

微尺度电动混合混沌反控制方法

张荣标^①, 杨宁^{①*}, 赵雨琦^②, 徐佩锋^①, 张忠强^③

① 江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013;

② Department of Electrical & Computer Engineering, Stony Brook University, Stony Brook, 11790, USA;

③ 江苏大学机械工程学院, 镇江 212013

* 联系人, E-mail: yangning7410@163. com

2012-06-26 收稿, 2013-01-08 接受

国家自然科学基金(11102074)资助

摘要 针对被动式混沌微混合器受控性差且加工难度大等缺点, 基于广义混沌同步理论, 提出了一种运用混沌电场对微流控芯片有序层流体进行主动混合的电动混沌反控制方法. 该方法将 Duffing 混沌模型施加于微流控芯片混合室的壁面电极, 结合微流控芯片微混合室建立控制模型, 采用 Rosenstein 小数据量混沌评价法对流体混沌效果量化评价, 进一步优化 Duffing 混沌反控制算法模型参数. 对优化后的混合混沌反控制算法与传统正余弦控制算法进行性能分析. 研究表明, 优化后 Duffing 算法控制流体进入混沌状态的时间比传统正余弦算法提前了约 27. 3%, 最大 Lyapunov 指数提高约 25%, 说明该方法有效地提高了微流控芯片微混合器的混沌混合效果.

关键词

微流控芯片
混合
混沌反控制
参数优化

混合是微流控芯片的基本操作之一, 其性能决定着微流控芯片完成生化实验的效果. 然而, 在微流控系统中, 雷诺数严重限制了流体的混合, 因此不同流质的混合主要依靠扩散来进行, 扩散是一种缓慢的固有过程, 所以通过增加混合微通道的长度和延长混合时间可以提高混合质量. 然而增加微通道的长度会增大微流控芯片的尺度, 延长混合时间会降低实验的效率. 为此, 国内外学者针对高效的混合方法进行了深入的研究. 已有研究表明混沌对流能够使流体在微尺度条件下快速折叠拉伸, 从而增大扩散界面, 减小分子扩散距离, 实现快速混合. 为此人们对能够产生混沌效果的微混合器进行了大量的研究. 如哈佛大学 Stroock 等人^[1]在 *Science* 上公开发表了一种“人”字浅浮雕型混沌微混合器, 在微通道底部加工制作交错排列的“人”字浅浮雕, 能够使流体在通道内产生螺旋式流动, 遂引起混沌对流. 随后, 华盛顿海军研究实验室 Howell 等人^[2]在通道底部和上部均加工交错排列浅浮雕结构, 实现了更好的混

沌效果. 2006 年英国伦敦皇家学院 DeMello 教授^[3]在 *Nature* 上发表文章, 对内置浮雕型混沌微混合器进行了综述. 随后 Hossain 等人^[4]采用三维 Navier-Stokes 方程和多目标进化算法对墙壁上交错排列浅浮雕形状进行优化, 进一步改善了混沌混合程度. 以上方法都是通过微通道内设置障碍物来实现混沌混合. 此外还有一些通过改变微通道整体结构来设计混沌微混合器. 如 Hong 等人^[5]设计的 Tesla 结构微通道, 能够产生 Coanda 效应实现流体的混沌对流. Kim 等人^[6]则设计了一种“F”型混合单元引导流体产生混沌对流效果. Xia 等人^[7]提出了两层交联的“X”型三维混沌混合微通道结构, 使得流体在通道流通过程中形成湍流混沌对流. Jen 等人^[8]设计了斜坡型、倾斜型和波浪型三种通道扭曲型的混沌微混合器, 来获得混沌混合效果. 中国浙江大学流体传动及控制国家重点实验室^[9]设计了一种三维交叉导流式混沌微混合器, 并采用拉格朗日跟踪法分析了该类型微混合器的混沌混合特性^[10]. 然而, 上述方法均为被动混合

引用格式: 张荣标, 杨宁, 赵雨琦, 等. 微尺度电动混合混沌反控制方法. 科学通报, 2013, 58: 1057–1062

Zhang R B, Yang N, Yao Y Q, et al. Electrokinetically driven flow mixing in micro scale based on chaotic anti-control method (in Chinese). *Chin Sci Bull (Chin Ver)*, 2013, 58: 1057–1062, doi: 10.1360/972012-999

法,即通过在微通道内设置障碍物或者改变微通道的几何形状使流体被拉伸和折叠从而产生混沌效果的混合方法.但在实际使用过程中这些方法往往具有以下缺点:第一、混沌混合过程不可控,影响了微流控芯片分析处理生化样品的自动化程度.第二、无论是在微通道设置障碍物还是改变通道的整体结构都具有较大的加工难度.第三、由于微流控芯片需要反复使用甚至在线使用,长期使用过程中复杂的通道结构容易使芯片结垢和污染,影响实验和检测精度.

通过其他物理场进行流体混合控制的主动混合器已经成为国内外学者关注的焦点之一,如美国伊利诺香宾大学的磁场控制法^[11]、美国摩托罗拉实验室声场控制法^[12]、中国中南大学的超声波控制法^[13]、以及中国科学院的微气泡控制法^[14].这些方法往往伴随有体积较大的物理场作用装置,不适用于微型化、集成化程度高的微流控芯片系统. Erickson 等人^[15]通过在微通道壁面安置电极,利用电渗效应通过电极诱发电场来控制流体混合.电极体积小且电路板容易和微流控芯片耦合桥接.因此基于电场控制的电动混合方法成为研究热点. Lin 等人^[16]研究了电极排列形式对混合效果的影响,发现斜向排列电极混合效果最好.赵亮等人^[17]研究了电场强度与微电极布置情况对混合过程的影响.唐桂华等人^[18]研究了混合室壁面粗糙元以及非均匀对称电势分布的对混合效果的影响.但上述研究仅仅采用正余弦控制算法进行电场控制,对于电场控制算法对混沌混合效果的影响,尚未有相关的研究报道.

在分析国内外微流控芯片混合技术基础上,从混沌动力学广义同步控制角度出发,研究了一种在微尺度条件下运用混沌电场对有序层流流体进行有效混合的混沌反控制方法,以提高主动式电动微混合器的混沌混合性能.

1 研究模型

1.1 物理模型

为了直观体现电动混合的性能,设计 Y 型通道的微流控芯片作为物理仿真模型,如图 1 所示. A, B 为两个入口通道,分别用于注入不同浓度的流体.通道中间设计有混合室.混合室的长度是 330 μm 、宽度是 200 μm 、高度是 100 μm .混合室两侧并排安置有电极,电极宽度是 50 μm 的扁平铂丝.同一边的电极

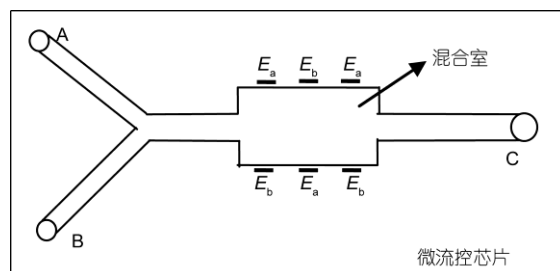


图 1 Y 型通道微流控芯片结构图

排列于同一直线.同一排电极间的间隙为 70 μm .两端的电极距离混合室端点的距离为 20 μm .

1.2 电动混合控制的数学模型

为了简化混合过程的运算复杂度,不妨假设:(1)通过微通道流动的溶液为不可压缩的牛顿流体.(2)忽略流体流动的重力和浮力的影响.(3)两个混合物种具有相同的恒定的扩散系数.(4)在混合过程没有发生化学反应.

壁面双电层(EDL)是产生电动扰动效应的基础,根据静电学理论,论文采用 Poisson-Boltzmann 方程^[19]来描述 EDL 的电位分布:

$$\nabla^2 \psi = \frac{2n_0 z e}{\varepsilon \varepsilon_0} \sinh \left(\frac{z e}{k_b T} \psi \right), \quad (1)$$

其中 ψ 是 EDL 的电势, n_0 是离子浓度, z 为离子价态, e 是电子电荷, ε 是电解质溶液的介电常数, ε_0 是真空介电常数, k_b 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, h 为微通道的半高.

根据流体动量守恒方程式(2),结合 Navier-Stokes 方程,可得电动驱动力方程式(3):

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \right] = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + \mathbf{F}_{\text{EOF}}, \quad (2)$$

其中 ρ 为流体密度, $\mathbf{V}$ 为速度矢量, P 为压力, μ 是流体黏度.而电渗驱动力 $\mathbf{F}_{\text{EOF}}$ 为

$$\mathbf{F}_{\text{EOF}} = 2n_0 z e \sinh \left(\frac{z e}{k_b T} \psi \right) \nabla (\psi + \phi), \quad (3)$$

式中 ϕ 为外加电场的电势.

混合室内的样品受到电动扰动下的对流以及自身扩散的双重作用,则其基本方程可描述为式(4):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) C = D_i \nabla^2 C. \quad (4)$$

为了便于分析、计算,采用下列的无量纲参数可对式(1)~(4)进行无量纲化.

$$t^* = \frac{t}{W^2/\nu}, \psi^* = \frac{ze}{k_b T} \psi, \phi^* = \frac{ze}{k_b T} \phi, \phi^* = \frac{ze}{k_b T} \phi, \\ \nabla^* = W \nabla, \mathbf{V}^* = \frac{\mathbf{V}}{\nu/W}, P^* = \frac{P - P_{\text{ref}}}{\rho(\nu/W)^2}, C^* = \frac{C}{C_{\text{ref}}}.$$

根据如图 1 所示的仿真模型, 建立相应的初始条件和边界条件, 如式(5)~(8)所示.

入口:

$$\frac{\partial \psi^*}{\partial y^*} = 0, \phi^* = \phi_{\text{in}}^*, \frac{\partial u^*}{\partial y^*} = 0, \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = 0, C^* = C_{\text{in}}^*, \quad (5)$$

出口:

$$\frac{\partial \psi^*}{\partial x^*} = 0, \phi^* = \phi_{\text{out}}^*, \frac{\partial u^*}{\partial x^*} = 0, \frac{\partial v^*}{\partial x^*} = 0, \frac{\partial C^*}{\partial x^*} = 0, \quad (6)$$

墙壁表面:

$$\psi^* = \zeta^*, \nabla^* \phi^* \cdot \mathbf{n} = 0, u^* = 0, v^* = 0, \frac{\partial C^*}{\partial n^*} = 0, \quad (7)$$

电极:

$$\psi^* = \zeta^*, \nabla^* \phi^* \cdot \mathbf{n} = 0, u^* = 0, v^* = 0, \frac{\partial C^*}{\partial n^*} = 0, \quad (8)$$

其中, ϕ_{in}^* 和 ϕ_{out}^* 是入口和出口电势的无量纲化形式. ζ^* 是无量纲的 Zeta 电势, 其定义为 $\zeta^* = ze\zeta/k_b T$. C_{in}^* 是无量纲的样品浓度, 入口端样品的初始浓度分别为 0 和 1. 在初始状态下流质是有序的层流状态. 为了将流质转换为无序的混沌混合状态, 将流质引入图 1 中所示的混合室中. 通过混合室内电极组合的对流质的电动干扰作用, 进行混合混沌反控制. 电极开始干扰的时刻定义为 $t^* > 0$. 电势 ϕ^* 完全由电极 ϕ_E^* 提供. ϕ_E^* 为随时间变化的电极电势的无量纲形式.

1.3 混沌反控制算法设计

目前常见的电动混合混沌反控制算法主要采用正弦或者余弦周期函数来诱导壁面 zeta 电位. 通过调整周期函数的振幅和频率来影响混沌混合的效果, 以优化混沌反控制算法^[20]. 然而从混沌反控制学的角度来看, 实现混沌流场通过混沌电场来诱导, 使其产生两个不同系统之间的广义混沌同步效果. 论文在此基础上提出了通过引入混沌电场来诱导流场, 实现电动混合混沌反控制方法.

选用 Holmes 型 Duffing 系统^[21]为如式(10), (11)所示的初始电场控制系统.

$$x_1^* = x_2^*, \quad (10)$$

$$x_2^* = -P_1 x_1^* - P_2 x_2^* - P_3 x_3^* + f_i \cos(\Omega t), \quad (11)$$

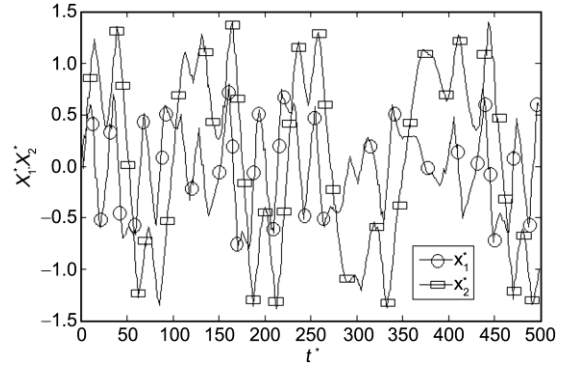


图 2 混沌电场的控制信号

其中, x_1^* 是振荡轨迹, x_2^* 是 x_1^* 的时间导数, P_1, P_2, P_3 是系统的无量纲参数. Ωt 是时变干扰源, f_i 是无量纲振动幅度, $\Omega (= \omega W^2/\nu)$ 是无量纲角速度的扰动, ω 是角速度. 为了确保 Duffing 系统产生混沌控制电场, 初始值被设定为 $x_1^*(0)=0.1$ 且 $x_2^*(0)=0.1$. 根据文献[22], 将无量纲参数设置为 $P_1=-1.0, P_2=0.25, P_3=1.0$. 在这些设定下, x_1 和 x_2 随时间变化如图 2 所示. x_1^* 为图 1 中电极 E_a 的控制信号, 即 $\phi_E^* = \alpha x_1^*$, x_2^* 则为图 1 中电极 E_b 的控制信号, 即 $\phi_E^* = \alpha x_2^*$, 其中 α 为信号放大系数.

采用 COMSOL Multiphysics 4.3 仿真软件对流体受电场控制的状态流线图进行仿真分析. 图 3 为 $t=0$ 时没有任何电场控制下流体系统的流场状态图. 从图中可以看出在不施加任何电场条件下, 流体流过混合室为一种有序的层流状态, 而在微尺度条件下靠扩散来实现不同流体相互渗透需要较长的时间或者较长的混合室尺度. 图 4 所示为 $f_i=0.5, t=300 \text{ ms}$ 时, 混沌电场控制下流体系统的流场状态图. 从图中可以看出, 在壁面电极产生的 EDL 电势的组合作用下流体中产生了一个电动驱动力, 该驱动力只在微混合器壁面附近起作用. 然而, 从图中可以看出, 壁面邻域外无直接作用的流体因耦合效应仍会被拖入运动. 如图电极 E_a 的电势为 $\phi_E^*=150$, 同时 E_b 的 $\phi_E^*=600$, 该电场配置下混合室壁面附近的流质, 从高电势 E_b 向低电势 E_a 移动. 由于 E_a 与 E_b 的相位关系正交使得混合室产生的壁面驱动力正好形成协同

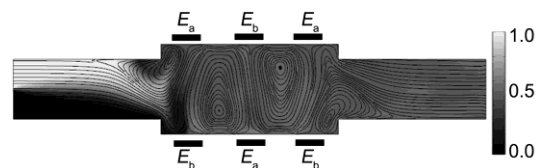


图 3 没有电场控制下流体系统的流场状态

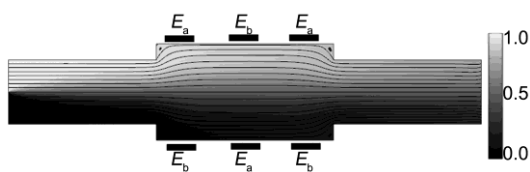


图 4 混沌电场控制下流体系统的流场状态

驱动关系, 所以诱导局域流场和散态流之间形成显著环流. 因此, 当散态流流过混合室时它需要被迫流过一个高度扭曲的路径, 成为混沌混合的主要驱动源.

2 仿真分析与参数优化

2.1 混沌评价方法

在微混合器中, 靠层流中的扩散来完成混合需要很长的时间, 所以需要增加对流. 已有研究表明, 混沌对流混合是加快微流动混合的有效方法, 所以在不考虑流体扩散影响的情况下, 流体流动的混沌程度在一定程度上反映了混合的程度.

Lyapunov 指数是衡量系统混沌特性以及尺度的重要参数. 通常对于已知动力学方程的系统, 其混沌特性可以直接通过定义来计算^[23,24]. 然而流体混沌动力学过程由于混沌方程不可知, 所以采用时序轨道跟踪观测法进行混沌程度的测算. Wolf 等人^[25]率先采用时序轨道跟踪观测并利用相平面、相体积等演化法来估算 Lyapunov 指数, 采用该方法可以通过计算最大 Lyapunov 指数(λ_1)和次大 Lyapunov 指数(λ_2)的值来判断二维系统的混沌状态, 如表 1 所示.

以 Wolf 法为代表的时序轨道跟踪观测法的判断效果较好, 但仍然存在计算数据长, 容易受参数影响的缺点. 事实上, 从表 1 中很容易看出, 系统只要存在一个正的 Lyapunov 指数, 就可以判断流体系统在做混沌运动, 因此判断流体的混沌状态时, 并不需要算出时序的 Lyapunov 指数谱, 而只要计算出最大 Lyapunov 指数就够了. Rosenstein 小数据量法是一种只计算混沌时序的最大 Lyapunov 指数的简单方法^[26],

表 1 Lyapunov 指数与系统状态间的关系

Lyapunov 指数	数据符号	系统状态
λ_1, λ_2	(+, +)	混沌状态
λ_1, λ_2	(+, 0)	混沌状态
λ_1, λ_2	(0, -)	临界混沌状态
λ_1, λ_2	(-, -)	大尺度周期状态

其计算过程为

(i) 对预设时序为 $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$, 嵌入维数为 m , 时间延迟为 τ 的流体系统进行相空间重构:

$$Y(t_i) = (x(t_i), x(t_i + \tau), \dots, x(t_i + (m-1)\tau)), \quad i=1, 2, \dots, n-(m-1)\tau, \quad (12)$$

(ii) 寻找轨道上第 j 点 $Y_j(t_0)$ 的最近临近点 $Y_{j'}(t_0)$, 并做暂短分离限制:

$$d_j(0) = \min \|Y_j(t_0) - Y_{j'}(t_0)\|, \quad |j - j'| > p, \quad (13)$$

式中, 平均时序轨道周期 p 可通过功率谱的平均频率的倒数估算, 即:

$$p \approx \frac{1}{\text{MNF}} = \frac{\int_0^\infty P(f) df}{\int_0^\infty f P(f) df}, \quad (14)$$

式中, MNF 为功率谱的平均频率, f 为功率谱密度函数, $P(f)$ 为流体轨迹信号的频谱.

(iii) 对于相空间的点 Y_j , 计算其临近点的 i 个离散时间步后的距离 $d_j(i)$:

$$d_j(i) = \min \|Y_{j+i} - Y_{j+i}^*\|, \quad i=1, 2, \dots, \min(m-j, m-j'), \quad (14)$$

对于每个 i , 对所有的 $\ln d_j(i)$ 取平均值得到 $y(i)$, 即:

$$y(i) = \frac{1}{q \Delta t} \sum_{j=1}^q \ln d_j(i), \quad (15)$$

式中, q 代表 $d_j(i) \neq 0$ 的数量, 应用最小二乘法对所得数据做线性回归, 所得直线斜率即为所求最大 Lyapunov 指数. 流体受横向驱动力流过混合室的平均时间约为 0.5 s. 在此条件下取 $\tau=0.001$ s, $m=2$, $n=500$, 作流体系统的 $y(i)$ 随时间变化的轨迹图, 如图 5 所示, 其中直线部分为采用最小二乘法对曲线拟合得出的, 其斜率即为最大 Lyapunov 指数.

2.2 混沌反控制系统参数优化

以步长为 0.1, 从 0 到 1 调整电动混沌反控制算法的振幅参数 f_c , 依次对流体系统 f_c 的时序轨道进行跟踪观测并采用 Rosenstein 小数据量法计算不同 f_c 下的最大 Lyapunov 指数, 图 6 显示计算所得的最大 Lyapunov 指数谱.

从图中可以看出, 当 $f_c=0.7$ 时最大 Lyapunov 指数达到最大, 说明此时微混合器内的流体达到最佳混沌混合效果. 此时, 混沌反控制算法的参数为最优.

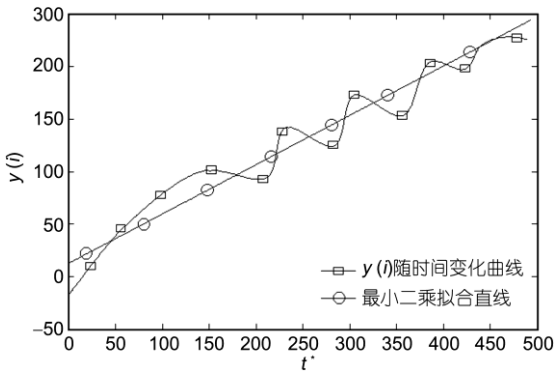


图5 $f_r=0.5$ 时流体系统最大 Lyapunov 指数

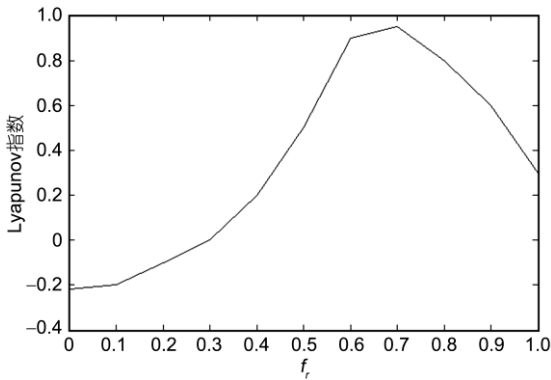


图6 随参数 f_r 变化的最大 Lyapunov 指数谱

2.3 不同控制算法的比较

为了便于比较不同控制算法对流体混沌反控制效果的影响,将时间序列进行二次分段,每隔 0.05 s 对流体做一次最大 Lyapunov 指数求解。混沌反控制算法分别采用文献[20]中的正弦扰动法和参数优化后的 Duffing 混沌反控制方法。图 7 所示为两种电动控制方法所控制的流质流过混合室过程的最大 Lyapunov 指数分布情况。

由图 7 易见,与 Duffing 混沌反控制算法相比较,

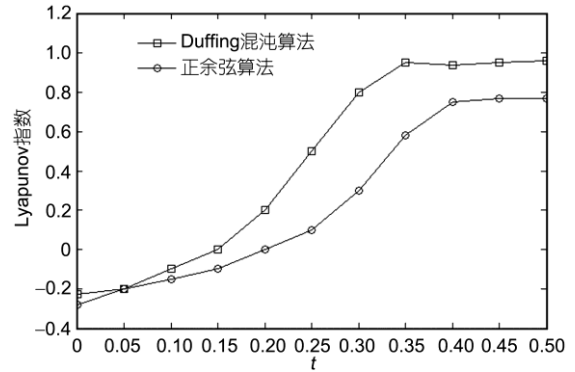


图7 不同算法作用下的最大 Lyapunov 指数分布

传统的正余弦算法在混沌产生时间以及混沌尺度上均体现出较好的优越性。以最大 Lyapunov 指数过零时间为基准,采用优化后 Duffing 算法控制的流体在进入混合室 0.15 s 后,便开始进入混沌状态,与正余弦算法相比提前了约 27.3%。在混沌尺度上采用优化后 Duffing 算法控制的流体得到的最大 Lyapunov 指数可达到 0.97,比正余弦算法提高约 25%。

3 结论

基于广义混沌同步理论,提出了一种运用混沌电场对微流控芯片内有序层流流体进行混合混沌反控制的主动式微混合方法。采用 Rosenstein 小数据量混沌评价法对流体混沌效果量化评价,优化 Duffing 混沌反控制算法的模型参数。通过对优化后的混合混沌反控制算法与传统正余弦控制算法进行仿真,结果表明,优化后 Duffing 算法对流体的混沌反控制,无论是进入混沌状态时间还是混沌最大 Lyapunov 指数评价尺度均优于传统的正余弦算法,所提出的电动混沌反控制方法能够有效提高主动式电动混合器的混沌混合效率,对于微流控芯片主动式电动微混合器的研究与设计具有一定的理论指导意义。

参考文献

- 1 Stroock A D, Dertinger S K W, Ajdari A, et al. Chaotic mixer for microchannels. Science, 2002, 295: 647–651
- 2 Howell P B, Mott D R, Fertig S, et al. A microfluidic mixer with grooves placed on the top and bottom of the channel. Lab Chip, 2005, 5: 524–530
- 3 deMello A J. Control and detection of chemical reactions in microfluidic systems. Nature, 2006, 442: 394–402
- 4 Hossain S, Husain A, Kim K Y. Optimization of micromixer with staggered herringbone grooves on top and bottom walls. Eng Appl Comp Fluid, 2011, 5: 506–516
- 5 Hong C C, Choi J W, Ahn C H. A novel in-plane Passive microfluidic mixer with modified Tesla structures. Lab Chip, 2004, 4: 109–113

- 6 Kim D S, Lee S H, Kwon T H, et al. A serpentine laminating micromixer combining splitting/recombination and advection. *Lab Chip*, 2005, 5: 739–747
- 7 Xia H M, Wan S Y M, Shu C, et al. Chaotic micromixers using two-layer ccrossing channels to exhibit fast mixing at low Reynolds numbers. *Lab Chip*, 2005, 5: 748–755
- 8 Jen C P, Wu C Y, Lin Y C, et al. Design and simulation of the micromixer with chaotic advection in twisted microchannels. *Lab Chip*, 2003, 3: 77–81
- 9 杨华勇, 阮晓东, 范毓润, 等. 交叉导流式微型混沌混合器. *化工学报*, 2006, 57: 1121–1126
- 10 傅新, 刘素芬, 阮晓东. 基于拉格朗日跟踪法的微混合器内混沌混合特性. *机械工程学报*, 2008, 44: 64–68
- 11 Ryu K S, Shaikh K, Goluch E, et al. Micro magnetic stir-bar mixer integrated with parylene microfluidic channels. *Lab Chip*, 2004, 4: 608–613
- 12 Liu R H, Yang J, Pindera M Z, et al. Bubble-induced acoustic micromixing. *Lab Chip*, 2002, 2: 151–157
- 13 樊晶, 叶红齐, 何显达. 超声波微混合反应器混合性能的研究. *化学工业与工程技术*, 2008, 29: 10–13
- 14 王斌, 徐进良, 刘国华, 等. 微气泡执行器强化微混合的实验研究. *微纳电子技术*, 2009, 46: 720–725
- 15 Erickson D, Li D Q. Influence of surface heterogeneity on electrokinetically driven microfluidic mixing. *Langmuir*, 2002, 18: 1883–1892
- 16 Lin J L, Lee K H, Lee G B. Active mixing inside microchannels utilizing dynamic variation of gradient zeta potentials. *Electrophoresis*, 2005, 26: 4605–4615
- 17 赵亮, 刘林华. 横向电动效应作用下微混合的数值模拟. *工程热物理学报*, 2007, 28: 481–483
- 18 唐桂华, 王斐斐, 毕成, 等. 微尺度电渗混合强化的数值研究. *工程热物理学报*, 2010, 31: 1721–1723
- 19 林建忠, 包福兵, 张凯, 等. *微纳流动理论与应用*. 北京: 科学出版社, 2010
- 20 Song H J, Bennett D. Numerical study of enhancing the mixing effect in microchannels via transverse electro osmotic flow by placing electrodes on top and bottom of the channel. *Microsyst Technol*, 2011, 17: 1427–1437
- 21 Yau H T, Chen C K, Chen C L. Sliding mode control of chaotic systems with uncertainties. *Int J Bifurcat Chaos*, 2000, 10: 1139–1147
- 22 Yau H T. Design of adaptive sliding mode controller for chaos synchronization with uncertainties. *Chaos Soliton Fract*, 2004, 22: 341–347
- 23 金天, 张骅. 基于统计方法的混沌 Duffing 振子弱信号检测与估计. *中国科学: 信息科学*, 2011, 41: 1184–1199
- 24 Kayacan E, Cigdem O, Kaynak O. Sliding mode control approach for online learning as applied to type-2 fuzzy neural networks and its experimental evaluation. *IEEE T Ind Electron*, 2012, 59: 3510–3520
- 25 Wolf A, Swift J B, Swinney H L, et al. Determining Lyapunov exponents from a time series. *Physica D*, 1985, 16: 285–317
- 26 Rosenstein M T, Collins J J, De Luca C J. A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets. *Physica D*, 1993, 65: 117–134

Electrokinetically driven flow mixing in micro scale based on chaotic anti-control method

ZHANG RongBiao¹, YANG Ning¹, ZHAO YuQi², XU PeiFeng¹ & ZHANG ZhongQiang³

¹ School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

² Department of Electrical & Computer Engineering, Stony Brook University, Stony Brook, 11790, USA;

³ School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

In order to solve the shortcomings of passive chaotic micromixer such as hard to control and difficult to manufacturing, we presents a chaotic anti-control method that use the chaotic electric field to control the mixing process of the orderly laminar fluid based on the generalized chaotic synchronization theory. This method applied the Duffing chaotic model on the micron electrode in the mixing chamber of the microfluidic chip. Then the chaos effect of fluid is evaluated by the Rosenstein method, and the parameters of the Duffing model are optimized. At last, the analyses of the chaos performance controlled by the optimized mixing chaotic anti-control algorithm and traditional cosine algorithm are carrying out. The simulation results show that the time of optimized Duffing algorithm controlled fluid to the chaotic state is 27. 3% shorter than the cosine algorithm. The largest Lyapunov of optimized Duffing algorithm is improved 25% compared with cosine algorithm. This data indicate the optimized Duffing algorithm improved the chaotic performance of the micromixer in microfluidic chip dramatically.

microfluidic chip, mixing, chaotic anti-control, parameter optimization

doi: 10.1360/972012-999