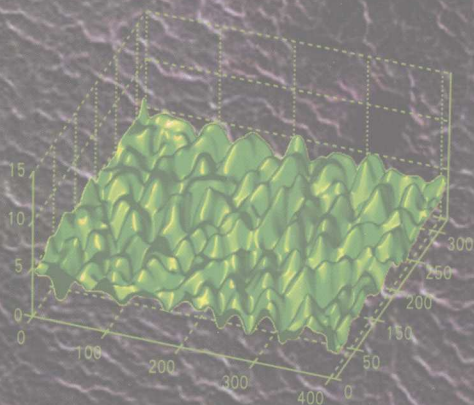


新型表面形貌测量仪器

杨练根 王选择 著



科学出版社

www.sciencep.com

新型表面形貌测量仪器

杨练根 王选择 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

全书首先系统地对表面形貌测量仪器的发展进行了综述,然后从原理、结构、信号处理、软件设计等方面论述了基于微恒力位移传感器的表面形貌测量系统、基于激光聚焦伺服式传感器的轮廓仪、基于激光干涉测量的轮廓仪等三种表面形貌测量仪器,最后论述了表面形貌测量仪器的关键部件——运动工作台。全书力求具有创新性、实用性和先进性。

本书可作为高等院校测控技术及仪器专业本科生、仪器科学与技术专业研究生及教师的参考书,亦可供工矿企业从事仪器开发、管理的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

新型表面形貌测量仪器 / 杨练根,王选择著. —北京:科学出版社,2008
ISBN 978-7-03-021042-5

I. 新… II. ①杨…②王… III. 机械量仪 IV. TG8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 015148 号

责任编辑:耿建业 于宏丽 / 责任校对:赵桂芬
责任印制:刘士平 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年2月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2008年2月第一次印刷 印张:13 3/4

印数:1—2 500 字数:262 000

定价:38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

序

俄国著名科学家门捷列夫曾说过一句名言:“没有测量就没有科学。”表面形貌测量仪器正是解决表面形貌精密测量的问题。由于产品质量要求及微电子、微结构及生命科学的发展,表面质量的功能特征愈来愈显得重要。表面的耐腐蚀性、摩擦、磨损、附着力、润滑、密封、涂镀效果以及声、光、电、磁、热等表面功能特性均与表面微观特性密切相关,因此对表面形貌测量仪器的研究、开发、学习与应用具有重要意义。

现代计算机技术、光学技术、传感器技术、信号分析与处理技术的飞速发展对表面形貌测量仪器的研究产生了巨大的影响。特别是大规模和超大规模集成电路出现之后,计算机的核心部件有了惊人的发展,为表面形貌测量仪器的自动化、智能化与集成化程度的进一步提高提供了可能。表面测量技术的发展也使计算机的应用功能得到了充分的利用,为此,传统测量仪器的智能化改造与新型表面形貌测量仪器的开发顺应了时代发展的要求。

表面形貌测量仪器的实质是传统精密测量原理与技术在表面形貌测量中的应用,因测量原理的不同而衍生的各种现代表面形貌测量仪器种类很多。该书作者根据近几年的研究成果,从工程实用的角度出发,选择了几种典型的表面形貌测量仪器,对仪器的原理、结构、实现方法、特性分析、精度指标以及所提出的改进技术等进行了全面的阐述与分析。

该书所介绍的现代工程表面形貌测量仪器,有些是精密测量的共性部分,如激光干涉仪测量原理、光栅或干涉条纹信号的处理方法、激光聚焦伺服式轮廓仪的控制方法等,既有特点,又不失一般性。有些从实用角度出发,对仪器的测量原理、误差分析、系统改进、特性分析等方面作了详细剖析,如音圈电机的结构改进与动态特性分析、聚焦误差信号的改进方法、高信噪比的条纹信号光电接收方法等。同时提出了一些仪器设计的创新思想,包括原理、算法和信号处理方法等多方面,如大量程高精度轮廓测量中的测量力控制、正交衍射光栅二维位移的测量、聚焦误差信号的改进与数字控制、大量程激光干涉仪的非线性补偿、提高条纹信号的响应速度以及差动式电感传感器信号的数字处理方法等,既新颖又实用,满足现代测量仪器多样化的需求。

在纳米测量系统中,被测物与探测系统之间一般要产生相对运动才能测出所需参数。位移系统的作用就是产生探针相对于样品的扫描运动,它是整个纳米探测系统的基础结构框架,是最基础的部分。纳米定位技术已成为前沿科学、工程技术领域的关键技术之一,该书所提供的精密定位系统在纳米测量中有很大的借鉴价值。

谢铁邦

2007年10月

前 言

表面形貌也称为表面微观几何形态,是指零件加工过程中,由刀具和零件的摩擦、切削分离时的塑性变形和金属撕裂,以及加工系统中的高频振动等原因,在零件的被加工表面上残留的各种不同形状和尺寸的微观凸峰和凹谷。自 20 世纪 20 年代第一台触针式轮廓记录仪问世后,表面测量技术就开始逐步得到发展,特别是最近一二十年,微电子技术、计算机技术、光学技术、传感器技术、信号分析与处理技术的飞速发展,基于各种原理的表面测量形貌仪器也纷纷问世,其测量范围小至亚纳米、大到毫米级,这为工业应用和科学研究提供了先进的科学分析手段。为使读者了解表面形貌测量仪器的发展,作者结合自己近年来在表面形貌测量方面的研究工作,撰写了本书。

全书共分 5 章,系统地论述了 3 种表面形貌测量仪器和一种运动工作台。第 1 章对表面形貌测量仪器的发展进行了综述,第 2 章论述了一种基于微恒力位移传感器的表面形貌测量系统,第 3 章论述了一种基于激光聚焦伺服式传感器的轮廓仪,第 4 章论述了一种基于激光干涉测量原理的轮廓仪,第 5 章论述了表面形貌测量仪器必不可少的二维工作台。全书系统地论述了表面形貌测量仪器的原理、结构、信号处理、软件设计等内容,力求使本书具有创新性、实用性和先进性。

本书主要由湖北工业大学杨练根教授、王选择副教授撰写,具体分工为:第 1 章杨练根,第 2 章杨练根、王选择,第 3 章杨练根、谢峰、王选择,第 4 章、第 5 章王选择。全书由杨练根、王选择统稿。

本书是在国家自然科学基金“正交衍射光栅计量方法与 XY 驱动定位技术的研究”(项目编号 50605018)、教育部新世纪优秀人才支持计划、国家自然科学基金“表面形貌的三维 MOTIF 评定方法及相关测量技术研究”(项目编号 50175037)、湖北省现代制造质量工程重点实验室开放基金“双测头大量程表面形貌测量系统及相关测量技术研究”(项目编号 LMQ2005A03)等项目的科研基础上撰写的,同时也参考了杨练根、王选择、谢峰在华中科技大学撰写的博士论文。

作者在从事与本书研究有关的工作中,得到了华中科技大学李柱教授、谢铁邦教授的悉心指导,本书的出版得到了湖北工业大学钟毓宁教授、赵大兴教授、湖北省现代制造质量工程重点实验室及学校的大力支持,在此一并致谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者给予指正。

作 者

2007 年 10 月

目 录

序

前言

1 概论	1
1.1 表面形貌及其意义	1
1.2 表面测量技术发展概况	1
1.2.1 接触式测量方法	2
1.2.2 光学测量方法	8
1.2.3 非光学式扫描显微镜方法	17
1.2.4 各种测量方法的比较	19
参考文献	20
2 基于微恒力位移传感器的表面形貌测量系统	23
2.1 微恒力位移传感器的整体设计	23
2.1.1 电感传感器存在的问题	23
2.1.2 微恒力位移传感器的结构	25
2.1.3 信号处理电路	27
2.1.4 量程的扩大	27
2.1.5 数字滤波	28
2.2 传感器的力控制机构	30
2.2.1 音圈电机的结构设计	30
2.2.2 音圈电机模型的建立	31
2.2.3 音圈电机的特征参数及性能分析	32
2.3 测量力的控制	33
2.3.1 传感器的静态和动态力分析	34
2.3.2 稳态误差分析	35
2.3.3 稳定性分析	36
2.3.4 PID 校正网络设计	38
2.4 微恒力传感器的动态特性及其测试、控制	42
2.4.1 系统动态特性的测试与辨识方法	42
2.4.2 传感器的数字仿真	43
2.5 基于微恒力传感器的表面形貌测量系统	44

2.5.1 形貌测量系统的整体设计	44
2.5.2 LSTM 系统硬件结构设计	46
2.5.3 LSTM 系统的软件设计	54
2.6 系统误差分析、精度验证和应用	57
2.6.1 系统误差分析	57
2.6.2 音圈电机的测试	58
2.6.3 精度验证	61
2.6.4 量程验证	64
2.6.5 应用	65
2.7 线切割音圈电机特性测试	66
2.7.1 电机的结构与受力分析	67
2.7.2 静态特性测试	69
2.8 电感传感器信号的直接数字化处理	71
2.8.1 电感传感器等效电路与理论输出信号	71
2.8.2 传感器幅位移与相位移数值曲线与分析	73
2.8.3 椭圆拟合相位与幅值方法	76
2.8.4 实验方法与结果分析	77
参考文献	79
3 激光聚焦伺服式轮廓仪	82
3.1 激光聚焦伺服式轮廓仪的基本原理	82
3.1.1 聚焦探测法的基本原理	82
3.1.2 傅科刀口法检测原理及其改进	83
3.1.3 激光聚焦伺服式位移传感器的整体设计	84
3.2 聚焦检测光路的设计与成像分析	85
3.2.1 半导体激光器及其自动功率控制电路	85
3.2.2 激光束的准直和整形	86
3.2.3 光学隔离器	87
3.2.4 聚焦物镜	87
3.2.5 分束棱镜	87
3.2.6 光路成像分析	88
3.2.7 聚焦检测信号模型分析	90
3.3 聚焦伺服信号及检测	95
3.3.1 聚焦误差信号检测	96
3.3.2 信号处理	96
3.3.3 聚焦误差 S 曲线	97

3.3.4 聚焦伺服执行机构	98
3.3.5 功率驱动电路	98
3.4 聚焦误差信号的改进	101
3.4.1 不同材料改善 S 曲线与陡坑测量范围分析	102
3.4.2 快速焦点跟踪方法与实验测量结果	103
参考文献	105
4 大量程杠杆式激光干涉测量仪	106
4.1 仪器整体结构和工作流程	106
4.1.1 仪器的整体结构	106
4.1.2 仪器工作流程	106
4.2 测量系统的原理与设计	107
4.2.1 干涉测量原理	107
4.2.2 干涉系统的设计	108
4.3 影响干涉条纹间隔宽度的因素分析	110
4.4 光源的选择与光学元件的要求	110
4.5 干涉测量仪的非线性分析	111
4.5.1 干涉测量仪测量数学模型	112
4.5.2 实验测量分析	114
4.6 干涉条纹的光电接收与处理方法	116
4.6.1 满足条纹计数的光电转换李萨如信号分析	116
4.6.2 椭圆信号的采集拟合、校正与补偿	119
4.6.3 获取条纹光电转换信号的方法	124
4.6.4 光电接收信噪比分析	136
4.6.5 线阵 CCD 干涉条纹的处理研究	138
4.7 干涉条纹光电信号转换电路	149
4.7.1 条纹光电信号硬件四细分处理	149
4.7.2 条纹的单片机计数方法	151
4.7.3 单片机与计算机的通信	151
4.7.4 光电信号的 A/D 转换	152
4.8 高信噪比下提高干涉条纹光电接收频响范围的方法	152
4.8.1 无偏压干涉条纹的光电转换分析	153
4.8.2 两路光电差分信号的计算	154
4.8.3 无偏压光电转换信号幅值与频率的关系	155
4.8.4 交直流混合放大电路的设计与分析	156
4.8.5 光电转换信号的交直流混合放大输出	157

参考文献	159
5 基于正交衍射光栅的表面形貌测量仪器二维工作台	161
5.1 工作台概述	161
5.1.1 常用位移计量方法综述	161
5.1.2 世界各国测量机及应用二维平台	162
5.1.3 二维位移工作台存在的主要问题	165
5.2 平面正交衍射光栅计量方法的研究	166
5.2.1 平面正交衍射光栅向量普适表达方程式	166
5.2.2 正交衍射光栅的测量原理	168
5.2.3 直角棱镜放置位置的设计	170
5.2.4 衍射光束方向、位置与光栅偏转、平移关系的理论建模	171
5.2.5 衍射光束干涉条纹图的仿真	174
5.2.6 测量误差的分析	178
5.3 共运动基面与共计量标准器工作台的结构设计与驱动	181
5.3.1 工作台整体结构	181
5.3.2 共运动基面与工作台导向机构的设计	182
5.3.3 粗动工作台偏摆运动误差的计算	183
5.3.4 微定位工作台结构及静力学分析	184
5.3.5 工作台定位驱动	185
5.3.6 共计量标准器工作台结构	189
5.4 驱动系统性能分析及虚拟仪器技术的应用	189
5.4.1 驱动系统硬件结构设计	189
5.4.2 工作台动态特性与稳定性分析	190
5.4.3 平面光栅与双频激光两测量系统测量结果的比对与分析	200
5.4.4 虚拟仪器技术的应用	203
参考文献	204

1 概 论

随着科学技术的不断发展,表面计量学也取得了迅猛的发展,表面测量技术、表面评定理论与方法的研究已成为科学技术的一个不可或缺分支。

1.1 表面形貌及其意义

表面形貌也称为表面微观几何形态,是指零件加工过程中,由刀具和零件的摩擦、切削分离时的塑性变形和金属撕裂,以及加工系统中的高频振动等原因,在零件的被加工表面上残留的各种不同形状和尺寸的微观凸峰和凹谷。

表面形貌不仅与加工过程中的加工方法及工艺参数密切相关^[1],而且其纹理特征在很大程度上决定了零部件的使用性能^[2]。在机械工业中,机械零件的表面形貌,不仅对机械系统的摩擦磨损、接触刚度、疲劳强度、配合性质以及传动精度等机械性能影响很大,而且还与导热、导电及抗腐蚀等物理性能有着密切的关系,从而影响到机械和仪器的工作精度、可靠性、抗振性及使用寿命等。在电子工业中,随着集成电路集成度的提高,硅片表面的粗糙度对集成电路中薄膜电阻和薄膜电容的影响越来越大,已直接影响到集成电路器件的性能及成品率。在生物医学制造业中,人工关节等人造器官的表面粗糙度会影响关节的灵活性和寿命,还会影响人体的健康。

表面形貌对一些非接触零件的光学和外部特性影响也很大。例如,光学元件的表面形貌,即使只有很小的一点微观凹凸不平,也会引起光的散射而使光学系统的性能变差,从而影响到整个系统的性能。

因此,准确地测量和评定表面形貌,不但能正确地识别出加工过程中的变化和缺陷,而且对控制和改进加工方法、研究表面几何特性与使用性能的关系,以及提高加工表面的质量和产品性能都有着重要意义^[3]。

此外,器官、组织、细胞、矿石、金属与非金属材料的微观表面形貌,也极大地吸引着生物学家、地质学家、材料专家的兴趣。

正是认识到表面形貌的上述重要性,表面测量技术才得以不断地发展。

1.2 表面测量技术发展概况

自20世纪20年代Schmaltz研制出一台用光学杠杆原理作放大装置的、功能简单的触针式轮廓记录仪^[4]后,表面测量技术就开始逐步得到发展,特别是最近

一二十年,微电子技术、计算机技术、光学技术、传感器技术、信号分析与处理技术的飞速发展,基于各种原理的表面测量仪器纷纷问世,其测量范围小至亚纳米、大到毫米级,这为工业应用和科学研究提供了先进的科学分析手段,主要表现在以下方面:①传统的触针式仪器朝着高分辨率、大量程方向发展;②非接触式的光学测量方法得到了迅速发展,光学探针仪器、相移式扫描干涉显微镜、光外差干涉测量仪等相继问世;③特别是扫描隧道显微镜、原子力显微镜及以后新型扫描探针显微镜的发明和发展,使超精表面检测突破了传统的精密检测的局限,实现了对原子级尺度表面微观形貌的检测,标志着表面形貌测量开始进入纳米测量时代。

表面形貌测量仪器种类繁多,原理各异,但根据测量原理的不同,表面测量技术主要可划分为以下三类:接触式测量方法、光学测量方法以及非光学式扫描显微镜测量方法。

1.2.1 接触式测量方法

接触式测量方法也称泰勒法或触针法,目前仍被广泛用于表面形貌的测量,是一种最基本的表面轮廓测量方法,特别是在工程表面测量中,触针式仪器占有极其重要的地位。这是因为触针式仪器具有直观可靠、操作简单、通用性强的特点,能满足一般检测的需要,触针法还是国际唯一公认的二维表面粗糙度测量的标准方法。使用触针式测量方法的仪器一般可分为电感式、电容式、压电式、干涉式及光栅式等,其中,以电感式应用最为普遍。

1.2.1.1 触针式传感器的基本原理

图1.1所示为常用的电感触针式传感器,其测量范围一般为 $\pm 100\mu\text{m}$ 或 $\pm 300\mu\text{m}$ 等,分辨率取决于电路系统的放大倍率和数据采集系统的分辨率。

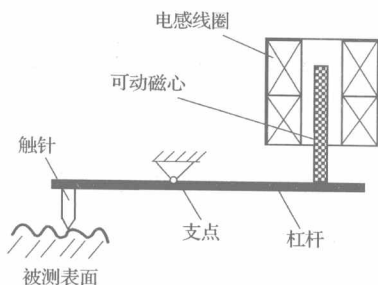


图1.1 电感式触针传感器

触针一般用金刚石制成,其针尖(tip)直径在 $1\sim 10\mu\text{m}$,在测量过程中触针沿工件表面滑动,工件表面的微观峰谷起伏使触针沿被测面的垂直方向上下移动,传感器将触针的这种垂直位移转换成电信号,经放大送入后续电路处理,即可得到工件表面微观轮廓信息。理论上触针针尖半径应等于零,才可能使触针探测到微观不平度的谷底,才有可能描绘出符合实际轮廓的真实轮廓。

但是,这是一种理想的工作情况,实际上没有一种加工方法能制造针尖半径等于零的触针,故在触针法测量中所获得的表面轮廓信息是触针圆心的移动轨迹,这个轨迹的曲率半径是实际轮廓曲线的曲率半径和针尖半径之和。如

果实际轮廓凹入处的曲率半径小于针尖半径或沟槽较窄时,则针尖圆心轨迹在这里便形成一个尖端,也就是触针的针尖半径将决定仪器测量能测量到的微不平度的最小程度。试验表明,对于一般精密加工表面,采用不大于 $10\mu\text{m}$ 半径的触针便能达到测量要求,当超过这个半径时,误差会加大^[5]。

针描实际轮廓的真实性,不仅和触针针尖的半径、几何形状以及被测面的沟槽形状有关,而且和触针的测量力、接触变形、触针的扫描速度等有关系。触针的测量力必须保证触针和被测表面始终接触。为使所用仪器能适应于测量较大的凹坑深度和较小的沟槽间隔,并保持较快的移动速度等条件,要使触针有一定的测量力。但由于触针很尖,如果测量力太大,表面接触应力会很大,会划伤表面,也会影响测量使用范围。触针越尖,针尖压力越大,也使针尖磨损加剧。

1.2.1.2 触针式轮廓仪及其发展

早在 1929 年,德国的 Schmalz 首先对表面微观不平度的参数进行了定量的测量^[6],随后出现了一些基于机械和光学方法实现信号转换的表面特征记录仪器。1936 年,美国的 Abbott 研制成功第一台车间用的测量表面粗糙度的轮廓仪。1940 年,英国 Taylor-Hobson 公司研制成功了表面粗糙度测量仪 Talysurf。此后各国竞相研制轮廓仪,轮廓仪从此进入了表面特征测量领域,并迅速取得了发展^[7~13],占领了主导地位。

轮廓仪技术的发展同电子技术、计算机技术、信号处理技术等发展相适应。以 Taylor-Hobson 公司的 Talysurf 系列产品为例,它经历了电子管电路技术(Talysurf3 型)、晶体管电路技术(Talysurf4 型)和集成电路技术(Talysurf5、P5、Z5L 型)等阶段,目前已处于以数字技术、计算机技术为基础的新阶段。FormTaly Intraz 在量程为 1mm 和 0.2mm 时的测量分辨率分别为 16nm 和 3nm,但实际上这个分辨率是 A/D 转换器的分辨率。因为传感器信号的 A/D 转换采用的是 16 位 A/D 转换器,故对应于 1mm 和 0.2mm 的量程, A/D 转换器的每一个数字变化对应着 $1/65536\text{mm}$ 和 $0.2/65536\text{mm}$ (即 16nm 和 3nm)。它不是显示装置的分辨率(resolution of a displaying device),也不是测量系统或测量仪器的分辨率(resolution of a measuring system or instrument),因为测量系统的分辨率受噪声、摩擦、阻尼以及被测量表面等方面的影响。1984 年推出了 Form-Talysurf 量仪^[14~17],采用 Michelson 干涉仪代替触针系统中的电感传感器,测量原理如图 1.2 所示。Surtronic Duo 是该公司的一种便携式粗糙度测量仪,测量范围 $200\mu\text{m}$,精度为 $0.1\mu\text{m}$ 。2001 年投放市场的 Talysurf CLI 系列是能测量粗糙度、波度、形状等参数的三维轮廓系统,带有电感测头和激光探头,实现接触和非接触测量。2003 年投放市场的 Talysurf CCI 3000 是一种分辨率在 0.01nm 的表面轮廓产品^[17]。

德国 Hommek 公司的轮廓仪主要有 T500、T1000、T4000、T6000 等。T500 是

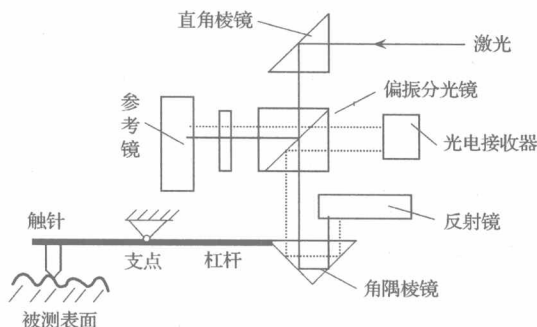


图 1.2 Michelson 干涉式触针传感器

便携式无缆线连接的粗糙度仪的代表,测量、控制、显示和传感器集成在一个很小的主机上。T1000 是集台式和便携式于一身的多功能粗糙度轮廓仪,其特点是触头可旋转 90° ,可以沿纵向和横向在平面、圆弧面、轴颈和小孔内进行测量。T4000 和 T6000 是台式高精度粗糙度测量仪,可以测量几十个粗糙度、波纹度和轮廓参数。配合各种测头可测量各种复杂表面的轮廓及粗糙度, T6000 的分辨率可达 $0.01\mu\text{m}$ 。

德国 Mahr 集团的代表产品 M 系列便携式粗糙度仪应用十分广泛,有多种选择附件,可实现复杂沟槽的测量。台式粗糙度仪 Perthometer S3P、S4P 和粗糙度、轮廓、形貌综合测量站 Concept 都是性能很好的表面粗糙度测量仪。

日本 Mitutoyo 公司的产品 Surf test 系列分为便携式 211/212/301 及台式 SU424/SU624 等粗糙度测量仪。它的各种专用传感器测头可以适用于各种型号轮廓仪,可测量圆柱、小孔、深孔、刀刃、台阶、深沟、齿面、曲面、窄槽等各种表面。如 SU624 型轮廓仪的数字滤波包括 2RC-75% 和 Gaussian-50% 滤波器,分辨率和量程分别为 5nm 和 $8\mu\text{m}$ ^[18,19]。

Ambios 公司生产的 XP-1、XP-2 型触针式轮廓仪最大测量范围为 $100\mu\text{m}$,在 $10\mu\text{m}$ 量程时其分辨率为 $0.15\mu\text{m}$,在 $100\mu\text{m}$ 测量范围时为 $1.5\mu\text{m}$,触针测量力为 $0.5\mu\text{N}\sim 0.1\text{mN}$ 。

美国 Veeco 仪器公司的 Dektak 3ST 触针式轮廓仪有 $6.5\mu\text{m}$ 、 $65\mu\text{m}$ 、 $131\mu\text{m}$ 三挡,其相应的分辨率为 0.1nm 、 1nm 、 2nm ,测量力为 $0.01\sim 0.3\text{mN}$ 。

我国主要的轮廓仪生产厂家有哈尔滨量具刀具厂、上海量具刀具厂及北京时代公司。哈尔滨量具刀具厂研制的 2302 型表面轮廓测量仪,在测量范围为 $1.6\mu\text{m}$ 时最高分辨率为 1nm 。上海量具刀具厂生产的 BD100 型轮廓测量仪,主要用于机械加工零件表面轮廓形状的测量,在量程为 $\pm 0.625\text{mm}$ 时最高分辨率为 $0.3\mu\text{m}$ 。北京时代集团公司的 TR100、TR200 等袖珍表面粗糙度仪是专用于零件表面粗糙度测量的仪器,采取袖珍式外形设计,以电箱、驱动箱、传感器及显示部分的高度集

成化为特色,主要适用于在线测量,测量范围为 $R_a: 0.05 \sim 10 \mu\text{m}$ 。

华中理工大学测试技术与仪器中心于 1994 年研制的 CRAS 曲面表面粗糙度自动测量系统,首次采用光栅衍射多普勒效应测量原理的柱面全息衍射传感器,该系统可同时测量表面粗糙度、表面波纹度和形状误差^[20,21]。

现在,各粗糙度测量仪生产厂家一方面致力于提高台式轮廓仪的分辨率,扩充其测量功能,完善人机界面和数据处理功能等;另一方面,在便携式轮廓仪的研制开发中,充分利用当今计算机技术、高集成电路技术及机电一体化技术,设计出适应在线测量要求的超小型体系结构。另外,专用传感器的研制也是一个重要的发展方向,只更换传感器附件,其他组件共享,就可以测量各种特殊表面。

1.2.1.3 可控测量力和大量程传感器的发展概况

一般地,位移传感器总是存在精度高则量程小或量程大则精度低的矛盾,因而,在工程应用中,提高传感器的测量精度与工作量程具有非常重要的意义。

虽然 20 世纪 70 年代触针式仪器就已达到 $\text{\AA}$ 级的分辨率,但它们的接触力(一般是 $10^{-3} \sim 10^{-6} \text{N}$)远高于 AFM。具有小触针针尖半径($< 1 \mu\text{m}$)的高分辨率触针轮廓仪在跟踪微轮廓表面时,会以足够的压力划过轮廓表面。虽然可以得到重要的功能信息,但使粗糙度测量难于解释。在测量光学零件中,触针半径会损害许多镜头的光学性质,模糊软聚合材料的测量结果。除了表面损害的影响外,当用传统的触针以较低的接触力测量时,会带来测量结果真实性的问题。响应频率在几十赫兹的触针针尖比 AFM 的大和重,当针尖的测量力减少到 mN 范围,触针可能会在样本表面弹跳,故要求测量速度减小。当要进行精确的测量时,测量速度只能是每秒几微米,使得测量时间过长,由此导致的热效应会影响测量结果。

无论在微米尺度还是在纳米尺度,触针技术在铅垂方向具有大的测量范围,因而在表面形貌测量中还有需求。通过使用低热膨胀系数的材料和很尖的触针针尖,触针技术能以 $0.1 \text{nm} \sim 0.1 \mu\text{m}$ 的分辨率测量高度的变化。由于针尖和被测表面间的相互作用,无论从物理上还是从几何上看,触针方法测量表面的真实性都受到影响。物理和机械的作用主要是来自划动力(tracking force)、摩擦力和动态力,而几何作用是来自触针针尖的形状和尺寸。既要限制针尖的接触应力,又要保持足够的划动力以便以可信的测量速度忠实地跟随表面,故一般是采取一个折中值,使用 $0.1 \sim 100 \text{mN}$ 的测量力。对更光滑的表面还需要采用更小的测量力、更尖的测量针尖和更慢的测量速度,以避免表面被划伤的危险。但是在轻负载时,触针的高跳跃率和动态力会因表面形貌导致的针尖偏转而引起接触力的巨大变化,因而,要使一种表面测量仪器能在纳米尺度和微米尺度使用,必须使其具有较小的常测量力。

因而,考虑到触针式量仪具有的优点,近年来国内外对触针式量仪进行了大量研究,其中可控测量力传感器和大量程传感器是其中研究较多的两种。

1) 自适应浮零位轮廓仪

法国的 Chuard 等提出了一种扩大经典轮廓仪测量范围的方法^[22],并按此原理研制出一种自适应浮零位轮廓仪。该方法采用步进电机和丝杠(最小步距为 $1\mu\text{m}$)控制触针的上下,从而可扩大仪器的测量范围。也可利用该机构控制测量力的大小,当采样值超过某一设定值就通过步进电机使测头上抬,从而减少测量力。但由于受步进电机的性能(如失步)影响及步距过大,因而测量力的控制效果受到影响,尽管轮廓仪量程得以扩大,但精度不是很高。

2) 大范围常力轮廓仪

1992 年 Howard 等提出了一种大范围常力轮廓仪^[23,24]。它采用一种典型的触针式探头,该探头的原理如图 1.3 所示,探头被安装在一个闭环常力动作的压电激励头上。在一个增大了尺寸的典型 AFM 结构的悬臂上安装着一个电容测微计以测量触针位移。两个电极构成一个平行板式电容,一个电极蚀刻在一种超低膨胀系数的玻璃陶瓷“Zerodur”的台阶上,而另一电极蚀刻在一个薄的、硅土玻璃悬臂上。当外力通过触针加到悬臂上时,两个电极间的间隙会变窄。通过压电激励器控制电容器的电容不变,悬臂能常力跟踪表面轮廓。

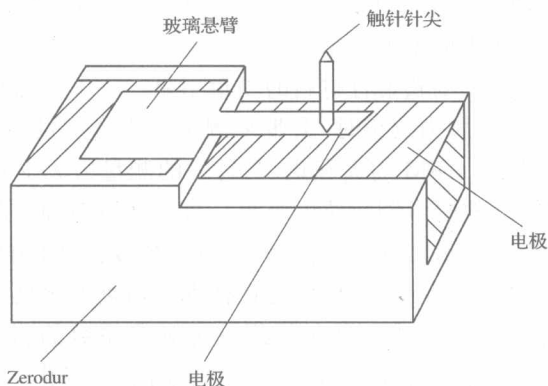


图 1.3 大范围常力轮廓仪的探头

为了提高稳定性,该系统采用了一个 Zerodur 参考电容。这个电容器的电极由两块 Zerodur 制成,并抛光其表面到平面度小于 20nm ,然后在表面上蚀刻一个台阶,铝电极被腐蚀到凹进处。为减少氧化,在铝电极的表面腐蚀一层 50nm 的薄层硅。这样制成的电容与蚀刻的台阶深度、电极区域、空气介质无关。无论是传感器还是参考电容都有很小的空气间隙,允许电容电桥补偿湿度或压力的变化。

为具有温度和结构稳定性,常力轮廓仪几乎全部由 Zerodur 制成。力的控制是通过 PI 反馈环节来进行(图 1.4),通过伺服系统消除 PZT 运动的滞后和蠕变。

3) 可控力触针位移测头

美国北加利福尼亚大学的 Chetwynd 等^[25]于 1996 年提出了一种可控力触针

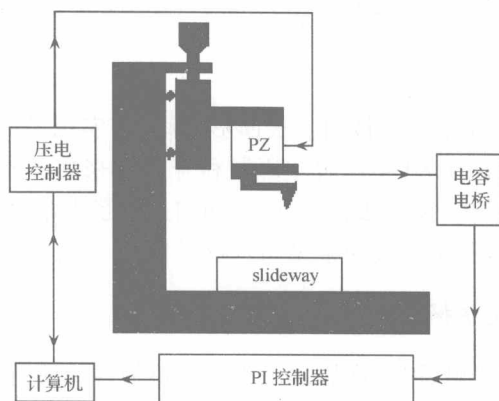


图 1.4 大范围常力轮廓仪的测量力控制

位移测头,其原理如图 1.5 所示。测头有三个部件:电磁力激振器、片簧挂钩支撑、差动电容传感器。测头大约高 30mm、截面粗 25mm。测头采用了一个低膨胀系数的测量链方案以保证热稳定性。和常力轮廓仪一样,外框架、安装支架、电极系统都由 Zerodur 制成,其他地方也采用了低膨胀系数材料。框架的主要部分装了一个被用作运动夹具以保持探头使用时被装到仪器上的片结构。两片厚 $50\mu\text{m}$ 、由铍-铜(Be-Cu)材料制造的片簧使测头的运动成一直线。

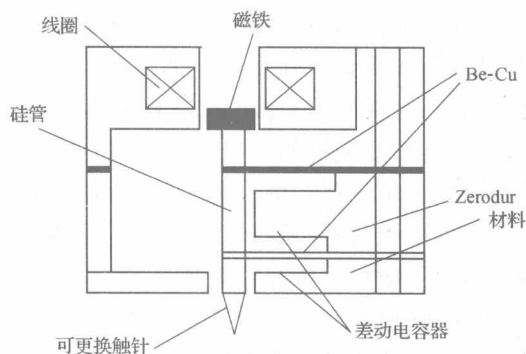


图 1.5 可控力触针位移测头的结构

测量力的调节由电磁力调节器和比例反馈电路进行。电磁力调节器由一个直径 3mm、长 2mm 的铍-硼-铁磁铁和内外径分别为 4mm、10mm、长 12mm 的线圈组成。改变线圈中的电流可使磁铁处于不同的位置。在表面测量过程中,由于测头相连的片簧产生变形所带来的力变化由比例反馈电路控制。这个比例信号的大小与差动电容传感器的输出有关,比例信号作为电流驱动电路的输入,从而调节线圈中的电流,补偿力的变化。力调节器中的电流方向应使得电磁力方向向上以补偿触针的自重。