

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.02.04

# 音叉光纤一体式三维谐振测头优化研究

丁鹏翔, 章文, 陈丽娟, 程真英, 黄强先

(合肥工业大学, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 音叉光纤一体式三维谐振测头是一种应用于微纳米三坐标测量机的新型测头, 由石英音叉与光纤测杆测球组成。为了保持测头的振动稳定性与测量准确性, 测杆的长度被限制在 1 mm 以内, 导致其测量较大深宽比微结构的能力受限。为了在保障测头测量性能的同时, 进一步提高测头的测量能力, 对测头进行了优化改良, 并进行了性能测试实验。

**关键词:** 谐振测头; 石英音叉; 测头优化; 测杆长度

**中图分类号:** TB9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5795(2019)02-0018-04

## Research on Optimization of 3D Resonance Probe Composed of a Tuning Fork and an Optical Fiber

DING Pengxiang, ZHANG Wen, CHEN Lijuan, CHENG Zhenying, HUANG Qiangxian

(Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Tuning fork optical fiber integrated three-dimensional resonant probe is a new type of probe used in micro-nano coordinate measuring machine, which consists of stone tuning fork and optical fiber rod measuring ball. In order to maintain the vibration stability and measurement accuracy of the probe, the length of the rod is limited to less than 1 mm, which results in the limitation of its ability to measure larger aspect ratio microstructures. In order to guarantee the measurement performance of the probe and further improve the measurement capability of the probe, the probe was optimized and improved, and the performance test experiment was carried out.

**Key words:** resonance probe; quartz tuning fork; probe optimization; length of micro-stem

## 0 引言

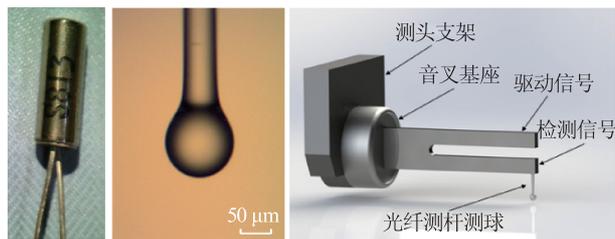
近年来, 微细加工技术快速发展, 器件趋于微型化<sup>[1]</sup>。为了解决微型器械的三维测量问题, 微纳米三坐标测量机应运而生。其中, 测头是微纳米三坐标测量机实现高精度测量的关键部件之一, 是微纳米三坐标测量机的核心之一, 同时, 也是测量领域国内外研究的热点与难点之一<sup>[2]</sup>。振动触发式测头以敲击的方式与被测物接触, 相较接触式测头的刚性接触, 测量力小、测量稳定性好、动态响应快; 与非接触测头相比, 具有较高的灵敏度与分辨力<sup>[3]</sup>。音叉光纤一体式三维谐振测头是本课题组自主研发的一种新型振动触发式测头, 此前已通过实验证明该测头具有亚纳米级触发分辨力、较高的灵敏度和良好的触发定位能力<sup>[4]</sup>, 且成本低、替换性好、制作简便。但为了使测头在工作中能够保持稳定的谐振状态并维持良好的测量性能, 其光纤测杆的长度被限制在 1 mm 以内。测杆的长度限制了测头 Z 方向的测量范围, 使得该测头很难应用于大深宽比微结构测量<sup>[5]</sup>。本文提出了增长测杆长度的

方法, 在保障测头测量性能的同时, 提升其测量大深宽比微结构的能力。

## 1 测头结构

音叉光纤一体式三维谐振测头由两部分组成: 裸露的石英音叉基座和光纤测杆测球。测头采用  $3 \times 8$  mm 的音叉型晶振, 如图 1(a) 所示, 标称谐振频率为 32.768 kHz。光纤测杆测球通过光纤熔接机烧制而成, 采用型号为 SMF-28 的单模玻璃光纤, 图 1(b) 是光纤测杆测球烧制完成后在电子晶像显微镜下的图像。测头总体结构如图 1(c) 所示, 音叉基座固定在测头支架上, 利用石英音叉自身的压电特性, 一臂作为压电驱动器, 另一臂粘接光纤测杆测球, 作为压电传感器检测输出电信号。测量时用一定幅值的正弦电压信号激励测头, 使测头保持在谐振状态, 试样通过夹具装载在微动台上向测头逼近, 接触时测头振幅迅速衰减, 以此特点实现对试样三维形貌的测量<sup>[6]</sup>。为了使测头能够起振并保持良好的性能, 最长测杆长度只能为 1 mm, 限制了该三维谐振测头在大深宽比微结构测量

中的应用能力,例如,在微孔的三维形貌测量中就无法对微孔深处进行测量。因此,要进行测头优化。



(a) 测头 (b) 电子晶像显微镜实物图像 (c) 测头总体结构图

图1 音叉光纤一体式测头

## 2 测头优化

光纤测杆测球粘接在音叉一臂时,增加了音叉这一臂的质量,打破了音叉两臂的质量平衡,对音叉的谐振振幅与谐振频率产生影响<sup>[7]</sup>。测杆越长,光纤测杆测球质量越大,音叉两臂质量越悬殊,测头的谐振振幅越低,性能越差。当增长光纤测杆长度时,可在音叉另一臂与光纤测杆测球对应位置添加配重,减少音叉两臂的质量差,从而在保持测头测量性能的基础上提高测杆的长度。

光纤测杆测球是通过 AB 胶粘接在音叉臂上的,在粘接过程中,通过针尖蘸取适量混合好的 AB 胶,涂抹在音叉臂上,每次使用的胶量都会有偏差,难以定量求出胶体的质量。已知胶体密度约为  $0.98 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,用针尖蘸取 AB 胶放在显微镜下观察,估算胶体体积,从而求出胶体质量。胶体附着在针尖端,近似为半球体,针尖近似为圆锥。用半球体的体积减去圆锥的体积,可以估算出胶体体积。采用最大值估算,计算出每次使用的 AB 胶质量不会超过  $2.8 \times 10^{-5} \text{ g}$ ,而 1 mm 长的测杆测球质量约为  $4.1 \times 10^{-5} \text{ g}$ ,将两者比较可以发现,胶体的质量小于光纤测杆测球的质量,但与光纤测杆测球的质量在一个数量级,因此,可用与粘接测头相同的点胶方式在音叉另一臂添加 AB 胶作为配重。

进行音叉臂配重实验,在音叉臂与光纤测杆测球对应的位置逐次添加 AB 胶,观察减小两臂质量差对测头谐振振幅的影响,实验实物图如图 2 所示。因为每次添加的胶量极少,所以难以定量求出每次添加 AB 胶的质量,也不能确保每次添加的 AB 胶质量一致。但是通过逐次增加配重,可以确保音叉两臂质量差趋于减小。对三个不同测头增加配重三次,以相同的信号激

励测头,记录每次增加配重后的谐振振幅,所得实验数据如表 1 所示。



图2 测头增加配重实验

表 1 逐次增加配重后测头谐振振幅测量数据 mV

测头编号	测头谐振振幅			
	无配重	第一次加配重	第二次加配重	第三次加配重
编号 1	752	840	920	1060
编号 2	288	320	420	498
编号 3	352	430	520	614

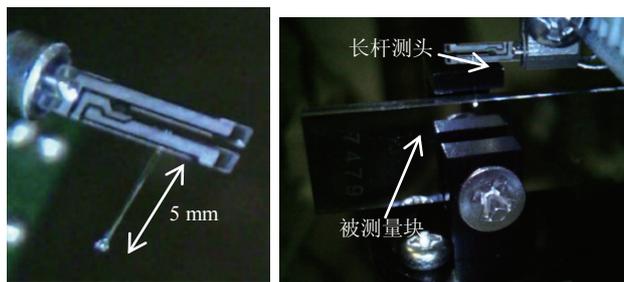
表 1 中测量数据显示,随着音叉两臂质量差越来越小,测头谐振振幅逐渐提高。因此,在测头谐振振幅未达到实验要求时,可通过加配重弥补。该方法可用于长测杆测头的制备,提高长测杆测头性能。

相同的负载添加在音叉臂不同位置时,对音叉谐振特性也有影响。负载位置距离音叉底座越近,音叉谐振频率与谐振振幅越大。光纤测杆测球粘接位置离音叉底座位置越近,测头谐振振幅会相对提高。但是随着测头有效悬臂长的减短,会对测头的测量性能产生影响,例如分辨力、灵敏度等。因此需要将测头有效悬臂长控制在合理范围内,在此基础上添加配重,提高测头测杆长度,同时保持测头良好的性能。

## 3 长杆测头性能测试

运用增加配重与控制粘接位置的方法制作了杆长约 5 mm 的长杆测头,如图 3(a)所示。对测头的性能进行测试,触发分辨力和灵敏度是评价测头性能的重要指标,而这些指标是根据测头的接近力曲线得到的。以 0 级量块工作面为被测对象,测量测头 X, Y, Z 三个方向上的接近力曲线,测量现场如图 3(b)所示。

X 方向的接近力曲线如图 4 所示,图中横坐标代表微动台的运动距离,纵坐标表示测头的振动幅值,通过计算测头振幅电压线性下降区域的斜率(斜率的绝对值为测头的灵敏度),可以得到 X 方向上测头的灵敏度约为  $1.32 \text{ V}/\mu\text{m}$ 。根据远离试样表面的数据得到系统采集信号的噪声误差为 1 mV,由此计算得到测头的



(a) 5 mm 的长杆测头实物图 (b) 测量现场图

图 3 长杆测头性能测试

触发分辨力约为 0.75 nm。同理，可以得到测头 Y 方向的灵敏度为 1.79 V/μm，触发分辨力约为 0.56 nm，测头 Z 方向的灵敏度为 1.48 V/μm，触发分辨力约为 0.68 nm。

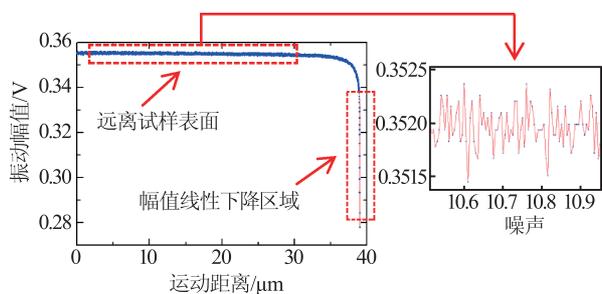


图 4 X 方向接近力曲线

选取量块上某一点，连续触碰 10 次获取接近力曲线，观察每次系统判断触发点位置的差异，对测头的触发重复性进行评估，测头 X 方向力曲线重复性测量结果如图 5 所示。通过计算得到 X 方向力曲线重复性误差约为 20 nm。用相同的方法测试测头 Y 方向和 Z 方向的力曲线重复性，得到 Y 方向的力曲线重复性误差为 30 nm，Z 方向的力曲线重复性误差为 20 nm。

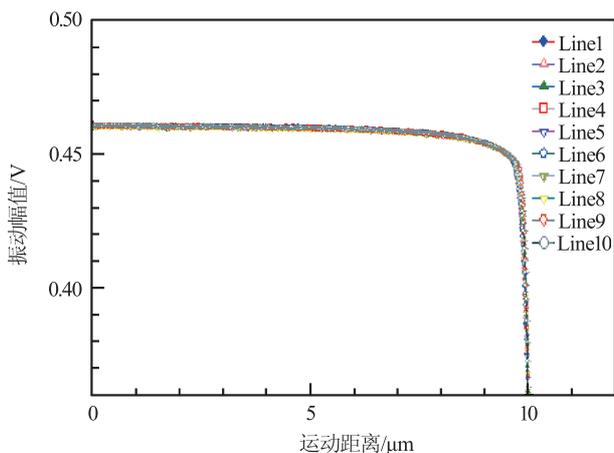


图 5 X 方向接近力曲线重复性

接近力曲线重复性实验是为了验证测头在触发过程中，触发点的一致性。而对于整个测头系统来说，其最终测量结果的一致性应该用触发测量记录的空间三维坐标的重复性来衡量。采用 0 级量块的工作面作为测量对象，对其表面某一点进行重复测量，记录下每次触发时的空间坐标值。由此评估单点触发测量坐标点的重复性。因为实际三维测量中是单轴逼近，当由一个方向逼近时，其他两个方向的坐标偏差很小，所以该实验主要评估逼近方向的坐标点重复性。试样从相同的初始位置，沿 X 方向逼近直至与测头触碰，连续触碰 10 次，记录每次触发时的三维坐标值，测量数据结果如图 6 所示。计算得到 X 向逼近的单点重复性误差为 25 nm。相同地，计算得到 Y 方向单点重复性误差为 33 nm，Z 方向单点重复性误差为 15 nm。

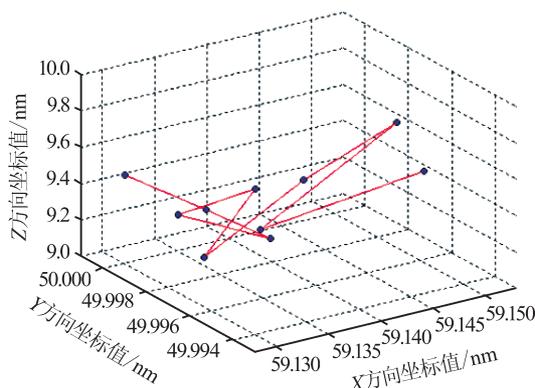


图 6 X 方向单点触发重复性测试

## 4 结论

通过增加配重与控制粘接位置的方法，显著提升了音叉测头的测杆长度，从原先的 1 mm 增长到了 5 mm，与此同时，保持了测头良好的性能，长杆测头维持了音叉谐振测头三维方向上的亚纳米级触发分辨力与纳米量级的重复性。测杆的增长扩大了测头的应用范围，使测头可以应用于大深宽比微结构形貌测量中，为相关微型计量仪器的研制和性能提升提供了借鉴。

## 参考文献

- [1] 雷源忠. 我国机械工程领域研究进展与展望[J]. 中国科学基金, 2009, 23(3): 134-138.
- [2] 刘祚时, 倪潇娟. 三坐标测量机(CMM)的现状和发展趋势[J]. 机械制造, 2004, 42(8): 32-34.
- [3] Claverley J D, Leach R K. Development of a Three-dimensional Vibrating Tactile Probe for Miniature CMMs[J]. Precision Engineering, 2013, 37(2): 491-499.

[4] Huang Q X, Chen C, Wu K, et al. A Three-Dimensional Resonant Triggering Probe for Micro-CMM[Z]. 2017.

[5] Zou L, Ni H, Zhang P, et al. Assembled Cantilever Fiber Touch Trigger Probe for Three-Dimensional Measurement of Microstructures[J]. Sensors, 2017, 17(11): 2652.

[6] 余惠娟. 基于谐振模式的三维纳米测头触发方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.

[7] 王春林, 沈工, 许文海. 关于石英音叉振子平衡问题的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1985(A5): 53 - 59.

收稿日期: 2019 - 01 - 14

基金项目: 国家自然科学基金(51475131); 国家自然科学基金(51175141)

作者简介

丁鹏翔(1993 -), 男, 硕士研究生, 2015年毕业于中国计量大学, 获工学学士学位; 现就读于合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 主要研究方向为音叉谐振测头研究以及测头在微形貌测量方面的应用。



章文(1994 -), 男, 硕士研究生, 2017年毕业于合肥工业大学, 获工学学士学位; 现就读于合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 主要从事 PVDF 谐振测头研究工作。



欢迎订阅《化学分析计量》

《化学分析计量》为双月刊, 国际刊号: ISSN 1008 - 6145, 国内统一刊号: CN 37 - 1315/06, 国防科技工业应用化学一级计量站(中国兵器工业集团第五三研究所)主办, 1992年创刊, 中国科技核心期刊, 美国 CA 收录期刊(2009年入选千种表), 中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊, 中国石油化工行业优秀期刊, 中国兵器工业优秀期刊, 华东地区优秀期刊。主要报道分析测试、化学计量专业最新技术和学术成果, 包括标准物质的研制, 分析测试方法, 分析和计量仪器设备的设计、研制、使用和维修, 相关法规、标准、管理经验探讨, 技术发展趋势分析和预测, 专业研究综合评述, 优秀企业介绍等。主要栏目: 标准物质、分析测试、计量管理、仪器设备、经验交流和综述。

地址: 济南市天桥区田家庄东路3号 邮编: 250031 电话: (0531)85878132, 85878224  
E-mail: anameter@126.com 网址: www.cam1992.net

《化学分析计量》2019年第2期目次

标准物质

二十碳四烯酸甲酯标准样品的研制

水中苯甲酸钠标准物质的研制

分析测试

大体积固相萃取 - 气相色谱法测定水中17种氯代有机物

微波消解 - 电感耦合等离子体质谱法测定新西兰蜂蜜中45种元素

超高效液相色谱 - 串联质谱法测定卷烟中果糖、葡萄糖、蔗糖、麦芽糖

电感耦合等离子体发射光谱法测定硫化物矿中的汞

基于核酸酶安培型电化学传感器的示差脉冲伏安法测定纺织品中的铅

极谱法同时测定海水中的铜、镉、铅、锌

2, 4 - 二甲苯胺印迹电极的零电流电位法制备与应用

微波消解 - 电感耦合等离子体发射光谱法测定多金属矿中10种主元素毫桑皮炮制工艺的优化

多壁碳纳米管修饰碳糊电极测定爽肤水中甲硝唑

石墨消解 - 电感耦合等离子体质谱法测定土壤及沉积物中钴、钼、铍、铅

顶空气相色谱 - 质谱法测定废水中挥发性有机化合物和卤化溶剂  
高频感应燃烧红外吸收法测定硅碳复合负极材料中的碳

气相色谱 - 质谱法测定塑胶玩具中的多环芳烃

石墨炉原子吸收光谱法测定高盐食品中的微量铅

高效液相色谱法测定化妆品中邻伞花烃 - 5 - 醇

微波萃取 - 气相色谱法测定土壤中5种有机磷农药

微波消解 - 电感耦合等离子体发射光谱法测定固体生物质燃料中8种元素

高效液相色谱法测定食用植物油中6种合成抗氧化剂

超声提取 - 气相色谱 - 质谱法测定塑料包装食品中16种邻苯二甲酸酯类增塑剂

在线超滤 - 离子色谱法测定降水中4种阴离子

固相萃取 - 超高效液相色谱 - 串联质谱法测定果蔬中26种有机磷农药残留

高频燃烧红外吸收光谱法测定铀金属中的碳、硫

计量技术

从 NIST Ca 标准溶液证书的演变规律揭示标准溶液的使用原则

仪器设备

全自动测油仪新型自动萃取装置的研制

液相色谱仪 - 电雾式检测器的校准

综述

柔性表面增强拉曼散射基底研究进展