

文章编号 1004 924X(2004)03 0275-07

# 采用三向光纤照明成像的三维微结构观测系统

张 麟, 陈 涛, 刘世炳, 左铁钊

(北京工业大学 激光工程研究院 激光微技术实验室, 北京 100022)

**摘要:** 为弥补普通光学显微镜照明系统的不足, 针对一般三维微结构的显微成像, 提出并设计了一个可实现实时调节的三向光纤照明成像观测系统。系统采用计算机、D/A 卡、驱动电路等硬件以及自主研发的控制软件, 实现对任一光源的光强进行稳定连续的实时调节。通过自主设计的机械结构将光源、光纤、耦合头以及显微镜连接为一整体, 实现光束入射方向、入射角和入射距离的任意调节。与通常的底部透射光照明系统进行实验比较, 成像质量显著提高, 不仅可以清晰观察目标对像的表面结构, 还能得到立体感强的三维图像。针对面阵 CCD 显微测量系统的标定和标定误差问题, 提出了螺旋微缝标定法。将螺旋测微计两铁钻形成的微缝作为标定的样本, 配以适当的观测手段和计算方法, 有效地消除或减小了各种误差, 提高了系统的标定精度。通过系统标定和测量比较, 系统的标定精度达到  $\pm 0.0015 \mu\text{m}$ , 测量精度达到  $\pm 1 \mu\text{m}$ 。实验结果表明, 螺旋微缝标定法可以基本满足 CCD 测量系统标定的要求。

**关键词:** 微机械系统; 照明; 电荷耦合器件; 显微测量; 标定误差

中图分类号: TH703 文献标识码: A

## Observation and measurement system for microstructure based on three direction fiber illumination

ZHANG Lin, CHEN Tao, LIU Shi bing, ZUO Tie chuan

(Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract:** This paper introduces a new three direction illumination system with light intensity, angle of incidence and distance of incidence precisely real time regulated is proposed for observation of 3D microstructure of MEMS. Three-dimensional images and the surface of the microstructure can be achieved by using this system. In the process of designing the surface matrix CCD micro measurement system, calibration errors have a direct effect on the measurement accuracy of the system. A new method, which is simpler, faster, more convenient and more applicable than the traditional method, is proposed to calibrate and reduce calibration errors. The calibration accuracy of the system is up to  $\pm 0.0015 \mu\text{m}$  and its measurement accuracy is up to  $\pm 1 \mu\text{m}$ . This system is suitable for calibration at the level of micron.

**Key words:** MEMS; illumination; charge coupled device; micro measurement; calibration error

收稿日期: 2003 12 24; 修订日期: 2004 02 14.

基金项目: 本项目得到国家自然科学基金(50175002), “863”计划(2002AA404160), 北京市自然科学基金(3031001)和北京市科技新兴计划的资助。

## 1 引言

随着微米/纳米技术的发展,微观测试技术得到迅速发展。目前,对亚微米级的微机械量和几何量的检测和计量手段有扫描电子显微镜(SEM)、扫描探针显微镜(SPM)、干涉显微镜、高精度轮廓仪、光电坐标测量机(CMM-Opt)等。其中,SEM和SPM的测量范围在几nm~200 $\mu\text{m}$ ;白光干涉显微镜测量范围在0.05 $\mu\text{m}$ ~0.6mm;轮廓仪测量范围在0.1 $\mu\text{m}$ ~5mm;采用光探针(Optical Probe)CMM测量范围在1 $\mu\text{m}$ ~1000mm;具有机械式测头(Mechanical Probe)的CMM对微机械量和几何量检测和计量相对较困难;扫描隧道显微镜(STM)和原子力显微镜(AFM)就其测量精度和范围属于纳米测量手段<sup>[1-4]</sup>。微几何量主要分布在几 $\mu\text{m}$ 到几mm之间,面阵CCD结合光学显微技术和计算机图像处理技术可较容易地对微几何量进行精密测量,并由于其成本低、操作方便灵活、测量精度较高等优点得到广泛应用。

要对三维微结构几何量进行高精度测量,必须先对系统进行准确标定。系统的标定误差直接影响系统的测量精度。传统的标定方法由于其标定用的样本要求尺寸小、形状规则、成像质量好、测量精度高等问题而不易实现,因此在大量的实验比较基础上提出了一种螺旋微缝标定法,并配以适当的观测手段和计算方法,有效提高了系统的标定精度,能基本满足对微机械几何量的测量精度要求。

CCD显微测量技术离不开显微摄影。在拍摄时由于采用的光线不同,所产生的图像效果便有很大差异。光学显微镜是显微摄影的重要组成部分,它把被观测对像按照一定倍数放大并通过CCD摄像机成像在显示器上。一般的光学显微镜均采用底部照明的方法对被观测对像进行成像,所以拍摄的图像只能观察到对像的表面轮廓。在某些观测过程中,观察的样本是基于有机聚合物材料加工的三维微机械器件或三维微结构,其尺寸在几 $\mu\text{m}$ 到几mm。有时需要观察对像的局部三维形貌以满足定域观测的需要,但是单纯采用底部透射光照明远远达不到要求。另外,一般显微镜的照明光源通过手动调节可变电阻来改变光源光强,光强的稳定性、变化的连续性和范围都比

较差,尤其在显微摄影中,更显不足。因此,要想直接获得较理想的具有较高灰度对比度的清晰三维图像必须对摄影显微镜的照明系统进行合理的设计。本文提出了一种三向光纤照射、光强精确可调的照明系统。经过实验比较,拍摄效果明显改善,基本满足对MEMS三维微结构成像的要求。这套照明系统还可用于各种透明样本和不透明样本的显微成像。

## 2 系统设计

本系统主要由光纤照明和面阵CCD显微测量两个子系统组成,其结构如图1所示。

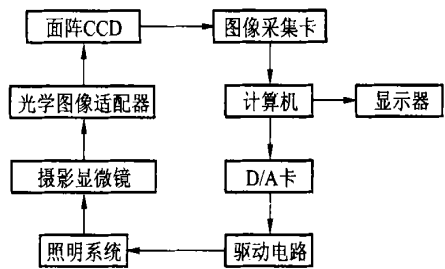


图1 系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of the system structure

硬件主要包括光源、光纤、耦合系统、光输出元件、摄影显微镜、光学图像适配器、面阵CCD摄像机、图像采集卡、D/A卡、驱动电路和计算机等。软件包括图像采集、图像数据处理和照明系统控制等软件。

### 2.1 三向可控光纤照明子系统

照明子系统由三向光纤照明和光强控制两大部分组成。根据光照度定义  $E = I \cos i / r^2$ , 当入射角  $i$  和入射距离  $r$  保持确定值时,精确调节光源光强  $I$  可以得到显微摄影需要的理想光照度。为了使被观察对像的某一局部的或整体的三维结构形貌清晰成像,或使不同区域的形貌具有较强的灰度对比效果,需要根据观察要求通过机械装置固定入射光的入射角度、入射方向和入射距离。固定位置后再通过计算机精确调节入射光的光强便可以使不同区域具有不同的光照度,从而形成具有较好的三维立体效果的图像。考虑到光纤具有光衰小,柔软易折不易碎,安装调试方便灵活等特点,系统采用光纤照明系统,以满足照明光源的控制调节要求。由于目标定域观测时的背景对比

度及视景深度等要求很高, 并考虑显微镜的空间结构限制, 系统采用三向照明方式以实现对本任意角度的观察成像, 其照明原理如图 2 所示。每一向照明通过光纤耦合构成, 其中包括光源、耦合器件、光纤和光输出元件 4 部分。由于显微摄影观察的样本尺寸小, 对光照度的要求不高, 因此光源选用普通的聚光灯泡即可。为了提高照射到光纤端面上的光斑均匀性和耦合率, 采用如图 3 所示的光学组件, 孔径入射角小于  $35^\circ$ , 使入射到光纤束端面的光线发生完全内反射, 使光损失最小。光纤选用玻璃点发光光纤, 直径为 3 mm。光输出元件的作用是控制和引导光线, 使之准确照射到目标上。根据样本的尺寸, 系统选用不同焦距的透镜可实现聚光照明、定向照明和发散光照明, 以满足不同的照明要求。

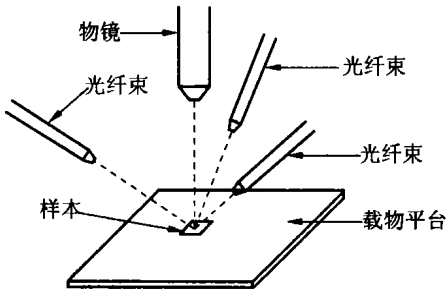


图 2 三向光纤照明子系统示意图

Fig. 2 Schematic of the three direction fibre illumination subsystem

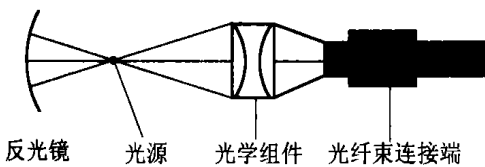


图 3 光学耦合结构示意图

Fig. 3 Schematic of the optical coupling system

光强控制单元包括驱动电路、D/A 卡和光强控制软件。驱动电路的主要作用是将 D/A 卡的输出电流放大, 提供光源发光的电压和电流。根据应用的控制精度要求, 本系统选用北京中泰研创科技有限公司的 PCF 8322 型 4 通道 12 bit D/A 卡。可输出 0~10 V,  $\pm 5$  V,  $\pm 2.5$  V 直流电压和 0~10 mA, 4~20 mA 直流电流。选用 0~10 V 直流电压输出。光强的控制软件采用 Visual C++ 编制, 基于 Windows 操作系统使该软件的控制界面较小, 可以和图像显示界面放在同一屏幕以达

到实时观察调节照明的效果。该软件既可对任一光源进行单独控制, 也可对任意两个或 3 个光源在原来调节的基础上进行同时控制并保持各光源光强的比例不变。

在观察过程中, 计算机通过 D/A 卡将数字控制信号转换成 0~3 V 的电压模拟信号, 其调节精度设置为 0.01 V。从 D/A 卡输出的模拟信号通过驱动电路实现电流放大, 最终精确控制光源的发光强度  $I$ 。通过机械调节合适的光束入射角  $i$  和入射距离  $r$ , 即可得到最佳的照明效果。

## 2.2 CCD 显微测量子系统及设计

CCD 显微测量的原理是先对已知尺寸  $W_p$  的物体成像, 经过适当的图像处理, 测得物体的像占屏幕的像素数  $N_p$ , 然后求得单位像素对应的物体实际空间的尺寸  $K = W_p/N_p$ 。在测量实际物体尺寸时, 只需测得图像所占的像素数  $N_p$ , 便可以确定物体的实际空间尺寸。以同样的方法还可以确定单位像素对应的实际空间面积, 用于测量任意形状图形的表面积。

子系统包括摄影显微镜、光学图像适配器、面阵 CCD 摄像机、图像采集卡、计算机、图像采集软件和图像数据处理软件等。显微镜选用重庆光电仪器有限公司 XSZ-7G 摄影生物显微镜。根据观察对象的尺寸范围, 系统选用 4 倍和 10 倍消色差物镜以及 40 倍平像场物镜, 其数值孔径 NA 分别为 0.1, 0.25 和 0.65, 能有效地消除球差、彗差、轴向色差、垂轴色差和场曲等各种像差。光学图像适配器是一个投影透镜, 其作用是将显微物镜成的像以适当的缩放倍率投射在感光面上, 形成一定尺寸的清晰实像。系统选用 1.2 倍透镜。面阵 CCD 是理想的光电图像采集、传输器件。根据显微图像分辨率的要求和图像宽度、彩色 CRT 以及光学系统本身分辨率等的要求, 系统选用日本 KOCA 公司的 KA-500 彩色面阵 CCD 摄像机。其感光面积为  $3.6 \text{ mm} \times 2.7 \text{ mm}$ , 面元数为 500(水平)  $\times$  582(垂直), 水平分辨率为 420 电视线, 最低照度为 1.0 lx。图像采集卡是将来自 CCD 摄像器件的已经转换成模拟视频信号的显微图像信号转换为数字信号, 输入计算机的硬件设备。根据摄像机的分辨率和实际应用的需要, 系统选用 32 位图像采集卡, 其特点是既可进行动态影像采集又可用于静态真彩图像采集。系统选用的图像采集软件为 AverCap, 它可实时显示并保存所观察的图

像, 图像大小为 768 像素 × 576 像素<sup>[5]</sup>。

图像处理的目的是通过适当的软件处理使原始数字图像得到适当变化, 以适应人的视觉信息感知, 便于或提高图像有用信息的提取<sup>[6]</sup>。本系统选用 Image-Pro Plus 图像处理软件<sup>[5]</sup>, 它具有过滤噪声、边缘识别、反显、灰度变换、锐化处理、二值化和伪彩色处理等多种图像处理功能。根据具体要求可以灵活地采用一种或多种图像处理技术, 以提高图像质量。同时它还具有测量的功能, 可以对放大的显微图像, 以像素为单位测量任意两点间的距离, 任意三点确定的圆的半径, 面积和圆心坐标, 任意图形的面积, 边沿长度和中心点坐标以及任意三点所成的角度(以度为单位)。

要对三维微结构几何量进行高精度测量, 对系统进行准确标定是极为重要的。系统标定主要存在两个问题: (1) 为减小读取像素数时的读数误差, 样本成像的边缘要整齐、清晰; (2) 为减小随机误差需要选取不同尺寸的样本对系统进行多次标定, 并且样本的空间尺寸一般在几十 μm 到几百 μm。另外, 不仅满足以上要求的样本不易找到, 还要对样本本身的尺寸进行精确标定。样本的尺寸精度直接决定或影响系统的测量精度。一般机械器件的测量精度要求在几 μm, 也就是说要选取测量精度为微米级甚至更高精度的测量仪器对样本进行测量, 同时要尽量选取无接触测量的方法以防止样本的形变带来的误差。这在一般的实验条件下很难实现。虽有专门的测量机构, 但费时、费力、费资。综合以上因素, 以螺旋测微计的两铁钻形成的微缝作为标定的样本。螺旋测微计的两铁钻形成的微缝的像, 边缘整齐、清晰, 且宽度在要求的范围内任意可调, 读数可精确到 0.01 mm。由于螺旋测微计零点误差(小于 0.005 mm)的存在, 在读数时必须进行零点误差校正, 但这样做肯定又会引入新的读数误差。因此在相同的观测条件下, 将两次整数读数的差作为微缝的宽度尺寸, 将两个微缝像的像素数的差作为微缝像对应的像素数, 便可以有效地消除或减弱螺旋测微计的零点误差和人为的读数误差。

假设微缝的宽度读数(单位: mm)为  $W^* = W \pm \Delta W$ , 微缝像的宽度读数(单位: 像素)为  $N^* = N \pm \Delta N$ 。其中  $W$  为微缝的真值宽度,  $\Delta W$  为仪器误差和读数误差。  $N$  为微缝像的宽度的真值读

数,  $\Delta N$  为读数误差和系统误差。则

$$K = \frac{W^*}{N^*} = \frac{W \pm \Delta W}{N \pm \Delta N} = \frac{W}{N \pm \Delta N} \pm \frac{\Delta W}{N \pm \Delta N}, \quad (1)$$

因为螺旋测微计的读数可以精确到 0.01 mm, 所以  $\Delta W \leq 0.005$  mm。由上式可以看出当  $N^*$  的读数很大时(取 600~750 个像素), 可以显著减弱  $\Delta W$  对  $K$  值的影响。由于微缝像的边缘整齐而清晰, 经过多次测量,  $N^*$  的误差限为 3 个像素, 即  $\Delta N = 3$ 。当  $W$ (取 0.6~0.7 mm) 相对  $N^*$ (对应 600~750 个像素)的取值较小时, 也可以显著减弱  $\Delta N$  对  $K$  值的影响。由以上分析可知, 采用上述螺旋测微计标定法并配以适当的观测手段和计算方法, 可以对 CCD 显微测量系统进行精确的标定。经过测量实验比较, 其测量精度可以达到  $\pm 1 \mu\text{m}$ 。能基本满足机械器件观测的精度要求。

### 3 实验结果

#### 3.1 不同照明方式的效果比较

实验分别采用底部透射光和三向光纤照明系统对用有机聚合物材料加工的三维微齿轮和铅粉末进行成像比较。其效果分别如图 4, 图 5 所示。

实验结果表明, 用透射光照明, 图像只能体现微齿轮的上表面边缘结构和铅粉末的平面轮廓, 且不能清晰地与背景区分。用三向光纤照明系统照明, 得到的图像局部和整体形貌均比较清晰, 且立体感强, 具有较强的灰度对比度, 能明显地区分于背景。

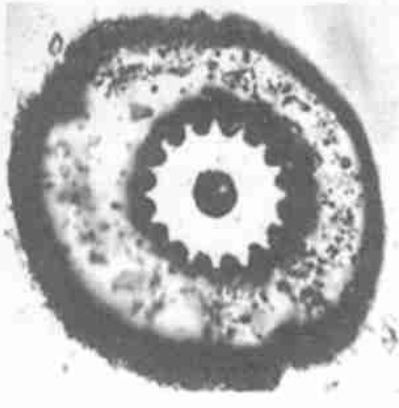
#### 3.2 系统标定结果及测量结果

在室温 20~25 °C, 与防潮、防尘、防震的测试条件和相同的观测条件下, 对不同读数的微缝的像进行了测量, 数据结果见表 1。同时, 对读数差在 600 个像素以上的数据进行了标定计算(仅列出 4 倍物镜标定的数据), 数据结果见表 2。

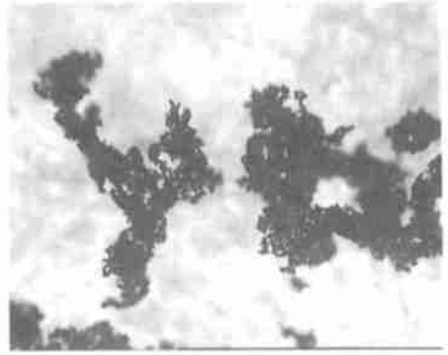
根据误差理论, 误差  $\sigma$  定义为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n}}, \quad (2)$$

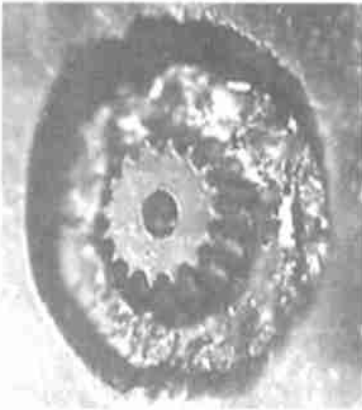
极限误差  $\Delta_{\text{lim}} = 3\sigma$ 。从以上数据可看出, 采用 4 倍物镜时系统标定的极限误差  $\Delta_{\text{lim}} \approx 0.004 \mu\text{m}$ ; 用同样的方法测得的 10 倍物镜所对应的极限误差  $\Delta_{\text{lim}} \approx 0.002 \mu\text{m}$ ; 40 倍物镜对应的极限误差



(a) 底部透射光照明效果  
(a) Effect of bottom illumination



(a) 底部透射光照明效果  
(a) Effect of bottom illumination



(b) 三向照明效果  
(b) Effect of three direction illumination



(b) 三向照明效果  
(b) Effect of three direction illumination

图 4 微齿轮的照明效果图

Fig. 4 Illumination effect of micro gear

图 5 铅粉的照明效果图

Fig. 5 Illumination effect of cenuse

表 1 不同读数微缝的像的测量结果

Tab. 1 Measurement results of different micro slot pictures

测微计读数 单位: mm	微缝像像素跨度 单位: 像素	测微计读数 单位: mm	微缝像像素跨度 单位: 像素
0.02	13	0.10	102
0.03	25	0.11	111
0.04	36	0.67	711
0.05	48	0.68	721
0.06	57	0.69	732
0.07	67	0.70	743
0.08	78	0.71	754
0.09	89		

表 2 标定计算结果

Tab. 2 Calculation results of calibration

参与计算的测微计读数 单位: mm	0.71	0.70	0.69	0.68	0.67	0.71	0.70	0.69
对应微缝尺寸 单位: mm	0.11	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04
对应微缝像素跨度 单位: 像素	643	641	643	642	643	697	695	696
单位像素对应尺寸 单位: $\mu\text{m}$	0.9331	0.9360	0.9331	0.9345	0.9331	0.9326	0.9353	0.9339
参与计算的测微计读数 单位: mm	0.68	0.67	0.71	0.70	0.69	0.71	0.70	0.71
对应微缝尺寸 单位: mm	0.03	0.02	0.04	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02
对应微缝像素跨度 单位: 像素	695	697	718	718	719	729	730	741
单位像素对应尺寸 单位: $\mu\text{m}$	0.9353	0.9326	0.9331	0.9331	0.9318	0.9328	0.9315	0.9312
单位像素对应平均尺寸 单位: $\mu\text{m}$	0.93331							
中误差 $\sigma$ 单位: $\mu\text{m}$	0.00133							
极限误差 $\Delta_{\text{lim}}$ 单位: $\mu\text{m}$	0.0039							

$\Delta_{\text{lim}} \approx 0.0015 \mu\text{m}$ 。用 4 倍、10 倍和 40 倍物镜标定的结果分别为  $K_1 = (0.933 \pm 0.004) \mu\text{m}$ ,  $K_2 = (0.384 \pm 0.002 \mu\text{m})$  和  $K_3 = (0.096 \pm 0.015 \mu\text{m})$ 。

系统经过标定后,在实际测量中产生的误差则主要来源于系统误差和标定产生的随机误差 ( $\Delta_{\text{lim}} * N^*$ )。作为例子,对经过中国计量科学研究院测量标定的微杆进行测量比较,结果见表 3。

表 3 测量结果的比较

Tab. 3 Comparison of measured results

样本标准直径 单位: mm	测量值 单位: mm
0.042 0	0.041 4
0.085 00	0.085 6
0.120 0	0.120 5
0.239 8	0.240 6

#### 参考文献:

- [1] WILKENING Dr G. Measuring methods for the determination of geometrical quantities of micro part[C]. *Proceedings of Symposium on Nano metrology in Precision Engineering*, 1998, 11(24): 68-75.
- [2] 王向军,王峰. 显微精密成像与微型机械尺寸检测技术[J]. *光学 精密工程*, 2001, 9(6): 511-513.  
WANG X J, WANG F. Study of micro mechanical size inspection technology by microscope precision digital image[J]. *Optics and*

从表中数据可以看出,用螺旋微缝标定法标定的 CCD 显微测量系统的测量精度小于或等于  $1 \mu\text{m}$ 。实验表明,螺旋微缝标定法能有效减小随机误差。系统参数一经确定,系统误差则基本确定,并可获得与标准标定方法相近的测量精度。

#### 4 结 论

三向光纤照明系统为透明和不透明样本的显微成像提供了一种新的照明方法和思路,不仅可以清晰观察目标对像的表面结构,还能得到立体感强的三维图像。与传统的标定方法相比较,螺旋微缝标定法是一种简便、快捷、实用、标定精度较高的标定方法,尤其适用于微米级测量系统的标定。

- Precision Engineering*, 2001, 9(6): 511-513. (in Chinese)
- [3] 李智,王向军. 微机电系统测试技术及方法[J]. 光学精密工程, 2003, 11(1): 37-44.  
LI ZH, WANG X J. MEMS measurement technologies and methods[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(1): 37-44. (in Chinese)
- [4] 吴一辉,贾宏光,王立鼎. 微观测试技术及其发展应用[J]. 光学精密工程, 1998, 6(2): 15-17.  
WU Y H, JIA H G, WANG L D. Micromasurement development and application[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, 6(2): 15-17. (in Chinese)
- [5] 王庆有. CCD 应用技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2000.  
WANG Q Y. *The CCD applied technology*[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2000.
- [6] 孙学珠,王庆有. 高精度 CCD 尺寸自动检测系统的光学系统设计[J]. 光学技术, 1995, 9(5): 29-34.  
SUN X ZH, WANG Q Y. The design of optical system for high precision CCD automatic size control[J]. *Optical Technology*, 1995, 9(5): 29-34. (in Chinese)

作者简介:张麟(1979-),男,河南商丘市人,北京工业大学激光工程研究院在读硕士研究生,主要研究方向为控制和微检测技术。E-mail: sunxiaozhlin@tom.com