

一种对微流控粒子分选芯片的分支出口位置的简捷设计方法

张岩¹

1. 清华大学精密仪器系 仪器科学与技术研究所 北京 邮编: 100084

引言: 基于尺寸效应对粒子分选是生物医学与环境科学中被广泛采纳的样品处理方法。在分选芯片的设计中, 分支出口的位置设计会直接影响到粒子分选精度与回收效率, 因此在设计芯片时需要人们对粒子出射位置进行预测。本文提出了一种结合仿真与系统辨识的预测粒子出射位置的方法: 对芯片进行建模仿真, 获取不同尺寸粒子的出射位置坐标; 采用基于线性最小二乘原理的拟合方法, 辨识出粒子的出射位置与直径的关系公式。

计算方法: 仿真分为两部分: 流场仿真与粒子运动轨迹仿真。

流场仿真方面, 选取非压缩层流模型进行稳态研究, 主导方程如下:

Navier-Stokes方程:

$$\rho(\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u} = \nabla \cdot \left[-p\vec{I} + \mu(\nabla\vec{u} + (\nabla\vec{u})^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \vec{u})\vec{I} \right] + \vec{F}$$

粒子运动轨迹仿真方面, 根据流场仿真得到的流场速度信息, 对流体中的粒子进行受力分析与轨迹计算, 主导方程如下:

$$\vec{F} = \frac{1}{\tau_p} m_p (\vec{u} - \vec{v}) \quad \tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu}$$

在图1所示流道结构的入口处设置一个弯曲流道, 用以对输入的悬浮粒子进行初步的聚集。载有粒子的样品流由 A 端输入 (7.2 ul/min), B 端输入鞘液, 用于辅助粒子聚焦 (7.2 ul/min); C 端输入主动流 (360.0 ul/min), D 端输入保护流 (14.4 ul/min)

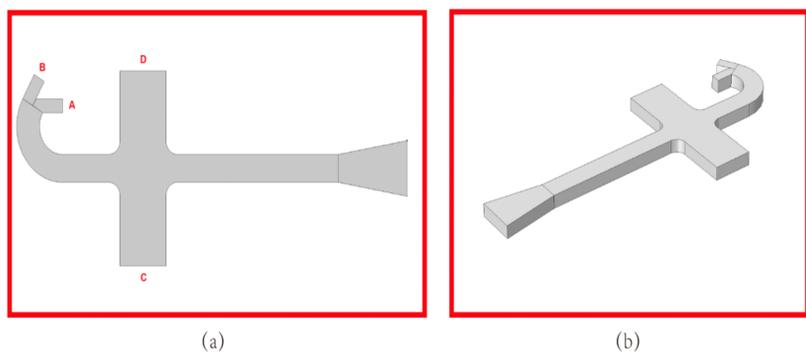


图 1 流道几何尺寸示意图 (单位: 微米)
(a) 为二维几何拓扑, (b) 为流道立体模型)

首先利用静态求解器求解流场速度分布, 对粒子直径执行参数扫描, 在 0.1um 与 80um 之间均匀取样 20 个直径值再利用时域求解器配合参数扫描, 求解不同尺寸粒子在流场中的运动轨迹。

结果: 以直径为 29.5um、4.31um 的粒子在 t=0.03s 时的运动仿真结果为例得到的粒子运动轨迹仿真结果示意图如图2:

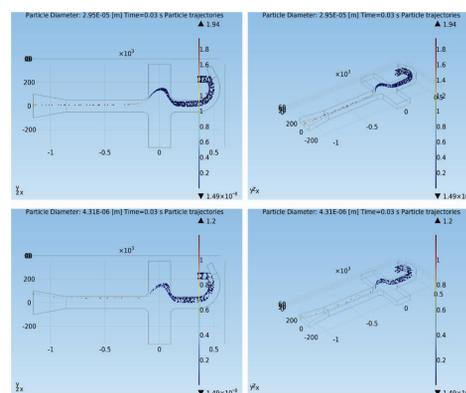


图 2 粒子运动轨迹仿真结果示意

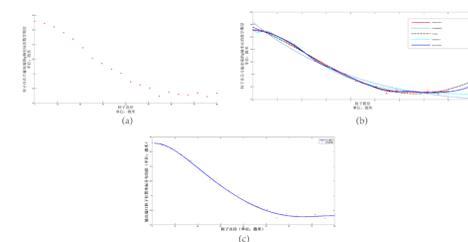


图 3 粒子位置坐标与粒子直径的定量关系
(a) 原始结果 (b) 不同拟合曲线 (c) 线性最小二乘拟合

将仿真实验数据导入 MATLAB, 利用其曲线拟合工具箱尝试不同的拟合方法进行拟合, 得到各拟合效果如图3, 最终选定线性最小二乘拟合, 得到预测公式。

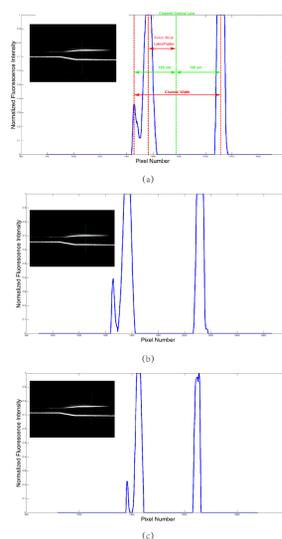


图 4 取样线上的荧光强度分布图

为了验证预测公式的准确性, 我们只做了相应的微流控芯片, 拍摄记录不同粒径荧光粒子在流道中的运动轨迹 (图4)。在荧光强度分布图上测量粒子出射轨迹的位置坐标, 验证了此公式的预测结果的内检测误差比重保持在 3% 以内。

结论: 本文提出的粒子出射位置预估方法, 经验证, 预测结果的内检测误差比重保持在 3% 以内。该方法运算量小, 可以方便灵活地在较大粒径范围内预估粒子出射位置。

参考文献:

1. Li, Jian, Xiangyu Zeng, and Jia Zhou. "Simulation design for continuous separating and 3D focusing of particles based on inertial microfluidics." ASIC (ASICON), 2013 IEEE 10th International Conference on. IEEE, 2013.)