

# 用有限元法对原子力显微镜力传感器 结构优化的研究\*

王晓晔 薛实福 李庆祥 徐毓娴 白立芬 于水  
(清华大学精密仪器与机械学系, 北京 100084)

**摘要** 应用有限元法对原子力显微镜(AFM)力传感器进行了力学分析,并计算了它的固有频率和力弹性常数。在此基础上,对力传感器基于减小应力和应力集中的原则提出了一种优化结构,并得出了可以作为力传感器设计的依据和原则。

**关键词** 有限元法 原子力显微镜 力传感器

## 1 引言

AFM的力传感器是由悬臂梁与探针集成而成,它是一个力的敏感器件。它的固有频率和力弹性常数是影响其性能的主要参数,因此应根据力传感器的使用要求设计其结构和尺寸。有限元法是分析力学构件以及优化设计构件的很有效的方法。

有限单元法的基本前提是:将连续的求解域离散为一组有限个单元的组合体。这样的组合体能解析地模拟或逼近求解区域。由于单元能按各种不同的联结方式组合在一起,且单元本身又可以有不同的几何形状,因此可以模型化几何形状复杂的求解域,有限单元法作为一种数值分析方法的另一重要步骤是利用在每一单元内假设的近似函数来表示全求解区域上待求的未知场函数<sup>[1-2]</sup>。

为此,本文采用了有限元分析软件ALGOR(SAP-91)对力传感器进行了分析和仿真<sup>[3]</sup>,计算了力传感器的固有频率和力弹性常数,并基于减小应力和应力集中的原则而提出了优化设计力传感器的方法。

\* 国家自然科学基金资助项目

收稿日期:1997-07-21

## 2 力传感器的有限元分析

力传感器主要有两种悬臂梁,一种是矩形,另一种是V形悬臂梁。由于矩形悬臂梁的力学模型相对比较简单,故着重对V形悬臂梁进行了有限元分析,其基本尺寸见图3,探针针形为双曲面锥形,探针底面直径 $5\mu\text{m}$ ,高 $5\mu\text{m}$ ,针尖半径 $20\text{nm}$ 。针对力传感器的几何结构特点,厚度相对长度和宽度很小,可以选择板壳元,但为了更加真实地模拟力传感器,采用了三维实体元作为基本单元。在建立分析模型时,网络划分见图1。由于在AFM中,力传感器与样品间的相互作用力为 $10^{-9} \sim 10^{-6}\text{N}$ ,所以在探针针尖处加上了 $F_z = 1\mu\text{N}$ 的作用力,悬臂梁的根部六个自由度都被约束住了<sup>[4]</sup>。

由于探针尺寸相对于悬臂梁来说较小,故探针的单元尺寸也较悬臂梁的单元尺寸小,在将其作为整个模型译码时发现单元丢失现象,为此,必须一方面调整公差,另一方面将悬臂梁和探针作为两个独立的模型分别译码,最后用嫁接技术将其粘接起来。

对嫁接后的完整模型进行了静态分析,计算出了应力和应变,如图2所示。从图中可以看出,最大应力出现在探针针尖处,为 $\sigma_{\max} = 3.145 \times 10^8 (\text{N}/\text{m}^2)$ ,探针顶部也明显地出现了应力集中(应力等值线密集),但与材料(氮化硅)的屈服强度( $1.4 \times 10^{10} \text{N}/\text{m}^2$ )比还是小得多。

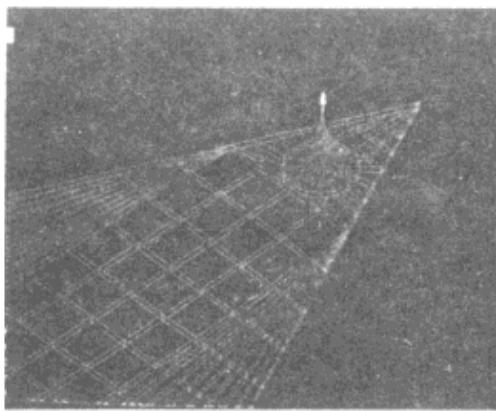


Fig. 1 Mesh of the cantilever with tip

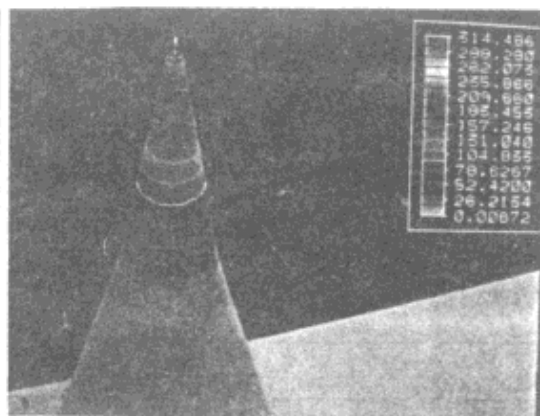


Fig. 2 Stress distribution of tip

静态分析得出了力传感器的弹性常数:  $K = \frac{F_z}{D_{Tip}} = \frac{1\mu\text{N}}{15.60\mu\text{m}} = 0.0641 (\text{N}/\text{m})$  ( $D_{Tip}$  为针尖处的位移)。对其进行模态分析便可得出固有频率  $F_r = 25.074 (\text{kHz})$ 。

## 3 力传感器的结构优化

### 3.1 V形悬臂梁结构的优化

悬臂梁的根部有应力集中,在力传感器受力过大时,悬臂梁从这些部位断裂。为提高力传感器的承载能力,应使应力均匀分布,依此为优化目标,对V形悬臂梁的结构进行了优化。我们对图3a)的结构提出了如3b),3c)两种优化结构,并对这三种结构V形悬臂梁进行了有限元



从上述的分析可以看出, 三种结构的力弹性常数与固有频率相差无几, 但最大应力与应力集中以结构 c) 最小。故推荐以结构 c) 作为 V 形悬臂梁的优选结构。

### 3.2 探针结构的优化

为了提高 AFM 的横向分辨率, 必须减小探针针尖的半径。为了能探测表面起伏较大的样品, 就需要高宽比较大的探针(即细长的探针), 但如果探针过于细长, 探针本身的刚度将下降, 那么探针本身的形变会使 AFM 图像失真, 所以寻找较为合适的探针结构是我们优化的目标。为此, 对各种高宽比和针尖半径的探针进行了有限元分析, 分别计算出了它们的刚度, 分析结果见表 2。

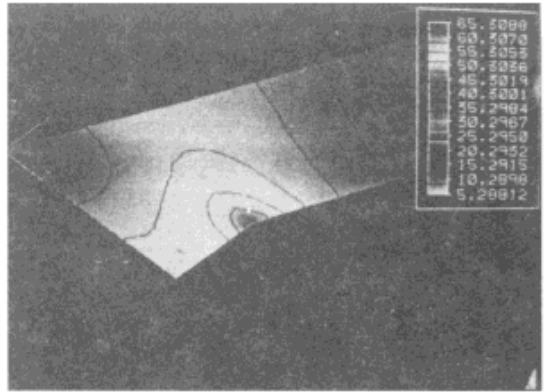


Fig. 6 Stress concentration of structure c)

Table 2 Rigidity of tips

No.	height ( $\mu\text{m}$ )	underside diameter( $\mu\text{m}$ )	ratio	radius of tip (nm)	rigidity (N/m)
1	5	5	1 1	20	1958.9
2	5	5	1 1	1	2215.8
3	10	5	2 1	20	1436.2
4	25	5	5 1	20	623.1

从表 2 的数据可以看出, 当探针高宽比增大时, 探针的刚度明显地减小, 所以, 在设计探针时, 应综合考虑高宽比与刚度的协调关系, 以达到预想的目的。具体多大的高宽比与刚度较合适, 应根据实际情况而定。一般在 AFM 接触模式中, 探针高宽比较小; 在 AFM 非接触模式中, 探针的高宽比较大。当在计量和探测深窄沟槽或表面起伏较大的样品时, 需要高宽比大的探针(如高宽比 10 1)。比较序号 1、2 的探针可以发现, 当高宽比及其它尺寸都相同时, 减小针尖半径有利于提高刚度。

在 AFM 探测过程中, 当作用力过大时, 会引起探针内部应力太大而断裂。为此计算了各种探针的内部应力, 表 3 为探针尖端加  $F_z = 1\mu\text{N}$  时的探针内部应力情况。从表 3 中可以看出, 当探针针尖变小时, 最大应力将迅速增大, 应力集中严重。图 7、8、9 分别为 1、2、3 号探针针尖处的应力集中图。

Table 3 Stress distribution of the tips

No.	height ( $\mu\text{m}$ )	underside diameter( $\mu\text{m}$ )	ratio	radius of tip(nm)	maximum stress ( $10^8\text{N}/\text{m}^2$ )	stress concentration
1	5	5	1 1	20	3.145	good(Fig. 7)
2	5	5	1 1	1	7.586	bad(Fig. 8)
3	10	5	2 1	20	3.031	better(Fig. 9)

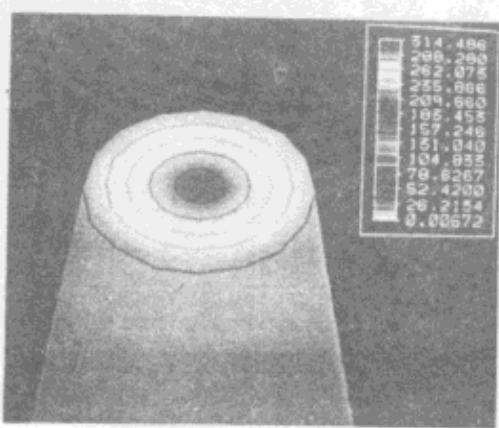


Fig. 7 Stress concentration of tip 1

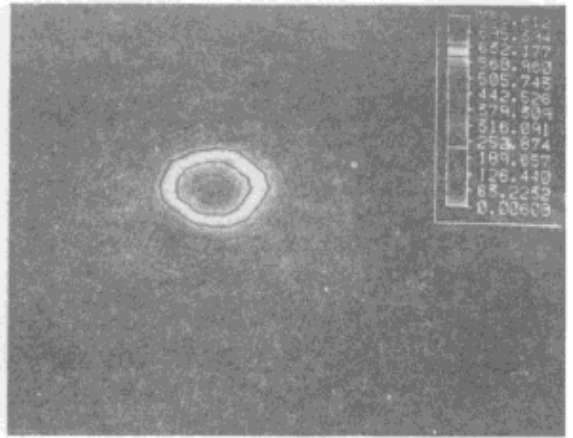


Fig. 8 Stress concentration of tip 2

从图中可以明显地看出 2 号探针针尖处的应力集中最严重(应力等值线最密), 3 号探针针尖处的应力集中有所改善(应力等值线较疏), 1 号探针针尖处的应力集中介于两者之间。在 AFM 中减小探针针尖半径, 提高分辨率一直是我们的追求的目标, 实际上在 AFM 中, 探针与样品相互作用力较小, 为  $1\mu\text{N} \sim 1\text{nN}$  之间, 所以一般情况下探针总能满足强度要求, 如氮化硅探针的屈服强度为  $1.4 \times 10^{10} (\text{N}/\text{m}^2)$ , 表 3 中的探针最大应力还是比它小得多。比较表 3 中序号 1、3 的探针可知, 提高探针高宽比时, 探针内部应力有所下降, 应力分布情况也有所好转。

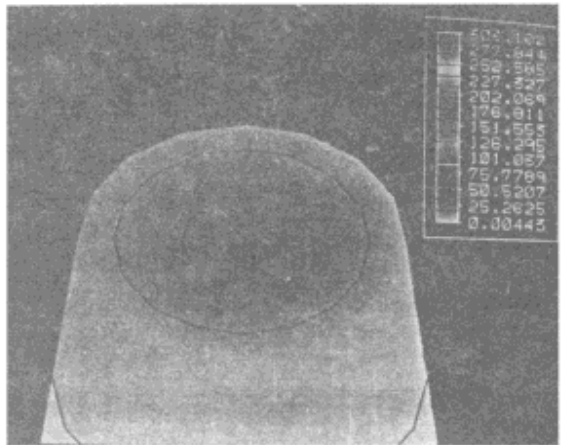


Fig. 9 Stress concentration of tip 3

## 4 结 束 语

本文应用有限元法对 AFM 力传感器进行了力学分析, 并对力传感器进行了优化。将 V 形悬臂梁的结构, 基于减小应力集中的原则提出了一种较好的结构; 对探针结构, 针对提高探针刚度、扩大探测范围以及减小应力及应力集中等问题进行了讨论。对探针的高宽比及针尖半径的选择进行了讨论, 得出了可以作为力传感器设计的依据和原则。

## 参 考 文 献

- 1 宋天霞等. 大型复杂结构优化设计计算. 武汉: 华中理工大学出版社, 1992
- 2 徐次达等. 固体力学有限元理论、方法及程序. 北京: 水利电力出版社, 1983
- 3 ALGOR(SAP91) 有限元分析软件使用手册

- 4 王晓晔. 原子力显微镜力传感器微机械加工、测试技术的研究. 北京: 清华大学硕士论文, 1997

## Investigation of Structural Optimization of the Force Sensor for the Atomic Force Microscope with the Finite Element Analysis

WANG Xiao-Ye, XUE Shi-Fu, LI Qing-Xian, XU Yu-Xian, BAI Li-Fen, YU Shui

(*Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084*)

### Abstract

In this paper, the mechanical analysis is carried out for the force sensor in AFM with the Finite Element Analysis. The resonant frequency and force constant are also calculated. In addition, the structural optimization of the force sensor is developed. Consequently, a better structure of the cantilever with V shape based on slighter stress concentration is recommended. Some helpful principles that can be used to guide the design are presented.

**Key words:** Finite Element Analysis, Atomic Force Microscope, Force sensor

王晓晔 男, 1971 年 8 月出生, 1997 年清华大学硕士研究生毕业。主要从事精密仪器及机械、半导体加工、微机械等方面的科研工作。