

芯飞睿技术参数十问系列 (一)

面形

面形

一、面形是什么

光学元件的面形一般是指元件表面的面形精度，其也可以用局部光圈、PV值（峰谷值）、RMS（均方根）、Power（离焦量/聚散性）、 PV_r （稳定的峰谷值）、PSD（功率谱密度）、GRMS（梯度均方根值）、透过波前等等来表示。主要是说明一个表面与理想参考面的偏差。

以球面为例：其PV是微观上检测表面的波峰与波谷的差值，单位一般为波长，检测设备比较认可的是美国的ZYGO干涉仪，可以直接量化的读出PV的数值。

面形偏差又被称为平面度、平坦度、平整度。平面度是指基片具有的宏观凹凸高度相对理想平面的偏差。平面度是限制实际平面对其理想平面变动量的一项指标，用来控制被测实际平面的形状误差。

二、面形偏差的指标是什么

国际规定的光学元件面形偏差有三个指标：一个光圈公差（N）和两个局部光圈公差（ Δ_1N 、 Δ_2N ）。

① 光圈N：被检光学表面的曲率半径相对于参考光学表面曲率半径的偏差称为半径偏差，此偏差所对应的光圈也可称为平均光圈；

② 像散偏差 Δ_1N ：被检光学表面与参考光学表面在两个相互垂直方向上产生的光圈不等所对应的偏差称为像散偏差；

③ 局部偏差 Δ_2N ：被检光学表面与参考光学表面在任一方向上产生的干涉条纹的局部不规则度称为局部偏差。

而国内一般的生产加工中，原始定义的光圈概念被更方便使用、也更为严格的“最大光圈”（建议标记为 N_G ）和局部光圈（ ΔN ）所替代。

① 最大光圈：国标（GB/T-81）在判断方法中规定，在光圈数最多的情况下，以有效检验范围内直径方向上最多条纹数的一半来度量。这就是将光圈和局部光圈的像散偏差合在一起；

② 局部光圈 ΔN ：将像散偏差 Δ_1N 和局部偏差 Δ_2N 合在一起进行判读。

在判读光圈上，国标是把“光圈数”定义为干涉场内出现的最多光圈数，而国际标准将“光圈数”定为干涉场内出现的平均光圈数。

以图1两幅干涉图形的光圈数和局部光圈数的判读及表1的判读结果来说明判读光圈在国标和国际标准中的差异。

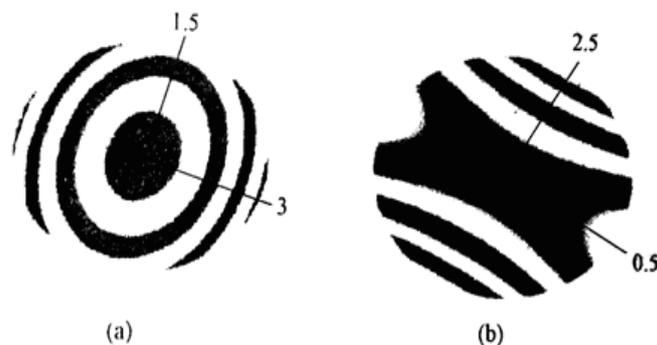


图 1. 我国标准GB 2813-2009与国际标准ISO10110-5 对干涉条纹判读的差异与比较

表1. 图1中干涉条纹判读结果的差异

图例	GB 2813-81判读数	ISO10110-5判读数
(a)	最大光圈数	弧度误差，平均光圈数
	$N_G=3$	$N=(3+1.5)/2=2.25$
	局部光圈数	不规则性，局部光圈数
	$\Delta N=3-1.5=1.5$	$\Delta N=3-1.5=1.5$
(b)	最大光圈数	弧度误差，平均光圈数
	$N_G=2.5$	$N=(2.5-0.5)/2=1$
	局部光圈数	不规则性，局部光圈数
	$\Delta N=2.5+0.5=3$	$\Delta N=2.5+0.5=3$

三、平面面形的标准是什么

根据国标(JJG28-2000)，平面面形的等级如表2所示。两个截面的平面度之差对于1级平晶不大于 $0.03\mu m$ ，对于2级平晶不大于 $0.05\mu m$ ，在有效直径外只允许塌边，但1级平晶在有效直径外 $0.5mm$ 内不得有塌边。

表2. 国家平晶面形标准

规格/mm	项目	有效直径d/mm	平面度/ μm			
			1级		2级	
			d范围内	(2/3)d范围内	d范围内	(2/3)d范围内
30	25					
45	39	0.03 ($\approx \lambda/21$)	-	0.1 ($\approx \lambda/6$)	0.05 ($\approx \lambda/13$)	
60	54					
80	72					
100	92	0.05 ($\approx \lambda/13$)	0.05 ($\approx \lambda/13$)	0.1 ($\approx \lambda/6$)	0.05 ($\approx \lambda/13$)	
150	140					
200	188	0.08 ($\approx \lambda/21$)	0.05 ($\approx \lambda/13$)	0.12 ($\approx \lambda/5$)	0.1 ($\approx \lambda/6$)	

注：1. (2/3)d指直径为有效直径d的三分之二，且在平晶的中心部位区域；
2. 括号内以波长为单位的数值（干涉仪常用波长 $\lambda=632.8nm$ ）。



平晶除按级标准外还有按等检验要求，表3就是国标所给的按等检验的150mm标准平静要求，其他尺寸也可以参照该表执行。

表3. 150mm(有效直径d=140mm)标准平晶按等检验要求

单位/ μm	1等		2等	
	d范围内	(2/3)d范围内	d范围内	(2/3)d范围内
平面度	0.03 ($\approx\lambda/21$)	0.015 ($\approx\lambda/42$)	0.05 ($\approx\lambda/13$)	0.03 ($\approx\lambda/21$)
任意两个截面平面度之差	0.015 ($\approx\lambda/42$)	-	0.03 ($\approx\lambda/21$)	-
测量的扩展不确定度 $U(k=3\text{或}p=0.99)$	0.01 ($\approx\lambda/63$)	-	0.02 ($\approx\lambda/31$)	-
其他要求	(2/3)d内的平面度应与总偏差方向一致，两个截面的偏差方向也应一致			

从表2和表3的数据可以看出，1等平晶只有采用绝对检验（三面四次互检）才能达到；而2等平晶和按级检验的平晶，可以采取多块配对互检的方式达到测量不确定度要求。

四、平晶面形光学加工、测试最高精度

现如今光学加工、测试能达到的最高精度比国家标准要高，在100mm内，最高精度可达到13~16nm ($\lambda/40\sim\lambda/50$)，在150mm可达到30nm ($\approx\lambda/20$)，600mm能达到63nm ($\lambda/10$)。

五、面形偏差的检测方法

面形偏差的检验主要是利用双光束干涉的原理，干涉测量是基于光波干涉原理的一种测量技术，与其他的光学测量方法相比，干涉测量具有更高的准确度和灵敏度，并且干涉测量是一种非接触式的测量，不会导致被测面接触损伤和附加误差。检验的方法有很多，本文主要介绍三种面形偏差的检验方法——样板法、条纹法和移相干涉法。样板法适合目视情况下的快速定性检验；条纹法等单幅干涉图处理方法早期常常需要在拍摄后再处理，但现在利用计算机实时处理；移相干涉法通过数字波面干涉仪进行面形测量，也成为了高精度面形测量的主要方法，并发展出了绝对检验技术。

(1) 样板法

样板法是根据光学元件的曲率半径和口径制造标准样板（平面或凹凸一对球面），再根据标准样板制造在生产

中使用的多个工作样板。与普通工件相比，样板一般采用性能稳定的光学材料制造，并且具有一定的厚度，其面形不易变化，曲率半径也可以进行准确测量。

样板法的操作过程：将待测零件和工作样板贴合，在灯光下观察两者之间空气间隙形成的干涉条纹，然后根据条纹的形状或颜色判断面形。

样板法的优劣势：优势是可以同时判断光圈和局部光圈；劣势是依靠观察者目测判断，接触测量致使表面损伤的可能性增大，也有可能产生额外的表面缺陷。

样板法的注意事项：样板本身的精度；样板法检测的光圈数N与光源的波长有关；样板法检测时的观测角度；小样板检验大工件的精度转换。

(2) 条纹法

条纹法主要是提取干涉图上的条纹信息，即确定干涉条纹中心的位置坐标和干涉级次。

条纹法的操作过程：背景滤波→二值化→细化→修像→标记→采样。

背景滤波是对原始干涉图进行预处理；二值化是对采样所获得的灰度图像进行压缩，使之成为二值图，即将干涉图中的条纹变成黑、白两种灰度值；细化是让黑白条纹变细，从而提取出条纹中心位置信息；修像是去除细化后图像中的干扰信息（无效条纹）、连接细化时条纹出现的间断处；标记是通过对细化的条纹进行跟踪，对每个条纹标记上级次（相对级次 $p=1, 2, 3, \dots$ ），使计算机能够分辨出不同级次的条纹；采样就是在垂直条纹的方向上以一定的间距设置采样线贯穿整个干涉图像区域，提取采样线与细化条纹相交处的坐标位置(x,y)和该条纹的级次信息。

(3) 移相干涉法

移相干涉法是采用光电定量探测方法，其高分辨率（可高达 $\lambda/100\sim\lambda/1000$ ）提供了获得跟高测量精度的可能——在横向，移相法以CCD像素构成了高密度点阵；在纵向，标准镜的移动获得了多幅干涉图，使得相位分辨率也远超过单幅干涉图。且移相干涉法通过计算每一个像素点的光强值，可以在一定范围内消除干涉仪的系统误差，具有抑制噪声好、精度高和实时动态等特点，但是移相干涉对环境稳定性的要求较高，并且需要有准确的位移。

移相干涉法将随时间变化的相位变化引入干涉仪的参考波前和采样波前（或者被测波前）之间，于是在干涉图的每个测量点上，都会产生一个时变信号，该信号相当于是对测量点位置两种波前像差进行了编码。

通常，将干涉仪中的参考波前设为：

$$\omega_r(x,y,t)=a_r(x,y)e^{i[\phi_r(x,y)-\delta(t)]}$$



被测波前设为：

$$\omega_t(x,y)=a_t(x,y)e^{i\phi_t(x,y)}$$

其中为 $a_r(x,y)$ $a_t(x,y)$ 波前振幅， $\phi_r(x,y)$ $\phi_t(x,y)$ 为波前相位， $\delta(t)$ 是加入到参考光束中的一个随时间变化的相移量，也就是两束光之间的相对相移，它能通过参考光或者被测光物理状态的变化而改变。改变之后的干涉光强分布为：

$$I(x,y,t)=|\omega_r(x,y,t)+\omega_t(x,y)|^2$$

或者写为：

$$I(x,y,t)=I'(x,y)+I''(x,y)\cos[\phi_t(x,y)-\phi_r(x,y)+\delta(t)]$$

式中 $I'(x,y)=a_r^2(x,y)+a_t^2(x,y)$ ，为平均光强；

$I''(x,y)=2a_r(x,y)a_t(x,y)$ ，为条纹或光强的调制。

如果把 $\phi(x,y)$ 定义为波前相位差，即

$$\phi(x,y)=\phi_t(x,y)-\phi_r(x,y)$$

可得到：

$$I(x,y,t)=I'(x,y)+I''(x,y)\cos[\phi(x,y)+\delta(t)]$$

这是相移干涉法的基本公式，每个测量点的光强会随着相移量 $\delta(t)$ 的变化而变化，而该相移量具有由未知波前相位带来的时间偏移量。

可以通过将该光强视为 $\delta(t)$ 的函数而观察到这个推导结果，对线性相移而言，相当于干涉光强在随时间变化。常数项 $I'(x,y)$ 是光强的偏移量， $I''(x,y)$ 是调制光强峰谷值的一半，未知相位与该正弦变化的时间相移有关。

六、平面度绝对检验

绝对平整度是指用绝对比例尺测量物体的平整度，其中参考平面(标准)完全没有不规则之处。任何光学平面的平整度都是相对于用来校准它的原始标准的平整度。由于两个表面都会有一些不规则性，因此很少有方法知道任何光学平面的真实绝对平整度。唯一可以达到几乎绝对平坦度的表面是液体表面，比如水银，有时可以达到 $\lambda/100$ 内的平坦度读数，这相当于仅6.32nm(632nm/100)的偏差。然而，液体平板很难使用和正确对齐，所以通常在准备标准平板校准其他平板时选用另一种测定绝对平整度的方法——“三平面测试”。在干涉面和波前测量中，三平面测试是将干涉仪参考波前的误差与被测部分表面的误差分开的测量程序的原型，即所谓的绝对测试。在这个测试中，三个大小和形状相同的平板相互对照测试。通过分析图案及其不同的相移，可以推断出每个表面的绝对轮廓。这通常需要至少12个单独的测试，在至少两个不同的方向上将每个单元与其单元进行对比。为了消除

任何错误，有时可以在测试时将平板放在边缘上，而不是平放，这有助于防止下垂。

七、平面面形检测的影响因素有什么

平面面形检测最重要的是精度，要想获得高精度的检测结果，需要把控好环境、干涉仪等影响因素带来的干扰。

(1)温度

温度是最主要的环境因素，对面形的影响有温度、温度梯度（随时间变化）和温度分层（随空间位置变化）这三种方式。在干涉测量中想要获得高精度的测量结果，温度至少要达到国标的要求。对于一般光学车间检验来说，如果使用K9材料的平晶，则需要满足《JJG28-2000平晶规定规程》所规定的室内等温（如表4所示）和仪器内等温（如表5所示）的要求。如果标准平晶和被测件都是石英或微晶材料，则温度、温度梯度可以放宽到符合干涉仪使用条件即可，即温度为 $(20\pm 5)^\circ\text{C}$ 、温度梯度小于 0.2°C/h ，连续工作10h内温度变化不大于 1°C 。不过光学车间检验一般测量口径不大（ $<150\text{mm}$ ），不需要考虑温度分层问题。

表4. 室内等温要求

平晶类别	平晶规格/mm	等温时间/h
平面平晶	30, 45	10
	60	16
	80	18
	100	20
	150	30
长平晶	200	35
	210	10
	310	16

表5. 平晶在干涉仪内等温时间要求

平晶类别	平晶规格/mm	等温时间/h	24h室温变化/ $^\circ\text{C}$	1h室温变化/ $^\circ\text{C}$
平面平晶	30, 45, 60	0.5	2.5	0.5
	80, 100	1	1.5	0.2
	150, 200	2	1	0.1
平行平晶	I, II系列	0.5	2.5	0.5
	III, VI系列	1	2.5	0.5
长平晶	210	1	1	0.1
	310	1.5	1	0.1



温度不稳定会直接影响测量精度的可靠性，温度分层可能会影响折射率发生不均匀变化，从而导致干涉条纹出现上下两端弯曲的现象。

在此简单举例来说明温度的影响。空调、加热取暖设备及通风口会造成温差和气流干扰，影响测量光束；操作人员在检测样品时长时间靠近仪器观察，人体体温会使仪器四周温度引起变化而传入样品与测试反射镜，引起干涉条纹变形；样品如果直接用手拿，手温也会引起边缘的干涉条纹弯曲。

(2) 气流

在高精度要求的测量中，气流和空气湍流是影响较大的误差源。气流干扰会使局部区域内空气密度不均匀，对测量光束引起局部偏折，改变测量波面，影响测量结果。在条纹视场内，任何特定点的性质往往是一个缓慢变化的相位误差，随着距离临近点大于几毫米到几厘米，点的相关性就会减小。可以通过产生足够的气流对空气进行混合，以防止停滞或分层，而不会产生过度的湍流。空气流动和湍流与热梯度有关，当温度梯度存在于干涉仪的任何结构部件中或被测部件中时，随着时间的变化，也会存在于全波前孔径的光路。

(3) 振动

振动是最难控制的环境问题，因为振动的产生来源有很多，如声波、人的活动、刚性不够的地板、其他设备等。当干涉仪工作时，环境振动会在两相干波面之间引入随机的位相变化，干涉条纹出现抖动现象，造成条纹模糊。对于移相式干涉仪，环境振动引入的位相变化是周期性的，这周期性波纹误差的空间频率是干涉图中条纹频率的两倍。为了抑制环境振动的影响，在移相式干涉测量时尽量将干涉图调整到零条纹。除此之外，减振方法还有使用气垫光学平台、地基隔离减振、橡胶剪切减振脚、软垫与大理石联合减振等。

4) 干涉仪

数字干涉仪在精度检测中需要注意一下问题：

- ① 干涉仪本身的精度——移相干涉仪的精度可达 $\lambda/100 \sim \lambda/1000$ (PV)。干涉仪在使用中需要按周期进行检定或校准，在测试前还可以复核仪器“空腔”精度，从而确认仪器工作状态；
- ② 注意有效域（光阑）的选定——测试前定制尺寸，按尺寸要求制作有效域，并移到所需检测部位；
- ③ 去除边缘虚假的峰齿——干涉图采样后可以用Zernike多项式拟合，可能会在干涉图边缘产生虚假的峰齿。虚假的峰齿并不代表表面面形的轮廓，但会很明显的影响PV值的大小；
- ④ 干涉仪的相对误差和绝对误差；

⑤ 镀膜面的检测——一般来说，镀膜面的反射率会比未镀膜的参考平面大很多，二者相干光束的光强相差悬殊，导致干涉条纹对比度很差。为平衡参考和测试光束的光强，可以加入特制的薄膜衰减片，衰减测试光束。

八、如何消除平行平晶面形检测中表面反射波面的影响

当被测平晶双面抛光且楔角很小，接近平行平板时，干涉波参考波面、平晶前、后表面的反射波面将两两相干，并同时出现在一副干涉图中。这时若想要消除后表面反射波面的影响，我们可以采取以下几种方法：

- ① 在平晶后表面涂抹凡士林，由于凡士林的折射率与玻璃相近，使得平晶与凡士林界面的反射率大大削弱，以至于后表面反射波形成的干涉条纹消失。而凡士林与空气的界面由于面形极差，无法进行干涉；
- ② 在平晶后表面涂胶水或样干漆（虫胶酒精溶液，在光学车间中常用来保护非加工表面），在测量结束后撕去胶水风干后形成的胶皮即可；
- ③ 在平晶后表面贴上胶带（无特殊要求），这可以消除后表面反射光，在测量结束后撕去胶带即可。
- ④ 采用先进的波长调谐移相干涉仪，它可以在多组干涉图同时存在的情况下分别提取出各个波像差面，能得到平晶前后表面面形偏差，还可以得到被测平晶的光学均匀性。

九、镀膜后的面形变化与哪些因素有关

对平晶进行镀膜，镀膜后的面形肯定会发生一些变化，那么这些变化与什么因素有关呢，又该如何降低变化呢？这节先介绍镀膜后面形变化与哪些因素有关。

- ① 薄膜的应力，包括薄膜热应力和本征应力。薄膜应力是由沉积问题，热处理和激光技术等引起的。通常使用具有独特特征、强度和缺点的方法来制造薄膜，薄膜可能会破裂或空洞，有时会从其基材介质上剥离，而其他过程可能会干扰诸如耐湿性或抗氧化性等特性。当薄膜中的晶格与基板或支撑材料中的晶格完美对齐时，就会发生外延薄膜应力，当薄膜和材料成为单晶时会产生失配应力；当膜厚不均匀地分层时，通常会产生应力；在真空镀膜的过程中，薄膜和基底都都处于较高的温度，当镀膜结束后，整个薄膜系统冷却至室温，由于材料间热膨胀系数的不同，导致薄膜和基底之间因收缩不匹配而产生应变，从而产生热应力；一般来说，薄膜的本



应力与薄膜本身的结构有关，薄膜的结构又依赖于沉积工艺条件。在薄膜生长过程中，薄膜中的晶粒、晶界、杂质、空位、表面应力以及薄膜与基底界面间的晶格失配等因素导致了本征应力的产生。薄膜的应力会导致光学元件镜面发生变形，影响薄膜器件的性能、稳定性和使用寿命。

② 平晶的应力。当晶体生长速率过快时，会导致热应力随之增大；当长晶炉内温场不合理，温度梯度过大，会出现热应力；当固/液界面凸出度增加时，会出现晶体中的热应力随之增加的情况；除此之外，应力还与晶体生长方向、径向热膨胀系数、退火过程等等有关。晶体的应力会导致晶片产生面形偏差，进而会影响晶片的质量。

十、如何控制镀膜后的面形形变量

上一节介绍了镀膜后的面性变化与薄膜应力和平晶应力有关，本节就通过这两方面来说明如何控制镀膜后的面形形变量。

① 薄膜的应力。由于薄膜应力会改变薄膜的性能，使其在整个表面积上不一致地变形。所以了解并在薄膜的给定温度或材料特性范围内产生所需的应力变化至关重要。这些因素与其他控制过程（例如温度和气流）一起工作，以在薄膜生产中产生目标精度。平衡这些过程可以最大程度地减少相消干扰，并优化此微观技术的性能。使用适当的离子辅助，离子辅助可以获得更加致密的薄膜；使用其他膜料封口，例如对于出现了膜裂的镜片，如果外层加镀一层AF，就不再出现膜裂或脱膜；选择合适的尽可能低的沉积温度；选择尽可能长的降温冷却时间；选择热力学参数配套的膜料，可以有效防止膜裂及脱膜。

② 平晶的应力。通过减少平晶的应力来控制镀膜后的面形形变。晶体的实际生长速率低于极限生长速率，控制晶体的生长速率减少热应力；升高长晶炉内气压有助于减少晶体的轴向温度梯度，从而降低晶体中的热应力；选择适合的晶体生长方向，减少应力；...

参考文献

- [1] Griesmann U. Three-flat test solutions based on simple mirror symmetry[J]. Applied optics, 2006, 45(23): 5856-5865.
- [2] 现行光学元件检测与国际标准.



有什么问题请联系我们的
技术工程师，在线为
您解答



了解更多资讯，请关
注我们的公众号--上海
芯飞睿科技有限公司

