

# 基于 AFM 推动的纳米粒子运动学模型研究\*

侯 静<sup>1 2 4</sup>, 吴成东<sup>1</sup>, 刘连庆<sup>2</sup>, 王志东<sup>2 3</sup>, 董再励<sup>2</sup>

(1 东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110004 中国;

2 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室 沈阳 110016 中国;

3 日本千叶工业大学 千叶 275-0016 日本; 4 沈阳建筑大学信息与控制工程学院 沈阳 110168 中国)

**摘要:** 针对纳米操作和装配过程中面临的由 AFM 单探针带来的物体丢失和操作效率低等问题, 通过对纳米粒子推动实验的分析, 建立了纳米粒子推动操作的运动学模型。该模型充分考虑了推动速度及探针磨损两个因素, 引入了与速度相关的粘滞摩擦力, 并利用空间配置的方法解决了探针针尖半径对操作结果的影响。该模型能够预测推动操作后粒子的可能位置, 从而可以避免操作过程中粒子丢失的现象, 能够提高纳米操作效率。数值模拟结果与多次实验操作结果相对比, 验证了所建模型的有效性。

**关键词:** 纳米粒子; 运动学模型; 推动速度; 探针磨损; AFM

中图分类号: TN16 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4010

## Research on kinematics model of nanoparticle based on AFM pushing

Hou Jing<sup>1 2 4</sup>, Wu Chengdong<sup>1</sup>, Liu Lianqing<sup>2</sup>, Wang Zhidong<sup>2 3</sup>, Dong Zaili<sup>2</sup>

(1 College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China;

2 State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, CAS, Shenyang 110016, China;

3 Department of Advanced Robotics, Chiba Institute of Technology, Chiba 275-0016, Japan;

4 School of Information and Control Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** In the process of nanomanipulation and assembly, most of the AFMs only have one tip as the end effector, which causes the problems of object loss and low operation efficiency. In this paper, the behavior of nanoparticle under pushing is theoretically analyzed and modeled. The model considers the pushing velocity and tip wearing sufficiently; speed related viscous friction is introduced and the configuration space method of the pushing action plane is used to overcome the affect of tip diameter on manipulation result. Using this model, the position of the nanoparticle can be determined after each manipulation in real time, so stable and reliable nanomanipulation can be realized. Numerical simulation and experimental results show the validity of the proposed model.

**Key words:** nanoparticle; kinematics model; pushing velocity; tip wearing; AFM

## 1 引 言

纳米材料在光、电、磁等方面具有独特的性能, 将其

制成特定的结构和器件已成为当今研究的热点问题。纳米物体的操作方法是制造纳米器件的关键技术, 影响着器件的精度和性能。现有的纳米操作方法中, 原子力显微镜(AFM)由于高分辨率和高操作精度的特性已经成

收稿日期: 2011-03 Received Date: 2011-03

\* 基金项目: 国家 863 计划(2009AA03Z316)、国家自然科学基金重点项目(60904095、60635040)、“中国科学院、国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划”资助项目

为纳米操控的主要工具<sup>[1-5]</sup>。为了提高纳米操作精度,研究者从纳米工作平台的动态优化<sup>[6]</sup>和纳米级测量技术<sup>[7]</sup>等多个方面进行了相关的研究。但 AFM 最初是用于进行纳米观测的工具,故进行纳米操作时,每一步的操作结果都需要重新成像来验证,这种扫描—规划—操作—扫描的操作模式效率低下,严重阻碍了 AFM 纳米操作的可靠性和效率<sup>[8]</sup>。此外,AFM 纳米操作是通过一根极细的探针接触样本实现的,样本和针尖的接触面积很小,因此探针只能对样本施加点式作用力,从而导致操作过程中经常出现探针滑过操作物体的现象,即粒子丢失的问题。如果能够对纳米粒子进行精确的定位操作则可以构成纳米尺寸的电学、光学和量子器件,从而实现新型材料、传感器、机械装置等,还能够促进纳米装配技术在医疗、生物、化学等领域的发展<sup>[9-10]</sup>。

为解决 AFM 粒子操作存在的问题,研究者提出了多种解决方案。Requicha 等人提出了一种路径规划的算法对多粒子进行了自动化操作<sup>[11]</sup>; Li 等人应用增强现实技术利用操作过程中的实时力信息更新操作界面进行纳米粒子操作<sup>[8,12]</sup>; Chen 等人发展了 CAD 纳米装配系统<sup>[13]</sup>; Liu 等人提出了一种局部扫描方法用以重新定位操作中丢失的纳米物体<sup>[14]</sup>; Kim 用轻敲方式逐步将粒子操作至目标位置<sup>[15]</sup>; Zhao 采用连续推动的方式操作粒子<sup>[16]</sup>。这些操作方法虽然在一定程度上提高了操作效率,达到了操作目的,但仍不可避免操作中发生粒子丢失的现象。

为了避免粒子丢失,最根本的解决方法是能够实时确定操作中粒子的位置,因而建立粒子模型是必要的。目前,关于纳米粒子模型方面的研究较少,尽管 Sitti 建立了粒子的动力学模型<sup>[17]</sup>,但模型参数很难确定。本文针对纳米粒子的运动情况进行了讨论,根据对基底接触平面及探针作用平面的详细分析,建立了纳米粒子的运动学模型。该模型充分考虑了探针推动速度以及探针磨损对操作结果的影响,通过力及力矩的平衡关系,预测操作后粒子中心的位置,从而实现了操作过程中粒子的实时定位,避免了丢失现象的发生。

## 2 纳米粒子的运动学模型

### 2.1 推动速度对操作的影响

大气环境下,纳米尺度的物体表面都会被自然吸附的水膜所覆盖,因此 AFM 探针—纳米粒子—基底间的作用力如图 1 所示。

图中,上标字母  $a$  表示吸引力,  $r$  表示排斥力,  $f$  表示摩擦力;下标字母  $o$  表示纳米粒子,  $t$  表示 AFM 探针,  $s$  表示基底。

纳米环境下,由于物体质量极小,其影响可以忽略不计,因而摩擦力才是决定纳米物体运动的主要因素。纳

米尺度下,虽然某些摩擦力的经验公式仍能适用,例如静摩擦大于动摩擦<sup>[15]</sup>,但由于物体表面水膜的存在,不能忽略粘滞摩擦力的影响,故摩擦力由库伦摩擦力和粘滞摩擦力 2 部分组成。实验证明,在不同的探针推动速度作用下,AFM 获取的激光偏转(PSD)电压信号不同,如图 2 所示,表明不同推动速度下,粒子所受的摩擦力不同,即粘滞摩擦力是粒子运动速度的函数。

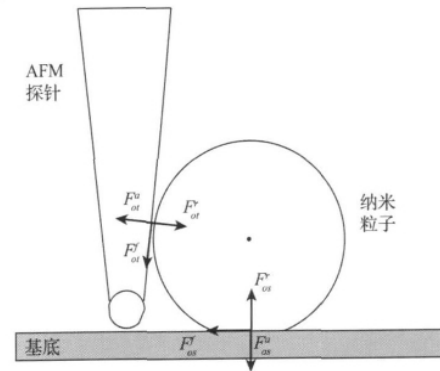


图 1 探针—粒子—基底间作用力示意图

Fig. 1 The forces among tip, particle and substrate

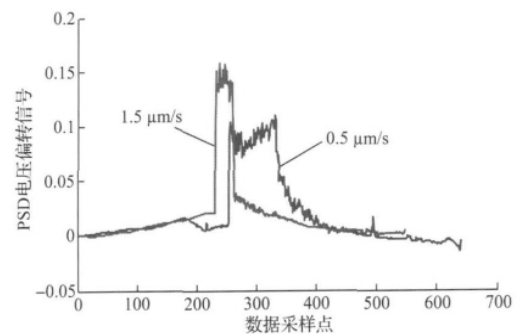


图 2 不同推动速度的 PSD 电压信号

Fig. 2 PSD voltage waveforms under different pushing velocities

### 2.2 纳米粒子的运动学模型

由于 AFM 探针存在定位误差,操作时很难确定粒子的中心位置,因此粒子操作过程中可能出现平移及旋转 2 种运动,如图 3 所示,图(a)为操作前图像,图(b)为操作后图像,图(c)为两者的叠加图像。

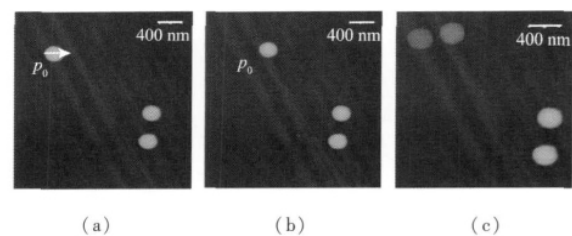


图 3 粒子推动的实验结果

Fig. 3 The experiment results of nanoparticle manipulation

AFM 探针以接触模式操作时, 纳米粒子与基底之间会产生不可忽略的形变, 故粒子与基底不能模型化为点接触。根据 Johnson-Kendall-Roberts (JKR) 模型可知, 接触区域是半径为  $R$  的圆<sup>[17]</sup>。由于纳米实验的操作基底通常为硅片、云母及 CD 表面等物质, 其高度起伏不大, 相对于直径为 200 nm 的粒子而言, 可忽略不计, 故可假设粒子在平面基底上运动。由于粒子作旋转平移运动, 其旋转中心是变化的, 但如果在较短时间内将推动步长划分为多个微小的运动阶段, 则可假设每个阶段粒子的旋转中心和旋转速度是不变的。在较小的推动步长下, 可假定探针针尖始终与粒子接触且匀速推动, 则探针的作用平面平行于基底的接触平面, 因而接触平面圆心的运动即可反映粒子运动。在样本基底为均质介质前提下, 可将粒子视为作匀速圆周运动的圆盘, 如图 4 所示。对基底接触平面与探针作用平面分别进行受力分析, 建立粒子的运动模型。

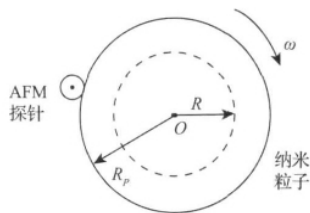


图 4 粒子的匀速圆周运动

Fig. 4 The uniform circular motion of the nanoparticle

2.2.1 基底接触平面分析

当粒子作圆周运动时, 其瞬时旋转中心  $I_{RC}$  位于圆外, 且由于粒子与基底均为均质, 则接触平面上摩擦力是均匀分布的。为了便于研究, 可将接触平面简化为一系列的棒状直线, 如图 5 所示。

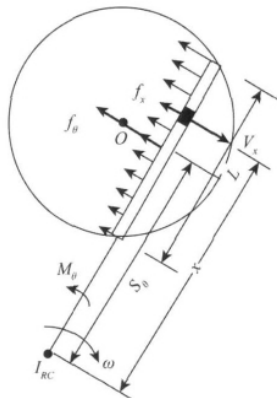


图 5 棒状直线摩擦力的分布

Fig. 5 The surface friction force on a line segment

根据上述分析, 棒状直线上微小单元的摩擦力  $f_x$  可用式(1)~(3)描述:

$$f_x = f_c + f_v \tag{1}$$

$$f_c = \mu N_x \tag{2}$$

$$f_v = cV_x \tag{3}$$

式中:  $f_c$  为库仑摩擦力且为定值,  $\mu$  为动态摩擦系数,  $N_x$  为单元上的正压力,  $f_v$  为粘滞摩擦力,  $c$  为粘滞摩擦系数,  $V_x$  为单元点的速度, 可用式(4)描述:

$$V_x = \omega x \tag{4}$$

式中:  $\omega$  为匀速圆周运动的角速度, 可根据探针的推动速度求取, 且为定值。x 是单元点与瞬时旋转中心  $I_{RC}$  间的距离。

对单元区域的摩擦力进行积分运算, 即可得到棒状直线区域所受的摩擦力及力矩, 如式(5)、(6)所示:

$$f_\theta = \int_{S_0-L/2}^{S_0+L/2} f_x dx \tag{5}$$

$$M_\theta = \int_{S_0-L/2}^{S_0+L/2} f_x x dx \tag{6}$$

式中:  $S_0$  为棒状直线中心与瞬心的间距, L 为棒状直线长度。

在接触平面上, 建立如图 6 所示的坐标系, 故  $S_0$  和 L 可用式(7)、(8)描述:

$$S_0 = S \cdot \sin \theta \tag{7}$$

$$L = 2 \sqrt{R^2 - (S \cdot \cos \theta)^2} \tag{8}$$

式中: S 是接触平面圆心与瞬心间的距离, R 为粒子与基底接触平面的半径,  $\theta$  为所建坐标系横轴  $x_0$  与棒状直线间的夹角, 其取值范围为  $0 < \theta \leq \frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{R}{S}$ 。

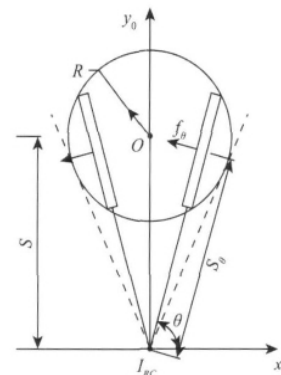


图 6 基底接触平面摩擦力的对称分布

Fig. 6 The symmetrical distribution of the friction force on the contact area

由于接触平面上, 棒状直线区域关于纵轴  $y_0$  左右对称, 故接触平面的摩擦力与力矩可用式(9)、(10)描述:

$$f_{fr} = \int_{\pi/2 - \arcsin R/S}^{\pi/2 + \arcsin R/S} f_\theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta \tag{9}$$

$$M = \int_{\pi/2 - \arcsin R/S}^{\pi/2 + \arcsin R/S} M_\theta \cdot d\theta \tag{10}$$

2.2.2 探针作用平面分析

对于纳米条件下,粒子所受的力与力矩均应保证平衡关系,则可获得式(11)、(12):

$$M_p = M \tag{11}$$

$$f_p = f_f \tag{12}$$

式中:  $f_p$  为探针推动作用力的分量,  $M_p$  为其力矩。

由于纳米粒子运动可视为圆盘的匀速圆周运动,故可对探针作用平面进行分析,得到图7所示的探针推动速度与粒子运动速度关系示意图。

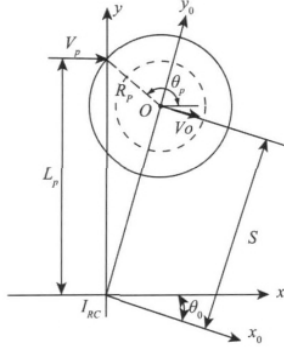


图7 探针推动速度与粒子运动速度的关系  
Fig. 7 The relation between the velocity of AFM tip and velocity of pushed particle

为了便于分析,对接触平面进行了坐标变换,建立了如图所示的  $xy$  坐标系。变换角  $\theta_0$  可由式(13)求取:

$$S \cdot \sin \theta_0 = -R_p \cdot \cos \theta_p \tag{13}$$

式中:  $\theta_p$  为推动作用点与圆心间的夹角,  $R_p$  为粒子推动作用平面的半径。

根据作用力  $f_p$  和力矩  $M_p$  之间的平衡关系,可获得式(14):

$$f_p \cdot L_p \cdot \cos \theta_0 = M_p \tag{14}$$

式中:  $L_p$  为推动点与瞬心的间距,可由式(15)描述:

$$L_p = S \cdot \cos \theta_0 + R_p \cdot \sin \theta_p \tag{15}$$

对上述表达式进行整理,得到式(16):

$$\int_{\pi/2 - \arcsin R/S}^{\pi/2 + \arcsin R/S} (f_p \sin \theta \cdot L_p \cos \theta_0 - M_p) d\theta = 0 \tag{16}$$

通过数值分析方法对上述方程进行求解,可得到变量  $S$ 。根据圆周运动的特点,可用式(17)描述探针推动速度  $V_p$  与粒子圆心运动速度  $V_0$  的关系:

$$\frac{V_p}{L_p} = \frac{V_0}{S} \tag{17}$$

通过粒子的运动时间即可确定操作后粒子所在的位置。

2.2.3 探针半径对操作的分析

文献[8]指出针尖顶峰角较小的探针更适用于操作。AFM 探针针尖可视为具有半孔径角  $\alpha$  的圆锥体,新的探针针尖尖端半径较小,例如 MikroMasch 公司生产的

NSC15 型探针针尖半径小于 10 nm,半孔径角  $\alpha$  约为  $5^\circ$ 。但随着扫描和操作的进行,针尖会逐渐磨损,故造成推动作用平面沿探针逐渐上移。若推动接触点所在的探针平面半径相对粒子半径较小,则其对操作的影响可适当的忽略。但当作用点所在的探针平面半径相对较大时,将大大影响操作结果。探针接触粒子时的相互作用平面如图8所示,图(a)为侧视图,图(b)为俯视图。

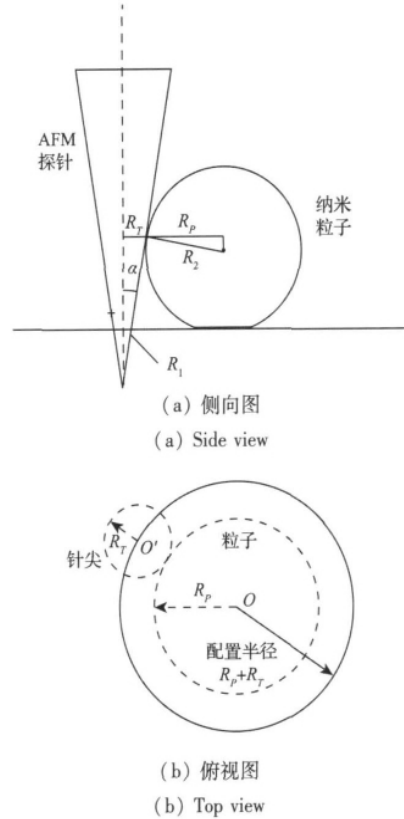


图8 探针与粒子推动作用平面示意图  
Fig. 8 The pushing plane of the tip and particle

文献[18]对探针针尖与粒子半径之间的关系进行了分析,讨论了不同情况下粒子推动作用平面与针尖推动平面的半径计算公式,本文采用相同方法通过式(18)和(19)对针尖和粒子的相互作用平面进行计算。

$$R_r = R_1(1 + \sin \alpha) \tan \alpha + R_1 \frac{1 - \sin \alpha}{\cos \alpha} \tag{18}$$

$$R_p = R_2 \cos \alpha \tag{19}$$

式中:  $R_r$  为探针针尖在接触点所在平面的半径,  $R_p$  为粒子的推动作用平面半径,  $R_1$  为探针针尖尖端半径,  $R_2$  为粒子半径。

由于操作过程中的探针磨损,造成  $R_1$  增大,从而使  $R_r$  相对于粒子半径不可忽略,因此在纳米粒子的运动学建模中,采用机器人控制的空间配置方法,在粒子推动作用平面半径的基础上增加针尖作用平面半径的尺寸,如图8(b)所示,即将式(13)和(15)中的  $R_p$  替换为  $R_p +$

$R_T$ , 即可解决探针半径对操作结果的影响。

### 3 数值模拟

#### 3.1 参数标定

如果根据所建立的粒子运动学模型求取变量  $S$ , 首先必须对模型中出现的定值参数  $f_c$  和  $c$  进行标定。标定方法为: 分别以  $0.5 \mu\text{m/s}$ 、 $1.0 \mu\text{m/s}$ 、 $1.5 \mu\text{m/s}$  和  $2.0 \mu\text{m/s}$  的推动速度在相同的操作条件下推动粒子, 并记录推动过程中 PSD 的偏转电压信号, 根据文献 [4] 的计算方法得到对应的推动作用力及均值, 从而得到推动速度与推动作用力的实验结果, 根据最小二乘拟合的方法得到拟合的直线, 其  $Y$  轴截距即为库伦摩擦力  $f_c$ , 斜率即为粘滞摩擦系数  $c$ 。

#### 3.2 数值模拟

根据参数标定结果, 采用龙贝格数值积分算法, 对所建立的粒子运动学模型进行了粒子运动轨迹的数值计算。探针推动速度设定为  $1.0 \mu\text{m/s}$ , 推动距离为  $500 \text{ nm}$ 。由于探针存在  $10 \sim 20 \text{ nm}$  的定位误差, 尽管操作时设定的推动路径通过粒子圆心, 但实际作用点的位置在圆心附近, 故进行运动轨迹计算时设定推动初始角的取值范围为  $11 \pi/12 \sim 13 \pi/12$ 。假设推动距离小于  $100 \text{ nm}$  的条件下, 推动角和瞬心的变化可忽略, 故根据模型确定粒子中心的运动, 更新推动点的位置, 重复计算, 可以确定  $500 \text{ nm}$  推动距离作用下, 粒子中心的运动轨迹。对于探针针尖磨损问题, 根据实验经验, 数次操作后探针针尖将由原来的  $10 \text{ nm}$  磨损为  $30 \text{ nm}$  左右, 之后磨损较为缓慢, 因此根据空间配置的方法, 探针作用平面的半径增加  $20 \text{ nm}$ 。根据上述的参数条件, 对模型进行数值模拟, 结果如图 9 所示。其中, 图 (a) 表示推动初始角  $\theta_p = 13 \pi/12$ , 推动作用平面半径  $R_p = 100 \text{ nm}$  的结果, 图 (b) 表示推动初始角  $\theta_p = 13 \pi/12$ , 推动作用平面半径  $R_p = 120 \text{ nm}$  的结果。

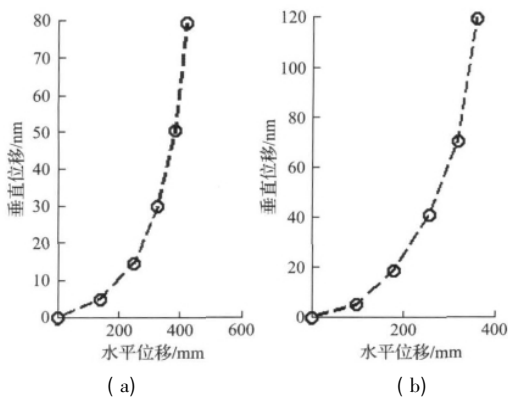


图 9 粒子运动轨迹的数值模拟

Fig. 9 Numerical calculations of the particle trajectories

## 4 实验结果

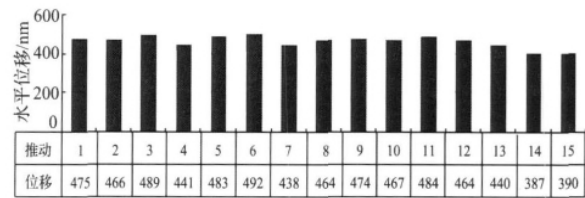
### 4.1 样本制备

将半径为  $100 \text{ nm}$  的乳胶纳米小球溶液用去离子水进行稀释, 取少许溶液滴在干净的 CD 基底上, 氮气吹干后, 静置  $3 \text{ h}$  以上方可进行操作。

### 4.2 实验结果

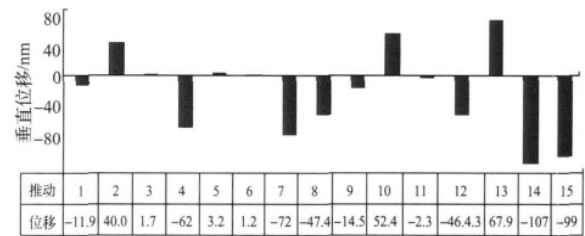
本实验的平台为 Veeco dimension 3100 SPM 设备, 探针为 MikroMasch 公司的 NSC15/AIBS。

实验参数设置如下: AFM 探针的推动速度设定为  $1 \mu\text{m/s}$ , 推动路径通过粒子圆心, 推动距离为  $500 \text{ nm}$ , 图 10 为 15 次推动操作的水平位移及垂直偏转位移的统计结果。



(a) 水平方向位移

(a) Center displacement in horizontal direction



(b) 垂直方向位移

(b) Center displacement in vertical direction

图 10 推动操作结果的统计

Fig. 10 The statistic of the pushing results

实验结果验证了本文所建立的粒子运动学模型预测粒子操作结果的有效性。实验结果中, 数据 3、5、6、11 的垂直偏转位移相对较小, 表明推动点的位置接近粒子圆心; 数据 14 的垂直偏转位移大于粒子半径  $100 \text{ nm}$ , 说明多次操作后, 探针针尖磨损, 此时不可忽略针尖半径对操作结果的影响。

根据建立的粒子运动学模型可预测操作后粒子的位置, 从而可高效率的将粒子推成特定的排列, 如图 11 所示, 实现粒子的可控操作。图 (a)、(b)、(c)、(d) 为连续推动操作过程, 箭头标明操作粒子及其运动路径。

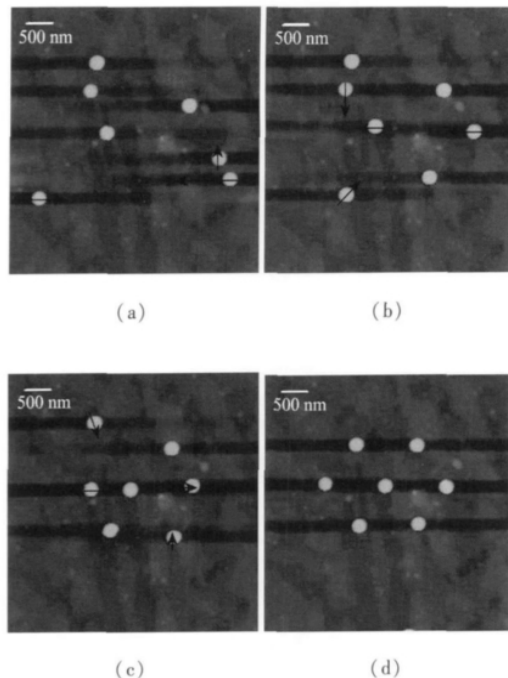


图 11 粒子排列的操作过程

Fig. 11 The pushing processes of particle pattern

## 5 结 论

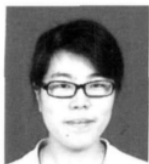
纳米装配操作过程中, 缺乏有效的方法来确定纳米物体的实时位置仍然是纳米结构和纳米器件制造过程中面临的主要问题之一。本文针对上述主要问题建立了纳米粒子的运动学模型并对探针磨损影响操作结果的解决方法进行了讨论。本文通过多次实验结果与数值模拟的实验结果相对比, 验证了所建运动学模型的有效性。根据粒子的运动学模型可以对推动操作后粒子的位置进行预测, 从而避免了操作过程中粒子丢失的现象, 并能够对纳米装配中探针推动路径的规划提供依据, 从而实现高精度、高效率的纳米操作。

### 参考文献

- [1] JUNNO T, DEPPERT K, MONTELIUS L, et al. Controlled manipulation of nanoparticles with an atomic force microscope[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, 66: 3627-3629.
- [2] TRANVOUEZ E, ORIEUX A, BOER E, et al. Manipulation of cadmium selenide nanorods with an atomic force microscope[J]. *Nanotechnology*, 2009, 20: 1-10.
- [3] WU S, FU X, HU X D, et al. Manipulation and behavior modeling of one-dimensional nanomaterials on a structured surface[J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256: 4738-4744.
- [4] 袁帅, 董再励, 缪磊, 等. 基于精确探针模型的 AFM 图像重构研究[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(6): 1117-1122.
- [5] YUAN SH, DONG Z L, MIAO L, et al. AFM image reconstruction based on accurate tip model[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(6): 1117-1122.
- [6] 袁帅, 董再励, 缪磊, 等. 基于数学形态方法的 AFM 探针建模研究[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(5): 1102-1107.
- [7] YUAN SH, DONG Z L, MIAO L, et al. AFM tip estimation based on mathematical morphology[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(5): 1102-1107.
- [8] 余晓芬, 程伶俐, 胡佳文, 等. 大行程纳米二维工作台的动态优化设计[J]. *电子测量与仪表学报*, 2010, 24(3): 289-293.
- [9] YU X F, CHENG L L, HU J W, et al. Dynamic optimization design of large travel 2-dof nano-positioning stage[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2010, 24(3): 289-293.
- [10] 夏瑞雪, 陈晓怀, 卢荣胜, 等. 新型纳米三坐标测量机误差检定方法的研究[J]. *电子测量与仪表学报*, 2010, 24(3): 250-256.
- [11] XIA R X, CHEN X H, LU R SH, et al. Research on error detection methods for a novel nano-CMM[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2010, 24(3): 250-256.
- [12] LI G Y, XI N, YU M M, et al. Development of augmented reality system for AFM-based nanomanipulation[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2004, 9: 358-365.
- [13] TAFAZZOLI A, PAWASHE C, SITTI M. Atomic force microscope based two-dimensional assembly of micro/nanoparticles[C]. *Proc. IEEE Int. Symp. on Assembly and Task Planning*, 2005, 230-235.
- [14] JALILI N, LAXMINARAYANA K. A review of atomic force microscopy imaging systems: application to molecular metrology and biological sciences[J]. *Mechatronics*, 2004, 14: 907-945.
- [15] MAKALIWE J H, REQUICHA A A. Automatic planning of nanoparticle assembly tasks[C]. *Proc. 2001 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP2001)*, 2001, 288-293.
- [16] LI G Y, XI N, CHEN H P, et al. "Videolized" atomic force microscopy for interactive nanomanipulation and nanoassembly[J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2005, 4: 605-615.
- [17] CHEN H P, XI N, LI G Y. CAD-guided automated

- nanoassembly using atomic force microscopy-based nanorobotics [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2006, 3: 208-217.
- [14] LIU L Q, LUO Y L, XI N, et al. Sensor referenced real-time videolization of atomic force microscopy for nanomanipulations [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2008, 13: 76-85.
- [15] KIM S, RATHFORD D C, LI X Q. Atomic force microscope nanomanipulation with simultaneous visual guidance [J]. *ACSNANO*, 2009, 3: 2989-2994.
- [16] ZHAO W, XU K M, QIAN X P, et al. Tip based nanomanipulation through successive directional push [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2010, 132: 030909-1 ~ 9.
- [17] TAFAZZOLI A, SITTI M. Dynamic behavior and simulation of nanoparticle sliding during nanoprobe-based positioning [C]. *Proceedings of IMECE' 04 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress*, 2004, 1-8.
- [18] RAO A, GNECCO E, MARCHETTO D, et al. The analytical relations between particles and probe trajectories in atomic force microscope nanomanipulation [J]. *Nanotechnology*, 2009, 20: 115706-1 ~ 6.

#### 作者简介



侯静, 2001 年于沈阳建筑大学获得学士学位, 2004 年于沈阳建筑大学获得硕士学位, 现为东北大学信息科学与工程学院博士研究生, 主要研究方向为 AFM 机器人化纳米操作方法研究。  
E-mail: bluerainhj@163.com

**Hou Jing** received B. Sc. degree in 2001 and M. Sc. degree in 2004 both from Shenyang Jianzhu University, and is currently working toward Ph. D. degree in College of Information Science and Engineering, Northeastern University. She majors in robotic nanomanipulation based on AFM.



吴成东, 1983 年于沈阳建筑大学获得学士学位, 1988 年于清华大学获得自动控制理论与应用专业硕士学位, 1994 年于东北大学获得工业自动化专业博士学位, 现为东北大学教授, 主要研究方向为模式识别、智能控制。

E-mail: wuchengdong@ise.neu.edu.cn

**Wu Chengdong** received B. Sc. degree in electrical automation from University of Shenyang Architectural and Civil Eng. in 1983, M. Sc. degree in control theory and application from Tsinghua University in 1988, and Ph. D. degree in industrial automation from Northeastern University in 1994. Now he is a professor in Northeastern University, Shenyang, China. He majors in pattern recognition and intelligent control.