

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2015.04.09

用于二维线纹测量的二维动态光电显微镜

李华丰, 王霁, 朱振宇, 兰一兵, 李强

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 对二维线纹标准样板进行溯源测量时, 需要对十字刻线进行高分辨力瞄准。利用二维动态光电显微镜, 将二维样板十字刻线分别成像在相互垂直的两组狭缝上, 狭缝宽度与刻线像的宽度基本一致, 方向与刻线像平行, 且在像空间上沿宽度方向错开约一个狭缝宽度的距离。当二维线纹样板沿某一方向运动时, 对应方向被测刻线的像先后呈现在一组狭缝中, 导致通过该组狭缝的光通量依次发生变化, 对应的两个光电接收器的电信号存在相位差; 信号处理系统根据两路电信号的相位关系, 在信号交叉位置发出瞄准脉冲, 锁定坐标测量系统, 即得到该方向被测刻线的位置; 分别对十字交叉刻线的两条刻线进行瞄准, 即可得到对应交叉点的坐标。

关键词: 二维线纹; 动态瞄准; 二维动态光电显微镜

中图分类号: TB92; TH741.7

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2015)04-0033-04

2-D Dynamic Photoelectric Microscope

LI Huafeng, WANG Ji, ZHU Zhenyu, LAN Yibing, LI Qiang

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Traceable measurement of 2-D Line Scale templates needs high resolution aim at the crosswire. In the 2-D dynamic photoelectric microscope, the image of crosswire is illuminated on two sets of slits which are mutually perpendicular. There are two slits in each set, which have the same width with the image of crosswire. And the distance between the two slits in width direction is also the same size. When the template moves in one of the directions, the image of crosswire will appear in the two slits successively. The luminous flux of the slits will change one after another, which means there is a phase difference between the photoelectric receivers of corresponding slits. And the signal processing system judges the aiming moment using those two signal. In this way, 2-D Dynamic Photoelectric Microscope can realize high resolution 2-D collimation.

Key words: 2-D Line Scale; dynamic aim; dynamic photoelectric microscope

0 引言

二维线纹样板利用一组交叉十字刻线定义平面内的点坐标, 常用于影像测量仪、光学成像系统等视觉测量系统的校准与畸变检测^[1-2]。

二维线纹样板的量值传递过程中, 需要进行高精度可溯源测量。对二维线纹进行溯源测量的关键是对其刻线进行高精度瞄准, 刻线瞄准方法决定了测量结果的准确性和溯源性。

工业领域常采用成像法进行二维线纹的精密测量与校准, 将被测样板经光学成像系统放大后投影在 CCD 靶面上, 采集图像, 处理图像信息拟合出刻线及

位置坐标^[3]。该方法的测量精度受到成像系统精度的限制, 一般仅能达到微米级^[4]。而且其与二维线纹所要校准的仪器设备采用相同的工作原理, 无法实现测量结果的直接溯源。

更精确的二维线纹测量采用干涉仪与成像系统相结合的局部成像瞄准法, 成像系统只对刻线附近的小区域进行光学放大并处理图像, 实现小范围的测量与瞄准, 大范围测量则由干涉测量系统完成, 测量结果由这两部分组合而成^[5]。这种方法可采用高倍率光学成像系统, 瞄准分辨力较高, 测量结果中的干涉测量部分可直接溯源到国际米定义。

本文介绍一种利用光电显微镜对刻线进行二维对线瞄准的装置。将刻线的像分别呈现在相互垂直的两组狭缝上, 利用刻线像与狭缝的相对位置关系判断瞄准位置。本方法中二维光电显微镜只作为瞄准装置, 不参与位置测量, 坐标数据完全由干涉测量系统获得,

收稿日期: 2015-04-21; 修回日期: 2015-05-28

基金项目: 国家“十二五”技术基础科研项目(J052011A002)

作者简介: 李华丰(1972-), 男, 河北武邑人, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为纳米计量技术。

因此其测量结果能够实现完全溯源。

1 二维动态光电显微镜结构

二维动态光电显微镜是在一维动态光电显微镜基础上发展而来。

二维动态光电显微镜将二维线纹样板上十字刻线的像呈现在两组狭缝上；每组狭缝与十字刻线中一条线的像平行，狭缝宽度与刻线像的宽度基本一致，且该组中的两条狭缝在刻线像空间上错开一个狭缝宽度的距离。当二维线纹样板沿该方向运动时，刻线的像在两条狭缝中先后出现，导致狭缝的光通量依次变化，对应的光电接收器输出信号存在一定相位差，通过比较两路光电信号的强度，即可得到对应刻线的瞄准位置。

二维动态光电显微镜由照明系统、成像系统、分光系统、狭缝对齐系统、信号采集处理系统、监视系统组成。照明系统为被测样品提供照明；成像系统将刻线进行光学放大，形成刻线放大的实像；分光系统将刻线的像进行分配，分别呈现在四个狭缝上；狭缝对齐系统包括两组相互垂直的狭缝，分别实现对十字刻线对齐；信号采集处理系统采集狭缝的光通量，转化为电信号，判断光强大小并发出瞄准脉冲；监视系统实现刻线图像与狭缝位置的观察。

二维动态光电显微镜光学结构如图 1 所示。

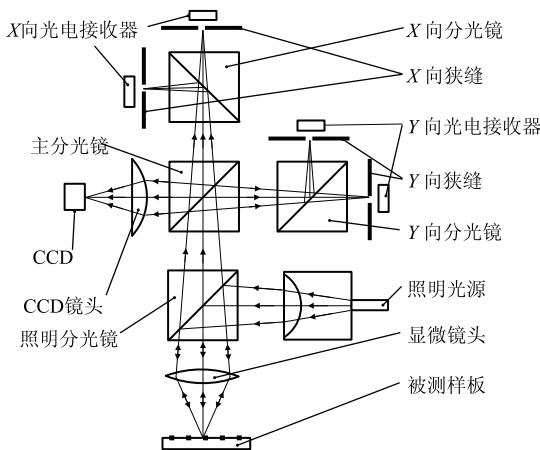


图 1 二维动态光电显微镜光学结构原理图

图 1 中，由照明光源、照明分光镜、显微镜头组成照明系统，将光纤引入的冷光照射在二维线纹样板上的被测区域。显微镜头将被测刻线成放大实像。主分光镜、X 向分光镜、Y 向分光镜组成分光系统，将刻线的实像等分成强度相同的 4 份并分别呈现在相应的狭缝上。X、Y 向各两个狭缝组成狭缝对齐系统，狭缝

宽度与被测刻线的像宽度基本一致，其中 X 向两个狭缝与十字刻线 X 方向的刻线像平行，并且两狭缝在刻线像空间上沿其垂直方向错开一个像宽度的距离；Y 向两个狭缝关系与之类似。光电接收器及后续的信号处理电路组成信号采集处理系统，接收狭缝透光区域透过的刻线反射光；CCD 镜头与 CCD 接收器组成监视系统，接收被四个狭缝反光区域反射出的十字刻线的像。

二维动态光电显微镜光学结构的特点为：利用相互垂直的两组狭缝作为光学瞄准的基准，每次瞄准具有相同的空间基准，测量结果中可以自动抵消光学系统成像误差造成的瞄准系统差；每个方向均采用双狭缝差动瞄准方法，可自动抵消由于照明光源、样品反射程度变化造成的瞄准误差；X、Y 方向的光路对称，相互独立，信号信噪比相当，具有相同的瞄准精度；采用狭缝光通量比较法，可自动均化刻线制造瑕疵对瞄准过程的影响，系统瞄准测量重复性高。

图 2 为二维动态光电显微镜的机械结构图。光电接收器为高灵敏度光电倍增管，能够接收透过狭缝区域的微弱光能量信号；分光镜采用分光平片，可以减少介质分界面多次反射对成像质量的影响；采用长焦大景深远心镜头作为显微镜头，长焦镜头可以增加显微镜与被测样品的距离，便于样品的安装调整，大景深远心镜头允许样品与镜头距离小范围变化，便于大面积样品的测量；以光纤冷光源作为照明光源，可以减小光源发热对瞄准测量的影响。

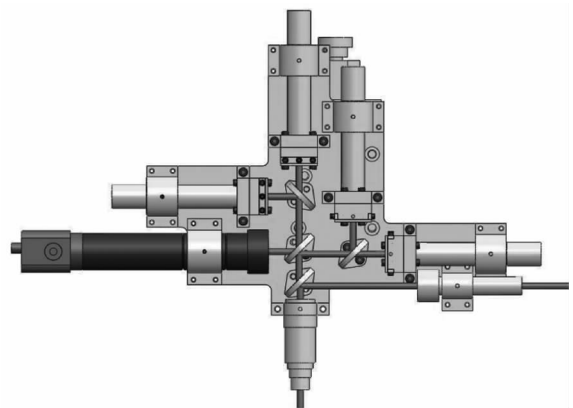


图 2 二维动态光电显微镜机械结构图

2 二维动态光电显微镜信号分析

二维线纹十字刻线的像通过狭缝后，被光电接收器转换为电信号，进入信号处理系统。

二维线纹样板沿 X 方向运动，其刻线像滑过 X 向

狭缝过程中，对应光电转换器输出信号的变化如图3所示。理想条件下，光电接收器信号输出幅度随位移的变化为一三角波信号。由于同组两个狭缝在像空间上错开一个狭缝距离，对应光电信号存在一定相位差。

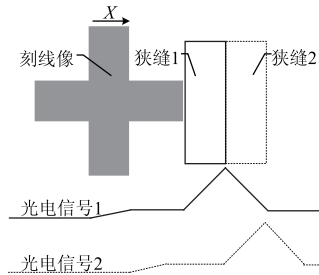


图3 狭缝光强信号图

使用二维动态光电显微镜瞄准时，被测二维线纹样板做稳速扫描运动，光电信号随时间的变化波形与图3类似。

对光电信号的处理可以采用同步数据采集法和幅度比较法。

利用同步数据采集法可高速同步采集光电信号幅度及对应位移信号，并由此找寻到刻线像与狭缝对齐的位置，即图3中光电信号的顶点位置。这种方法每个方向只需要一路光电信号，可以简化光路；缺点是需要采集、传输、实时处理大量数据，信号处理系统结构复杂，引入的数字噪声较大，实时性差，测量速度较慢，不适合大面积、多刻线测量。

采用幅度比较法可实现瞄准状态的判断，通过比较同组两路光电信号的幅度，在两信号幅度相等的瞬间发出瞄准信号。该方法信号处理系统结构简单，响应速度快，可进行高速扫描测量；利用差动方式实现瞄准，可以自动抵消照明光源波动、样品反射特性变化对瞄准的影响，提高瞄准精度。

在实际的二维动态光电显微镜系统中，由于成像系统存在畸变、分光系统存在多次反射、刻线像边缘存在衍射，以及光电接收器的带宽限制，光电输出为一“钟”形信号，如图4所示。

对于动态瞄准方法，两光电信号的交叉时刻即为光电显微镜的瞄准时刻，即图4中的 t_1, t_4 时刻，该时刻的坐标位置 x_1, x_4 即为被测刻线的坐标，刻线间的距离为 $x_4 - x_1$ 。由于信号处理系统的电路延迟，瞄准信号在 t_2, t_5 时刻发出，瞄准信号传输到测量系统并锁定位置数据则在 t_3, t_6 时刻，即实际得到的位置坐标为 x_3, x_6 ，测得的刻线间距为 $x_6 - x_3$ 。测量间距与实际间距的差别即为两次瞄准的延迟时间内由于工作台速度差

异导致的位移差。

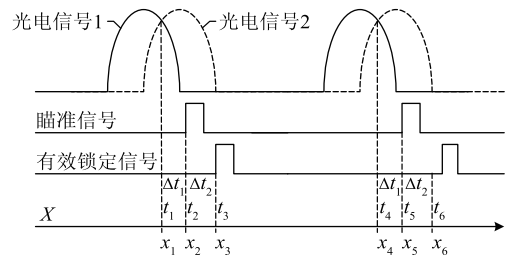


图4 动态瞄准过程时间与坐标延迟分析

在二维动态光电显微镜中，信号处理电路的瞄准脉冲延迟时间 $\Delta t_1 = 50 \mu s$ ，测量系统中干涉仪响应时间 $\Delta t_2 = 1 \mu s$ ，则由于工作台速度波动造成的瞄准误差为

$$\Delta x = (\Delta t_1 + \Delta t_2) \Delta v = 51 \times 10^{-6} \Delta v \quad (1)$$

式中： Δv 为两次瞄准延迟时间内的平均速度差。

二维动态光电显微镜的瞄准重复性指标为 50 nm，设速度变化对其贡献为 10 nm，则最大允许速度变化量 $\Delta v_{max} \approx 0.2 \text{ mm/s}$ ，当工作台以 3 mm/s 速度运行时，其速度波动量需在 6.7% 以内。

3 二维动态光电显微镜瞄准重复性试验

为验证二维动态光电显微镜瞄准重复性，按照 JJG 331-1994《激光干涉比长仪检定规程》中关于比长仪的测量重复性检定方法的规定^[6-7]，对利用二维动态光电显微镜的二维线纹标准装置进行了测量重复性试验，利用一等线纹尺分别对 X, Y 方向的测量重复性进行了验证，取线纹尺任意一端的连续 10 mm 的间隔，重复测量 14 次，以测量结果的总不确定度作为仪器单次测量的不确定度。在连续 10 天中，分别在 X, Y 方向上进行了 10 组观测，依据测量结果给出的测量重复性如表 1 所示。

表1 二维线纹标准装置测量重复性

方向	10 组观测结果的测量不确定度/nm									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X	42	39	43	44	38	45	47	46	44	49
Y	48	46	45	49	46	49	45	43	41	46

从表1中数据可以看出，二维线纹标准装置在 X, Y 方向上的测量重复性均优于 50 nm，且两个方向上的数据相当，可知作为瞄准部件的二维动态光电显微镜在 X, Y 方向上的瞄准重复性均优于 50 nm。

4 结论

文中介绍了二维动态光电显微镜结构。采用对称分

光光路实现 X 、 Y 方向上的等精度瞄准；利用在像空间上相互垂直的两组狭缝分别实现两个方向上的瞄准；采用差动比较法实现同组两路信号的差动瞄准。通过对瞄准过程的延迟分析推导出运动系统速度稳定性对动态瞄准精度的影响，得到二维动态光电显微镜对扫描测量系统速度稳定性的要求。试验表明，二维动态光电显微镜能够在 X 、 Y 两个方向的瞄准重复性均能达到 50 nm。

二维动态光电显微镜能够实现二维线纹的非接触动态高精度瞄准，实现二维线纹等二维标准物质测量的完全溯源；其测量速度快，便于实现大面积测量。

参 考 文 献

[1] 北京杏林睿光科技有限公司. 标定板、二维测微尺 [EB/OL]. [2015-03-09]. http://www.real-light.com/product_

ucts_detail/&productId=285.html.

[2] 维视数字图像技术有限公司. 机器视觉标定板 [EB/OL]. [2015-02-10]. <http://www.microvision.com.cn/index.php/jqsjbdb/show/60.html>.

[3] 刘永春. 视觉测量系统标定技术研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2008.

[4] 嘉藤公司. 影像测量仪 [EB/OL]. [2013-10-10]. <http://www.doc88.com/p-9552939406688.html>.

[5] 薛梓, 叶孝佑, 王春艳. 大行程超精密二维运动平台定位系统的研制 [J]. 计量学报, 2009, 38(5A): 141-145.

[6] 国家技术监督局. JJG 331-1994 激光干涉比长仪检定规程 [S]. 北京: 中国计量出版社, 1994.

[7] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 73-2005 高等别线纹尺检定规程 [S]. 北京: 中国计量出版社, 2005.

欢迎订阅《化学分析计量》

邮发代号 24-138

《化学分析计量》为国内外公开发行的全国性分析、计量专业技术类刊物，双月刊，大 16 开本，单月 20 日出版。国际刊号：ISSN 1008-6145，国内刊号：CN37-1315/O6。《化学分析计量》是中国科技核心期刊、美国《化学文摘》(CA) 千种表收录期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊，中国石油和化工行业优秀期刊、中国兵器工业优秀期刊、华东地区优秀期刊。2015 年单价 15 元，全年 90 元。您可通过邮局或银行汇款向《化学分析计量》杂志社办理订阅手续，欲订阅过刊或合订本、合订本光盘的读者直接向杂志社订阅。

地址：山东省济南市 108 信箱杂志社

邮编：250031

电话：(0531)85878132, 85878148, 85878224

E-mail: anameter@126.com

网址：www.cam1992.com

《化学分析计量》2015 年第 4 期目次

标准物质

血清雌二醇标准物质的研制

电力变压器油中溶解气体分析用标准物质的研制

甲醇中微量水分标准物质的研制

分析测试

基于纳米材料增效的 2, 6-二叔丁基对甲酚分子印迹电化学生传感器的研究及应用

气相色谱-正化学源离子阱质谱法测定饮用水中 9 种 N-亚硝胺

HPLC 法同时测定半枝莲中原儿茶酸和香草酸的含量

离子色谱法测定生活饮用水中的 F⁻、Cl⁻、SO₄²⁻ 和 NO₃⁻

傅里叶红外光谱法分析密胺餐具、脲醛餐具及其表面涂层

电感耦合等离子体发射光谱法测定硅质耐火原料中的硼

离子色谱法同时测定饮用水中 11 种无机阴离子

超高效液相色谱法测定卡托普利片中卡托普利二硫化物含量

大体积全自动固相萃取气相色谱-质谱法测定水中苯并芘

气相色谱法同时测定艾叶中 4 种挥发性成分

ICP-AES 法测定岩矿样品中的 17 种金属元素

非抑制电导离子色谱法测定车用尿素溶液中 Ca²⁺

氢化物发生原子荧光法测定头发样品中的硒

LC-MS/MS 法检测黑色粮谷类食品中的苏丹黑 B 和苏丹红 B

HP-FFAP 毛细管柱气相色谱法测定空气中溶剂汽油

石墨炉原子吸收法测定化探样品中的微量锡

正己烷萃取-连续流动光度法测定含油废水中的氰化物

ICP-AES 法测定 70Ni-30Mo 镍钼中间合金中钼、铁、铝、硅、磷

双通道原子荧光法同时测定水中砷和硒

离子色谱法测定电厂水中的有机酸和无机阴离子

计量技术

发射光谱仪检定规程的探讨和应用

实验室管理

热解炉-金汞齐捕集-原子吸收法测定土壤中汞的注意事项

氧瓶燃烧-电位滴定法测定溴系阻燃剂中溴含量的影响因素

影响酸度计示值准确性及稳定性的因素分析

仪器设备

NexION300X 型电感耦合等离子体质谱仪的日常维护及故障排除

高效液相色谱仪故障排除两例

综述

邻苯二甲酸酯类增塑剂提取技术研究进展

环境监测技术及其体系的现状及发展趋势