

纳米构件操作的机理、 方法及跟踪定位

李东洁 杨 柳 著



科学出版社

纳米构件操作的机理、 方法及跟踪定位

李东洁 杨 柳 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍了纳米构件操作的机理、方法及跟踪定位的理论知识,以及基于压电陶瓷纳米定位平台和 SEM 实验平台的实践分析。主要内容包括:第 1 章,纳米操作及其跟踪定位;第 2 章,纳米构件操作的机理、建模及分子动力学仿真;第 3 章,具有视觉和力觉临场感的纳米构件操作;第 4 章,压电陶瓷驱动器的纳米定位与跟踪控制;第 5 章,基于单视角 SEM 图像的目标识别与定位;第 6 章,基于 SEM 的实验平台搭建及实验;第 7 章,智能控制算法在纳米构件操作中的应用。

本书具有很强的针对性和实用性,内容充实、深入浅出,可作为纳米构件、纳米驱动器控制及智能控制技术等领域的科研人员、工程技术人员以及高校师生的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

纳米构件操作的机理、方法及跟踪定位 / 李东洁, 杨柳著. —北京: 科学出版社, 2018.9

ISBN 978-7-03-056176-3

I. ①纳… II. ①李…②杨… III. ①纳米材料-机械元件-研究
IV. ①TH136

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 320456 号

责任编辑: 裴 育 纪四稳 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 蓝 正

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 9 月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2018 年 9 月第一次印刷 印张: 15

字数: 302 000

定价: 90.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

近年来, 纳米科学和技术获得了广泛的关注并得到了迅速的发展。各种纳米材料、纳米器件不断被研制并投入使用, 纳米测量、纳米级超精密加工、纳米电子学都有了新的发展。作为纳米科技领域的关键技术之一, 纳米操作技术是人类对微观世界探索、认识、改造和利用的基本手段, 是用于研究纳米材料、结构和装置性质特征的基本技术, 也是纳米构筑单元准备、纳米设备装配的必备技术。而纳米操作则需要通过纳米操作系统来实现。本书内容涵盖纳米构件操作的机理和方法、纳米驱动器的定位与跟踪控制方法、纳米构件操作的定位与跟踪、智能控制算法在纳米构件操作中的应用。

作为一本全面讲解纳米构件操作等相关知识的书籍, 本书具有以下特点。

1) 技术全面, 内容充实

本书全面涵盖了纳米构件操作的机理分析、建模、分子动力学仿真, 具有视觉和力觉临场感的纳米构件操作, 压电陶瓷驱动器的纳米定位与跟踪控制, 以及基于 SEM 图像的纳米构件操作定位与跟踪, 同时还介绍了单自由度的压电陶瓷纳米定位平台以及基于 SEM 的实验平台搭建。

2) 循序渐进, 深入浅出

为方便读者学习, 本书从纳米操作的定义、特点及方法讲起, 逐步引入纳米构件操作的机理分析和压电陶瓷驱动器的定位与跟踪方法, 进一步过渡到基于 SEM 图像的纳米构件操作定位与跟踪。读者可以根据自己的知识基础选择阅读本书时的切入点, 对有关内容进行选读。

3) 图文并茂, 讲解详尽

为了讲解清晰, 本书在每一章中都穿插了各种物理原理图、结构框图、流程图、控制框图以及实验平台图等。对于书中最核心的数学表达公式和控制算法都给出了详尽的推导过程及讲解, 并给出了相应的 MATLAB 仿真实验框图, 以帮助读者加深理解。

4) 结合应用, 注重实践

本书讲解了基于 SEM 的实验平台搭建, 给出了相应的实验结果, 并对得到的结果进行了分析。

以上内容均可以作为纳米构件操作定位与跟踪的实践经验, 帮助读者对纳米构件进行正确的操作与分析。

全书共 7 章, 其中李东洁撰写了 1.7 节和第 2、3、5~7 章, 杨柳撰写了 1.1~1.6 节和第 4 章。两位作者共同完成了各章节的审阅、修改和最终审校。

本书的部分内容源自国家自然科学基金项目(51105117)和黑龙江省自然科学基金项目(QC2014C054)的研究成果, 特别感谢国家自然科学基金委员会和黑龙江省科学技术厅的资助与支持。同时, 本书吸收了很多优秀教材与著作的思想、经验和优点, 并引用了一些文献, 谨向各位文献作者表示诚挚的谢意。在资料收集和图文修订的过程中得到了哈尔滨工业大学博士研究生邹宇、肖万哲, 哈尔滨理工大学硕士研究生王金玉、宋鉴、张丽、张越、王倩倩、刘聪、翟常贺、徐立航、陈浩、李东阁、李若昊等的协助, 相关单位的同仁也对本书提出了许多宝贵意见, 在此一并表示感谢。

作 者

2017 年 7 月

目 录

前言

第 1 章 纳米操作及其跟踪定位	1
1.1 纳米操作的定义及特点	1
1.1.1 纳米操作的定义	1
1.1.2 纳米操作的特点	2
1.2 纳米操作需要解决的问题	2
1.3 纳米操作的种类及方法	3
1.3.1 纳米操作的种类	3
1.3.2 纳米操作的方法	6
1.4 纳米驱动器的跟踪定位	6
1.4.1 开环控制方法	7
1.4.2 反馈控制方法	7
1.4.3 反馈结合前馈控制方法	8
1.4.4 基于扰动观测器的控制方法	8
1.4.5 多自由度压电陶瓷纳米驱动器的跟踪定位系统控制	9
1.5 纳米操作的跟踪定位	9
1.5.1 基于微/纳米传感器的纳米操作跟踪定位	9
1.5.2 基于图像处理的纳米操作定位	9
1.5.3 纳米操作的闭环控制	10
1.6 纳米操作的应用及发展历程	10
1.6.1 纳米操作的应用	10
1.6.2 纳米操作的发展历程	11
1.7 纳米操作的最新进展	16
1.7.1 操作方法方面的进展	16
1.7.2 操作技术方面的进展	19
1.7.3 操作工具方面的进展	22
1.7.4 操作平台和检测设备方面的进展	23
参考文献	26

第 2 章 纳米构件操作的机理、建模及分子动力学仿真	31
2.1 纳观环境中的作用力	31
2.1.1 范德瓦耳斯力	31
2.1.2 弹性接触机理分析	32
2.1.3 毛细作用力	34
2.1.4 静电力	35
2.2 纳米构件操作的机理建模	37
2.2.1 探针-纳米线力学模型	37
2.2.2 探针-基底力学模型	38
2.2.3 纳米线-基底力学模型	39
2.3 纳米构件力学行为建模	39
2.3.1 纳米线旋转	40
2.3.2 纳米线弯曲	41
2.3.3 探针路径规划	42
2.4 分子动力学方法基本原理	43
2.4.1 牛顿运动方程	44
2.4.2 分子动力学算法	44
2.5 纳米操作的分子动力学模拟	45
2.5.1 模型建立	46
2.5.2 势函数的选取	46
2.5.3 纳米线弯曲机理分析	49
2.5.4 纳米线断裂机理分析	51
2.6 模拟细节	52
2.7 结果分析	54
2.7.1 推动现象仿真分析	54
2.7.2 弯曲现象仿真分析	56
2.7.3 断裂现象仿真分析	56
参考文献	58
第 3 章 具有视觉和力觉临场感的纳米构件操作	59
3.1 纳米操作系统总体设计及力觉接口的稳定性分析	59
3.1.1 系统总体结构	59
3.1.2 力觉交互系统建模	61
3.1.3 力觉交互系统的稳定性判据	63
3.1.4 基于二端口网络的力觉交互系统稳定性与性能分析	65

3.2 视觉临场感的实现	70
3.2.1 虚拟对象表达与几何建模种类	71
3.2.2 虚拟对象的模型创建	72
3.2.3 位姿信息三维环境映射及虚拟场景建立	75
3.3 虚拟模型的碰撞检测	77
3.3.1 碰撞检测的分类	77
3.3.2 探针与基底的碰撞检测	80
3.3.3 纳米线与基底的碰撞检测	81
3.3.4 探针与纳米线的碰撞检测	82
3.3.5 碰撞检测算法的整合	84
3.4 虚拟力觉渲染	85
3.4.1 探针与基底之间的力	85
3.4.2 纳米线与基底之间的力	86
3.4.3 探针与纳米线之间的力	87
3.5 虚拟力觉渲染模型的 MATLAB 仿真及分析	88
3.5.1 探针与基底之间的力	88
3.5.2 ZnO 纳米线与基底之间的力	89
3.5.3 钨探针与 ZnO 纳米线之间的范德瓦耳斯力	90
参考文献	91
第 4 章 压电陶瓷驱动器的纳米定位与跟踪控制	94
4.1 压电陶瓷的非线性分析及其二阶模型的系统辨识	94
4.1.1 压电陶瓷驱动器理论基础	94
4.1.2 压电陶瓷的非线性特性	97
4.1.3 压电陶瓷驱动器二阶模型的系统辨识	100
4.2 压电陶瓷驱动器的输出反馈滑模观测器控制方法研究	104
4.2.1 压电陶瓷驱动器的滑模控制	104
4.2.2 输出反馈滑模观测器控制设计	104
4.2.3 稳定性分析	106
4.2.4 实验及分析	108
4.3 压电陶瓷驱动器的输出反馈积分控制方法研究	112
4.3.1 基于滑模的输出反馈积分控制器设计	113
4.3.2 稳定性分析	115
4.3.3 实验及分析	117
4.4 压电陶瓷驱动器的有限时间终端滑模控制方法研究	124

4.4.1	终端滑模控制器设计	124
4.4.2	滑模扰动观测器设计	126
4.4.3	稳定性分析	127
4.4.4	仿真及分析	129
	参考文献	134
第5章	基于单视角 SEM 图像的目标识别与定位	138
5.1	探针的识别及精确定位	138
5.1.1	亚像素边缘检测概述	138
5.1.2	相似度概述	144
5.1.3	探针的平面定位	146
5.1.4	探针的垂直定位	149
5.2	纳米线的识别及精确定位	150
5.2.1	核密度估计	151
5.2.2	纳米线图像的预处理	153
5.2.3	纳米线的识别及定位	153
5.3	重叠纳米线的识别及定位	156
5.3.1	重叠纳米线的识别	156
5.3.2	重叠纳米线图像的预处理	158
5.3.3	重叠纳米线的定位	159
5.4	目标定位及识别结果	160
5.4.1	探针平面定位结果	160
5.4.2	探针垂直定位结果	161
5.4.3	纳米线识别结果	162
5.4.4	纳米线平面定位结果	166
5.4.5	重叠纳米线识别结果	166
	参考文献	168
第6章	基于 SEM 的实验平台搭建及实验	170
6.1	实验平台总体结构	170
6.1.1	力觉反馈设备	171
6.1.2	扫描电子显微镜	172
6.1.3	纳米定位器	173
6.2	控制流程与软件构架	176
6.2.1	遥纳操作控制流程	176
6.2.2	SEM 图像的网络传输实现	178

6.2.3	Omega3-Attocube 主从控制实现	179
6.2.4	系统软件构架	180
6.3	纳米构件操作策略	181
6.3.1	纳观操作作用力模型	181
6.3.2	纳米构件操作的约束条件	183
6.3.3	探针 z 向运动策略	184
6.3.4	纳米构件旋转策略	185
6.3.5	纳米构件平移策略	188
6.4	SEM 下纳米线操控实验	189
6.4.1	虚拟环境测试实验	189
6.4.2	ZnO 纳米线旋转实验	190
6.4.3	ZnO 纳米线平移实验	192
	参考文献	193
第 7 章	智能控制算法在纳米构件操作中的应用	194
7.1	基于模糊 PID 的系统闭环控制	194
7.1.1	控制器结构设计	194
7.1.2	模糊集、论域和隶属函数的选择	196
7.1.3	模糊整定规则参数的建立	198
7.2	BP 神经网络	201
7.2.1	BP 神经网络结构	202
7.2.2	BP 神经网络算法原理	202
7.2.3	BP 神经网络 PID 控制器设计	202
7.3	定位平台模型化	205
7.3.1	实验平台驱动装置建模	206
7.3.2	Attocube 位移模型的建立	207
7.4	控制平台建模及性能仿真分析	208
7.4.1	模糊 PID 控制方法的 MATLAB 仿真	208
7.4.2	BP 神经网络 PID 控制系统 MATLAB 仿真	211
7.5	预测控制在纳米操作系统中的应用	215
7.5.1	预测控制	216
7.5.2	基于 BP 神经网络的广义预测控制	217
	参考文献	226

第 1 章 纳米操作及其跟踪定位

1.1 纳米操作的定义及特点

1.1.1 纳米操作的定义

近年来, 纳米科学和技术获得了广泛的关注并得到了迅速的发展。各种纳米材料、纳米器件不断被研制并投入使用, 纳米测量、纳米级超精密加工、纳米电子学都有了新的发展, 而作为一项崭新的技术, 与纳机电系统(NEMS)相关的研究工作也在很多实验室展开并获得了不小的进展^[1]。

作为纳米科技领域关键技术之一的纳米操作技术是人类对微观世界探索、认识、改造和利用的基本手段之一^[2], 是用于研究纳米材料、结构和装置性质特征的基本技术, 也是纳米构筑单元准备、纳米设备装配的必备技术。纳米操作是指对原子、分子及纳米尺度的器件进行定位、推、拉、拾取、释放、装配等的各种操作^[1, 2]。

纳米操作需要通过纳米操作系统来实现。纳米操作系统是指适用于对纳米尺度(通常是指 1~100nm)对象进行操作、集微力检测控制和视觉于一体、具有沟通宏/微观领域能力的操作系统。一般纳米操作系统主要由纳米操作器及驱动器、纳米操作台、纳米力传感器、操作环境控制以及纳米尺度成像设备等部分组成, 其基本结构如图 1.1 所示^[3]。在宏观意义上, 可以将纳米操作系统分为接触式纳米操作系统和非接触式纳米操作系统两类; 按其操作环境又可分为真空纳米操作

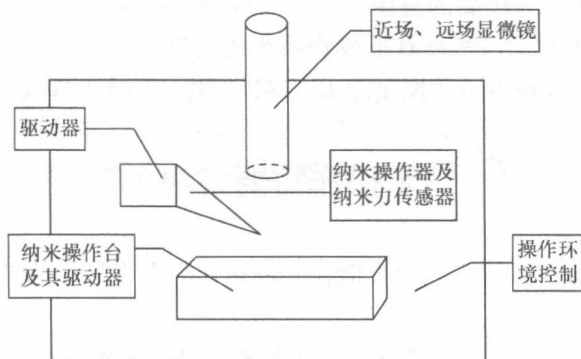


图 1.1 纳米操作系统的基本结构

系统、空气纳米操作系统、液体纳米操作系统三类。对操作环境的选择主要依据微纳构件的尺寸、形状和性能等条件。利用纳米操作系统,人们可以对纳米尺度的对象进行拉-压、拾取-移动-释放、定位/定向、装配、压印、弯曲、扭曲等操作^[1,2,4]。

1.1.2 纳米操作的特点

纳米操作不同于宏观操作,它的操作对象是原子、分子及纳米尺度甚至亚纳米尺度的微器件。当物质在纳米尺度时,其材料特性有显著的变化,并具有一些新的特性:

(1) 小尺寸效应。当微尺寸与光波波长、传导电子的德布罗意波长及超导态的相干长度、透射深度等物理特征尺寸相当或更小时,它的周期性边界被破坏,从而使其声、光、电磁、热力学等性能改变而出现新的特性的现象,称为小尺寸效应。

(2) 表面效应。单位质量粒子表面积的增大,表面原子数目的骤增,使原子配位数严重不足;高表面积带来的高表面能,使粒子表面原子极其活跃,很容易与周围的气体反应,也容易吸附气体,这一现象称为离子的表面效应。

(3) 量子尺寸效应。微粒尺寸达到与光波波长或其他相干波长等物理特征尺寸相当或更小时,金属费米能级附近的电子能级由准连续变为离散并使能隙变宽的现象,称为量子尺寸效应^[5]。

操作对象的特殊性决定了纳米操作系统需具有与宏观操作很多不同的特点^[2,4,6]:

(1) 具有高分辨率的观察能力。保证操作过程中对操作对象的位姿的准确获取和可靠操作。

(2) 具有沟通宏/微观尺度世界的能力。当系统本身是宏观尺度,而操作对象为微观尺度时,要具有良好的沟通转换能力。

(3) 操作空间中有较高的自由度。为了保证对操作对象的任意操作和高精度操作,需要从各个方向、角度获取操作系统的信息。

(4) 纳米操作过程中力的控制能力。保证对操作对象的有效操作和无损操作。

1.2 纳米操作需要解决的问题

未来的纳米操作系统应该向智能化和高速化方向发展,为此需要解决下列问题^[1,4,6]:

(1) 批量生产需要自动而高速的纳米操作系统。要解决稳定、高速控制中的开环非线性、不确定性和干扰性等问题。

(2) 纳观力学建模是可靠操作必需的。然而,人们对纳米尺度的物理、化学等现象还未能完全理解,所以要对微观受力进行持续不断的探索,开发具有恰当物理和化学模型的微纳操作技术,寻求可靠的纳米力建模。

(3) 三维装配仍是纳米操作系统面对的重要问题。人们需要开发智能纳米夹持器,寻求可靠的纳米力建模。

(4) 对于灵活多变的操作任务,需要设计各种各样更加微型化、集成化的传感和驱动器件。

(5) 能够兼顾效率、灵活性、准确性和成功率等综合性能的有效操作方法有待研发。

1.3 纳米操作的种类及方法

1.3.1 纳米操作的种类

近年来,随着纳米科学与技术的快速发展,应用于不同研究目的的纳米操作系统被研发出来并投入使用。放大纳米物质并将清晰的纳米世界呈现在人们眼前,是纳米操作技术发展不可或缺的基础环节。为此,通常根据纳米操作中使用的显微技术的不同对纳米操作进行分类。典型的纳米操作系统主要有基于扫描探针显微镜(SPM,主要包括扫描隧道显微镜(STM)和原子力显微镜(AFM))的纳米操作系统、基于电子显微镜(EM,主要包括扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM))的纳米操作系统、光镊纳米操作系统以及混合式纳米操作系统^[1]。

1. 基于 SPM 的纳米操作系统

SPM 是在 STM 发明取得巨大成就的基础上发展起来的一个大家族,包括 AFM、STM、静电力显微镜(EFM)、摩擦力显微镜(FFM)等。其原理都是通过检测微小探针与样品表面的各种相互作用,在纳米尺度上研究各种物质表面结构和性质。这些类型的显微镜中用于纳米操作的主要是 STM 和 AFM。

以 STM 为核心的纳米操作系统主要用于原子和分子的操作。1990 年, Egle 和 Schweizer 进行了首次纳米操作实践。他们运用 STM 在单晶镍表面定位单个氩原子,组成了“IBM”三个字母。目前用 STM 对原子、分子的操作主要包括三类:移动、拾取和释放。

AFM 集成像、力反馈和操作能力于一体。这种系统以 AFM 为主体,可以用于在平面上对纳米对象进行机械操作,如操纵纳米粒子、碳纳米管(carbon nanotube, CNT)进行纳米压印等,也可以用于对生物对象进行操作。由于 AFM 可在各种环

境中成像,所以这种系统在纳米科技研究中具有广泛的应用。

最初的纳米操作过程都是基于静态图像离线设计的,每次操作都要经历扫描—设计—操作—扫描的循环,因此这种过程效率较低,并且操作过程中无实时的信息反馈。Holis 首次把磁悬浮手控制器和 STM 结合实现了遥纳米系统操作。Taylor II 对 STM 构建的虚拟现实界面包括立体头盔显示界面、力反馈遥操作手,极大地增强了 STM 的操作能力。

近年来的研究热点集中在把 AFM 和触觉设备与虚拟现实技术相结合,使纳米操作进一步机器人化。Sitti 把三维虚拟现实和一个自由度的触觉设备引入基于 AFM 的纳米操作系统中。李红斌等通过把分析悬臂-探针尖和环境的交互作用得到的垂直力和侧向力反馈给触觉设备,基于实时力和位置信息,实时更新视觉图像,从而极大地方便了系统的操作。美国北卡罗来纳大学研制的纳米操作系统把虚拟现实界面和 AFM 结合,对生物样本、碳纳米管等进行了操作实验。Hudson 设计了分布式协作纳米操作手系统,可以使纳米操作手的不同使用者远程协作。这些系统把机器人化思想融入 SPM 中,具有广阔的研究空间。

基于 SPM 的纳米操作系统构建相对容易,但单探针只能完成简单的二维操作,极大地限制了其柔性工作能力。另外,在操作过程中如何获取可靠的实时视觉信息仍需进一步研究。

2. 基于 EM 的纳米操作系统

EM 是根据电子光学原理,用电子束和电子透镜代替光束和光学透镜,使物质的细微结构在极高放大倍数下成像的仪器。EM 主要包括 SEM 和 TEM 两种。

日本名古屋大学研制的纳米操作系统在 SEM 中集成了四个操作单元,共 16 个自由度。末端执行器为三个 AFM 悬臂和一个基底或四个 AFM 悬臂。可以实现的功能包括纳米操作、纳米测量、纳米制作和纳米装配。

一些公司已研制出相关产品,如 Zyvex Technologies 公司研制的 S100 纳米操作系统,具有灵活、紧凑、模块化的特点。德国 Klocke Nanotechnik 公司基于纳米马达研制了并联式和串联式纳米操作手,其直线运动分辨率可达 2nm,运动行程达 70nm。德国 Kleindiek Nanotechnik 公司研制的适用于 SEM 的纳米操作手由两个旋转电机和一个径向电机组成,径向运动范围达 12mm,分辨率达 0.5nm。

基于 SEM 的纳米操作系统的特点是:在电镜真空室内集成纳米操作手,可以进行实时观察;多个纳米操作手可以协调工作,每个操作手具有多个自由度,可以进行复杂的三维操作;操作对象不受基底影响。由于具有实时观察功能,并且具有多个操作手,所以基于 SEM 的纳米操作系统是功能较为完善的系统,是一项很有发展前途的技术。

基于 TEM 的纳米操作系统以高分辨率的 TEM 作为观察工具,在其超高真空样品室内放置操作手。这类系统一般是针对特定的研究应用搭建的:Kuzumaki 用 TEM 中的双操作手对单壁碳纳米管进行操作。Wang 在 TEM 中对单壁碳纳米管的物理和机械性质进行了测量。Zettl 和 Cumings 在 TEM 中实现了多壁碳纳米管的低摩擦线性轴承。这类系统受限于其样品室的狭小空间,几乎不能放置大的操作手。

3. 光镊纳米操作系统

基本的光镊纳米装置包括三大部分:①光阱形成、显微观察及光学耦合的光路系统;②纳米精度操作系统;③纳米精度位移和微小力测量系统。Arai 等采用双光镊系统实现了 DNA 分子(2nm 直径)的扭转、打结,为细胞内蛋白纤维相互作用等分子力学的研究开辟了新的途径。

中国科学技术大学激光生物实验室首次用光镊排布微粒,形成稳定的空间结构,为生物器件组装提供了一种可行的途径。光镊是非接触式的纳米操作工具,能对样品施加皮牛量级的力,可广泛应用于生物纳米操作。基于光镊的纳米操作系统的主要特点是:能稳定捕陷的最小物体尺寸为 40~50nm;对捕陷进行精密、高速、xyz 向控制具有挑战性;装配对象需要通过化学和其他方法形成稳定的连接。

4. 混合式纳米操作系统

上述几种系统各有特点,如基于 AFM 和 STM 的纳米操作系统虽然容易构建,但缺少实时的观察手段;基于 TEM 的纳米操作系统成像分辨率高,但在真空室内不能放置体积较大的操作手。一些研究者充分利用各自系统的优缺点进行集成,进而构成混合式纳米操作系统。例如,Williams 把 AFM 和 SEM 组合在一起,利用 SEM 观察 AFM 针尖的运动和 AFM 针尖与样品的交互,控制 AFM 针尖拾取和操作样品上的对象。Nakajima 构建了基于 SEM 和 TEM 的混合式纳米操作系统,使得系统既具有足够高的分辨率,又能实现高效灵活的操作。Metin 提出联合 AFM 和光镊进行复杂的拾取与释放操作。

近年来,将虚拟现实(VR)技术引入纳米操作过程中也是纳米操作研究中的另一个方向,即具有虚拟现实体系的纳米操作系统。

由于纳米操作具有不可感知性,很多学者将虚拟现实技术引入纳米操作系统中,推进了操作系统反馈控制技术的发展。纳米操作虚拟现实体系的研究主要集中在日本、欧美等国家及地区,一方面通过计算机图形建模技术,融合视觉信息,实现三维可视化,另一方面研究纳米操作下的力学模型,实现力觉、触觉的感知和反馈。日本东京大学 Sitti 把三维虚拟现实和一个自由度的触觉设备引入基于

AFM 的纳米操作系统中,该系统借助反馈力觉信息和显微镜视觉信息成功地实现了对较大尺寸微粒的操作实验;东京工业大学提出一种遥操作的虚拟现实方法结合一种虚拟耦合阻抗的遥操作方法,实现了各种力(范德瓦耳斯力、表面张力和电磁力)的反馈,操作精度达到纳米级,并建立了触觉反馈装置的虚拟现实操纵界面,操作手可以根据末端的位置姿态进行调整^[7]。

随着计算机图形技术的发展,我国在纳米操作的虚拟现实体系方面也开展了一些研究。哈尔滨工业大学的机器人技术与系统国家重点实验室对基于 SEM 的主从遥纳操作平台进行了研究,提出了一种基于虚拟现实技术的交互式纳米操作方法,建立了纳米操作下的虚拟力觉和视觉模型;中国科学院沈阳自动化研究所和北京航空航天大学机器人研究所在纳米操作的遥操作图形预测仿真方面也开展了研究。

1.3.2 纳米操作的方法

由于纳米操作具有有别于宏观操作的特殊性,很多研究者都在寻求准确、可靠的纳米操作方法。纳米操作按其物理原理可分为流体力式、声辐射式、光辐射式、介电力式以及机械力式五种主要方式^[2]。

从表 1.1 中不同纳米操作方式的对比可知,介电力式和机械力式的纳米操作方式在纳米操作中的可操作性较强,目前研究的热点主要集中在具有灵活可控的操作工具的可靠机械力式纳米操作方面。

表 1.1 不同纳米操作方式的对比

分类	驱动方式	优点	缺点
流体力式	流体驱动	适合活性分子操作	操作精确性较差,控制精度不高
声辐射式	超声波频率控制	操作相对简单	操作精确性较低,操纵自由度较低
光辐射式	光学效应	操作精度较高	操作过程受样品特性影响,容易损伤样品
介电力式	介电泳	不易破坏样本	操作对象单一,控制精度要求较高
机械力式	机械驱动	灵敏度高、可控性强	操作系统较复杂

1.4 纳米驱动器的跟踪定位

本节以压电陶瓷纳米驱动器为例,介绍纳米驱动器的跟踪定位控制方法。压电陶瓷纳米驱动器跟踪定位控制过程中产生一系列有害的非线性特性(尤其是迟滞现象),这些非线性特性直接导致定位误差及系统的不稳定性,所以对这些非线性进行补偿或者消除的控制方法得到了人们的关注。

1.4.1 开环控制方法

开环控制方法经常应用在因机械约束的限制而无法使用位置反馈控制的领域中,如 AFM。在这样的控制方法中,压电陶瓷的逆模型被串联在控制系统中使用。压电陶瓷驱动器(PEA)的逆模型根据参考信号位移量 y_d 产生一个输入电压 U_{pea} , 这样可以根据输入电压 U_{pea} 得到一个相应的位置输出 y , 以用来跟踪参考信号位移量 y_d 。图 1.2 给出了一个典型的压电陶瓷驱动器开环控制方法。

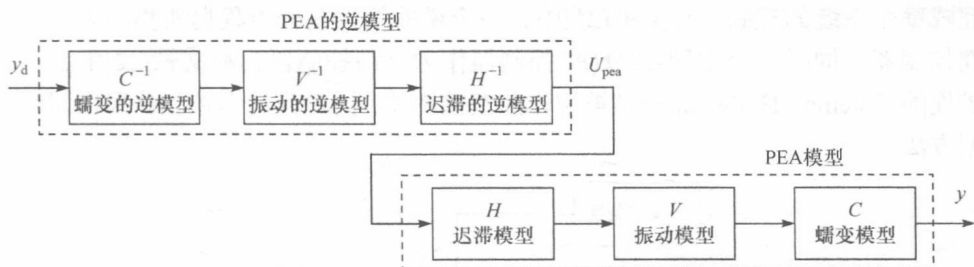


图 1.2 典型的压电陶瓷驱动器开环控制方法

1.4.2 反馈控制方法

压电陶瓷驱动器的反馈控制方法如图 1.3 所示,在未知控制中可以很大程度地抑制未知的干扰作用,如模型误差、外加负载和压电陶瓷驱动器动力学的改变。因此,反馈控制方法被广泛应用在压电陶瓷驱动器的控制中。

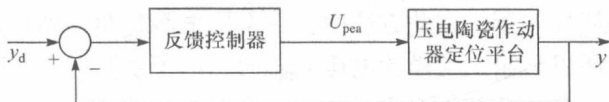


图 1.3 压电陶瓷驱动器的反馈控制方法

对于静态的或者低频的操作,经典的控制方法因其简单性及消除稳态误差的有效性而被广泛使用,如比例-积分-微分(PID)控制或多个积分器的使用跟踪目标位置^[8-10]。各种各样的 PID 调节技术被使用在压电陶瓷驱动器的位置控制应用中,如试错法(Physik Instrumente 公司 2005 年使用)、灰色关联分析^[11]、最优线性二次调节^[12]、半自动调优技术以及自动调优技术^[13]。但是,在宽频操作中,系统具有很大的不确定性因素,如模型误差、额外负载等。这时就需要先进的控制技术,因为 PID 控制在处理这些不确定因素时受到带宽的限制^[14]。在这些先进的控制技术中,滑模变结构控制方法得到了越来越多的关注。这是由于滑模控制器可以彻底地消除系统不确定项或者控制对象输入通道中的不确定项,从而使控制器具有很强的鲁棒性^[15, 16]。