

# 光学镜面间距测量技术研究进展

师中华<sup>1,2</sup> 杨宝喜<sup>1,2</sup> 魏张帆<sup>1,2</sup> 李璟<sup>1</sup> 黄惠杰<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 透镜作为光学系统中最基本的光学元件, 其中心厚度的加工误差和装配精度将直接关系到整个光学系统的成像质量。对镜面间距非接触测量技术进行了研究, 重点介绍了图像法、轴向色散法、差动共焦法、低相干光干涉法等方法的测量原理和研究进展, 指出了这些方法的优缺点和适用范围。这些方法都能满足一般光学系统的精度要求, 其中低相干光干涉法测量精度最高, 轴向色散法、差动共焦法次之, 图像法测量精度最低。对光学镜面间距测量技术的发展趋势进行了论述。

**关键词** 测量; 镜面间距; 图像法; 轴向色散法; 差动共焦法; 低相干光干涉

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.040004

## Research Progress in Optical Spacing Measurement Technology

Shi Zhonghua<sup>1,2</sup> Yang Baoxi<sup>1,2</sup> Wei Zhangfan<sup>1,2</sup> Li Jing<sup>1</sup> Huang Huijie<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Information Optics and Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** As the most basic optical element in the optical system, the center thickness machining precision and assembly precision of the lens directly affect the imaging quality of the optical system. Kinds of non-contact measuring methods that have been proposed in recent years are introduced. The working principles and developing trends of the imaging method, axial dispersion measuring method, differential confocal measuring method, low coherence interferometry measuring method are described, as well as their own advantages and disadvantages. These methods can satisfy the precision requirement of the optical system, and the low coherence interferometry method provides the highest precision. The axial dispersion method and the differential confocal method comes second, and the imaging method is the last one. The developing direction of the lens gap measurement technology is discussed.

**Key words** measurement; lens gap; imaging method; axial dispersion; differential confocal; low coherence interferometry

**OCIS codes** 120.4820; 120.5700; 120.6650

## 1 引言

在光学领域中, 中心厚度、曲率半径和折射率是透镜的三个基本参数, 透镜中心厚度加工误差以及装配精度会对光学系统的成像质量产生较大的影响, 特别是在光刻机曝光系统、航测镜头、干涉仪标准镜头、激光谐振腔等高性能精密光学系统中, 对透镜中心厚度和镜面间距都有严格的控制要求, 提高透镜厚度测量精度和定位精度是提高光学系统性能的关键所在。

目前已有多种方法可以对光学镜面间距进行测量, 这里主要将其分为两类: 接触式测量和非接触式测量。接触式测量主要通过测头接触透镜中心前后表面, 直接获取其几何厚度和镜面间距<sup>[1-2]</sup>; 非接触式测量

收稿日期: 2014-11-13; 收到修改稿日期: 2014-12-24; 网络出版日期: 2015-02-10

作者简介: 师中华(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事光电检测与光学设计方面的研究。E-mail: szh@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 杨宝喜(1972—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事光学系统设计、光电检测和高数值孔径光学光刻技术等方面的研究。E-mail: yangbx@siom.ac.cn(通信联系人)

主要包括图像法<sup>[3]</sup>、轴向色散法<sup>[4-5]</sup>、共焦法<sup>[6-7]</sup>、差动共焦法<sup>[8-11]</sup>、低相干光干涉法<sup>[12-21]</sup>(类似白光干涉技术<sup>[22-24]</sup>)、图像标定法<sup>[25]</sup>、Fizeau干涉法<sup>[26]</sup>、偏振干涉法<sup>[27-28]</sup>。接触式测量的结构相对简单,但其本身存在较大的缺陷:容易划伤透镜,破坏表面,测头与透镜频繁接触会因磨损透镜而影响测量精度。与接触式测量相比,非接触式测量系统相对复杂,但可以对透镜组进行无损测量,且能够达到较高的测量精度,因此在非接触式测量方面发展了较多的测量方法,本文将重点介绍近几年出现的非接触式测量技术。

## 2 非接触式测量方法

### 2.1 图像法

Goncharov等<sup>[3]</sup>最早利用图像法对人眼模型的不同部分进行定位,区分不同结构的分界面,其原理是利用入射光束在不同透镜表面发生自准直反射产生测量信号,如图1所示。根据自准直原理,透镜表面存在两个自准直反射位置,第一个位置是当入射光束聚焦在透镜表面时会产生极大值反射,第二个位置是当入射光束垂直于透镜表面即光波的等相位面曲率等于透镜表面的曲率时会产生极大值反射。由于实际光束与几何光线存在差别,所以当光束满足两种自准直反射条件时,根据光斑大小和强度区分两种反射位置。当测量透镜间距时,只要确定第一种自准直反射位置即可。图1中反射镜M用于准直透镜 $L_1$ 和 $L_2$ ,实际测量时会移除反射镜M。被测透镜组固定在直线导轨上,光束通过分束镜S进入测量区,被测透镜组前后移动时,不同表面会产生自准直反射,反射光通过分束镜S和透镜 $L_4$ 后聚焦在CCD上,形成测量光斑,结合CCD图像确定透镜组不同表面的反射位置后,由几何光线追迹可以计算出透镜中心厚度和镜面间距。

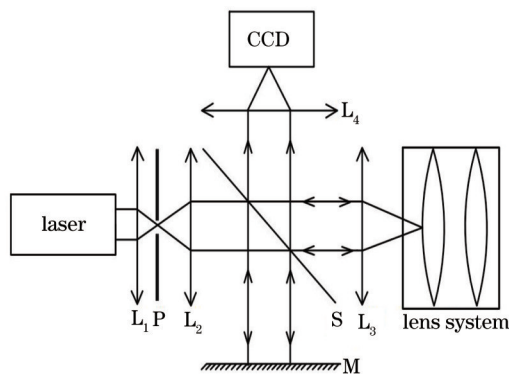


图1 图像法测量原理图

Fig.1 Schematic diagram of the lens spacing measurement based on imaging method dispersion

该方法测量结构相对简单,但测量精度相对较低。如果对测量精度要求不高时,可直接观察CCD上的图像对被测透镜组进行定位与准直,可用于光学系统的粗调。要提高测量精度则需要对CCD采集的图像进行后续处理,精确定位反射光强最大的位置,但由于实际光束为高斯光束,在束腰附近都会产生反射,要准确定位反射光强极大值位置,则需要高灵敏度的CCD。

### 2.2 轴向色散法

Kunkel等<sup>[4]</sup>最早利用轴向色散方法对透镜厚度进行测量,乔杨等<sup>[5]</sup>对该方法进行了进一步优化。其原理是利用光学镜组产生轴向色散,通过分析被测镜面反射回光谱仪的光的波长,来确定透镜厚度和镜面间距,如图2所示。选用卤素灯作为光源,利用光纤及耦合器传输,光纤的末端是一个反射式的探头,以接收通过被测件反射回来的光。测量系统的核心是共焦光学系统,其作用是将入射的白光按波长会聚在光轴上,由于轴向色散,不同波长的光会聚在光轴的不同位置处,最短波长的焦点与最长波长的焦点之间的距离即为测量范围。待检透镜组置于测量范围内时,当镜面恰在某波长会聚的焦点上,则该波长的光会发生自准直反射,反射光通过透镜会聚回光纤探头。只有焦点在被检件的上表面和下表面的光才能反射回光纤探头。反射回来的光通过光纤传入光谱仪,进行光谱分析,通过计算这两个光波长的距离确定被测件的厚度。

由于入射光线进入透镜后会发生折射,对不同面形的透镜其计算公式不同,且不同波长的光会会聚在光轴上的不同位置,所以在测量前要已知某种材料对不同光波长的折射率,通过多项式拟合得出一定波长范围内的材料折射率曲线。该方法的测量范围与光学色散系统和材料的种类有关,由于光学系统产生的轴

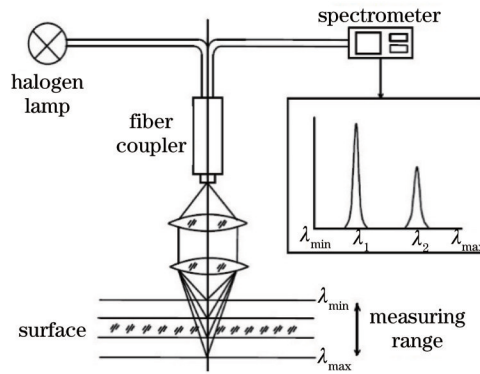


图2 轴向色散法原理图

Fig.2 Schematic diagram of the lens spacing measurement based on axial

向色散范围有限,其测量范围相对较小,文献[5]中对K9材料其测量范围在15~23.4 mm,可用于某些微结构光学系统的测量,测量精度主要与光谱仪的分辨率有关,文献[5]中测量精度约为1 μm。该方法对在测量范围内的透镜组有着较高的测量精度,但是在测量之前需要知道透镜面形、材料折射率曲线等参数,应用范围相对较小。

2.3 差动共焦法

Zhao等<sup>[8-11]</sup>利用差动共焦法对透镜厚度和透镜组间距进行测量,该方法利用共焦原理对透镜的前后表面进行定位,其原理图如图3所示。准直镜出射的光束经标准透镜L<sub>1</sub>和L<sub>2</sub>后形成测量光束,并会聚于标准透镜的焦点处;被测透镜沿光轴方向移动,当测量光束会聚点与被测透镜表面顶点重合时,测量光束由被测透镜表面自准直反射,偏振分光镜(PBS)将光束反射至分束镜,经分束镜(BS)分束的两束测量光分别被位于其后的带有数字显微镜的CCD1和CCD2接收,其中数字显微镜CCD1和CCD2的物方平面与准直镜焦平面的偏移量分别为+M与-M,形成差分结构,当测量光束聚焦在透镜前后表面时,产生反射极大值信号,探测器分别离焦±M,测量到的信号是极大值两侧对称位置的值,此时两路探测信号的差值为零(见图4),即最后得出的差分测量曲线过零点位置反映出被测透镜的前后表面的位置,两路信号的差分响应为

$$I(u, u_M) = I_1(u, +u_M) - I_2(u, u_M) = \left\{ \frac{\sin[(2u + u_M)/4]}{(2u + u_M)/4} \right\}^2 - \left\{ \frac{\sin[(2u - u_M)/4]}{(2u - u_M)/4} \right\}^2, \tag{1}$$

式中u为轴向归一化坐标。

该方法的优点是利用差分结构消除了共模干扰,将确定反射信号极大值位置转换为确定差分信号过零点位置,可有效提高测量的精度,文献[9]中的测量精度可达到1 μm以下。系统的测量范围主要由标准透镜组决定,当标准透镜组的焦距较大时,可以测量中心厚度较厚的透镜或对透镜组进行定位。入射光线进入透镜后会发生折射,所以对不同面形的透镜其计算公式不同,测量前要已知透镜面形等条件。

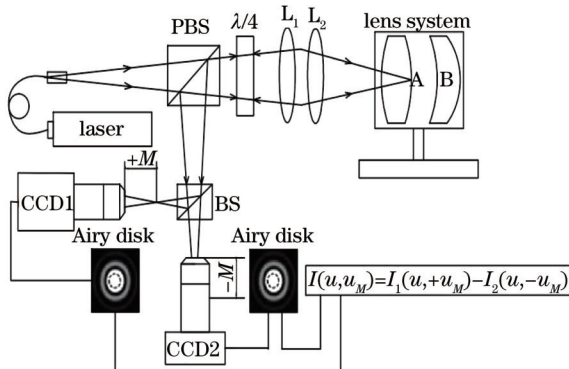


图3 差动共焦法原理图

Fig.3 Schematic diagram of lens spacing the measurement based on differential confocal

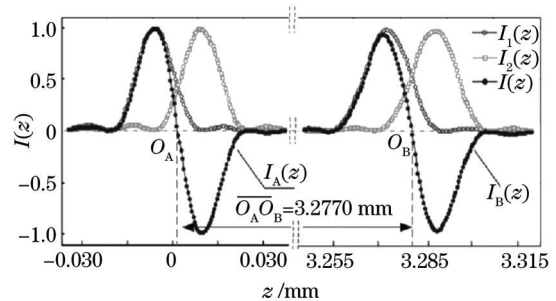


图4 差动共焦法测量曲线

Fig.4 Measurement curves of differential confocal



## 2.4 低相干光干涉法

低相干光干涉法<sup>[12-21]</sup>与白光干涉技术<sup>[22-24]</sup>原理类似,最早是Fogale公司利用该方法实现镜面间距测量的,并研制出相关的测量仪器,随后Langehanenberg等<sup>[12-15]</sup>对该方法进行了进一步改进和优化,使其达到更高的测量精度。该技术是利用时域光学相干层析成像(TDOCT)方法实现镜面间距测量的。原理如图5所示,从宽带光源[如超辐射发光二极管(SLD)]发出的低相干光,经过分束镜(光纤耦合器)分为两束,一束为信号探测光,经调焦透镜聚焦后照射到样品内部而得到很弱的后向反射光,再经调焦透镜和分束镜反射进入探测器;另一束为参考光,经参考镜反射后进入探测器和信号光叠加产生干涉信号;一方面来自样品不同表面的反射信号具有不同的光程,另一方面,参考光程随着参考镜的位置的改变而改变,由于只有在光程差不大于光源的相干长度的位置才能产生干涉信号,而TDOCT系统SLD光源的相干长度很短,故只有来自样品某一特定深度的反射信号才能与参考光相干,其中在相干信号强度最大的位置对应着等光程位置,随着光程差的增加,相干信号迅速减小(见图6),因此TDOCT系统具有很好的空间定位精度,从而具有高分辨率,通过改变参考臂的光程,即通过高精度、高速步进电机驱动参考镜做匀速直线运动,同时采用激光测距的原理,并将测距光和参考光共光路设计,就可以高精度获取样品不同表面的位置信息。

该方法的测量长度目前可达600 mm,能够对已封装好的光学系统进行准确定位,且无需知道透镜面形等参数。该方法将测距光与参考光共光路设计,可以消除导轨变形和环境变化带来的影响,可有效地提高测量精度,文献[17]中的测量精度可达200 nm。但因为在测量过程中要使延迟臂进行扫描,所以测量的实时性相对较差,为达到较高的测量精度,必须保证被测镜组严格共轴。

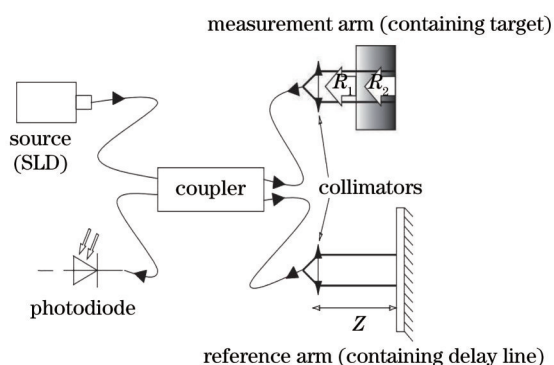


图5 低相干光干涉法原理图

Fig.5 Schematic diagram of the lens spacing measurement based on low coherence interferometry

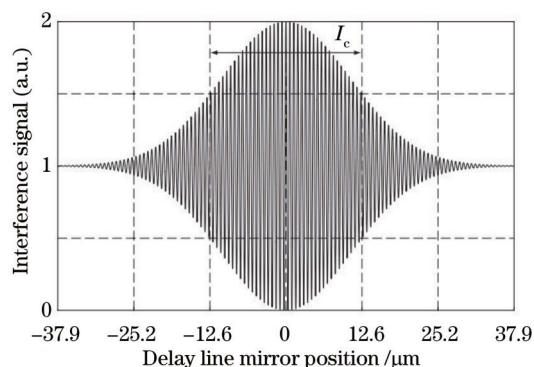


图6 低相干光干涉法测量信号图

Fig.6 Measurement signal of low coherence interferometry

## 2.5 其他方法

不同于文献[3]的测量方法,文献[25]介绍了另一种基于图像测量技术的在线测量方法,这里称为图像标定法,其原理是将CCD通过标准长度进行标定,将整个透镜组通过光学系统在所标定的CCD相机中成像,经与标准长度所占的像素个数比对,通过测量软件处理和分析,计算出透镜中心厚度和透镜间隔,在镜组装配过程中,可以实时测量多个透镜之间的轴向间隙。但由于CCD分辨率、图像清晰程度和标定系数精确度等的影响,难以达到较高的测量精度,同时对于已经装配完成的镜组,需要拆卸后才能进行测量。

文献[26]提出一种利用Fizeau干涉法进行镜面定位的方法,由Fizeau干涉仪构成主要的光学检测系统,使干涉仪标准镜头的焦点聚焦于被测透镜的顶点,通过光电成像转换器将被测透镜镜面顶点波前翻转自准干涉而予以定位;指示光栅与干涉仪的标准镜头联动,通过光栅传感器和数显表组成的读数系统读取标准镜头的移动量而获取光学系统的空气间隔值,实时性相对较差。

另外文献[27]使用偏振干涉法进行镜面间距测量,首先用透镜将光束通过偏振部件以一倾斜角度射到第一表面,并将测量光束定位在受测表面上,利用从第一表面和受测物体表面上反射光束的干涉效应使偏振光束通过透明部件后反射,然后用偏振灵敏强度探测器和相位探测器测量由入射平面限定的偏振分量的强度和相对相位,分析这些测量参数,即可得到两表面间距。偏振干涉法的特点在于测量速度快、测量精度高。但目前这种方法主要应用于测量受测试物体表面相对于透明部件的平行表面之间的微小间隙,还无法

实现对多个透镜轴向间距的高精度测量。

### 3 结 论

本文主要介绍了一些非接触式镜面间距测量的方法,其中大部分方法是通过测量透镜表面反射信号来确定空气与透镜之间的分界面,如何精确测定反射信号是提高测量精度的关键所在。图像法可以对光学系统进行粗调,不适用于高精度测量;轴向色散法在测量时需要确定透镜面形和透镜材料对不同波长的折射率,可以对一些微结构光学系统进行测量,应用范围相对较窄;差动共焦法需要确定透镜面形和透镜材料的折射率,可通过改变标准透镜组的焦距来改变测量范围,但需要对光学系统进行光线追迹计算得出透镜厚度和镜面间距,对复杂光学系统计算量很大;低相干光干涉法只需确定透镜材料的群折射率,测量范围可根据延迟臂的长度进行调整,可用于一些复杂光学系统的测量;图像标定法的测量原理不同于其他方法,是距离测量中比较常用的方法,但不适用于已封装的光学系统;最后两种干涉法同样不适用于复杂光学系统,可对透镜较少的光学系统进行测量。

以上方法中差动共焦法和低相干光干涉法测量的精度相对较高,其关键在于差分结构和共路结构的设计可有效抑制共模干扰,提高测量精度。许多测量方法的原理已比较成熟,在光学系统和信号探测系统达到极限、测量水平难以提高的情况下,要提高测量精度需要从系统结构来进行改进和优化,考虑哪些噪声会对测量结果造成影响,在不同方法中加入差分或共路结构设计,如在低相干干涉法中引入差分结构,进一步提高干涉极大值信号定位精度。通过系统结构来抑制噪声是提高测量精度的关键,也将是镜面间距高精度测量的一个发展方向。

### 参 考 文 献

- 1 Cao Xinyu, Xu Shoude, Huang Huijin, *et al.*. The high precision online measurement of lens-to-lens interval [J]. *Optical Instruments*, 1992, 14(3): 20-24.  
曹新宇, 徐守德, 黄惠金, 等. 透镜间隔的高精度在线测量[J]. *光学仪器*, 1992, 14(3): 20-24.
- 2 Li Fangling. Improving measurement of axial clearance during the assembly of the optical chamber of the missiles [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2009, (1): 130-131.  
李芳玲. 光学舱装配中轴向间隙测量的改进[J]. *机械设计与制造*, 2009, (1): 130-131.
- 3 Goncharov A V, Bailón L L, Devaney N M, *et al.*. Optical testing of lens systems with concentric design [C]. *SPIE*, 2009, 7389: 738912.
- 4 Kunkel M, Schulze J. Noncontact measurement of central lens thickness [J]. *Glass Science and Technology*, 2005, 78(5): 245-247.
- 5 Qiao Yang, Zhang Ning, Xu Xiping, *et al.*. Design of lens thickness measurement system based on confocal technology [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(7): 1635-1641.  
乔 杨, 张 宁, 徐熙平, 等. 基于共焦法的透镜厚度测量系统设计[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(7): 1635-1641.
- 6 Ziebarth N, Manns F, Acosta A C, *et al.*. Non-contact optical measurement of lens capsule thickness during simulated accommodation [C]. *SPIE*, 2005, 5688: 19-25.
- 7 Dierke H, Tutsch R. Optical measurement of the layer thickness of transparent materials [C]. *SPIE*, 2012, 8430: 843008.
- 8 Zhao W, Sun R, Qiu L, *et al.*. Lenses axial space ray tracing measurement [J]. *Opt Express*, 2010, 18(4): 3608-3617.
- 9 Shi Libo, Qiu Lirong, Wang Yun, *et al.*. Development of lens central thickness measurement system using laser differential confocal microscopy [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(3): 683-688.  
史立波, 邱丽荣, 王 允, 等. 激光差动共焦透镜中心厚度测量系统的研制[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(3): 683-688.
- 10 Liu Wenli, Shi Libo, Sun Ruoduan, *et al.*. Measurement Method and Apparatus for Lenses Axial Space by Confocal Technique: China, CN101782373A [P]. [2010-03-17].  
刘文丽, 史立波, 孙若端, 等. 共焦透镜轴向间隙测量方法与装置: 中国, CN101782373A [P]. [2010-03-17].
- 11 Liu Wenli, Shi Libo, Sun Ruoduan, *et al.*. Measurement Method and Apparatus for Central Lens Thickness by Confocal Technique: China, CN101788271A [P]. [2010-03-17].  
刘文丽, 史立波, 孙若端, 等. 共焦透镜中心厚度测量方法与装置: 中国, CN101788271A [P]. [2010-03-17].
- 12 Langehanenberg P, Dumitrescu E, Heinisch J, *et al.*. Automated measurement of centering errors and relative surface

- distances for the optimized assembly of micro-optics [C]. SPIE, 2011, 7926: 79260E.
- 13 Langehanenberg P, Ruprecht A, Off D, *et al.*. Highly accurate measurement of lens surface distances within optical assemblies for quality testing [C]. SPIE, 2013, 8844: 88444F.
- 14 Langehanenberg P, Stickler D, Lüerß B, *et al.*. Verification of the optical design by simultaneous measurement of centering errors and relative surface distances inside of optical systems [C]. SPIE, 2012, 8550: 85500Y.
- 15 Langehanenberg P, Heinisch J, Dumitrescu E. High precision geometrical characterization and alignment of miniaturized optics [C]. SPIE, 2012, 8249: 82490U.
- 16 Wang Zhibin, Shi Guohua, He Yi, *et al.*. Application of optical coherence tomography to distance measurement of optical surface [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(7): 1469-1474.  
王志斌, 史国华, 何益, 等. 光学相干层析技术在光学表面间距测量中的应用[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1469-1474.
- 17 Wilhelm R, Courteville A, Garcia F. A novel low coherence fibre optic interferometer for position and thickness measurements with unattained accuracy [C]. SPIE, 2006, 6189: 618918.
- 18 Courteville A, Wilhelm R, Delaveau M, *et al.*. Contact-free on-axis metrology for the fabrication and testing of complex optical systems [C]. SPIE, 2005, 5965: 596510.
- 19 Wilhelm R, Courteville A, Garcia F. Dimensional metrology for the fabrication of imaging optics using a high accuracy low coherence interferometer [C]. SPIE, 2005, 5856: 469-480.
- 20 Courteville A, Garcia F, Nel L. Positioning of optical payload: SALT telescope [C]. SPIE, 2004, 5495: 463-473.
- 21 Guo Banghui, Li Ming, Sun Qiang. Research of dispersion in measurement of optical lens gap [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 51(6): 061204.  
郭帮辉, 李明, 孙强. 光学镜面间隔测量中的色散研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 51(6): 061204.
- 22 Ding Zhihua, Zhao Chen, Bao Wen, *et al.*. Advances in doppler optical coherence tomography [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(8): 080005.  
丁志华, 赵晨, 鲍文, 等. 多普勒光学相干层析成像研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 080005.
- 23 Guo Tong, Li Feng, Ni Lianfeng, *et al.*. Microstructure surface topography measurement based on color images of white light interferometry [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34 (2): 0212003.  
郭彤, 李峰, 倪连峰, 等. 基于白光干涉彩色图像的微结构表面形貌测量[J]. 光学学报, 2014, 34 (2): 0212003.
- 24 Li Chuansheng, Zhang Chunxi, Wang Xiaoxiao, *et al.*. White light interferometry for pigtail polarization crosstalk of Ti-diffused LiNbO<sub>3</sub> integrated optic phase modulator [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0508003.  
李传生, 张春熹, 王夏霄, 等. 钛扩散 LiNbO<sub>3</sub> 相位调制器尾纤偏振串音的白光干涉测量方法[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0508003.
- 25 Jiang Jiadong, Yuan Daocheng, Pu Jie. Research on on-line-measuring clearance of assembly parts based on image measurement technology [J]. Journal of Transducer Technology, 2006, 24(12): 26-28.  
蒋家东, 袁道成, 蒲洁. 基于图像测量技术的装配间隙在线测量研究[J]. 传感器技术, 2006, 24(12): 26-28.
- 26 Wei QuanZhong. Non-Contact Measuring Apparatus and Method for Air Gap of Optical System: China, CN1428627A [P]. [2003-07-09].  
魏全忠. 非接触式光学系统空气间隙测量工作方法和设备: 中国, CN1428627A [P]. [2003-07-09].
- 27 De Groot P. Optical Gap Measuring Apparatus and Method: United States, US5953125A [P]. [1999-09-14].
- 28 Liu Yongzhi, Ye Yutang, Liu Xu, *et al.*. An Apparatus for Measuring Micro Optical Interval: China, CN2166414Y [P]. [1994-05-25].  
刘永智, 叶玉堂, 刘旭, 等. 一种微小光学间隔的测量装置: 中国, CN2166414Y [P]. [1994-05-25].

栏目编辑: 何卓铭