不期望的混合。流体约束又分为静态流体约束和动态流体约束^[13]。静态约束表述为两个不同的液滴在任意的 t 时刻,两液滴不能处于直接邻近或对角邻近的阵列单元位置,它们之间必须至少有一个空单元的间隔。动态约束表述为对液滴 d_i 操作的激活单元不能与液滴 d_j 相邻,否则在液滴 d_i 和液滴 d_j 之间会产生意外的混合。当 X_i 、 Y_i 表示 i 液滴所在行与列,静态与动态流体约束公式如式(1)、(2)所示。

静态流体约束:

$$|X_i^t - X_j^t| \geq 2 \text{ 或 } |Y_i^t - Y_j^t| \geq 2 \quad (1)$$

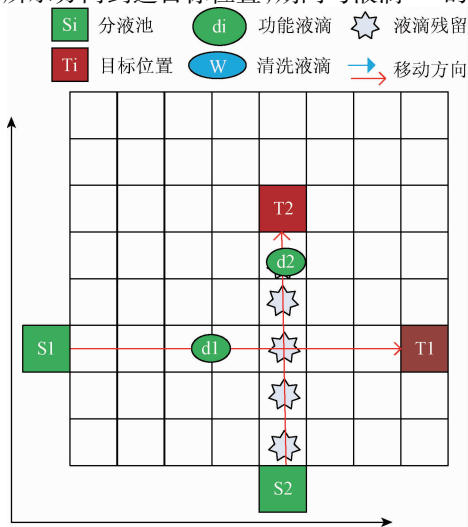
动态流体约束:

$$|X_i^{t+1} - X_j^t| \geq 2 \text{ 或 } |Y_i^{t+1} - Y_j^t| \geq 2 \\ \text{或 } |X_i^t - X_j^{t+1}| \geq 2 \text{ 或 } |Y_i^t - Y_j^{t+1}| \geq 2 \quad (2)$$

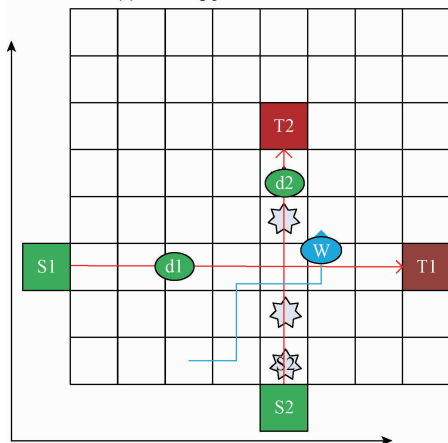
微流控芯片中液滴路由时,除了流体约束还存在时间约束。在数字微流控生物芯片上,当两个或两个以上的实验液滴通过同一个阵列单元会产生交叉污染。为了能够清除污染,清洗液滴必须在后一个液滴到达之前对该污染单元进行清洗^[14]。假如清洗液滴与实验液滴同时从 0 时刻开始移动,那么满足清洗时序的条件可以用式(3)表示。 T_{early} 表示第一实验液滴到达时刻, T_{late} 表示第二个实验液滴到达时刻, T_{washing} 表示可以清洗的时间区间。液滴从一个阵列单元移动到相邻阵列单元的时间作为一个单位时间。

$$T_{\text{washing}} = [T_{\text{early}}, T_{\text{late}}] \quad (3)$$

污染单元清除如图 1 所示。在图 1(a) 中液滴 d_2 先到达目标位置并在其路径上留下部分液滴,液滴 d_1 随后按图中所示方向到达目标位置,期间与液滴 d_2 的路径相



(a) 路径相互交叉产生污染
(a) Crossing paths arise contamination



(b) 清洗液滴清洗交叉污染液滴
(b) Wash droplets clear cross contaminations

图1 污染单元清除

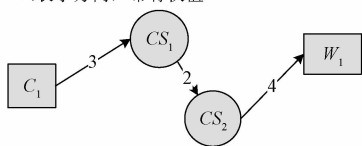
Fig. 1 Contamination unit clearance

交于(5,3)位置。为了防止污染的产生,在液滴 $d1$ 到达污染位置前,必须使用清洗液滴对该位置的残留液滴进行清除,如图1(b)所示。

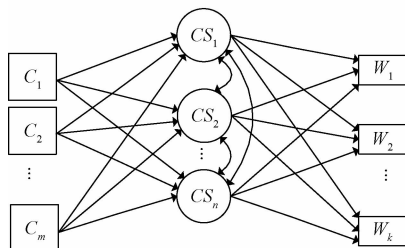
3.2 数字微流控芯片污染单元清除模型转换

在满足时间约束以及流体约束的条件下,在实验液滴移动的同时,清洗液滴对污染单元清除并最终到达废液池。针对清洗液滴清除污染故障的过程,可把数字微流控生物芯片污染单元及废液池转换成一个二维无向带权图 $G(V, E)$, 如图2所示。其中 V 表示污染单元, E 表示两个污染单元之间的路径,边上的权值表示两者之间的距离。将得到的二维无向图 G 作为动态 MTSP 模型,在不影响实验液滴运行的同时寻找一条最优清洗路径。

C_m :表示清洗液分液池
 CS_n :表示污染单元
 W_k :表示废液池
 $\rightarrow$:表示方向,带有权值



(a) 单液滴清洗
(a) Single droplet clearance



(b) 多液滴清洗
(b) Multi droplet clearance

图2 数字微流控生物芯片污染故障清除模型转化

Fig.2 The model transformation of digital micro-fluidic biochips contamination clearance

4 数字微流控生物芯片污染故障清除策略

本文将清洗液分液池作为蚂蚁起始位置,污染单元以及废液池作为路由的节点,蚂蚁所经过的路径作为清洗液清洗污染单元路径。蚂蚁通过选择概率对污染单元进行选择,通过节点上的信息素浓度反映该路径吸引蚂蚁的能力,启发信息反映蚂蚁选择路径的影响因素。在设计基于蚁群算法的污染故障清除路径优化策略时,需要重新定义蚁群算法的概率选择策略和信息素更新策略。

为提高实验效率,以整个实验中清洗液清洗污染单元的时间为评价函数。在每个实验中安排 m 滴清洗液滴同时从 m 个清洗液分液池出发,清洗完所有的污染单元

后到达废液池,每个实验中污染单元清除完毕后,把最后到达废液池的清洗液滴的清洗时刻作为本次实验的清洗时间。当每次实验完成清洗操作后,所有实验中液滴最大的清洗时间之和为这一组的清洗时间。目标函数为:

$$\min: z = \sum_{k=1}^K \max(\sum_{i \in L} x_{kci}) \quad c \in C_k \quad (4)$$

假设阵列单元为 m 行 n 列, L 表示阵列单元集合,共有 K 个实验, C_k 表示第 k 个实验中清洗液液滴集合。定义 $x_{kci} = 1$, 表示第 k 个实验中第 c 滴清洗液经过 i 阵列单元。

4.1 概率选择策略

在选择清洗污染单元过程中考虑时间以及距离,对概率选择函数进行重新定义,使蚂蚁到达废液池的清洗时间最短。第 k 只蚂蚁在 t 时刻时,已选的污染单元为 i 。采用伪随机比例选择规则式(5)选择下一目标污染单元 j ,以提高蚂蚁探索新路径以增加全局搜索的能力^[13]。 J 是根据概率转移函数式(6)使用轮盘法选择的下一目标单元。

$$j = \begin{cases} \operatorname{argmax}_{j \in \text{allowed}_m} \{ [\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta \lambda_{ij} \}, & q \leq q_0 \\ J, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta \lambda_{ij}}{\sum_{j \in \text{allowed}_m} [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta \lambda_{ij}}, & j \in \text{allowed}_m \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

α 和 β 分别决定了信息素和启发式信息的影响力。 $\tau_{ij}(t)$ 表示两个目标污染单元 i, j 之间路径上的信息素浓度,通过式(10)更新。 $\eta_{ij}(t)$ 为启发函数。 D_{ij} 表示 t 时刻污染单元 i 到下一目标污染单元 j 的曼哈顿距离。

$$\eta_{ij} = \frac{1}{D_{ij}} \quad (7)$$

在污染清除过程中,需要协同考虑动态流体约束和时间约束。如图3所示,图3中存在3个污染点,假如图3中功能液滴到达污染单元1、2、3的前后时刻分别为(10,16)(2,12)(10,18)。蚂蚁从图中清洗液分液池出发时,距离污染单元1和3的距离最近为4,距离污染单元2的距离最远为6。但是由于清洗时间约束条件,蚂蚁选择对污染单元1或3清洗时,必须等到功能液滴到达该污染单元之后,这时最短清洗时间为13,而选择污染单元2的最短清洗时间为9。

选择清洗污染单元1或3时,由于存在流体约束条件,液滴在移动的过程中可能会等待,前者的清洗时间区间范围小,所以应该先选择污染单元1。因此,定义时间选择参数 λ_{ij} , 调整距离与时间对清洗单元选择的影响。

$$\lambda_{ij} = \frac{1}{\omega_1 T_{\text{early}}^j + \omega_2 (T_{\text{late}}^j - T_{\text{early}}^j)} \quad (8)$$

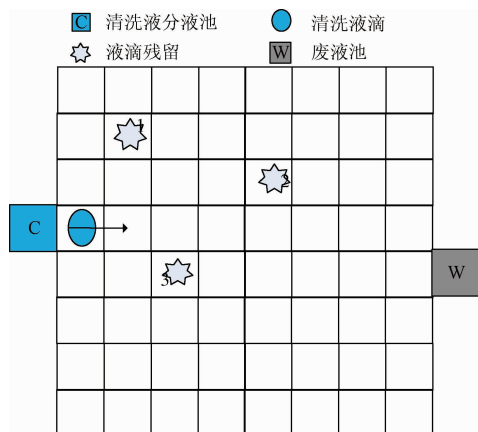


图 3 清洗液选择污染单元

Fig. 3 Wash droplet select contamination unit

当选择的污染单元 j 的 T_{early}^j 越小,清洗时间范围越小,那么该污染单元被选择的概率越大。 ω_1 、 ω_2 表示时间影响参数, T_{early}^j 、 T_{late}^j 表示污染单元 j 上两个功能液滴先后到达污染单元 j 的时刻。

在用式(5)进行概率选择过程中,由于污染清除有严格的时间要求,所以需要优先满足时间约束。在用概率选择出污染单元 j 后,蚂蚁是否选择该单元进行清洗需要满足:

$$T_j + T_{jx} < T_{\text{late}}^x \quad (9)$$

式中: T_j 表示蚂蚁到达污染单元 j 的时刻, T_{jx} 表示污染单元 j 到污染单元 x 的时间, T_{late}^x 表示功能液滴最后到达污染单元 x 的时刻。如果不满足式(9),则 t 时刻选择污染单元 x 为目标单元进行清洗操作。

4.2 信息素更新策略

采用最大最小蚁群算法把各路径上的信息素轨迹量的值域限制在 $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ 内,避免了早熟收敛的同时保证最优解的收敛速度。信息素更新方式如下:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} \quad (10)$$

$$\Delta\tau_{ij} = \begin{cases} \frac{20}{L^{bs}}, & j \text{ 属于最优路径单元} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中: ρ 是信息素挥发因子, L^{bs} 为全局最优路径长度, $\tau_{ij}(t)$ 是 t 次迭代 i j 污染单元之间的信息素浓度。

4.3 动态禁忌表建立

移动禁忌表:为了实现在线测试,不影响实验液滴以及清洗液滴正常进行,清洗液滴选择下一单元时必须满足流体约束条件,将不能选择的相邻单元放入禁忌表中。由于清洗液滴在不断移动,每一滴清洗液的禁忌表也随其移动不断更新。例如,第 m 滴清洗液在 t 时刻的禁忌表,主要包括 t 时刻以及 $t+1$ 时刻实验液滴和其它清洗液滴所在单元及其相邻单元。实验液滴移动时间远远小

于实验操作(混合,检测等)所需要的时间,在实验液滴移动时,实验反应区域范围不发生变化,所以流体约束禁忌表还包括当前实验中实验液滴反应区单元。

污染单元禁忌表:在 t 时刻每滴清洗液至多选择一个污染单元,当某一污染单元被清洗液滴选择或者该污染单元被清洗,则把该污染单元放入禁忌表中,其他清洗液滴在 t 时刻不再对禁忌表中污染单元进行选择。在时刻 $t+1$ 时首先把未清洗的污染单元从禁忌表中移除,然后重新选择未清洗的污染单元。

最大最小蚁群算法路径清洗优化流程如图 4 所示。

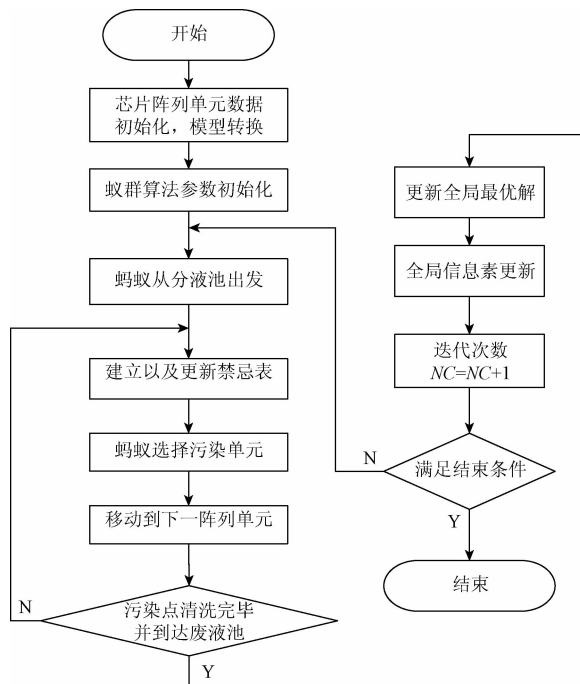


图 4 蚁群算法路径清洗流程

Fig. 4 Flow chart of path cleaning of ant colony algorithm

蚂蚁从清洗液分液池出发,通过概率函数策略选择污染单元,并判断下一步经过的单元是否出现在流体约束禁忌表中,如果是则停在原来位置,否则选择污染单元移动清洗。在所有蚂蚁到达废液池后,完成本次迭代并对当前全局最优或本次迭代最优的路径进行更新。

5 实验结果与分析

实验采用的数字微流控芯片阵列单元数为 16×16 。液滴在 100 Hz 的变换频率下,从一个阵列单元到相邻阵列单元的花费时间为约为 10 ms。本文以文献[15]采用的人体生理体液的多元体外诊断实验为例,实现污染故障在线清除策略验证。图 5 所示为实验中样品与试剂变化过程,该体外检测分析实验共有 3 种人体生理体液(尿

液、血浆、血清)样品,检测试剂分别为葡萄糖和乳酸,样品与检测试剂在电极作用下在数字微流控生物芯片上移动。

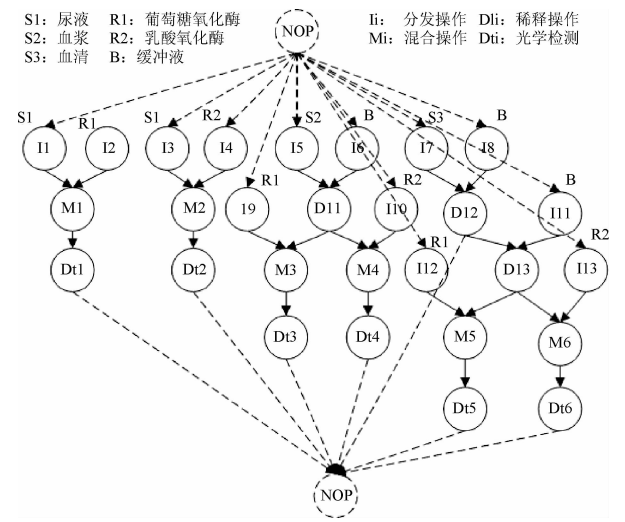


图5 体外检测实验样品与试剂变化关系
Fig.5 Relationship changing between sample and reagent in vitro

体外诊断实验中稀释、混合等反应在数字微流控芯片上所使用的阵列单元变化,以及样品、试剂清洗液、废液池的布局如图6所示。

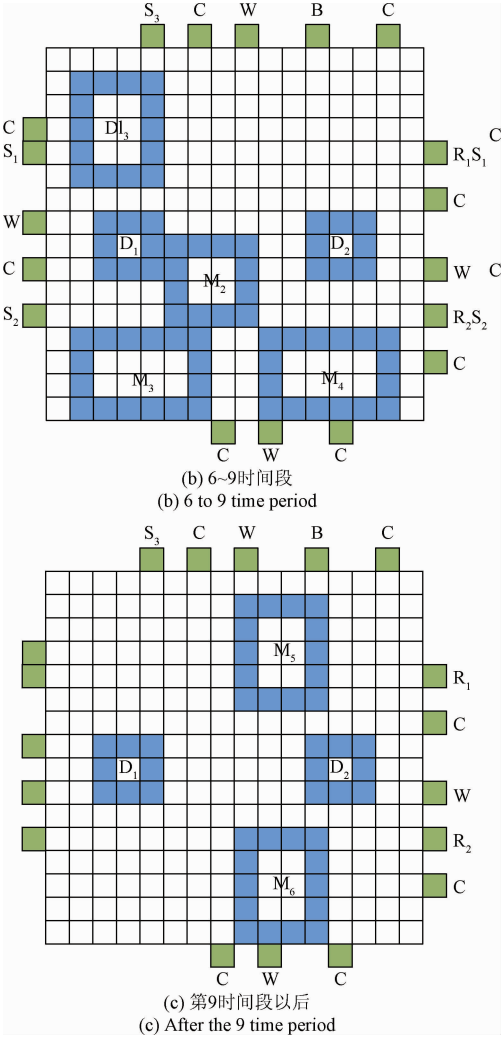
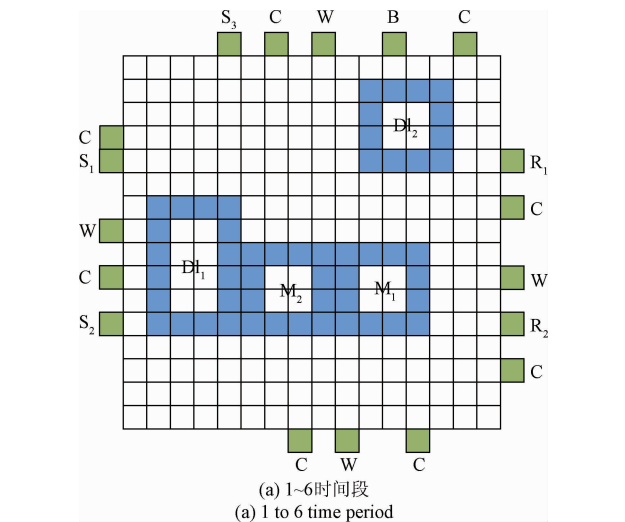


图6 实验操作区域布局
Fig.6 Layout of experimental operation area

根据上述人体生理体液的多元体外诊断实验的操作布局,建立实验模拟平台。本文采用的污染故障清除方案主要针对已经确定的实验液滴调度进行污染故障的清除,保存实验中液滴路由的轨迹数据以及操作反应的区域,在进行算法实现时,通过在每一个时刻对相关的数据进行读取、处理建立算法的仿真环境。人体生理体液的多元体外诊断实验中实验参数如表1所示。其中 m 表示 m 组蚂蚁, n 表示每组有 n 只蚂蚁, τ_0 表示初始化信息素浓度。

表1 人体生理体液的多元体外诊断算法参数
Table 1 Algorithm parameters of multiplexed in-vitro diagnostics on human physiological fluids

参数	m	n	τ_0	α	β	q_0	ρ	NC	τ_{max}	τ_{min}	$\omega 1$	$\omega 2$
值	10	8	10	3	2	0.9	0.1	2 000	30	1	0.5	0.3

5.1 实验结果分析

由图7、表2所示结果可知,本文采用的MMAS算法

与ACO算法的液滴路由时间分别为191与195个时间单元,与MCC算法实验^[7]相比路由时间分别减少了

1.0% 和 -1.0% ;MMAS 算法算法与 ACO 算法的使用阵列单元数目分别为 333 与 354,与 MCC 算法实验相比分别减少了 5.1% 和 4.8%。因此,在人体生理体液的多元体外诊断实验中使用 MMAS 算法进行污染故障清除,能够在路由时间以及阵列单元使用数目上得到优化,比 MCC 算法更好。

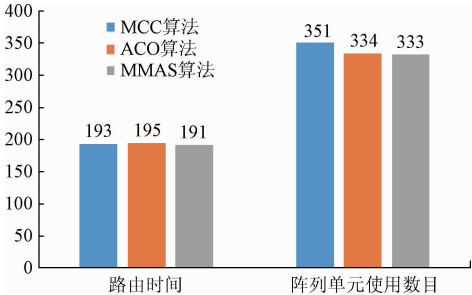


图 7 数据结果比较

Fig. 7 Comparison of results

表 2 算法优化百分比

Table 2 Percentage of algorithm optimization (%)

	阵列单元使用数目	路由时间
MMAS 算法/MCC 用算法	5.1	1.0
ACO 算法/MCC 算法	4.8	-1.0
MMAS 算法/ACO 算法	0.2	2.0

5.2 算法收敛分析

如图 8 所示,横坐标表示算法迭代次数,纵坐标表示清洗时间。使用基本蚁群算法时信息素浓度过度集中,造成早熟收敛不能得到全局最优结果,使用 MMAS 算法由于增加了信息素浓度的变化范围,避免了早熟增加探索其它路径的能力。所以,使用 MMAS 算法于第 1 220 次迭代达到清洗时间最小值。假设生化分析共有 K 个实验,每个实验污染单元数目为 n ,蚂蚁数为 m ,则算法的空间复杂度与时间复杂度分别为 $S(n) = O(n^2)$ 和 $T(n) = O(n^2)$ 。

6 结 论

本文将蚁群算法用于数字微流控生物芯片在线污染清除,结合芯片的动态流体约束和时间约束条件,重新定义概率选择函数与信息素更新策略,以人体生理体液的多元体外诊断实验为实验对象,实验结果表明,采用污染故障在线清除策略能够有效地清除交叉污染,同时降低设计成本,提高了测试效率。采用最大最小蚁群算法与基本蚁群算法相比,能够获得更短的清洗时间。且与 MCC 方案相比较,能够有效减少阵列单元使用数目。

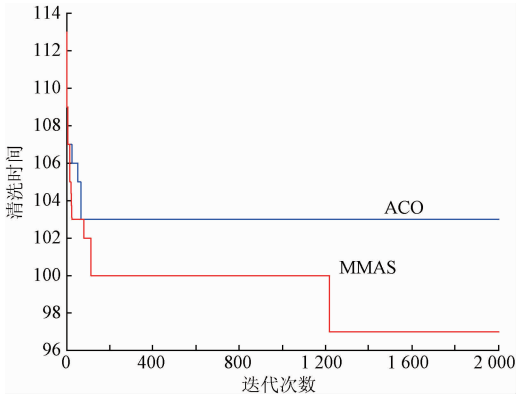


图 8 算法测试收敛图

Fig. 8 convergence of algorithm test

参考文献

[1] 林晓梅,张铭. PDMS 微流控芯片加工技术研究[J]. 长春工业大学学报:自然科学版,2013, 34(2): 172-179.

LIN X M, ZHANG M. The researches in the PDMS microfluidic chip processing technology [J]. Journal of Changchun University of Technology: Natural Science Edition,2013, 34(2) :172-179.

[2] IBRAHIM M, CHAKRABARTY K. Digital-microfluidic biochips [J]. Computer,2016,49(6) :8-9.

[3] MAFTEI E, POP P, MADSEN J. Routing-based synthesis of digital microfluidic biochips [J]. Design Automation for Embedded Systems, 2012, 16 (1) : 19-44.

[4] CHAKRABORTY S, DASGUPTA P, CHAKRABORTY S, et al. An efficient two phase heuristic routing technique for digital microfluidic biochip [J]. IET Computers & Digital Techniques, 2016.

[5] ROY P, RAHAMAN H, DASGUPTA P. Two-level clustering-based techniques for intelligent droplet routing in digital microfluidic biochips. [J]. Integration the VLSI Journal, 2012, 45(3) :316-330.

[6] ZHAO Y, CHAKRABARTY K. Cross-contamination avoidance for droplet routing in digital microfluidic biochips [J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2009, 31(6) :1290-1295.

[7] PRANAB R, PAMPA H, RUPAM B, et al. A new cross contamination aware routing method with intelligent path exploration in digital microfluidic biochips [C]. 8th International Conference on Design & Technology of Integrated System in Nanoscale Era,2013:50-55.

[8] MITRA D, GHOSHAL S, RAHAMAN H, et al. Offline

- washing schemes for residue removal in digital microfluidic biochips [J]. *Acm Transactions on Design Automation of Electronic Systems*, 2015, 21(1):1-33.
- [9] PAN I, SAMANTA T. A droplet clustering and residue removal technique for cross-contamination avoidance in digital microfluidic biochip [J]. *Mirlabs Org*, 2014, 6: 171-183.
- [10] HUAGN T W, LIN C H, HU T Y. A contamination aware droplet routing algorithm for the synthesis of digital microfluidic biochips [J]. *IEEE Transactions Computer-Aided Design of Integrated Circuit and System*, 2010, 29(11):1682-1695.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] CHATTERJEE S, RAHAMAN H, SAMANTA T. Multi-objective optimization algorithm for efficient pin-constrained droplet routing technique in digital microfluidic biochip [C]. *14th International Symposium on Quality Electronic Design*, 2013, 10(16):252-256.
- [14] WANG Q, SHEN Y, YAO H L et al. Practical functional and washing droplet routing for cross-contamination avoidance in digital microfluidic biochips [C]. *51st Design Automation Conference*, 2014:1-6.
- [15] SU F, HWANG W, CHAKRABARTY K. Droplet routing

in the synthesis of digital microfluidic biochips [C]. *Proceedings of the Design Automation & Test in Europe Conference*, IEEE Computer Society, 2006:73-73.

作者简介



Xu Chuanpei received B. Sc. and M. Sc. degrees both from Guilin University of Electronic Science and Technology in 1990 and 2001, respectively, and obtained Ph. D. from Xidian University of Electronic Science and Technology. Her research interest is IC test theory and technology.



Liu Leizhen received B. Sc. degrees from Guilin University of Electronic Science and Technology in 2013 and obtained M. Sc. Degrees from Guilin University of Electronic Science and Technology in 2016. His main research interest is integrated circuit testing.



Wan Chunting received B. Sc. degrees from Guilin University of Electronic Science and Technology in 2011 and obtained M. Sc. Degrees from Guilin University of Electronic Science and Technology in 2014. Now he is a experiment teacher of Guilin University of Electronic Science. His main research interest include integrated circuit testing and embedded systems.

许川佩, 1990 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理论与技术。

E-mail: xcp@guet.edu.cn

刘磊振, 于 2013 桂林电子科技大学获得学士学位, 2016 年获得硕士学位, 主要研究方向为集成电路测试。

Liu Leizhen received B. Sc. degrees from Guilin University of Electronic Science and Technology in 2013 and obtained M. Sc.

万春霆, 2011 年于桂林电子科技大学获得学士学位, 2014 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电子工程与自动化学院实验教师, 主要研究方向集成电路测试、嵌入式系统。