

文章编号 1004-924X(2007)08-1235-06

φ300 mm 干涉仪参考镜的设计及测试

武旭华¹, 陈磊¹, 王磊²

(1. 南京理工大学 电光学院, 江苏 南京 210094;

2. 中国科学院 国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042)

摘要:针对一台有效口径为 300 mm 的斐索立式移相干涉仪的参考镜,采用有限元方法对其水平状态不同支承方式下的表面变形进行了分析及优化设计,根据设计结果在对镜坯抛光时留出变形余量,并用液面基准法进一步验证了分析结果,其 PV 的差值为 0.008λ , RMS 的差值为 0.005λ 。实验结果表明,此干涉仪参考镜支撑结构的设计满足技术要求。

关键词:应用光学;大口径干涉仪;参考镜;镜面支承;有限元法

中图分类号:TH744.3 文献标识码:A

Design and test of reference mirror in φ300 mm interferometer

WU Xu-hua¹, CHEN Lei¹, WANG Lei²

(1. *School of Photoelectric Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China*; 2. *Nanjing Institute of Astronomical Optics and Technology, National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China*)

Abstract: In order to find an optimal supporting scheme for the reference mirror in a φ300 mm interferometer, horizontal supports were modeled and analyzed in adhered spot edge support and band-back support using finite element method. For the sake of simplicity and economy, the ringy-band support with 10 mm wrap bandwidth was accepted to optimize the design, the ideal surface deformation of the reference mirror due to self-weight was obtained in the optimal support scheme. According to this result, a certain allowance was given for deformation when the mirror blanks were polishing. Then the surface of this mirror under practical condition was measured through building absolute liquid reference. By comparison, the differences of PV magnitudes and RMS values are only 0.008λ and 0.005λ , respectively. It is clear that the structural design of the interferometer reference mirror meets technical requirements very well. At last, several suggestions were given to eliminate the effects of thermal turbulence.

Key words: applied optics; large-aperture interferometer; reference mirror; mirror support; finite element method

1 引言

干涉仪是一种高精度光学元件检测设备,其参考平面是进行光学精密检测的基准,担负着传递与保持量值的重任。因此,干涉仪标准镜片的面形质量将直接影响最终测量结果。在大口径立式光学系统中,参考平面存在自重引起的面形变化问题须严格控制。

由于大口径干涉仪标准镜片制造困难,故常用的干涉仪最大口径通常只做到 $\Phi 150$ mm,因此重力等因素对干涉仪标准镜片面形影响较小。随着干涉仪口径和精度的提高,对大型参考镜的设计及加工工艺提出了很高的要求,必须重点考虑重力等因素对镜面面形质量的影响。对于传统的干涉仪标准镜片三点支承安装方式,由于重力而引起的镜面变形和镜内应力很大,远不能满足光学成像质量的要求,所以已不适用于大口径标准镜片的安装与调整。因此,对大口径镜的支承状态进行有限元分析,选择能够符合镜片要求的支承方式非常必要,需要解决的技术问题是如何采用合理的支承方式来缓减大口径干涉仪标准镜片的重力因素等对镜面面形质量和准确度的影响。

大型参考镜在工作运行中的面形质量,不仅与参考镜本身的加工质量有关,而且与支撑结构合理与否也密切相关,不同的支撑方式引起的变形差别非常大。国内外相关技术人员已根据镜子几何形状及口径^[1,2]、支撑方式^[1,3]、施加载荷^[3]的不同情况,采用有限元法对光学镜子受各种因素影响的不同情况进行了详尽的分析和大量的报道。A. J. Malvick^[1,5-6]采用差分法分析了口径为 230 cm、154 cm 和 4 m 的镜子在多种支撑方式下的理论弹性变形。文献 [8-10]利用有限元方法建立了镜子的有限元模型并计算了特定支撑情况下的变形。文献 [2]针对两种常见的径向支撑方式:点支撑和带支撑,以及相应的轴向支撑方式,给出了透镜表面变形的结果,并与实验结果进行了比较;徐荣伟、刘立人等^[11]采用有限元方法对大型干涉仪镜子在不同垂直支承方式下的表面变形与温度变形进行了分析。

本文以一台有效口径为 300 mm 的斐索立式移相干涉仪的参考镜为例,采用有限元方法对此

参考镜在平放状态不同支承方式下的表面变形进行了分析,设计出满足要求的干涉仪参考镜的最佳支承结构。

2 有限元分析模型

整个干涉仪光学系统的波差要求较高,对该参考镜在微重力作用下面形误差要求 $PV = \lambda/10, RMS = \lambda/50$, 其中 $\lambda = 632.8$ nm。由于所用的参考镜尺寸大、重量重,其支撑方式和镜坯材料对面形的影响较大,这些问题必须有针对性的加以解决,使之达到使用要求。首先,应该选用符合系统质量要求的干涉仪参考镜材料—具有良好的光学面形并且能在一定工作条件下保持可靠的性能。综合来讲,制造大口径干涉仪参考镜的合适材料要具有低热膨胀系数、良好的导热性能、微观结构均匀(无气孔、气泡、结石等缺陷)、高弹性模量、低密度、安全无毒、化学性能稳定等特点^[4]。通过对镜坯材料做性能综合比较,认为进口合成熔石英不失为一种良好的光学玻璃材料,其性能参数见表 1。参考镜的镜坯选用口径 350 mm、厚度 60 mm 的进口熔石英平行平板;而为了避免参考平面和后表面的多重反射,参考镜后表面有个 10° 的楔角,背部反射面为平面。

表 1 镜坯材料的性能参数

Tab. 1 Performance parameters of mirror materials

材料	密度 /(10^{-6} kg/mm ³)	杨氏模量 /(10^9 N/m ²)	泊松比
进口合成融石英	2.201	72.7	0.16
胶粘剂	1.1	20	0.49
铝	2.7	70.6	0.33

其次,大口径参考镜的支承方式对镜子的应力分布和参考面的变形起决定性作用,直接影响参考镜的光学性能,需综合考虑经济性、安装方式、镜面变形以及参考镜的具体结构及工作状态等,本文的工作主要针对背部支撑或侧面支撑的方式进行讨论,在此基础上,设计出干涉仪参考镜的最佳支承结构。背部支撑又可以分为三点、四点、六点和多点支撑。这里主要讨论多点支撑,也可以近似理解为环状支撑^[12]。

本文采用有限元方法对参考镜的支承结构进

行优化设计,对此干涉仪参考镜在环状支承和侧面支承方式下的自重变形(主要指由于自重作用干涉仪参考镜在自然状态下的变形以及在支承装置中受到卡夹的应力变形)进行了分析,给出了对应的表面变形值,选择了最佳支承方式。

2.1 背部支撑

如图 1 所示,用背部环带支撑将 φ350 mm 的参考镜坯固定。由弹性力学可知,平板的中心重弛为:

$$S_{r=0} = 0.362P \frac{R^2}{D}, \quad (1)$$

式中 $P = \pi R^2 q$ 为总负载, $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ 为平板的弯曲刚度; q 为均匀分布载荷、 R 为半径、 E 为杨氏模量、 ν 为泊松比、 h 为平板厚度。由于每块材料内应力等情况的不同,自重引起的面形变化量也不同。

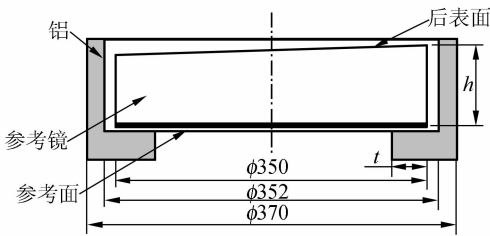


图 1 环带支撑示意图

Fig. 1 Sketch of ringy-band support schemes

用 ANSYS 有限元软件分别对厚度 h 相同、支承环带宽度 t 不同以及支承环带宽度 t 相同,厚度 h 不同的环状支撑方式下进口合成熔石英镜坯的自重变形做了分析,分析结果见表 2。其中 $h = 60$ mm, $t = 10$ mm 的过中心点的横截面的自重变形如图 2 所示。

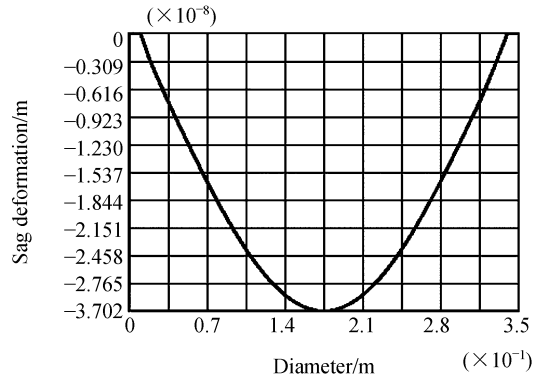


图 2 直径横截面($t=10$ mm)的自重变形

Fig. 2 Sag deformation of diameter-cross section while $t=10$ mm

2.2 侧面支撑

如图 3 所示,用 24×3 个胶粘点将参考镜固

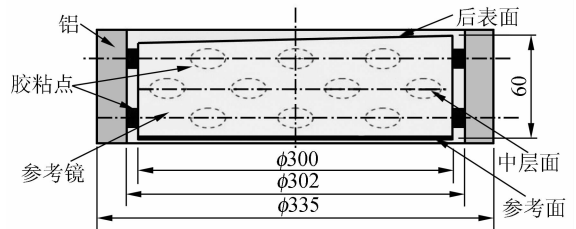


图 3 胶粘点支撑示意图

Fig. 3 Sketch of support scheme with adhered spots

定在口径比 φ300 mm 的参考镜大一点的镜框环上。根据材料力学理论,当参考面放置在与参考平面同样大半径的环上时,中层面的变形可由下式给定:

$$w(r) = \frac{\rho h a^4}{64D} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right) \left(\frac{5+\nu}{1+\nu} - \frac{r^2}{a^2}\right), \quad (2)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (3)$$

其中, r 为计算位置到中心的距离, a 为半径, h 为厚度, E 为杨氏模量, ν 为泊松比, ρ 为密度。由于式(2)代表薄盘(厚径比 $< 1/10$)中间层面的变形。本文中的参考镜比较厚,因此实际的变形可能会有些差别。

胶接支撑情况下参考镜自重变形的有限元分析结果如图 4 所示,该曲线过中心点的 PV 值可达 23.858 4 nm。若选用 18×3 和 12×3 个胶点支承, PV 值分别可达到 25.74 nm 和 28.19 nm。

表 2 直径 350 mm 的镜坯在各种环状支撑方式下的自重变形

Tab. 2 Sag deformation of φ350 mm mirror in different ringy-band supports

环带宽度	镜坯厚度	自重变形	环带宽度	镜坯厚度	自重变形
t/mm	h/mm	PV 值/nm	t/mm	h/mm	PV 值/nm
5	60	-28.866	10	56	-28.749
10	60	-25.860	10	58	-27.219
15	60	-24.005	10	60	-25.860
20	60	-23.894	10	62	-24.570
25	60	-21.125	10	64	-23.416

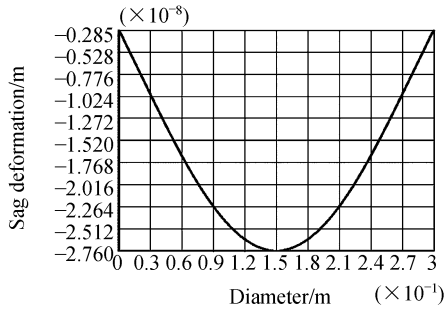


图 4 直径横截面的自重变形

Fig. 4 Sag deformation of diameter-cross section

2.3 两种支撑结果分析

在大口径干涉仪装置中,参考镜片安装主要从方便安装、快速拆卸、镜面变形小、支承效果好来考虑,选用较好的安装镜片方式,使镜片稳定地处于某个位置。通过 ANSYS 分析实验证明,选择从环带镜面支承和胶点侧面支承都可以满足设计要求,胶点侧面支承对镜面变形影响比环带镜面支承小一些,结构紧凑,而且比较省料;但胶接工艺过程比较复杂,选用无应力胶,固化时间长,操作过程稍有失误,处理不好就会引起应力变形,从而导致镜面面形的变化。以前采用在圆周方向上给镜片和支承件之间灌硅胶,支承效果很好,但安装和拆卸都不太方便。由于胶和玻璃以及铝合金的温度系数不同,胶粘点与镜面接触的位置必须采用钢材材料,否则在温度变化时,容易引起玻璃内部应力变形,影响测试精度。从有限元的分析结果可以看出,选用环带兜吊的支撑方式也可以保证良好的支承效果,使标准镜片镜面变形在 $\lambda/20 \sim \lambda/30$ 内。且采用环带兜吊的方式,可使镜子的重力分布在环带与镜子接触的圆环面内,而柔性的环带垫圈与镜子之间会有良好的接触,应力分布比较均匀,不会产生较大的局部应力。但由于支承位置“边缘效应”的影响,在自重变形符合面形精度要求的前提下应保证通光口径尽量大,以方便仪器装调。所以,带宽为 10 mm 的环带支撑是最终的选择,面形变化如图 5 所示。

对一块大型干涉仪参考镜,在检测和使用过程中除本身的自重变形和加工、装配和调整误差外,最终质量还受温度梯度变形的影响。温度变形是指干涉仪处于变化的热环境中各种热效应使镜子产生的热弹性变形。理论上,当干涉仪装置处于恒温环境或较好的温控环境中,就可以有效

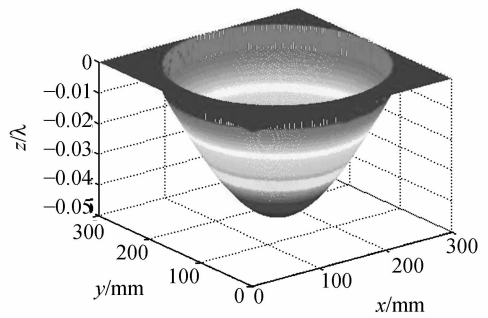


图 5 自重理论变形有限元结果

Fig. 5 Sag deformation calculated by FEM

PV-0.049 λ RMS-0.016 λ

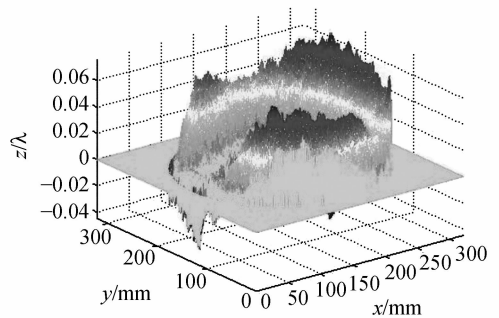


图 6 Zygo 测试结果

Fig. 6 Results on Zygo

PV-0.121 λ RMS-0.020 λ

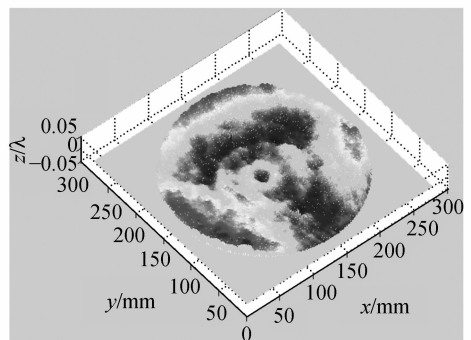


图 7 有限元计算结果

Fig. 7 Results calculated by FEM

PV-0.090 λ RMS-0.017 λ

地避免温度梯度热效应的影响。当温度梯度在 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 变化时,镜面变形的 PV 值仅为 1 nm,标准偏差为 0.58 nm,远远小于自重和支承变形,可以忽略不计^[13]。

以此自重变形为参考来指导加工,在抛光过程中必须预留变形余量,以最终达到光学系统质量的要求,保证系统精度。将根据设计要求加工

出来的参考镜放在测试口径为 600 mm (24 inch) 的 Zygo 卧式干涉仪上进行检测,面形 PV 可达到 0.121λ ,均方根值为 0.020λ ,如图 6 所示。用 Zygo 干涉仪测出参考镜在垂直放置状态下的面形结果,减去用有限元法对大型干涉仪参考镜在理想支撑方式下的重力变形值,可得在这种支撑方式下参考镜的理论变形值,如图 7 所示。

3 液面基准法测试

将加工好的参考镜按设计要求装调到干涉仪上,对该参考镜在实际使用状态下的面形进行测试。

3.1 光学平面基准的建立

光学平面基准的建立方法一般有两种:液面基准法^[14]和平面绝对检验(如三面互检法^[15]和伪剪切法^[16])。

三面互检法和伪剪切法的数学公式是理想情况下的,作为平面检验基准均存在一些不足。一般来讲,三面互检法需要三个面形精度相近、口径一样的高精度平面,由于在测试中需要对三个平面进行互换与旋转,测试波面的空间一致性不易保证;同时三次调整过后均需要经过完全恒温,测试时间也相当长。对于大口径系统,加工三个平面成本高且支撑困难,而且因为水平放置的平镜将因自重而产生明显的面形变化,从而给大口径立式干涉仪的参考镜三面互检测试增加了难度^[17],所以一般只适合于制造高精度中等口径平面时使用。由于统一原始波面时误差的积累问题,伪剪切法作为建立平面基准的方法未被广泛承认。因此,本文采用液面基准法对该参考镜在实际使用状态下的面形进行了测试。

3.2 液面的制备

液体的表面基本上具有与地球表面相等的曲率半径,在液体直径为 300 mm 时液面平面度偏差仅为 $\lambda/340$,为此,液面被认为是检测平面的绝对标准,即可以近似为“绝对平面”。但是,这只是原理上的估算,真正要使液体平面度达到 $\lambda/340$ 需有严格条件保证才行。为保证获得高精度、稳定的液体平面,对承液盘和制备过程均须考虑影响液面多个方面的因素,例如振动、尘粒、毛细力、蒸汽、不同的温度条件、静电荷、磁场、液体本身的物理和化学性质等,这些因素影响是不能忽略的。

为了使液体的曲率半径大,平面度高,必须选择表面张力小,具有适中粘性,可以防止轻微振动影响的液体。另外,必须考虑到液体的反射率,要使干涉仪的条纹对比度好,取反射率匹配的液体为好;还要注意使用无色、无味、无毒、不易挥发、无腐蚀性特性、清洁有粘性的液体。

由于环境会带来一定的测量误差,且是一个不定性概念,应尽量减少。液体的稳定直接影响着液面的平面度,主要是消除振动的干扰。为防止振动的干扰,可将干涉仪和盛着液体的液槽放置在环境僻静的恒温实验室内的减振大理石实验平台上,液槽和大理石之间放有隔振材料,工作台与大地之间也垫有隔振材料。

另外由于固液之间的浸润效应^[18],液槽大小对平面度也有影响,因此,必须把靠近液槽四壁的液体分划在可用范围之外。经计算,选用 400 mm 的液盘足可以忽略浸润效应对平面度带来的影响。液盘中液面的自振频率随液盘深度增加而增加,随直径加大而减少。因此,在液盘底部设置减振群岛板,提高了液体自振频率,减少了振幅和液体的流动,使液体能够尽量稳定下来,又不受轻微振动的影响。

3.3 测试结果

将配置好的液面 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 下恒温静置 72 h 后,测试用液面作光学平面基准所得参考镜的面形结果,并将此结果(图 8)与有限元法计算所得的理论变形值(图 7)做了对比,PV 的差值为 0.008λ ,RMS 的差值为 0.005λ 。从 PV 值和均方根值的量化结果以及波面分布的走势(边缘的高低分布及中心的火山口状波面)来看,结果是比较吻合的。

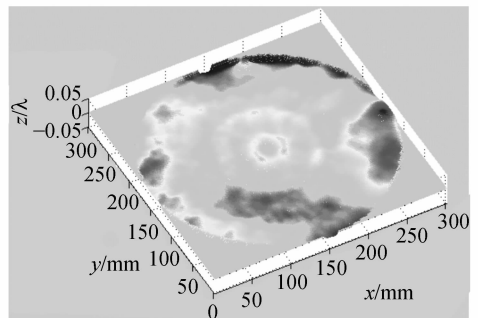


图 8 液面基准法测试结果

Fig. 8 Results measured by absolute liquid method

PV=0.098 λ RMS=0.012 λ

4 结 论

由于干涉仪口径和精度的提高,对大型参考镜的面形提出了很高的要求。支撑方式在对变形的影响占很大比重,不同的支撑方式引起的变形差别也很大。本文利用有限元方法对大型干涉仪参考镜的水平支承方式进行了优化设计,并采用液面基准法对分析结果进行了实验验证,结果表

明,此干涉仪参考镜支撑结构的设计是满足技术要求的。

由于在该支承方式下参考镜的自重和支承变形远大于热弹性变形,因而采取 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 的温控措施,在干涉图稳定的情况下进行多次采样,通过平均效应就可以有效降低热效应的影响。实验采用了南京英特飞光电技术有限公司生产的 300 mm 斐索立式移相干涉仪,并得到该公司杨援总经理的大力相助,特此感谢。

参考文献:

- [1] MALVICK A J. Theoretical elastic deformations of the steward observatory 230 cm and the optical sciences center 154 cm mirrors[J]. *Appl. Opt.*, 1972,11(3):575-585.
- [2] BIGELOW B C. Finite element analysis of large lenses for the keck telescope high resolution echelle spectrograph [J]. *SPIE*,1991,1532: 15-26.
- [3] 吴清文,卢镔,王家骐,等. 自重作用下中心支撑主反射镜面形变化研究[J]. 光学 精密工程, 1996,4(4):23-28. WU Q W, LU E, WANG J Q, *et al.*. Study on the surface figure changes of primary mirror centrally supported under gravity load[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996,4(4):23-28. (in Chinese)
- [4] 陈亚,宋淑梅. 大口径轻质反射镜坯的制造[J]. 光学 精密工程, 2004,12(4):402-405. CHEN Y, SONG SH M. Manufacturing of a big aperture lightweight mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(4):402-405. (in Chinese)
- [5] MALVICK A J, PERSON E T. Theoretical elastic deformations of a 4 m diameter optical mirror using dynamic relaxation[J]. *Appl. Opt.*, 1968, 7:1207-1212.
- [6] MALVICK A J. Dynamic relaxation; a general method for determination of elastic deformation of mirrors[J]. *Appl. Opt.*, 1968, 7:1207-1212.
- [7] MACK B. Deflection and stress analysis of a 4.2-m diam primary mirror of an altazimuth-mounted telescope[J]. *Appl. Opt.*, 1980, 19:1000-1006.
- [8] HATHEWAY A E. Mounting for a four meter glass mirror[J]. *SPIE*, 1990, 1303:142-149.
- [9] BIGELOW B C. Finite element analysis of large lenses for the Keck Telescope high resolution echelle spectrograph [J]. *SPIE*, 1991, 1532:15-20.
- [10] HATHEWAY A E. Finite element methods for evaluating optical system performance[J]. *SPIE*, 1984, 518:145-150.
- [11] 徐荣伟,刘立人,刘宏展,等. 大型干涉仪镜子的支承设计与温度变形分析[J]. 光学学报,2005,25(6):809-815. XU R W, LIU L R, LIU H ZH, *et al.*. Support schemes and thermal effects analyses of large-aperture interferometer mirrors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005,25(6):809-815. (in Chinese)
- [12] SMIT M K, CORVAN D. Phasar-based WDM-divices: principles, design and applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1996, 2(2):236-250.
- [13] TOSHIYUKI T, SONKO O, YUTAKA K, *et al.*. Stability of the reference flat used in Fizeau interferometer and its contribution to measurement uncertainty[J]. *SPIE*, 2003,5190: 431-439.
- [14] LOAD R. Interference bands and their application[J]. *Nature*,1893,48:212-214.
- [15] FRITZ S. Absolute calibration of an optical flat[J]. *Opt. Eng.*,1984,23(4):379-383.
- [16] KEENAN P B. Pseudo-shear interferometry[J]. *SPIE*, 1984,123(4):2-9.
- [17] TOSHIYUKI T, NOBUAKI U, KENICHI H, *et al.*. Japanese ultimate flatness interferometer (FUJI) and its preliminary experiment[J]. *SPIE*, 2001,4401:83-90.
- [18] BORN M, WOLF E. *Principle of Optics*[M]. London: Pergamon Press,1959.

作者简介:武旭华(1977-),女,河北石家庄人,南京理工大学光学工程专业博士研究生,主要从事光学测试技术方面的研究。E-mail: wuxh1977@sina.com