

MWCNT 操作的动力学运动学建模研究^{*}

田孝军, 王越超, 席宁, 董再励

(中国科学院沈阳自动化研究所 机器人学重点实验室 沈阳 110016)

摘要: 为实现 MWCNT 操作运动过程的视觉显示, 本文建立了 MWCNT 的动力学模型, 据此可推导出推动 MWCNT 所需施加力的大小, 并根据探针的实际受力判断其能否运动; 同时还建立了 MWCNT 的运动学模型, 根据探针的实际位置可获得探针操作下 MWCNT 的新位置与姿态, 并借助虚拟现实技术对视觉界面进行实时更新, 实现了 MWCNT 运动过程的实时视觉显示。基于上述视觉显示, 操作者可在线控制探针的作用位置与运动轨迹、以及施加在探针上作用力的大小与方向, 实现对 MWCNT 操作过程及结果的在线控制。MWCNT 的操作实验初步验证了该模型的有效性。

关键词: MWCNT 操作; 动力学; 运动学; 原子力显微镜

Study on dynamics and motion modeling in MWCNT manipulation

Tian Xiaojun, Wang Yuechao, Xi Ning, Dong Zaili

(Robotics Laboratory, Shenyang Institute of Automation, Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: For real-time display of MWCNT manipulation process, in this research MWCNT dynamics model, based on which the force needed to push MWCNT can be deduced, is proposed and whether MWCNT can be moved or not can be judged according to the actual force applied on probe. Meanwhile, we also propose MWCNT motion model, based on which MWCNT's new position & posture can be obtained according to probe position, and then updated on the visual interface according to VR technology, thus real-time display of MWCNT manipulation process is realized. Based on the visual display, operator can online control the manipulation process and eventual result, by real-time adjusting the position & trajectory of the probe's, the amplitude & direction of applied force. MWCNT manipulation experiment verifies the effectiveness of the models.

Key words: MWCNT manipulation; dynamics model; motion model; atomic force microscope

1 引言

在基于 AFM 的纳米操作中, 由于光学显微视觉技术受光波长的限制无法实现纳米级成像, 而 AFM 操作与成像使用同一探针, 操作时无法同时进行成像来获取操作进展情况的实时视觉信息。为此, 本课题组在前期研究中, 借助增强现实技术实现了多壁碳纳米管(MWCNT)运动过程的视觉显示^[1-2], 但未对其中的动力学建模问题进行阐述, 本文将对此方面进行进一步分析。

在实现 MWCNT 操作过程的视觉显示时, 其关键问题是要得知 MWCNT 在探针作用下能否运动及其运动模式。针对研究所涉及的操作对象主要是直径相对较粗的 MWCNT, 由于其刚性相对较大, 在操作实验过程中几乎不发生明显宏观变形, 可以将其初步视为刚体(对于很细的纳米管/线, 其在操作过程中会发生复杂的弯曲变形, 需要借助分子动力学、量子力学等复杂工具进行建模, 此处对此不做研究), 虽然 MWCNT 受各种纳观力的共同作用^[3], 但由于 MWCNT 尺寸远大于原子级, 此处为非原子/量子操作, 其运动学表现仍符合牛顿力学基本规律, 此处我们仍可运用牛顿力

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(60635040, 60575060)、863 计划(2006AA04Z320)、辽宁省优秀青年科研人才培养基金(2005220025)资助

学来对 MWCNT 的受力与运动进行分析。

在本文中,我们将建立操作过程中 MWCNT 的动力学模型,从而可得出推动它所需施加作用力的大小,并根据探针的实际受力来判断其能否运动;同时,将建立其运动学模型,并据此运动学模型来得出 MWCNT 的运动模式,结合探针的实际位置来获得探针作用下 MWCNT 的新位置与姿态,并在视觉界面进行更新,从而来实现 MWCNT 运动过程的实时视觉显示。这样,操作者就可以在视觉界面上实时观察到探针作用下 MWCNT 的运动过程,从而将无法观察的纳米操作中间过程及结果的实时控制。

2 MWCNT 动力学建模

针对探针-微粒-基片之间存在的各种纳观力,按其作用效果可以分为吸引力(或粘滞力)、排斥力及摩擦力三类,图 1 为考虑此三类力作用时针尖-基片-MWCNT 之间的力学模型。

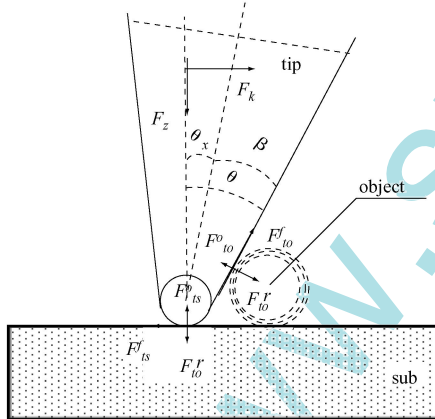


图 1 针尖-基片-MWCNT 的受力模型

其中, F_{ts}^f 、 F_{ts}^a 、 F_{to}^f 为相互作用的纳米摩擦力; F_{to}^a 、 F_{ts}^a 、 F_{ts}^r 为相互作用的引力; F_{ts}^r 、 F_{ts}^a 、 F_{ts}^r 为相互作用的排斥力; F_z 、 F_x 分别为悬臂施加在针尖上的法向力及横向力; α 为探针受力产生的悬臂扭转角; β 为 1/2 针尖锥型角。

对于 MWCNT, 其受针尖与基片的共同作用, 在操作过程中在垂直和水平方向保持平衡, 此时其平衡条件为:

$$F_{ts}^r \cos \alpha = F_{ts}^a + F_{ts}^f \sin \alpha + F_{ts}^a \cos \alpha \quad (1)$$

$$F_{ts}^a + F_{ts}^f \sin \alpha = F_{ts}^a \cos \alpha + F_{ts}^f \sin \alpha + F_{ts}^a \quad (2)$$

对于针尖, 受 MWCNT 与基片的作用, 由悬臂提供法向力及横向力来保持其平衡, 则在垂直方向上其平衡条件为:

$$F_z + F_{to}^f \sin \alpha + F_{ts}^f = F_{ts}^f \sin \alpha + F_{to}^f \cos \alpha + F_{ts}^r \quad (3)$$

为克服 MWCNT 所受阻力, 保证探针能够推动, 探针必须施加一定大小的法向力, 否则探针可能产生较大的向上弯曲变形而滑过 MWCNT, 从而使推动操作失效, 此法向力可通过受力分析得出(而横向力由操作者通过力/触觉设备的操作手柄施加, 可保证产生足够大的横向操作力来克服微粒所受横向阻力, 所以此处可不考虑横向力的问题)。

对于 MWCNT, 在操作过程中其运动方式为滑动(见第 3 节的分析)。当操作 MWCNT 在基片上滑动时, 微粒与针尖之间无滑动, 此时微粒与基片之间的摩擦力为^[4]:

$$F_{to}^f = s_{os}^c A_{os} + \mu_{os} (F_{ts}^r + F_{ts}^a) \quad (4)$$

其中 s_{os}^c 为极限剪切应力, A_{os} 为与微粒-基片两接触材料性质有关的常数; A_{os} 为微粒-基片之间的接触面积; μ_{os} 为微粒-基片之间的摩擦系数。

将式(4)代入式(1)、(2), 则可得针尖与微粒之间的排斥力为:

$$F_{ts}^r = F_{ts}^a - \frac{\mu_{os} \cos \alpha (1 + \sin \alpha) s_{os}^c A_{os} - \mu_{os} (1 + \sin \alpha) (1 + \mu_{os} \cos \alpha) F_{ts}^a}{\mu_{os} (1 + \sin \alpha) - \cos \alpha} \quad (5)$$

将式(4)、(5)代入式(3), 当基片对探针排斥力为 0 时, 可得施加在探针上最小法向力为:

$$F_{zr} = \left[2 - \frac{(1 + \sin \alpha) (1 + \mu_{os} \cos \alpha)}{\mu_{os} (1 + \sin \alpha) - \cos \alpha} \right] \mu_{os} F_{ts}^a - \left[\frac{\mu_{os} (\sin \alpha + \cos \alpha + \sin^2 \alpha)}{1 + \sin \alpha} + \sin \alpha \right] F_{ts}^a - F_{ts}^f + \frac{\mu_{os} \cos \alpha (1 + \sin \alpha)}{\mu_{os} (1 + \sin \alpha) - \cos \alpha} s_{os}^c A_{os} \quad (6)$$

据式(6)可以看出, 其中除去系数外, 需要得到的力为 MWCNT-基片以及针尖-基片之间的粘滞力。在实验过程中保持环境干燥以减小毛细力等的影响, 则粘滞力的大小主要与接触面积有关, 此时粘滞力之间的关系可表述为:

$$\frac{F_{ts}^f}{F_{ts}^a} = \frac{A_{ts}}{A_{os}} \quad (7)$$

$$\frac{F_{to}^f}{F_{ts}^a} = \frac{A_{to}}{A_{os}} \quad (8)$$

其中, 针尖-基片之间的粘滞力 F_{ts}^f 可据力-距离曲线实验获得(经典力-距离曲线如图 2 所示): 根据 JKR 理论, 力-距离曲线中针尖与基片突然分离时探针的受

力为粘滞力 F_s^a 的 $3/4^{[5]}$ 。获得 F_s^a 后,据式(7)、式(8),则 F_s^a 、 F_d^a 可分别推导得出,再代入式(6),则可得到推动 MWCNT 所需施加法向力的大小(可为负数,表示针尖-基片之间作用力足以保持针尖吸附在基片上),当施加作用力超过此法向力时,探针不会滑过微粒而进行操作失效。

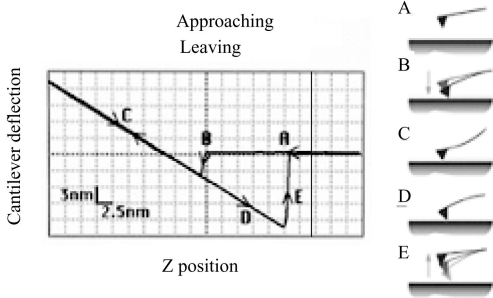


图2 经典力-距离曲线

3 MWCNT 运动学建模

由于 MWCNT 在分散沉积过程中表面通常会粘附上碳粉等杂质,或在分散过程中产生微小变形,使得其结构不再为完全对称的直管形,且它在操作过程中会受到较强的表面作用力,这些因素使得它在基片表面的运动一般为滑动,只在极少数情况下为滚动(如表面为原子级平度且碳纳米管结构为完全对称的直管形时^[6]),这种滑动运动方式在我们的实验中也得到了验证。

当操纵 AFM 探针对 MWCNT 的一端进行操作时,MWCNT 将会绕一点进行转动(其实质为在基片表面的滑动),此时沿 MWCNT 长度方向的受力及运动模式可表述为如图 3 所示。

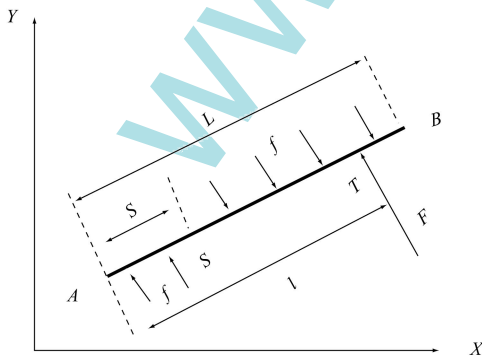


图3 刚性 MWCNT 的运动模式

其中, A, B 为 MWCNT, T 为探针作用点, S 为转动

中心, L 为其长度, s 代表转动中心到 A 端的距离, l 为探针作用点到 B 端的距离, f 为基片施加在 MWCNT 上的平均阻力。

当 AFM 探针操作 MWCNT 时,其力及力矩平衡方程可以表述为:

$$\begin{cases} F(l - s) = \frac{1}{2} f(L - s)^2 + \frac{1}{2} fs^2 \\ fs + F = f(L - s) \end{cases} \quad (9)$$

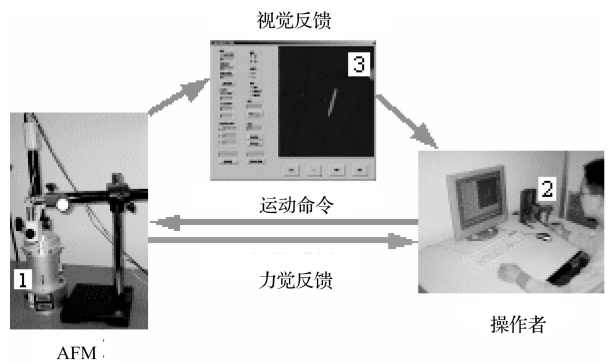
由上式,则可推导出在探针该次作用下 MWCNT 转动中心的位置:

$$s = l - \sqrt{l^2 - lL + L^2} \quad (10)$$

很显然,在相同大小的作用下,当探针作用于 MWCNT 端部,且作用方向与其轴线垂直时,作用力矩最大,此时 MWCNT 较易被推动。因此,采用对 MWCNT 两端间隔作用而针尖轨迹为‘Z’字形的操作策略,有助于 MWCNT 的整体平面运动(可避免绕一点转动而无平动)。

4 MWCNT 操作实验

在上述研究基础上,基于所研制的机器人化纳米操作系统^[1-2](见图 4),实现了对 MWCNT 的操作及操作过程的实时显示,对 MWCNT 的连续两步操作结果,如图 5 所示。



1 CSPM wet 型 AFM; 2 触觉设备; 3 视觉界面
图4 基于 AFM 的机器人化纳米操作系统

从 MWCNT 的推动实验可以看出, MWCNT 在操作过程中为绕转动中心的转动,与上述分析相符合。其中,实时视觉显示过程及建模研究在其中的作用可以解释如下:(1) 在操作前先扫描成像,得到操作前 MWCNT 的位置与姿态;(2) 根据视觉界面上显示的实时探针针尖位置,操纵触觉设备的操作手柄,控制探针运动到指定位置实施操作,当施加在探针上的力超过推动 MWCNT 所需力时, MWCNT 产生运动,此时

据运动学模型得到 MWCNT 转动中心位置,并结合探针的实际位置(由于探针在操作过程中与 MWCNT 相接触,探针位置就代表了 MWCNT 上该点的位置),依此两点就可唯一确定 MWCNT 的新位置与姿态,将此新位置与姿态在视觉界面上进行更新,就实现了 MWCNT 运动过程的实时显示;(3)在实时显示及力反馈的辅助下,操作者操纵触觉设备对探针的作用位置与运动轨迹、以及施加力的大小与方向进行调节,从而可实现对 MWCNT 的连续可控操作,具体视觉显示结果可参照文[1]中所述。

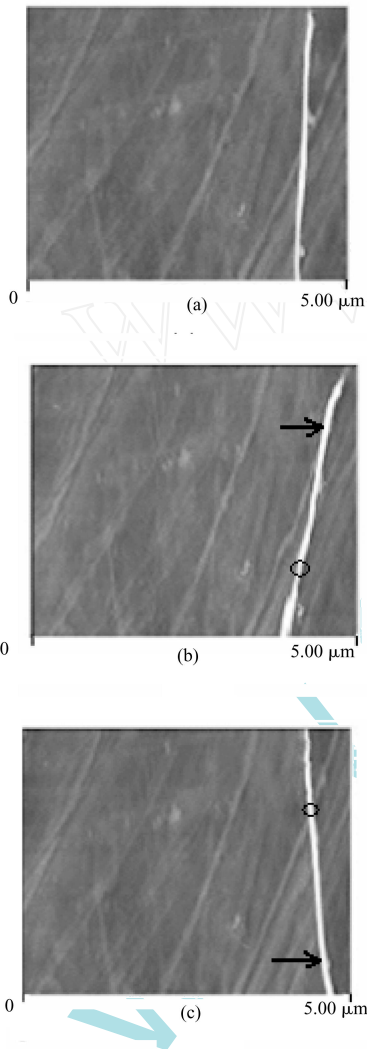


图5 对 MWCNT 的连续两次操作(图中箭头为探针的作用位置,小圆圈为转动中心)

在上述实验中,记录下 MWCNT 第一步推动过程中探针所受的力,如图6所示。

从图6可以看出,当法向力控制在 20~40 nN 之间,MWCNT 能被推动,此时最大横向力控制在

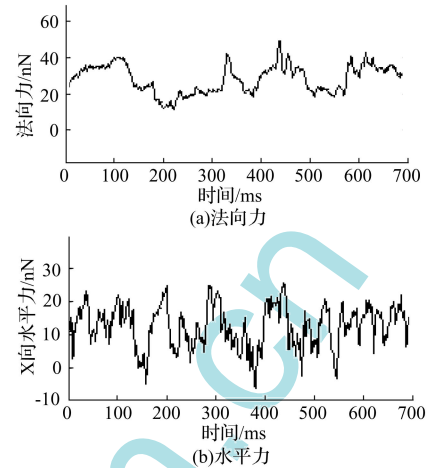


图6 第一步操作中的探针受力

30 nN,其中横向力明显的锯齿波形式反映了 MWCNT 在操作过程中的‘stick-slip’运动行为。

5 结论

本文建立了 MWCNT 的动力学模型,根据探针实际受力得知其运动与否;并根据建立的运动学模型及探针实际位置得出其实时位置与姿态,依此对视觉界面上进行实时更新,从而实现了 MWCNT 操作过程的实时视觉显示。在实时视觉(力觉)信息的辅助下,操作者可在线调节探针的作用位置及运动轨迹、及施加作用力的大小与方向,实现了对 MWCNT 操作过程及结果的在线控制,从而可提高 MWCNT 操作与装配的灵活性与效率。

参考文献

- [1] TIAN X J, LIU L Q, JIAO N D, et al. A study on an AFM based nanomanipulation system with force and visual feedback [C]. Proc. 11th IEEE Conf. Mechatronics and Machine Vision in Practice, 2004: 132-137.
- [2] 焦念东,刘连庆,田孝军,等.具有力觉与视觉反馈的交互式纳米操作系统[J]. 机器人,2006,28(3): 279-284.
- [3] ISRAELACHVILI J. Intermolecular and surface forces [M]. Academic Press London, London, UK,1991.
- [4] COLCHERO J, MEYER E, MARTI O. Friction on atomic scale, in Handbook of Micro/Nano Tribology [M]. CRC Press, Boca Raton, 1999.
- [5] ARAI F, ANDO D, FU KUDA T. Micro manipulation

based on micro-physics: Strategie based on attractive force reduction and stress measurement [C]. In Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 1995, 236-241.

[6] FALVO M R, TAYLOR R M, HELSER A, et al. Nanometer-scale rolling and sliding of carbon nanotubes[J]. Nature, 1999, 397:236-238.

www.cnki.net
www.spm.com.cn