



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101268331 B

(45) 授权公告日 2012. 02. 22

(21) 申请号 200680009907. 8

(22) 申请日 2006. 04. 05

(30) 优先权数据

60/668, 385 2005. 04. 05 US

(85) PCT申请进入国家阶段日

2007. 09. 26

(86) PCT申请的申请数据

PCT/US2006/012527 2006. 04. 05

(87) PCT申请的公布数据

WO2006/107985 EN 2006. 10. 12

(73) 专利权人 QED 技术国际股份有限公司

地址 美国伊利诺伊州

(72) 发明人 保罗·E·墨菲

德拉吉沙·米拉迪诺维克

格雷格·W·福布斯

加里·M·德弗里斯

乔恩·F·弗莱格

(74) 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

11105

代理人 马高平

(51) Int. Cl.

G01B 11/24(2006. 01)

(56) 对比文件

US 2003/0117632 A1, 2003. 06. 26, 摘要、权利要求 1、说明书 [0002]、[0032]-[0045]、附图 1-12.

US 2005/0002285 A1, 全文.

CN 1529151 A, 2004. 09. 15, 全文.

审查员 钱凌影

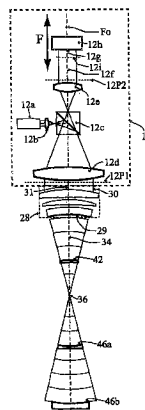
权利要求书 1 页 说明书 11 页 附图 10 页

(54) 发明名称

非球面的精确高分辨率测量方法

(57) 摘要

本发明提供一种系统,其包括在大大地提高精度的情况下从测试件测量表面或波前的多种方法,特别是非球面的较高空间频率。这些方法包括测试件的多个测量结果。这些方法之一包括校准和控制计量仪表的聚焦补偿,以避免在测试件相对仪表重新定位时的分辨率和精度的损失。其它方法补充常规平均法,用于抑制仪表固有斜率依赖不均匀偏差的较高空间频率结构。这些方法之一包括抑制零件较高空间频率结构,使得仪表偏差能够消除;另一种方法直接在测量结果内抑制仪表偏差。在适于特定几何图形和目标的各结构组合中可以使用所有的方法。



1. 在包括零件定位装置和波前测量仪表的计量系统中,一种用于获得对具有设计规定的潜在对称性的零件的表面或波前的高精度特征的方法,该方法包括以下步骤:

a) 在所述零件和所述仪表的不同相对位置获取多个测量结果,

b) 执行以下步骤的一个或多个步骤:

i) 利用所述设计规定的每个波前的局部曲率和所述仪表的校准常数的知识,确定所述仪表用于每个所述测量的最佳焦距位置;

ii) 通过以下方法校准在所述测量中的系统的仪表波前误差:平均具有所述仪表的相同测试条件和遵从所述潜在对称性的所述测量的所述不同相对位置的所述测量结果,以使得如果所述零件与所述设计规定完全一致,在所有所述不同相对位置的所述仪表测量结果相同;

iii) 通过平均在所述零件的相同标定位置获得的所述测量结果,减小未校准误差,但其中,两个或更多所述测量相对所述仪表具有不同的取向;和

iv) 通过将所述测量结果拼接在一起,减小未校准误差,其中在所述测量中,低空间频率信息被明确滤除或用自动补偿器隐含地补偿。

2. 在包括零件定位装置和波前测量仪表的计量系统中,一种在测试具有设计规定的潜在对称性的特定表面或波前时、测定和计算系统仪表波前误差的方法,该方法包括以下步骤:

a) 确定所述表面或波前的所述对称性;

b) 选择要校准的仪表和零件测量条件,包括仪表结构和所述零件的位置;

c) 在所述零件和仪表的不同相对位置获得多个测量结果,其中所述测量符合所述测量条件且所述不同相对位置遵从所述对称性,使得如果所述零件与所述设计规定完全一致,在所有所述不同相对位置的所述仪表测量结果相同;和

d) 由所述测量结果计算系统仪表波前误差的校准。

3. 如权利要求 2 所述的方法,其中,所述零件绕轴旋转对称,所述多个测量位置是在绕所述轴的环上,且所述校准计算是所述测量结果的平均。

4. 如权利要求 3 所述的方法,其中,所述平均从简单和加权中选择。

5. 如权利要求 2 所述的方法,其中,所述校准计算采用关于所述测量结果的知识,所述方法包括进一步的步骤:

a) 计算所述测量结果的加权平均值,所述加权通过估计测量数据的质量来确定;和

b) 从所述加权平均值去除特征,所述特征具有在理想空间带上与所述零件相同的对称性。

6. 如权利要求 3 所述的方法,其中,所述仪表具有潜在对称性,包括其它的步骤:

a) 确定所述仪表的所述对称性;

b) 在仪表与零件的不同相对取向获取多个测量结果,其中所述不同相对取向位置遵从所述对称性,以使得如果所述零件与所述设计规定完全一致,在所有所述取向的所述仪表测量结果相同,

c) 由所述测量结果计算仪表对称对系统仪表波前误差所起的作用;和

d) 在系统仪表波前误差的所述校准中将零件的作用与混合的对称误差分开。

非球面的精确高分辨率测量方法

技术领域

[0001] 本发明涉及表面和波前测量的方法和装置；更具体地说，涉及这种测量的自动操作设备、校准、和采集；最具体地说，涉及提高非球面和波前测量的精度的方法。

背景技术

[0002] 现有技术已知对表面和光学波前进行精确测量的方法和设备。用于获得光学的量测量的优选装置（非出乎意料地）基于光学技术。尽管可应用一些其它技术，在这个领域最普遍公认的计量仪表基于干涉测量原理。

[0003] 这种设备能够获得非常精确的测量。利用菲佐干涉仪 (Fizeauinterferometer) 等，直径为 $\sim 100\text{mm}$ 的部分表面的等高线图能够精确到大约 10 纳米（在可见光波长的 $1/10$ 和 $1/100$ 之间）。基于显微镜的干涉仪（例如，基于扫描白光技术的那些干涉仪）能够精确地测量特征的高度，在 $\sim 1\text{mm}$ 直径区域的范围内高于纳米。菲佐干涉仪和显微镜干涉仪的性能满足所有情况，除非最苛刻的应用。然而，随着时间的推移，应用要求变得更严格。例如，光刻具有精确散射（“闪光”）要求。这些需要在包括从 $0.1\text{--}10\text{mm-x}$ 波带的空间频率范围内的次纳米精度测量。这个波带是在菲佐干涉仪的横向分辨能力的高端，但是，在干涉显微镜的低端。

[0004] 市场上可买到的干涉显微镜能够达到本申请的高精度（或接近），但是，达不到横向范围要求。使用较低放大倍率的显微物镜增加横向范围，但这种方法仅仅对平坦（或接近平坦）表面有效。由于它们与仪表参考面的很大偏离（弯曲部分与平参考面相比），不能测量曲面（球面或非球面）。

[0005] 市场上可买到的菲佐干涉仪能够很容易达到横向范围要求。然而，为了达到需要的分辨率（ ~ 100 微米），干涉仪需要更大的放大倍率是很平常的。相当简单的光学设计改型能够解决这个问题。更大的挑战是菲佐干涉仪的高精度，它的精度通常比干涉显微镜的低。更低精度的主要因素是更高的光相干性、不能精确地聚焦在测试表面、和校准系统误差的更大难度。需要新发明来提高本领域当前的状态。相关的挑战是当测量的表面为非球面时极高的要求。

[0006] 随着测量光源的相干性提高，所得到的测量结果对缺陷诸如擦痕、灰尘颗粒、斑点、和阴影反射更灵敏。这种缺陷会降低测量结果的重复性并且也带来系统误差（偏差）。现有技术中存在有效降低光源相干性的各种技术，以降低这种误差，而不会过度降低其它性能。例如，参见 Kuechel 的美国专利 No. 5, 357, 341；Freischlad 的 No. 6, 061, 133；和 Deck 等的 No. 6, 643, 024。然而，这些技术使系统对聚焦误差更灵敏。而且，越高的空间频率表面特征的分辨率对聚焦误差的也越灵敏。因此，测量系统的合适聚焦变得非常重要。

[0007] 最佳焦距位置取决于干涉仪光学系统和测试元件的曲率半径。对于给定的球面（钢琴）测试件，只有当干涉仪光学系统变化时这些参数才变化。当测试零件时，这种情况一般不出现，所以干涉仪操作者通常能够手工调焦到足够精度，以获得满足要求的测量结果。然而，非球面具有两个局部主曲率半径，它们根据要检测的非球面的部位而变化。因此，

对于任何给定的部位,在指定要测试的标定半径时存在一些自由度。改变标定曲率半径意味着改变最佳测试位置(相对于干涉仪的光学系统)。这种测试物体位置的改变(变化)意味着最佳焦距位置也改变。因此,对于非球面,干涉仪的最佳焦距位置取决于当前要测量的表面部位。

[0008] 现有技术中,用户调整焦距的方法不足以实现在测试非球面的多点的自动测量(即,在测量中不需要用户手工重调焦距)。自动聚焦机构也提高测量重复性,因为会消除操作者手工聚焦技术的振动。其它装置(诸如照相机)采用自动聚焦技术,但是,这些装置不能直接应用于光学表面的测量。所谓的“无源”方法依靠优化图像的结构对比度。因为光学表面通常没有明显的表面结构,即,它们非常光滑,这种方法失效(非常像试图对无特征的目标诸如无云的天空聚焦时的情况)。然而,“有源”自动聚焦方法测量用一些辅助仪表测量目标的距离,并且利用光学系统的知识来计算必需的焦距位置。尽管这个基本原理可应用于波前测量仪表,还有潜在改进的地方。因为波前测量仪表已经将发射照明光(和检测反射光)作为它的基本功能部分,为了测量距离,采用这种仪表而不采用其它系统的手段是理想的。而且,波前测量仪表的精确光学参数并不被人熟知。(例如,它可以使用市场上可买到的精确设计的透镜子组件。)因此,当它们符合焦距时,用于校准这些参数的方法要明显改进。

[0009] 具有高空间频率的系统误差的校准也是必须改进的地方。参考波前误差(在测量中的空间依赖高度偏差)是非常精确的限制。在现有技术中存在几种技术校准这种误差,包括双球形、不规则球、和具有互锁补偿器的子孔径拼接(subaperture stitching)。例如,参见 J. C. Wyant, “Absolute optical testing; better accuracy than the reference”, *Photonics Spectra*, March 1991, 97-101; J. C. Evans and R. E. Parks, “Absolute testing of spherical optics”, *Optical fabrication and Testing Workshop*, OSA Technical Digest Series 13, 185-187 (1994); 和 P. Murphy, J. Fleig, G. Forbes, 和 P. Dumas, “Novel method for computing reference wave error in optical surface metrology”, *SPIE Vol. TD02*, 138-140, 2003。然而,这些方法不适于参考波前中较高分辨率特征的极其精确的校准。高空间频率波前特征在空间传播是比低空间频率传播得快。因此,在要测量测试光学系统的共轭位置校准这些特征非常重要;否则,在参考波前中较高空间频率成分的测定不准确。例如,对 50mm 直径的球体进行的球校准不能准确地校准 200mm 曲率半径的测试件的较高空间频率。校准的曲率半径与测试件的曲率半径明显不同,因此,参考波前误差的较高空间频率成分也不同。

[0010] 对于球面测试件,通过对与测试件具有大约相同半径的零件简单地进行校准,或通过对测试件本身进行校准,球技术适合于准确地校准参考波前的较高空间频率。该零件可能是球形截面(而不是完整的球),但是,如果该零件的尺寸超过测量区域的某个边缘(近似地,表面结构具有的感兴趣的最长空间波长不适当地空间相关),出于这个原因它起作用。如果完整的球形不用于校准,由于零件的表面轮廓的空间相关性,求平均值的技术不必集中于参考波前的正确值。然而,这种相关性很少延及较高空间频率,让它们利用不是完全球形的零件充分地校准。应该注意,在较低空间频率也很重要,包括具有互锁补偿器的子孔径拼接的方法与非球平均值先后起作用,以使在整个可测量空间频率的范围具有参考波的准确参数。然而,这种拼接技术通常不可应用于非球面。因此,需要另外的方法

来获得非球面上较高空间频率波前误差的校准。

[0011] 因此,本领域需要的是自动设定测量装置焦距位置的方法,优选地,是需要比较少知道实际聚焦光学系统的方法。

[0012] 本领域还需要的是校准或另外减小测量装置的系统误差的方法,特别是,测量非球面时具有较高空间频率的方法。

[0013] 本发明的主要目的是,当知道测试表面的局部曲率半径时,能够使计量系统对测试表面自动聚焦。

[0014] 本发明的另一目的是,提高波前测量仪表的精度,特别是,对于非球面和较高空间频率。

发明内容

[0015] 简而言之,本发明提供用于提高计量系统的测量精度的方法,包括:包括多轴元件定位装置并嵌入波前测量仪表的机器。这些方法包括以下步骤:校准未知光学系统的聚焦参数;仅仅知道测试件的标定局部曲率半径来自动设定焦距;校准用于非球面波前的参考波偏差;和减小未校准误差的影响。这些精确提高的方法主要应用于非球面的较高空间频率(高于测试件上很小波动)。

[0016] 本发明的一方面是校准波前测量仪表的聚焦参数。不需要成像系统的现有知识。这种一次性校准的结果结合测量区域中已知的测试件的标定局部曲率半径能够自动聚焦。

[0017] 本发明的第二方面是现有技术随机平均技术的变化,其能够应用于一些潜在对称性(underlying symmetry)情况下的非球面波前测量,(也许是作为球体、圆环等旋转),在本文中称为“环平均”。因为系统波前误差随着所测量的图形而变化,在球面零位测试结构中进行的校准不可应用于非球面非零位测试。然而,将测量结果限制到标定形状相同的那些结果的平均值、提供非球面与在该环上对称零件误差混合的系统波前误差的测定。

[0018] 本发明的第三方面是随机平均技术的另一变化形式,其除了空间之外通过波前斜率求平均值。存在依赖于所测量波前斜率的波前误差成分(这就是纯随机平均值对于非球面测试是无效的原因)。测量相同位置的测试件,但是有不同的斜率分布(例如,通过稍倾斜的测试件得到的),让这种斜率依赖误差平均值连同普通空间依赖参考波偏差减小。

[0019] 本发明的第四方面抑制在拼接测量的中空间频带中的低空间频率的影响。当拼接时,任何低空间频率误差易于引起拼接结果的拼接假象(例如,在子孔径边缘的台阶)。这种边缘具有明显的较高空间频率成分,因此,低空间频率误差能够破坏较高空间频率的特性。在拼接之前(通过拟合或滤除它们)消除低空间频率成分,或实际使它们最佳化,因为拼接中的补偿器能够降低较高频率的破坏。

[0020] 在本发明的一个实施例中公开了在包括零件定位装置和波前测量仪表的计量系统中,一种用于获得对具有设计规定的潜在对称性的零件的表面或波前的高精度特征的方法,该方法包括以下步骤:a)在零件和仪表的不同相对位置获取多个测量结果,b)执行以下步骤的一个或多个步骤:i)利用设计规定的每个波前的局部曲率和仪表的校准常数的知识,确定仪表用于每个测量的最佳焦距位置;ii)通过以下方法校准在测量中的系统的仪表波前误差:平均具有仪表的相同测试条件和遵从潜在对称性的测量的不同相对位置的测量结果,以使得如果零件与设计规定完全一致,在所有不同相对位置的仪表测量结果相

同 ;iii) 通过平均在零件的相同标定位置获得的测量结果,减小未校准误差,但其中,两个或更多测量相对仪表具有不同的取向 ;和 iv) 通过将测量结果拼接在一起,减小未校准误差,其中在测量中,低空间频率信息被明确滤除或用自动补偿器隐含地补偿。

[0021] 在本发明的一个实施例中公开了在包括零件定位装置和具有聚焦台和多个不变的第一级特性参数的波前测量仪表的计量系统中,一种用于确定波前测量仪表的第一级光学参数和用等式

$$\frac{1}{ob+ob_ref} + \frac{1}{im+im_ref} = \frac{1}{f}$$
描述的图像共轭的方法,该方法包括以下步骤

骤 :a) 确定“ob_ref”,其是在仪表内从物方参考点到第一主面的偏移量 ;b) 确定“ob”,其是从测试表面到物方参考点的位移量 ;c) 确定“im_ref”,其是在仪表内从聚焦台机械原点 Fo 到第二主面的位移量 ;d) 确定“im”,其是在仪表内聚焦台的位置 ;e) 确定“f”,其是仪表光学系统的焦距。优选地,该方法还包括以下步骤 :a) 在理想的光学结构中设置波前测量仪表 ;b) 在计量系统中设置具有已知半径和离其共焦位置已知位移的测试表面的零件 ;c) 调整聚焦台的位置,直到表面被精确聚焦 ;d) 记录得到的一对共轭位置的结果,其包括聚焦台的位置和零件相对已知物方参考点的位置 ;e) 重复步骤 b 至 d,以获得多个不同对的共轭位置 ;和 f) 通过以下方式对对共轭位置进行拟合计算 :求出仪表光学系统的多个不变的第一级特性参数,至少包括焦距、从物方参考点到第一主面的位移、和从聚焦台机械原点到第二主面的位移。优选地,该方法用于确定聚焦台的位置,使得仪表聚焦在特定位置,该方法还包括以下步骤 :a) 基于测试波前的局部曲率半径和波前相对于物方参考点和第一主面的位置的知识,计算特定位置的物方共轭位置。b) 基于物方共轭位置和所知道的仪表光学系统的焦距位置,计算像方共轭位置 ;和 c) 基于像方共轭位置和所知的从聚焦台的原点到第二主面的位移,计算聚焦台位置,其中仪表聚焦到特定位置。

[0022] 在本发明的一个实施例中公开了在包括零件定位装置和波前测量仪表的计量系统中,一种在测试具有设计规定的潜在对称性的特定表面或波前时、测定和计算系统仪表波前误差的方法,该方法包括以下步骤 :a) 确定表面或波前的对称性 ;b) 选择要校准的仪表和零件测量条件,包括仪表结构和零件的位置 ;c) 在零件和仪表的不同相对位置获得多个测量结果,其中测量符合测量条件且不同相对位置遵从对称性,使得如果零件与设定规定完全一致,在所有不同相对位置的仪表测量结果相同 ;和 d) 由测量结果计算系统仪表波前误差的校准。其中,零件绕轴旋转对称,多个测量位置是在绕轴的环上,且校准计算是测量结果的平均。其中,平均从简单和加权中选择。其中,校准计算采用关于测量结果的知识,方法包括进一步的步骤 :a) 计算测量结果的加权平均值,加权通过估计测量数据的质量来确定 ;和 b) 从加权平均值去除特征,特征具有在理想空间带上与零件相同的对称性。其中,仪表具有潜在对称性,包括其它的步骤 :a) 确定仪表的对称性 ;b) 在仪表与零件的不同相对取向获取多个测量结果,其中不同相对取向位置遵从对称性,以使得如果零件与设计规定完全一致,在所有取向的仪表测量结果相同, c) 由测量结果计算仪表对称对系统仪表波前误差所起的作用 ;和 d) 在系统仪表波前误差的校准中将零件的作用与混合的对称误差分开。

[0023] 在本发明的一个实施例中公开了在包括零件定位装置和波前测量仪表的计量系统中,一种在从零件测试特定表面和波前时减小系统仪表波前误差的效果的方法,该方法包括以下步骤 :a) 选择零件上要测量的标定位置 ;b) 在标定位置获得多个测量结果,测量

具有公共数据点,其中每个测量结果不同于在至少一个位置和取向的另一测量结果;c)平均多个测量结果,以形成公共坐标系统,同时用来解释测量结果的任何相对平移。

[0024] 在本发明的一个实施例中公开了一种从表面的多个重叠子孔径数据图合成物方表面的全数值孔径图的方法,包括以下步骤:a)选择减小重叠子孔径数据图的测量误差的至少一种方法;b)从多个区域采集多个子孔径数据图,至少每个子孔径数据图的一部分与至少一个相邻子孔径数据图的一部分重叠,以形成重叠数据区域;c)将多个重叠子孔径数据图投影到具有标定畸变图的球坐标系统;d)从由具有自由放大率范围的自由补偿器和具有相同限制放大率的互锁补偿器组成的两组中的至少一组选择多个误差补偿器,以补偿重叠子孔径数据图中的拼接误差;e)同时通过选择的误差补偿器的线性组合,将重叠子孔径区域中数据图的每一个的不一致最小化。该方法还包括过滤子孔径数据图,过滤发生在采集步骤之后、但在不一致最小化步骤之前,其中过滤从子孔径数据图中去除低空间频率形式。该方法还包括优化重叠数据区域中的低空间频率偏差,其中低空间频率偏差用数学基本函数表示,每个数学基本函数用自由补偿器表示。该方法还包括平均斜率依赖误差,其中子孔径数据图包括在重叠子孔径数据图中相同点上的不同局部斜率的重叠数据,以平均仪表的斜率依赖系统误差。

[0025] 本发明的各个应用方面总体或部分提供比现有技术更高的测量精度,特别是对于非球面上较高空间频率结构的测量。

附图说明

[0026] 下面结合附图阅读下面的说明书,本发明的下列和其它目的、特征和优点,以及目前优选的实施例将更清楚,其中:

[0027] 图 1 是根据本发明的多轴计量系统的立体图;

[0028] 图 2a 是图 1 所示的仪表中包含的六轴的示意性立体图;

[0029] 图 2b 是图 1 所示的仪表的旋转轴之间的偏移的示意性立体图;

[0030] 图 3 是表示个中各种球面测试件的共焦/零位位置的示意图(图 3a-3c),其中测试件定位成测试表面的标定中心精确地与从所包含的仪表出现的球面波前的中心一致;

[0031] 图 4 是表示在所包含的仪表发射的校准光场中各个平面测试件(图 4a-4b)位置的示意图,其中测试件定位成该件表面法线与场的传播方向平行;

[0032] 图 5 是包括聚焦阶段(“F”轴)的波前测量仪表的样品内部图;

[0033] 图 6 是表示利用真实数据的焦距参数校准的示例性测定结果和数据拟合的曲线图;

[0034] 图 7a 是从垂直于它的对称轴看时,实例旋转对称非球面和样品子孔径测量区域的示意图(侧视图);

[0035] 图 7b 是图 7a 所示的实例非球面沿平行于其对称轴方向的视图(俯视图);

[0036] 图 7c 是实例非球面的垂度的数学描述,其中‘r’是离旋转对称轴的距离;

[0037] 图 7d 是实例非球面相对于波前测量仪表定位的视图,以最佳地看到样品子孔径测量区域;

[0038] 图 8a 是样品非球面的垂度(沿平行于其对称轴的方向、从测试件顶点的正切面测量的偏差)为离对称轴的表面点距离‘r’的函数的曲线图;

[0039] 图 8b 是样品非球面的局部主曲率为 $\lambda_{r'}$ 的函数的曲线图：‘切向’主曲率在包含对称轴和特殊表面点的表面法线的平面内测量，而‘径向’主曲率在包含表面法线还垂直于径向曲率的平面内测量；

[0040] 图 8c 是样品非球面与最佳拟合球面的横距作为 $\Lambda_{r'}$ 的函数的曲线图，其中最佳拟合球面的表面通过非球面的中心和边缘；

[0041] 图 8d 是非球面与最佳拟合球面之间的斜率差作为 $\Lambda_{r'}$ 的函数的曲线图；

[0042] 图 9a 是样品非球面与离开非球面轴 20mm 为中心的参考球面在 10mm 直径区域范围内的横距的曲线图，其中参考球面的曲率是局部半径和离轴 20mm 的环形曲率的平均值，优选除垂直比例放大的局部表面缺陷之外；

[0043] 图 9b 是参考表面与球面的横距的曲线图，优选除垂直比例放大的单个局部表面缺陷之外；

[0044] 图 9c 是利用图 7d 所示的样品测试设备，通过测试图 9a 所示的表面与图 9b 所示的参考表面获得的样品测量结果；

[0045] 图 9d 是样品环形平均值校准，这个实例包括沿非球面 20mm 对称环的不同位置的 5 个无噪音测量结果的平均值；和

[0046] 图 9e 是直接采用环平均校准的测量结果实例（从图 9c 的表面测量结果减去图 9d 的校准结果）；

具体实施方式

[0047] 本发明提供提高计量系统的测量精度的方法，所述计量系统包括：包括多轴测试件定位装置和嵌入波前测量仪表例如菲佐干涉仪的机器。这些方法减小仪表波前的对称误差的误差成分，特别是非球面波前的较高空间频率误差（大于测试件上的小波动）。

[0048] 参照图 1 和 2，根据本发明的计量系统 10 包括安装至（“嵌入”）多轴机器 14 上的波前仪表 12，例如，干涉仪，多轴机器 14 限定具有在测试过程中容纳和移动测试件 20 的镜台 18 的工作台。机器运动结构被示出（图 2a），其中有六个机械轴；三个用于平移（X, Y, Z），三个用于旋转（A, B, C）。应该理解，其它轴结构（包括轴的不同数量和 / 或顺序）可能在本方面的范围内。这六个轴的每个轴的运动例如通过致动器 16 独立可控制，致动器 16 诸如是具有常规设备和齿轮装置的步进电机组。所有这些机械轴可以自动或手动控制。控制的类型不是处理的必要部分。

[0049] 如图 3 所示，机器轴必须将测试件定位，使得嵌入仪表波前的焦距 36 名义上与非平面测试件表面的任何具体部分的曲率中心一致（或在标定平面测试件的情况下，仪表波前的传播方向 34 名义上平行于测试表面法线 38）。在本文中这称为表面“共焦”位置。共焦位置经常也称为“零位”，意指重新进入仪表的波前与用于测试的仪表存在的波前近似或相同。图 4 示出名义上的平面测试件的情况。应该注意，当用球面或平面波前测试时，非球面的大多数区域没有唯一的零位或共焦位置。然而，它们具有最接近近似共焦的位置（虽然精确的位置某种程度上取决于使用的“接近”的定义；最小均方波前偏差和最小峰值波前斜率差是两个实例）。参见图 7，它是实例非球面表面的示意图。图 8b 图示非球面的局部曲率半径的变化，以及最靠近共焦位置的曲率 132，用于测试远离对称轴 20ram（图 7d 中的简图）。

[0050] 波前仪 12 最好包括（可能是电脑控制的）用于设定仪表像面的机构（聚焦台，在本文中称为“F”轴）。图 5 详述包括这种 F 轴的示例性菲佐干涉仪。光源 12a 发射光束，光束被透镜 12b 聚焦，然后，部分地被分束器 12c 反射（部分透过分束器 12c 的光一般忽略不计），然后，被透镜 12d 准直。然后，光透过透射球面 28 或透射平面 32。对于透射球面，优选仪表内部光轴 31 与仪表外部光轴 34 和 Z 轴传播方向两者相互平行。透射球面的最后表面，即，参考表面 29，对齐，使得它的曲率半径在平面上的入射波前的曲率半径一致。有些光被透射，会聚到点 36，而其余光反射回仪表（“参考波前”）。然后，透射的光从测试表面（例如，42, 46a, 或 46b）并再进入波前（“测试波前”）。参考波前和测试波前都通过透镜 12d 返回并且部分地透过分束器 12c（这次，从分束器 12c 部分反射的光一般忽略不计）。然后，光通过透镜 12e，该透镜 12e 被优先选择用于准直光（形成图像空间的系统远心）。在通过所有光学系统之后，平面 12i 名义上与测试表面共轭。聚焦轴 F 提供所述装置，以与沿名义上平行于光轴 12f 的轴将仪表检测器平面 12g 移动至 12i，从而达到用于具体测试表面的最佳焦距。仪表检测器平面 12g 的两个实际实例包括 CCD 成像阵列（包括在包装 12h 中的其它视频电子设备）和散射盘（包括在包装 12h 中的另外中继成像光学元件）。

[0051] 通常，在现有技术中，波前测量仪表是它的光学元件将波前成像到某个检测平面（其中记录波前的强度和 / 或相位）的光学系统。这种仪表通常要求将表面（或光学系统）放在离仪表特定距离的条件下测试，如图 3 所示。该距离取决于仪表的光学系统以及测试表面的曲率半径；共焦位置是在等于离仪表焦点 36 的表面曲率半径的距离。因此，具有不同半径的不同测试表面，诸如 42, 46a 和 46b，放在离仪表不同的距离（并具有不同的物方共轭）。仪表检测平面的最佳位置（1 与像方共轭 12i 一致的 12g）改变，结果，通常根据等式 1： $\overline{obj} + \overline{img} = \overline{f}$

[0052] 其中“obj”是从测试表面到仪表的第一主面 12P1 的位移量，“img”是从仪表的后主面 12P2 到像面的位移量（即，检测平面的最佳位置），“f”是仪表光学系统的焦距。

[0053] 通常，仪表操作者手工（和目视）调整检测平面 12g（并因此“划圈”），以对给定测试结构（与测试表面图像共轭 12i 一致的 12g）实现最锐利的图像。为了让操作者看清楚，当达到最加焦距时，这一般需要物理边缘或某另一高对比度特征（例如，测试件边缘，或插入仪表波前以临时提供聚焦边缘的一张纸）。因此，现有技术的聚焦方法不需要知道物体的位置、仪表焦距、或仪表主面位置。

[0054] 根据本发明的自动聚焦系统比现有技术的波前测量仪表具有明显改进。本发明建立在所谓的“有源”聚焦系统的基本概念上，但是有两个主要改进：

[0055] 1. 本发明是自校准，因此，不需要知道仪表光学设计；和

[0056] 2. 它采用测试件标定局部曲率半径的现有知识计算物距，不需要另外的测距机构。

[0057] 本发明没有采用仪表光学系统的详细知识，因此，等式 1 不能利用“原态”。相反，本发明采用的模式由等式 2 给出。

[0058] 等式 2 $\frac{1}{ob + ob_ref} + \frac{1}{im + im_ref} = \frac{1}{f}$

[0059] 其中

[0060] ● “ob_ref”是从参考点（已知，诸如参考表面 29 的顶点或点 36）到第一主面

12P1(未知,并且不变)的偏移量;

[0061] ●“ob”是从测试表面到物方参考点(已知,并取决于测试件的标定局部曲率半径)的位移量;

[0062] ●“im_ref”是从F轴机械原点Fo到第二主面12P2(未知,并且不变)的位移量;

[0063] ●“im”是F轴的位置(通常,这是我们试图正确设定的可变参数);

[0064] ●“f”是仪表光学系统(未知,并且对于给定的仪表光学元件的设定不变)的焦距。

[0065] 不变的未知参数通过使用本发明的方法校准。

[0066] 校准的参数包括“ob_ref”、“im_ref”和“f”。校准需要在几个不同共轭位置测试一个或多个测试件。校准方法包括以下步骤:

[0067] 1. 在理想光学结构中设定仪表;

[0068] 2. 在多个不同物体和F轴位置采集数据,采用以下子步骤在每个位置对获得数据;

[0069] a) 设立部分已知半径(例如,将它安装在工作台上并且将其与仪表波前对齐;对齐包括已知的Z偏移),

[0070] b) 调整F轴位置,直到表面在明显可见位置(随意采用辅助对齐的辅助设备,诸如纸的稍微滑动),

[0071] c) 记录F轴的位置和物体位置(注意物体位置是相对于物体参考点);

[0072] 3. 对多个物体和F轴位置对进行拟合计算(例如,利用非线性最小平方拟合法则),利用“ob_ref”、“im_ref”和“f”作为自由度使拟合最化。例如,参见图6,其中参考表面29的顶点是物方参考点。

[0073] 在完成这些步骤之后,现在已知三个不变的参数。因此,达到最佳焦距的F轴位置可以用已知的“ob”(一旦测试件的标定局部曲率被设计,就已知)。以这种方式聚焦仪表提高系统的性能,最特别地是,对于在非球面波前具有的较高空间频率。

[0074] 通过校准或平均波前测量的对称偏差还可能提高测量精度。对于球面的零位测量,现有技术富富有余。一种已知的方法,在本文中称为“随机平均值”,对表征波前测量仪表的较高空间频率偏差特别有用。简单地说,现有技术平均方法包括以下步骤:

[0075] 1. 选择其横向延伸大于波前测量仪表的延伸、并且它的半径尽可能接近测试件的半径(实际上,测试件能够经常用作校准件);

[0076] 2. 在包括多轴测试件定位装置和波前测量的系统中安装校准件,将校准件移到它的共焦位置;

[0077] 3. 求得在校准件表面的不同位置的多个测量值(其测量应该仍在共焦位置);注意,对称误差在每次测量中相同,而检测件的任何偏移或其它噪音测量与测量之间不同;

[0078] 4. 求总测量值的平均值,从而在本测试条件下,构成系统仪表波前误差的测定值。

[0079] 现有技术平均技术取决于基本上与在零件不同测量位置的对称误差,以及在感兴趣的某个空间带上无关联的零件误差(因此,它的平均值趋于零)。但是,要注意对称误差通常作为单次测量的位置斜率的函数而变化。球面零件在测量时一般没有这种斜率变化,从而它们符合波前偏差不随零件位置变化的要求。然而,非球面测量通常达不到这个标准(例如,参见图8d,在非球面上的斜率变化),因此,现有技术随机平均方法的标准设备不能

提供足够的校准。

[0080] 本发明基于这个基本平均方法,而且存在应用非球面的平均技术和波前测量的新方法。这种新的平均方法之一,在本文中称为“环平均”法,能够应用于具有某种潜在对称性的非球面。例如,考虑旋转对称的非球面 110,如图 7a 所示(在图 7c 中给出数学描述)。考虑以距离非球面对称轴 112 为 $r = 20\text{mm}$ 的位置 122 为中心的测量区域 124。尽管局部斜率在零件上变化,如图 8d 所示,它沿绕对称轴的任何特定环名义上是不变的,诸如距离对称轴 112 为 $r = 20\text{mm}$ 的环 126。标定形状和斜率与在环 126 上的中心 122 的任何测量区域 124 是相同的,环 126 设置成从中心 122 到仪表的位移保持不变(即,没有纵向平移)。图 9a 图示这种情况,并且包括小缺陷(与理想非球面形状的偏差)145。另外考虑图 9b,除了小缺陷 143 之外,它是完美的参考表面的轮廓图。当对球面波前测量非球面时,如图 7d 所示,发射的光 133 和反射的光 135 光路不一致。因此,仪表的任何缺陷,诸如 143,对反射的光 135 具有不同的影响。因此,如果 143 是唯一的仪表缺陷,实际测量类似图 9c,应该注意,缺陷 143 被分成两部分(一部分加入相同位置作为测试表面缺陷 145,由于反射波前 135 的位移,另一部分被剪切。因此,图 9c 所示的测量不是图 9a 所示表面的精确表示。值得注意的是,现有技术平均方法获得有些像 9b 的校准图,其实际上没有补偿实际仪表误差,由于反射光的光路不同于校准所使用的光路。

[0081] 多次测量可以在环的不同位置进行(其对反射的光 135 具有大致相同的图形)和平均,以提供在环上测量的对称波前误差的估计值。具有斜率和空间的系统误差在测量时保持相同,而与测试表面的偏差将趋于平均数。图 9d 表示沿环的不同位置进行并平均的 5 次测量结果;参考表面(和任何其它干涉仪光学元件,假定在这个实例中正确)的缺陷保持,只是测试表面缺陷被平均。然后,测试测量值可以减去总的环平均值,以获得测试表面缺陷的更准测定。例如,图 9e 是图 9d 减去 9c 的结果,并且有效地将表面上的缺陷 145 与仪表缺陷 143 分离。应该注意,对准误差(诸如倾斜和平移)改变测量的斜率分布,从而改变系统波前误差。因此,在用于计算校准的每次测量中应该存在相同量的对准误差,利用校准的任何测量应该具有目前对准误差的量(既,相同的标定共焦位置对于所有要平均的测量)。对准误差的变化降低校准的量。

[0082] 尽管用于图 7-9 的实例非球面是完全旋转对称,这不是本发明需要的特征。本发明应用于任何测试表面或潜在对称的波前,唯一的要求是零件的标定形状在零件表面的多个位置相同(因此,允许测试件误差的空间平均值出现在表面斜率图形标定相同的区域)。非球面的偏轴部分可以采用沿子孔径的“圆弧”分布的子孔径上的平均值,圆筒可以采用线,而环面可以采用环或部分环。更普通的对称也是可能的,诸如 4 点(沿 X 轴和 Y 轴两者反射对称),其中只有 4 次测量能够有效地用于感兴趣的每个校准点(但 4 次比 1 次好)。

[0083] 根据本发明计算对称仪表波前误差的方法,包括以下步骤:

[0084] 1. 确定所述表面或波前的对称性(例如,测试件的位置具有相同规则的形状);

[0085] 2. 选择仪表和测试件测量条件,在这种条件下校准(不像现有技术的普通低级校准,较高空间频率特征的精确校准可以对仪表参数十分敏感,诸如聚焦阶段的位置),特别是感兴趣的零件的位置(例如,在前面的实例中,距离轴 20mm 环上的任意位置被认为是“感兴趣的”);

[0086] 3. 在零件的仪表的不同相对位置获得测量值,其中测量满足理想的测试条件并具

有相同的标定测量（规定的测量是相同的，尽管在测试件上的加工缺陷实际上造成实际测量稍微不同）；和

[0087] 4. 有所述测量值计算系统仪表波前误差的校准。

[0088] 最简单的计算是求所有获得的测量值的平均值。采用现有知识的更精确的计算当然是可能的。例如，如果一数据点被已知（或认为）比另一点具有更低的信噪比，会增加或甚至减少平均数。而且，如果没有达到一定的可信度（例如，在该点校准被认为有效之前，要求至少 4 个“好”点），校准本身的点能够减少。其它拼接可能分离被错误测定的空间成分，这些在新段落中进一步描述。

[0089] 尽管这种方法对非球面测量有显著的提高，与标准的平均方法相比，它有两个缺点：它效率更低，它对于一定对称性将被测量与偏差混合。效率损失相当明显：一个“环”的正确校准通常不能应用于具有不同局部主曲率半径的另一个环，而标准平均校准对任何和所有测试球面的位置有效。这是本身比球面具有更少对称性的非球面的必需结果。误差混合问题当然也从对称的平均值出现。如果要测试的表面 / 波前具有与零件规定的相同对称性的特征，它们将持续简单的测量值平均数。实际上，零件形式在测量位置上变化的假设不成立。

[0090] 本发明的另一方面是应用现有知识和假设来帮助解决混合问题。平均值的任何“对称成分”的源（例如，对于旋转对称非球面，与环对称的测量部分）是不确定的（它可能来自仪表偏差或测试的零件）。这种测量的对称成分以平均数出现，因此，假定默认值是波前测量的部分对称误差（而不是零件上的特征）。应该注意，这包括非球面形状的旋转对称形式（在零件上的“已知”并且不是部分系统误差），如图 9d 所示，从而图 9e 不包括非球面形式。尽管校准不能区别测试件的对称成分与参考波前的对称成分，获得的平均值可以后处理，以便将一定的特征分配给测试件，而不是对称误差。一些有用的后处理包括（但不限于）去除所有对称成分或去除对称成分的某种过滤形式。“有用”取决于应用和其它技术补充处理（诸如本发明另外的因素，在下文中描述）。例如，如果测量的目标是零件上高亮的任何凹槽结构，对称成分的高通过滤形式可以从平均值去除。这样，假定任何平均的凹槽形成零件表面，而不是指定校准。虽然它也可以“已知”非球面形状是在零件上，它便于将它分配给校准，以高亮凹槽结构。它易于看见结构缺陷，如图 9e 所示，例如，因为表面形式已经随平均值减少。尽管它以这种形式指定误差不“正确”，它对有些缺陷提供更方便的分析，因此，优选任意指定测试表面形式为这种情况的校准。

[0091] 混合问题更直接的解决方法包括利用仪表的旋转对称，以在任何给定子孔径内离析零件形状的旋转平均值。这可以用与仪表对称轴旋转对称的零件的许多不同位置获取多个数据组。这些旋转用软件单独地移动，使得零件在所有数据图上具有固定取向。显而易见，获得图形的平均值抑制仪表的空间不均匀分布，并将改善的通路提供给测试件 / 波前的特征。这样，它可能继续获得零件有利于上述混合对称误差的明确测定。因此，混合误差的根源被消除，从而可以配置效果。

[0092] 平均方法设法平均测试件的影响，以便对特定波前斜率分布得到确定的对称波前偏差。因此，该方法的输出是校准图形；图 9d 表示这种图形的线性图，其可以减去另外的测量值（诸如图 9c），以获得至少去除一些波前偏差的测试表面（诸如图 9e）更精确的测定。本发明将其它的扩展提供给现有技术平均技术，设法测量测试表面，而不是波前偏差（平

均对称波前误差代替测试表面)。

[0093] 原理是,尽管这种波前误差对于特定波前斜率分布是不变的,它们随着斜率而变化。因此,存在通过平均零件相同位置的测量值减小这种误差的潜能,但是,通过仪表的不同部分。图 7d 的图示规定表面 110 的特定位置的反射波前 135。它有可能或多或少地测量中心 122 的相同区域 124,而且定位倾斜和 / 或纵向位移的零件(得到不同的对准形式和通过仪表不同路径的反射波前 135)。在本文中,倾斜定义为测试表面与表面 110 在位置 122 的入射光束的垂线的偏离,或测试表面与波前的平行线的偏离。因为系统误差的空间图形随着输入波前斜率变化,该误差将平均到某种程度(提高测试表面测量的保真度)。而且,这种方法最可能应用于非球面波前较高空间平率的测量。有可能将这种技术与环平均接合,还有可能接合零件绕仪表对称轴的旋转,非常像消除前面混合误差的歧义的讨论。

[0094] 本发明前述因素在减少由波前测量仪表引起的较高空间频率波前误差方面特别有效。它们对减小低空间频率误差实际上具有更低效率。往往是其它技术在测量低空间频率误差方面有效,较低频率的容差往往也更松。然而,较高空间频率数据的精确子孔径拼接可以通过低空间空间频率来限制。当拼接时,任何未补偿的误差将造成重叠区域的矛盾。当这种误差是低空间频率时,它们在子孔径边缘造成拼接假象(台阶)。因为这种假象具有宽频谱(低频成分和高频成份都有),拼接能够使低频误差不利地影响中频性能。本发明另外的因素能够缓解这个问题。通过从子孔径数据去除任何低空间频率信息(包括在测试波前实际存在的任何信息),减小低频误差影响拼接假象的电压。这种过滤必须仔细地进行,特别是在测试波前中实际存在低空间频率的情况下,因为在子孔径中获得的差影响拼接假象。有些方法包括选配多项式和频率范围(傅立叶)过滤。

[0095] 如果低频去除不足以抑制拼接假象,进一步改进可行。取而代之,简单地去除低频形式,它被优化以最小化子孔径之间的不一致(从而减小拼接假象)。根据美国专利 6,956,657,低频形式定为自由补偿器(free compensators),其公开的相关内容在本文中并入作为参考,其在拼接计算以最小化任何数据不一致的过程中被单独优化。一种可能的实现方案如等式 3 所示,其中单独的 Zernike 多项式不包括。

[0096] 等式 3 : $f_j(x,y) = \sum_k^j a_{jk} Z_{jk}(j,c,y)$

[0097] 应该注意,Zernike 多项式具有对子孔径指数(j)的依赖性,因为子孔径绘成零件坐标系统能够使它们失真。应该理解,本发明不限于低频形式任何具体表示的范围;其它形式(诸如傅立叶系数)也是可能的。重要的是,该表示法获取造成拼接假象的低频变化。

[0098] 尽管参照各个具体实施例描述了本发明,应该理解:在描述的本发明概念的精神和范围内可以做出许多变化。因此,意味着本发明不限于所述的实施例,而是由下列权利要求的语言限定的整个范围。

[0099] 本申请要求 2005 年 4 月 5 日提交的未审美国临时申请 No. 60/668,385 的优先权。

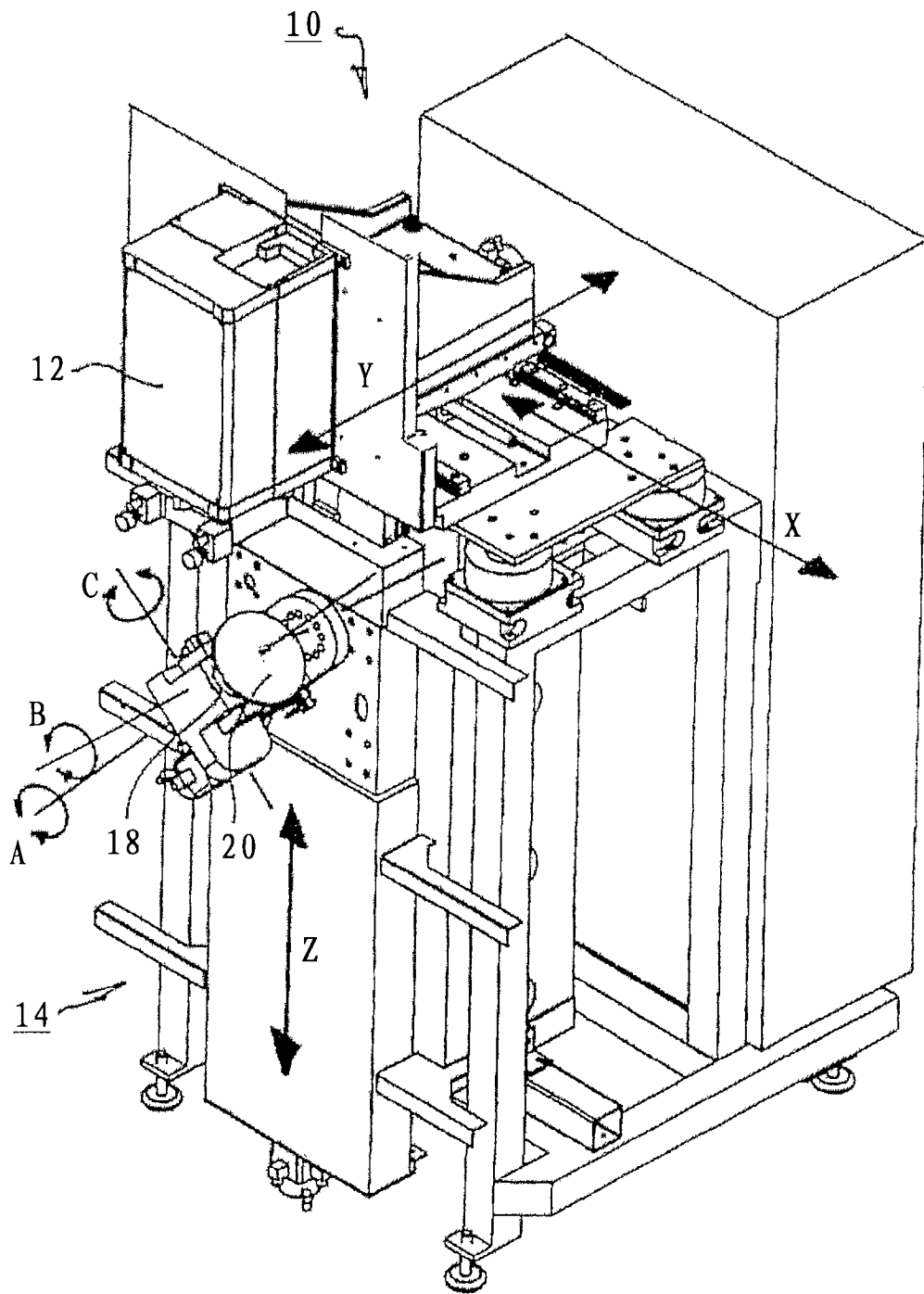


图 1

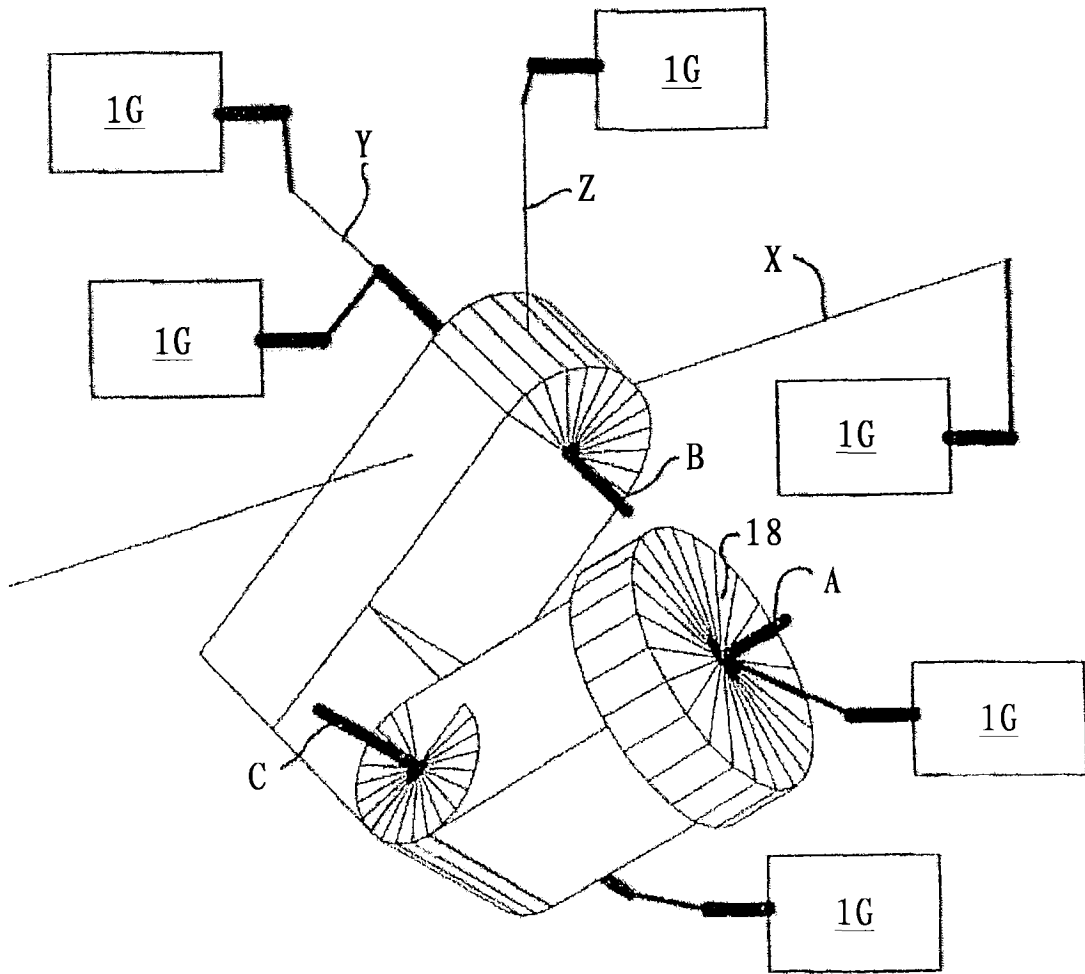


图 2a

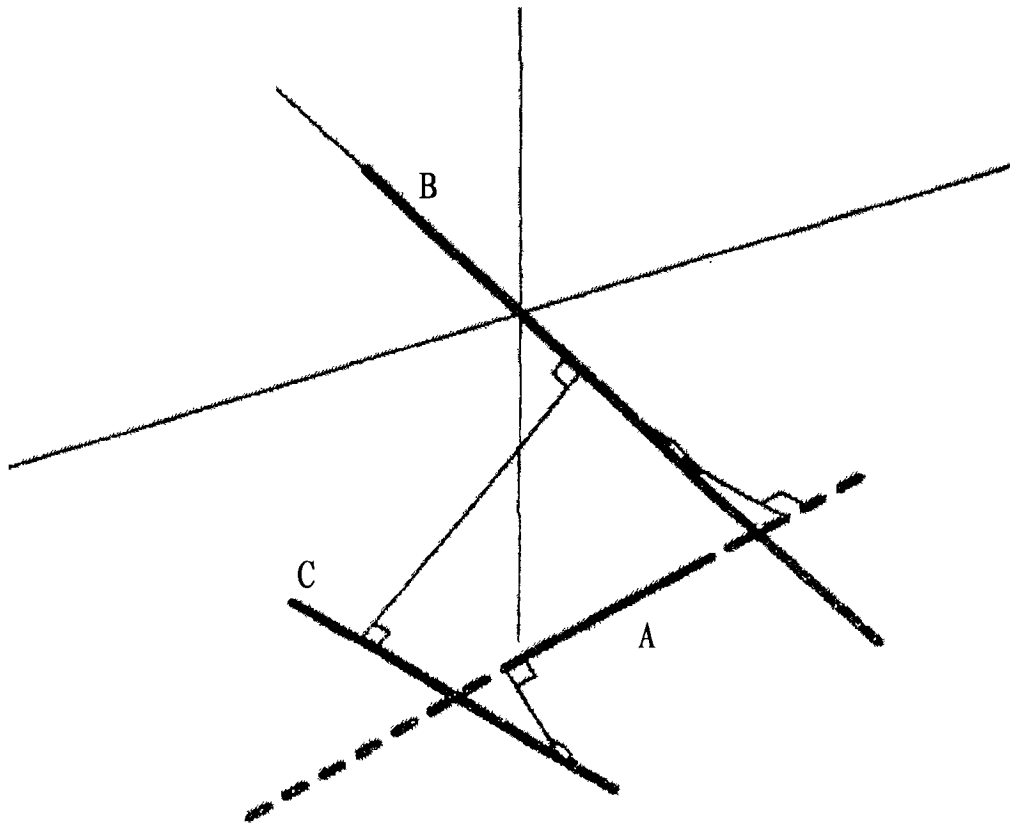


图 2b

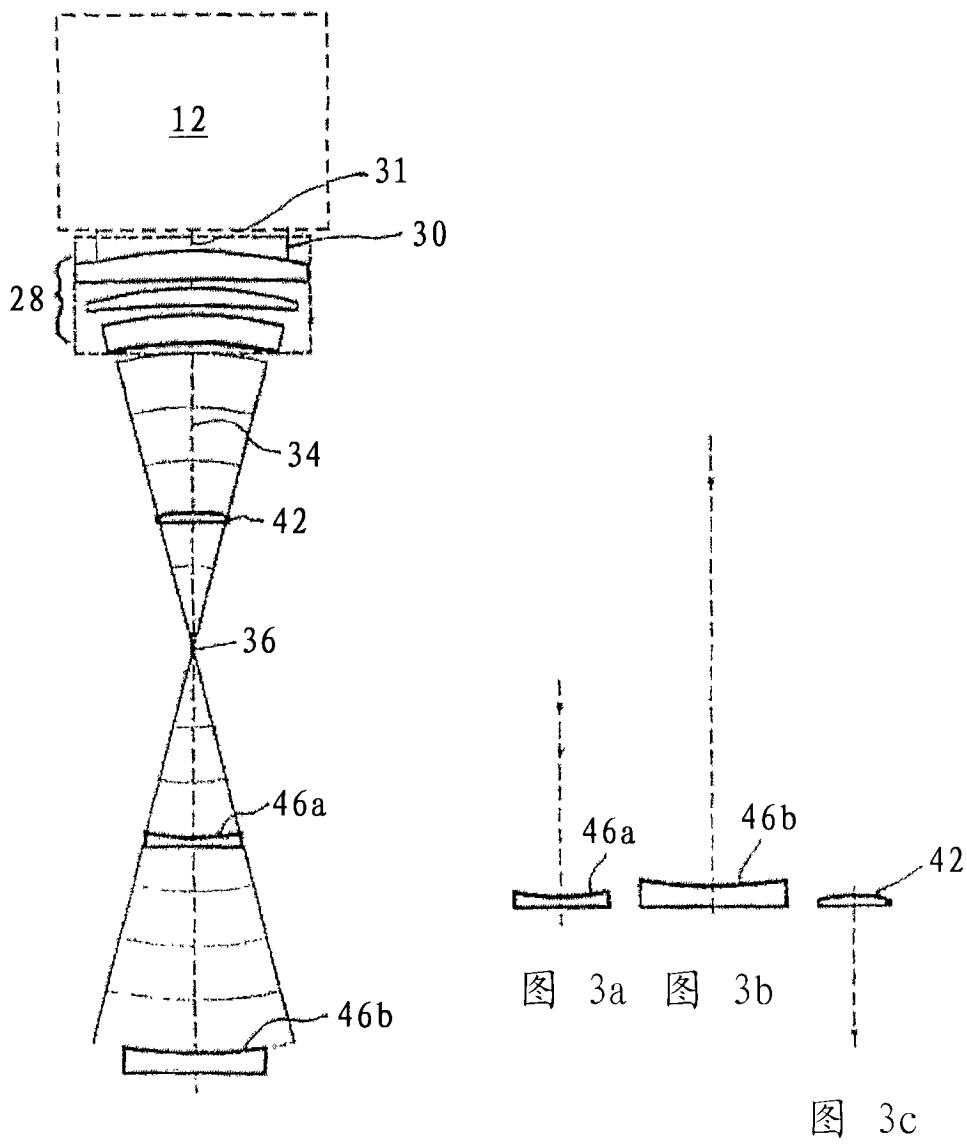


图 3

图 3a 图 3b

图 3c

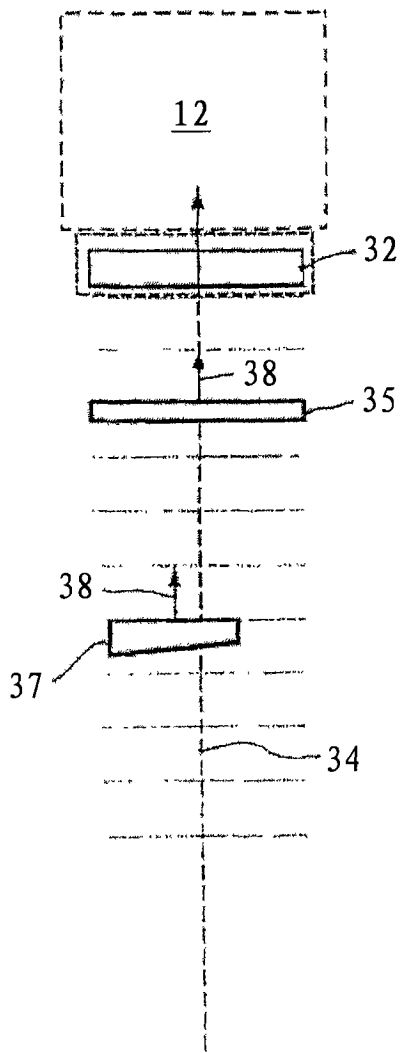


图 4

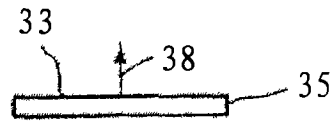


图 4a

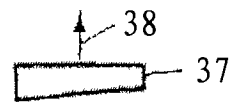


图 4b

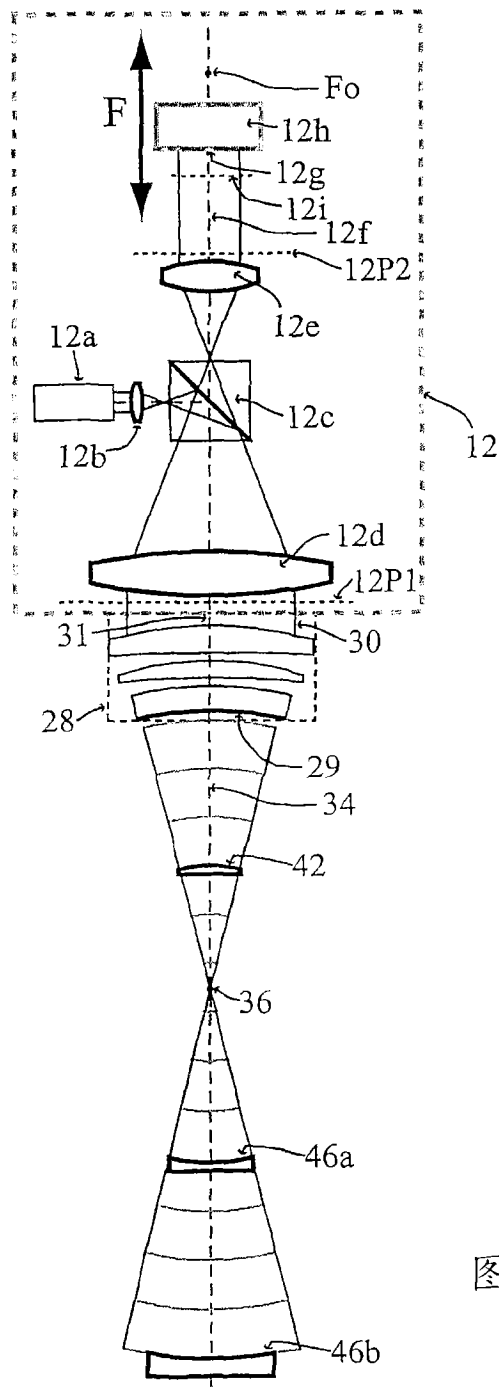
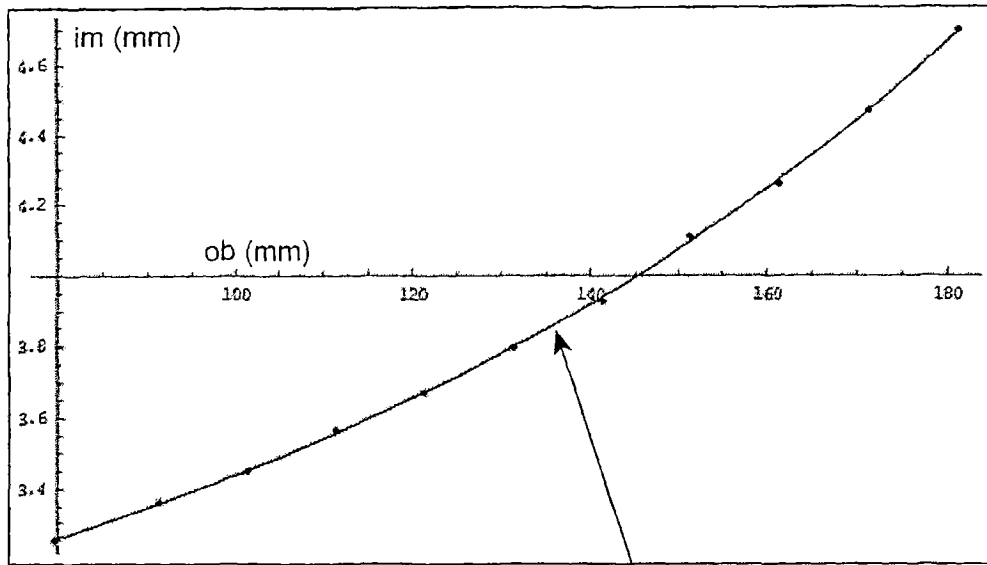


图 5



ob (mm)	im (mm)
79.558	3.25
91.3984	3.363
101.3984	3.451
111.3984	3.565
121.3984	3.671
131.3984	3.799
141.3984	3.93
151.3984	4.11
161.3984	4.26
171.3984	4.471
181.3984	4.699

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{ob + ob_ref} + \frac{1}{im + im_ref}$$

$$f = 22.4046$$

$$ob_ref = -349.795$$

$$im_ref = 21.4145$$

表1: 测量的物体和聚焦轴位置对的实例

"ob" 对物方参考点29和透射球形参考面的顶点测量

"im" 是聚焦轴F相对于其机械原点的位置

图 6

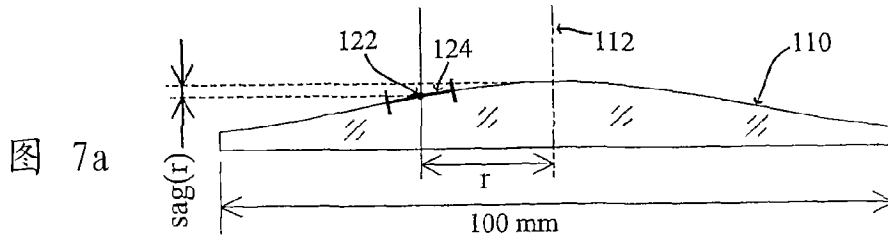


图 7a

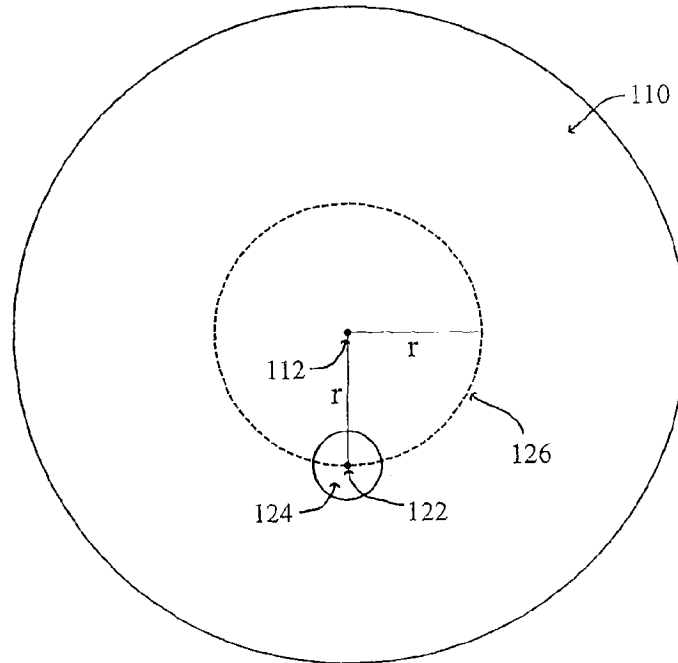


图 7b

$$\text{sag}(r) = \frac{c r^2}{1 + \sqrt{1 - c^2 r^2}} + a_d r^4$$

where: "c" = $\frac{1}{100 \text{ mm}}$ and "ad" = $\frac{-1}{1000000 \text{ mm}}$

图 7c

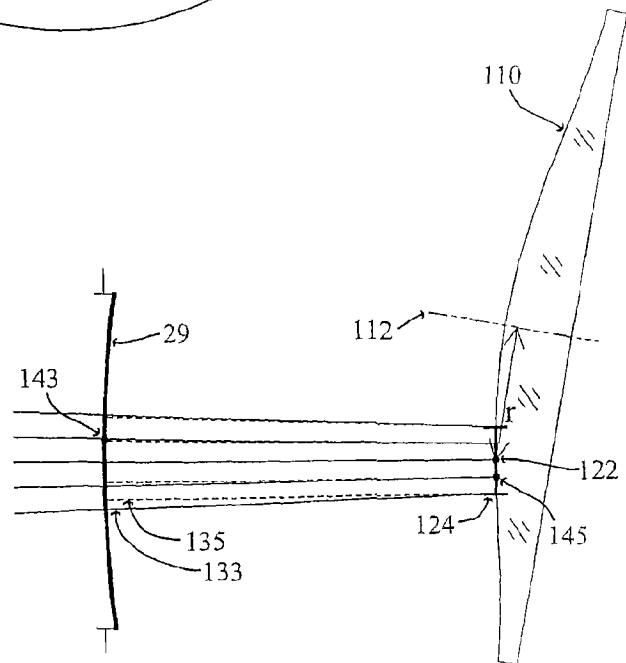


图 7d

局部表面特性

(表面局部位置 "r" 的函数, 从对称轴测量, 单位: mm)

图 8a

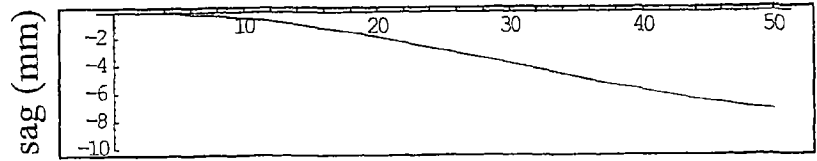
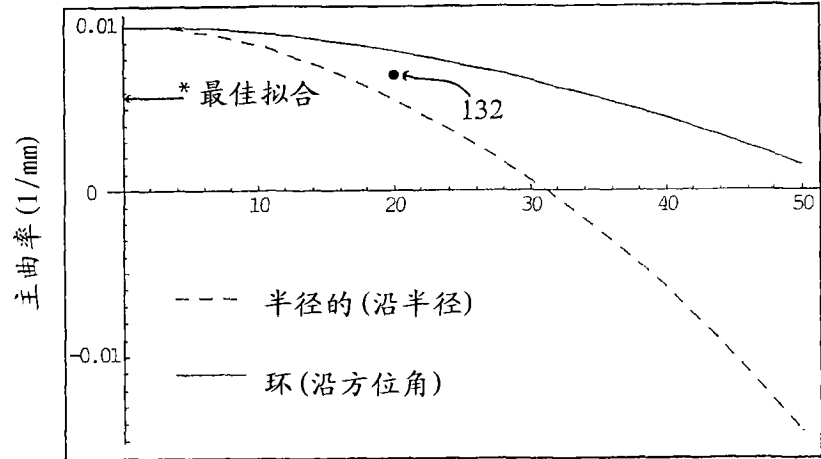


图 8b



* 表面通过非球面的中心和边缘的球面

图 8c

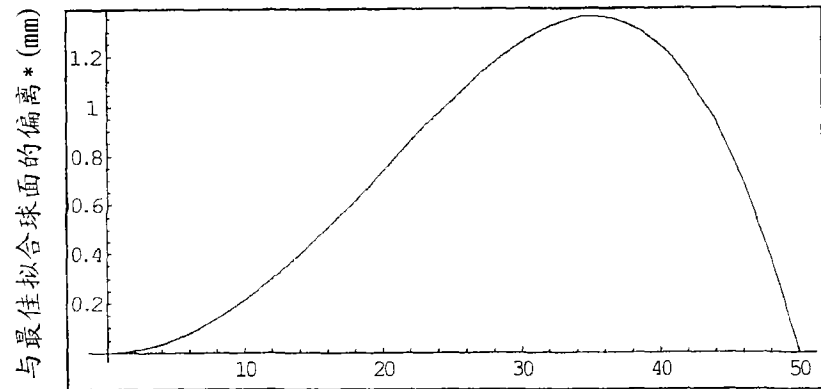


图 8d

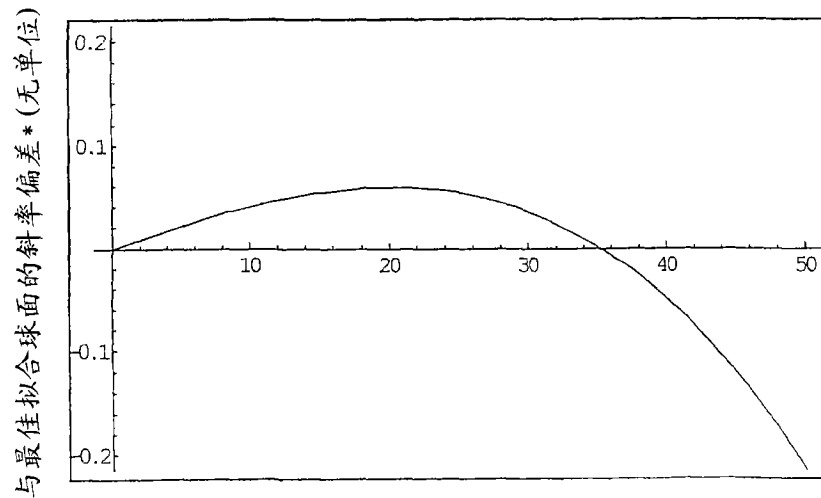


图 9a

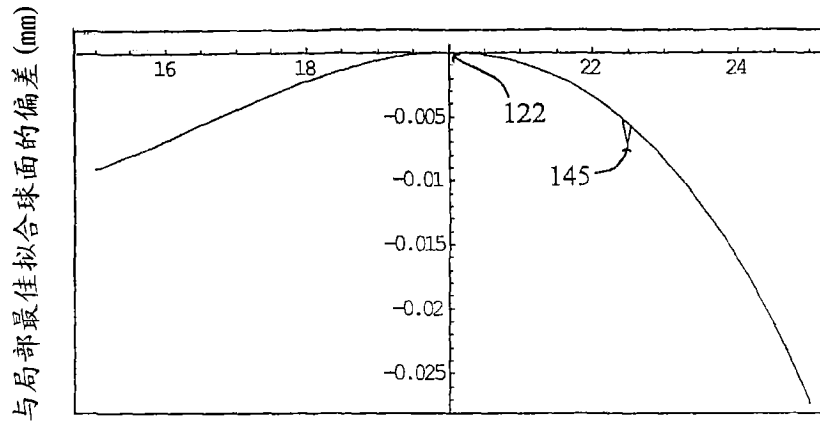


图 9b

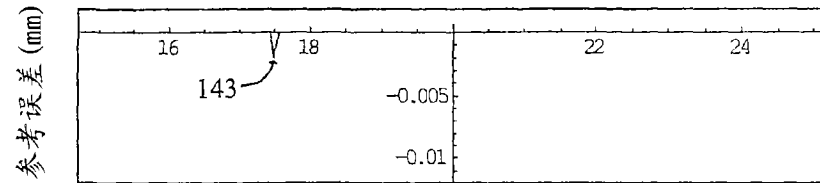


图 9c

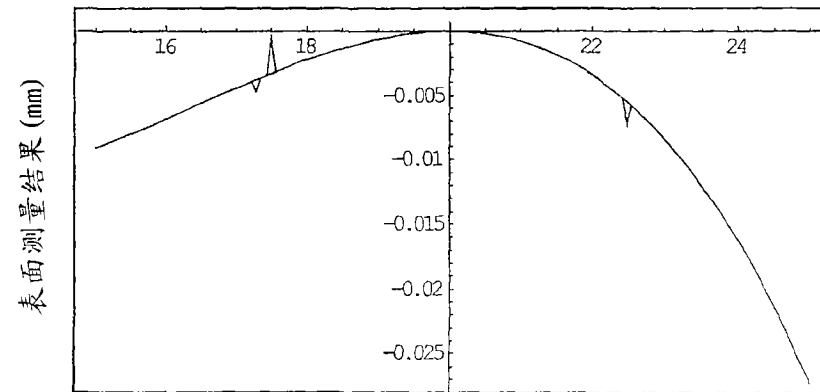


图 9d

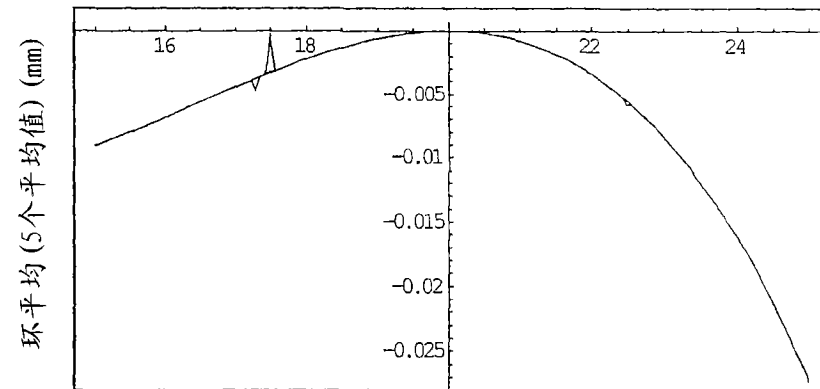


图 9e

