

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2018.02.08

等倾与相移两种干涉仪的平面度绝对测量比对

王青, 顾洋

(南京理工大学, 江苏 南京 210094)

摘 要: 采用三平面互检测量方法, 分别在等倾干涉仪和相移干涉仪上对平晶平面度进行了绝对测量比对。针对两种干涉仪不同的测量原理, 提出了一种规范方法以从相移干涉仪数十万点阵测量数据中, 提取符合等倾干涉仪测量数据格式的结果; 对比等倾干涉仪的结构与环境控制方法, 研究了相移干涉仪进行平面度绝对检验过程中的温度、温度梯度、温度分层情况, 采取双重保温措施下达到了 $0.002\ \mu\text{m}$ 的测量重复性, 和 $0.01\ \mu\text{m}$ 的绝对检验测量不确定度。与等倾干涉仪的检定结果的差异小于 $0.01\ \mu\text{m}$, 证明了相移干涉仪用于平晶的平面度检定工作可行性。

关键词: 平面度; 相移干涉仪; 等倾干涉仪; 三平面互检

中图分类号: TB921

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2017)00-0030-04

Absolute Measurement Comparison between Isoclinic Interferometer and Phase Shift Interferometer

WANG Qing, GU Yang

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 211194, China)

Abstract: Based on the method of three-flat testing, the comparison of flatness measurement was given by two kinds of instruments which are isoclinic interferometer and phase shift interferometer. With the study of two principles of two kinds of interferometers, a standard process was put forward to extract a few figures from the lattice data tested by phase shift interferometer to fit the data format from isoclinic interferometer. Temperature, temperature gradient and temperature stratification on an optical platform was researched, a comparison of the environmental control method of isoclinic interferometer, the double insulation structure of the cavity of phase shift interferometer was applied. The measurement repeatability was $0.002\ \mu\text{m}$ and uncertainty of absolute measurement was $0.01\ \mu\text{m}$. And comparing with the result of equal inclination interferometer, the difference was less than $0.01\ \mu\text{m}$. Therefore, the phase shift interferometer can be used entirely in the flatness verification.

Key words: flatness; phase-shifting interferometer; isoclinic interferometer; three-flat test

0 引言

在平晶计量中, 传统上认为等倾干涉仪的测量精度要远远高于等厚干涉仪, 其原因是等倾干涉仪是单点测量, 可以准确地确定多个特定点上的高程差^[1], 这对于量值传递来说是十分重要的。而等厚干涉仪则是测量条纹的弯曲程度, 通过一些在不特定位置上的交点(条纹与边缘的交点、条纹与垂直于条纹的直径的交点等)来计算平面度^[2-3], 只能获得测量面的平面度估值。因此上述两种仪器给出的平面度指标完全不一样: 等倾干涉仪给出的是平面度(两个垂直截面上给十个点的数据), 等厚干涉仪则是按光圈 N 、局部光圈 $\Delta_1 N$ 、 $\Delta_2 N$ 来表述。受此影响, 相移干涉仪出现后, 有许多人因其干涉光路、屏显干涉图图像与等厚干涉仪一致而认为其仅是等厚干涉仪的升级版, 测量精度不

如等倾干涉仪。

事实上, 相移干涉仪的测量原理是在动态改变干涉腔相位长度的情况下, 用 CCD 采集每个像素上的光强值变化, 通过运算复原波前相位, 因此相移干涉仪得到的基本测试结果是波前。由于波前结果含有几十万到上百万个数据, 一般以二维等值图、三维立体图的形式显示, 用户无法直接使用。在行业内采用峰谷值(PV)、均方根(RMS)等非定域指标或统计指标来表述, 但这与等厚干涉仪的光圈表述一样, 与计量的量值传递需求相去甚远。因此相移干涉仪虽然在国防计量和光学冷加工企业中被广泛应用, 却与平面度计量体系始终隔着一道鸿沟——PV 值与平面度、光圈是不同的指标系统, 有相关性却无数学转换方法^[4]。因此在相移干涉仪成为平面度测量仪器前, 首先就要解决数据指标的向前兼容性问题。对此, 本文提出了从相

移干涉波前数据中提取平面度指标的方法，并在相移干涉仪上实现了与等倾干涉仪完全一致的平面度绝对检验。

1 采用等倾干涉仪的绝对检验

在广东省计量科学研究院的帮助下，采用等倾干涉仪进行了三平面互检。在测试前，首先是对被测的两块南京某公司的平晶 YTF1#和 YTF5#标注两条互相垂直的截面(1-2)和(3-4)，按照规定的方法，这两个截面是采用随机方式选定的，而不是选定的特征截面^[5]。而标准平晶(编号 8805)具有上级计量部门的检定证书。采用中山大学编写的图像采集与处理软件包测量，可以对干涉环进行自动读数，并对原始数据进行归一化(两端归零)。

原始测试数据(原始记录号 020170001)及三平面互检结果如表 1。

表 1 等倾干涉仪上的三平面互检原始数据

平晶组合	截面	相对高程差/ μm				
		+70	+48	0	-48	-70
5#-1#	(1-2)	0.000	-0.002	-0.013	-0.004	0.000
	(3-4)	0.000	-0.005	-0.016	-0.003	0.000
8805-1#	(1-2)	0.000	-0.008	-0.029	-0.006	0.000
	(3-4)	0.000	-0.006	-0.027	-0.004	0.000
8805-5#	(1-2)	0.000	0.001	-0.016	-0.007	0.000
	(3-4)	0.000	-0.010	-0.026	-0.009	0.000

表 2 等倾干涉仪上的三平面互检结果

平晶	截面	单块平晶的绝对高程/ μm				
		+70	+48	0	-48	-70
1#	(1-2)	0.000	-0.006	-0.013	-0.002	0.000
	(3-4)	0.000	-0.001	-0.009	0.001	0.000
5#	(1-2)	0.000	0.004	0.000	-0.003	0.000
	(3-4)	0.000	-0.005	-0.008	-0.004	0.000
8805	(1-2)	0.000	-0.003	-0.016	-0.005	0.000
	(3-4)	0.000	-0.006	-0.019	-0.005	0.000

2 相移干涉仪绝对检验与输出波前数据的处理方法

采用相移干涉仪进行的三平面绝对检验，在两个

方面是与等倾干涉仪一样的：其一是在三块平晶相互检测之间，必然有一块平晶需要翻转；其二是一组测量只能保证一条截面上的数据是互检的，这个截面就是翻转的对称截面，一般为过中心的一条直径。为获得另一个正交截面上的数据，需要进行第二次翻转，就形成了三面四次互检(参考平晶与被测平晶的两次测量结果可以通用)。在卧式干涉仪的实际操作中，水平翻转等同于垂直翻转+旋转 180°。

选用四块石英平晶进行了多组测量，其中两块是 ZYGO 带框的石英平晶，标号为 Z26，Z27，另两块为南京英特飞公司送检过的石英平晶，标号为 1#和 5#。对于带框的平晶，其截面是固定的：截面(1-2)为垂直方向，截面(3-4)为水平方向；对于无框平晶，截面方向是可以旋转的，因此可以进行不同组合的绝对检验。

表 3 多块平晶互检配对表

序号	参考平晶	测试平晶及其方向	翻转方式	参与绝对测量的截面	
				参考平晶	被测平晶
1	Z26,	1#, 截面	Z27 垂直翻转	(1-2)	1#(1-2)
2	Z27	(1-2)垂直	Z27 水平翻转	(3-4)	1#(3-4)
3	Z26,	1#, 截面	Z27 垂直翻转	(1-2)	1#(3-4)
4	Z27	(3-4)垂直	Z27 水平翻转	(3-4)	1#(1-2)
5	Z26,	5#, 截面	Z27 垂直翻转	(1-2)	5#(1-2)
6	Z27	(1-2)垂直	Z27 水平翻转	(3-4)	5#(3-4)
7	Z26,	5#, 截面	Z27 垂直翻转	(1-2)	5#(3-4)
8	Z27	(3-4)垂直	Z27 水平翻转	(3-4)	5#(1-2)

在数据处理过程中，首先对相移干涉仪给出的测试结果进行采样，获取波前的数据集 $\{W(i, j), i, j = 1, 2, \dots, n, m\}$ 和确定干涉有效区间的模板(MASK)。相移干涉仪的软件包有一个“标定”功能，用以获得的像素坐标与空间坐标的转换系数——像素格值 k ，于是可以直接进行两种坐标之间的像素-mm 转换。

第二步是进行平滑处理(低通滤波)。因为相移干涉仪的采样分辨率一般为 0.2~0.3 mm，而等倾干涉仪的两个干涉环的直径为 4~7 mm^[6]，因此其采样分辨率不会高于 5 mm。相移干涉仪的采样数据 ([6]) 首先需要 进行毫米量级上的均值滤波，这样既保证了对平晶表面足够的分辨率，也提高了采样数据的稳定性。

$$W(i, j) = \frac{\sum_{x=i-n}^{i+n} \sum_{y=j-n}^{j+n} W(x, y)}{m \times m} \quad (n = \frac{m-1}{2}) \quad (1)$$

式中： m 为低通滤波窗口的大小，根据相移干涉仪分辨率的不同，可采用 3~15 的窗口大小。

第三步是确认翻转的对称截面，然后在该截面上采样。为与规定的要求相符，采样为中心点和 $\pm 48\text{ mm}$ ， $\pm 70\text{ mm}$ 五个位置。对于四块平晶之间的互检，采样结果如表 4 所示。

表 4 多块平晶互检的原始数据采样

测量 序号	互检平晶 及方位	采样 截面	相对高程差/ μm				
			-70	-48	0	48	70
1	Z26 1#, 截面 (1-2)垂直	水平	0.001	0.002	-0.025	0.006	-0.004
		垂直	0.011	0.005	-0.025	0.009	0.009
2	Z26 1#, 截面 (3-4)垂直	水平	0.002	0.002	-0.025	0.001	-0.002
		垂直	0.009	0.008	-0.025	0.009	0.005
3	Z26 5#, 截面 (1-2)垂直	水平	0.001	0.005	-0.018	0.005	-0.004
		垂直	0.003	0.008	-0.018	0.004	-0.003
4	Z26 5#, 截面 (3-4)垂直	水平	-0.003	0.001	-0.017	0.006	-0.010
		垂直	0.004	0.009	-0.015	0.006	0.002
5	Z27 2#, 截面 (1-2)垂直	水平	0.008	0.002	-0.011	0.006	0.006
		垂直	0.001	-0.003	-0.011	0.001	0.001
6	Z27 2#, 截面 (3-4)垂直	水平	0.007	0.001	-0.012	0.001	0.009
		垂直	0.002	0.000	-0.012	0.003	0.002
7	Z27 5#, 截面 (1-2)垂直	水平	0.009	0.004	-0.006	0.003	0.006
		垂直	-0.004	0.000	-0.006	-0.003	-0.004
8	Z27 5#, 截面 (3-4)垂直	水平	0.004	0.001	-0.003	0.005	-0.001
		垂直	-0.003	0.001	-0.003	0.000	-0.004
9	Z27 Z26, 垂直翻转	水平	—	—	—	—	—
		垂直	-0.008	0.000	-0.018	0.001	-0.008
10	Z27 Z26, 水平翻转	水平	0.009	0.008	-0.018	0.008	0.009
		垂直	—	—	—	—	—

第四步是对采样数据进行归一化处理，包括将干涉仪给出的波长单位转换为米制 (μm) 单位、将干涉仪

rms 最小值为标准的消倾斜结果，转换为以边缘两点为零的消倾斜结果。获得的五个采样点结果标注为 $(x_{-70}, x_{-48}, x_0, x_{+48}, x_{+70})$ ，则转换公式为

$$\begin{cases} x_{-70} = 0 \\ x_{-48} = x_{-48} - \frac{x_{-70} + x_{+70}}{2} + \frac{48}{70} \left(\frac{x_{-70} - x_{+70}}{2} \right) \\ x_0 = x_0 - \frac{x_{-70} + x_{+70}}{2} \\ x_{+48} = x_{+48} - \frac{x_{-70} + x_{+70}}{2} + \frac{48}{70} \left(\frac{x_{+70} - x_{-70}}{2} \right) \\ x_{+70} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

根据上述流程，第一组的采样数据和处理结果如表 5 所示，其他截面也可以通过同样的流程处理。

3 两种干涉仪的平晶绝对检验结果与比对

等倾干涉仪的绝对检验，采用广东省院的二等平晶(8805)，与上级计量部门的检定结果比较，平面度的最大差异为 $0.015\text{ }\mu\text{m}$ ，如表 6 所示。按一级平晶等倾干涉仪绝对检验的测量不确定度 $u_i = 0.01\text{ }\mu\text{m}$ ($k=1$) 计算， En 值为 1.06，在可以接受的范围。

表 6 平晶(8805)的检定结果比较 μm

截面	检定单位	绝对高程					面度
		+70	+48	0	-48	-70	
8805	广东省院	0	-0.003	-0.016	-0.005	0	-0.016
	(1-2) 中国计量院	0	-0.003	-0.022	0.000	0	-0.022
8805	广东省院	0	-0.006	-0.019	-0.005	0	-0.019
	(3-4) 中国计量院	0	-0.012	-0.034	-0.006	0	-0.034

在对相移干涉仪进行绝对检验进行分析时，首先考虑多次测试结果之间的一致性。Z26，Z27 两块平晶参与了四次绝对检验，其两个截面上测量点差异最大为 $0.004\text{ }\mu\text{m}$ ，平面度的测量重复性(标准差)为 $0.002\text{ }\mu\text{m}$ 如表 7 所示。如果再考虑温度等影响因素，相移干涉仪对于石英平晶的平面度绝对检验的测量不确定度可以优于 $0.01\text{ }\mu\text{m}$ ($k=2$)。

表 5 垂直截面：Z26(1-2)，Z27(1-2)，1#(1-2)

采样 位置 /mm	原始数据(从相移干涉波前数据中提取) 相对高程/ μm			原始数据(消倾斜)相对高程/ μm			三平面互检结果绝对高程/ μm		
	Z26-1#	Z27-1#	Z27-Z26	Z26-1#	Z27-1#	Z27-Z26	1#	Z26	Z27
-70	0.011	0.001	-0.008	0	0	0	0	0	0
-48	0.005	-0.003	0	-0.005	-0.003	0.008	-0.008	0.003	0.005
0	-0.025	-0.011	-0.018	-0.034	-0.012	-0.011	-0.018	-0.017	0.006
48	0.009	0.001	0.001	0	-0.001	0.008	-0.004	0.005	0.004
70	0.009	0.001	-0.008	0	0	0	0	0	0

表7 参考平晶的平面度重复性结果 μm

平晶/截面	平面度				标准偏差
	1	2	3	4	
Z26(1-2)	-0.017	-0.015	-0.013	-0.015	0.002
Z26(3-4)	0.006	0.004	0.004	0.003	0.002
Z27(1-2)	-0.016	-0.016	-0.015	-0.016	0.001
Z27(3-4)	-0.011	-0.011	-0.012	-0.011	0.001

在确认了等倾干涉仪和相移干涉仪各自绝对检验精度之后,就可对英特飞的两块平晶(1#,5#)的两次检测结果进行比对,其平面度结果最大的差异为 $0.005\text{ }\mu\text{m}$ (如表8,表9所示)。按测量不确定度 $0.01\text{ }\mu\text{m}$ 计算,两种干涉仪测试结果的归一化偏差^[7] E_n 值为0.5,说明结果一致性极好。

表8 南理工相移干涉绝对检验结果 μm

平晶/截面	绝对高程					平面度	
	-70	-48	0	48	70		
1#(1-2)	①	0	-0.008	-0.018	-0.002	0	-0.018
	②	0	-0.003	-0.009	-0.003	0	-0.009
	平均	0	-0.006	-0.014	-0.003	0	-0.014
1#(3-4)	①	0	-0.002	-0.007	0.005	0	-0.007
	②	0	-0.005	-0.018	-0.002	0	-0.018
	平均	0	-0.004	-0.013	0.002	0	-0.013
5#(1-2)	①	0	0.001	-0.005	-0.001	0	-0.005
	②	0	0.002	0.006	0.01	0	0.006
	平均	0	0.002	0.001	0.005	0	0.001
5#(3-4)	①	0	0.001	-0.002	0.003	0	-0.002
	②	0	0.001	-0.003	0.000	0	-0.003
	平均	0	0.001	-0.003	0.002	0	-0.003

表9 两种测量方法的绝对检验结果比对 μm

平晶/截面	平面度测试结果		差异
	南理工 相移干涉	广东省院 等倾干涉	
平晶: 1# 截面: (1-2)	-0.014	-0.013	0.001
平晶: 1# 截面: (3-4)	-0.013	-0.009	0.004
平晶: 5# 截面: (1-2)	0.001	0.000	0.001
平晶: 5# 截面: (3-4)	-0.003	-0.008	0.005

4 结论

在测量过程中我们发现,除了测量原理外,相移干涉仪与等倾干涉仪最大的不同在于干涉腔是否敞开以及干涉腔的腔长远大于等倾干涉仪的 5 mm 。一般的卧式相移干涉仪属于通用仪器,放置在抗震的光学平台上以方便测试时的各种光路搭建(如测量球面就需要

长光路、测量方砖、屋脊棱镜等则需要折转到侧方光路)。这种形制不适合干涉计量的要求:光学平台造成的干涉腔内空气层非线性温度梯度、温度波动、气流扰动等将带来较大的直接测量误差,其单次测量结果(PV)的波动可能达到 $0.01\text{ }\mu\text{m}(k=1)$,比相移干涉仪的标称值大了十倍。故本次实验中,对于干涉仪进行了保温处理,用铝合金玻璃封闭了光学平台,用橡塑保温材料封闭了干涉腔。测试表明,在室温波动为 $(20\pm 1)\text{ }^\circ\text{C}$ 的情况下(变频空调),干涉腔内的温度波动小于 $0.1\text{ }^\circ\text{C/h}$,达到了国标的要求。在环境条件符合要求的情况下,在相移干涉仪上进行的绝对检验要比在等倾干涉仪上方便许多:一组两个截面的测量只需进行4次,半天可以完成;而等倾干涉仪则需要进行6次,还要小心干涉环的级次不能数错,一般需要进行2~3天。

参 考 文 献

[1] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. JJG 661-2004 平面等倾干涉仪检定规程[S]. 北京:中国计量出版社,2004.

[2] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 2831-2009 光学零件的面形偏差[S]. 北京:中国计量出版社,2009.

[3] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. JJG 28-2000 平晶检定规程[S]. 北京:中国计量出版社,2000.

[4] 徐德衍,王青,高志山,等. 现行光学元件检测与国际标准[M]. 北京:科学出版社,2009.

[5] 王青,徐新华,陈磊,等. 一种子孔径拼接系统中系统误差的修正方法:201110106489.7[P].

[6] 张旭东,贺美云,刘香斌. 一种基于 Matlab 的干涉条纹自动处理方法[J]. 计量学报,2010,31(1):14-16.

[7] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. JJF 1117-2010 计量比对[S]. 北京:中国计量出版社2010.

收稿日期:2017-09-19;修回日期:2017-12-18

基金项目:国家重大仪器专项开发(2013YQ150829)



王青(1963-),江苏苏州人,九三学社成员,主要研究方向为光学测量、光学计量、薄膜光学。江苏省计量测试学会理事;江苏省标准化协会理事;南京技术监督光学产品质量检验站副站长;中国光学学会光学会员;中国计量学会高级会员。

1985年毕业于中山大学物理系;博士就读于南京理工大学电子工程与光电技术学院;现就职于南京理工大学2011先进发射协同创新中心,任主任助理。出版多本教材,并获得10多项国家和省部级科技进步奖励。