

# 干涉检测中环境温度引起的镜面变形分析

陈 华<sup>1,2</sup> 史振广<sup>1</sup> 隋永新<sup>1\*</sup> 杨怀江<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 在达到 1 nm 量级的光学元件表面面形干涉检验时,被检元件由温度变化引起的面形偏差是不能忽略的。分析了干涉检验时存在的各种环境温度情况,对不同情况下被检元件内外温度分布进行了仿真,并将温度场作为静力学分析的载荷条件,进行了镜面温度变形分析。计算出了带支撑的直径为 300 mm 凸球面透镜在不同温度分布下的镜面变形量,并通过球面拟合计算出面形的峰谷(PV)值和均方根(RMS)值,得出要保证 1 nm 精度的面形测量就需要保证环境温度水平漂移不超过 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,镜子轴向温度差不超过 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,直径方向温度差不超过 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的结论,为高精度面形检测的实施提供了参考。

**关键词** 光学检测;凸透镜;热变形;环境温度;有限元法

**中图分类号** TH741 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0112007

## Thermal Deformation Analysis of Optical Surfaces Caused by Environmental Temperature during Interferometric Testing

Chen Hua<sup>1,2</sup> Shi Zhenguang<sup>1</sup> Sui Yongxin<sup>1</sup> Yang Huaijiang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** For interferometric testing of optics with surface qualities of approximately 1 nm, thermally caused deformation of mirror surface cannot be ignored. The various temperature conditions of interferometer environment are analyzed and temperature distribution of the mirror under test is simulated using I-Deas software. The temperature distribution was then used as thermal load of linear static analysis to perform mirror thermal deformation analysis. The peak-valley value and root-mean-square value surface figure error of a  $\phi 300$  mm convex lens caused by ambient temperature fluctuation is achieved. The environmental temperature fluctuation should be less than  $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , temperature difference be less than  $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$  in mirror axis direction and  $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  in mirror diameter direction to perform optical test of 1 nm surface figure error, which is instructive to high quality optical testing.

**Key words** optical testing; convex lens; thermal deformation; environment temperature; finite element method

**OCIS codes** 120.0120; 120.3180

## 1 引 言

随着半导体制造技术的飞速发展,每一代新的曝光光刻设备都对分辨率提出了更高的要求,因而

涉及到大口径、超高精度光学表面的检测。特别是极紫外(EUV)光刻技术的发展,对光学表面提出了达到均方根(RMS)值为 0.1 nm 的面形要求,随之

**收稿日期**: 2010-04-01; **收到修改稿日期**: 2010-04-26

**基金项目**: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新基金资助课题。

**作者简介**: 陈 华(1983—),女,博士研究生,主要从事高精度面形干涉仪环境控制方面的研究。

E-mail: chenhuatyb@126.com

**导师简介**: 杨怀江(1966—),男,博士,研究员,主要从事光学信息融合、信息安全和干涉检验信息处理方面的研究。

E-mail: yanghj@sklao.ac.cn

\* **通信联系人**。E-mail: suiyx@sklao.ac.cn

而来的是,检测设备的精度需要高于  $0.1 \text{ nm}^{[1]}$ 。30多年来,在高精度波前探测时通常倾向于采用移相干涉法<sup>[2]</sup>,面形测量的重复性精度能够达到  $\lambda/1000$  (RMS),但复现性却严重地受到环境条件的影响。这些环境因素包括环境温度、气流扰动、各种形式的振动、环境湿度和压强等。无论从设备上还是从软件算法上,都不断有新的方法出现来抵抗这些动态或者静态的环境扰动<sup>[2~4]</sup>。但是,环境温度导致的被测镜面面形的改变是无法从软件上去除的,其温度变化引起的面形偏差被直接当作了镜面的误差,这在高精度镜面面形检测中是不能忽略的。为此,某些超高精度面形干涉检验对实验室温度的稳定性和均匀性甚至提出了优于  $\pm 0.01 \text{ }^\circ\text{C}$  的要求<sup>[5]</sup>,为高精度面形检测实验室的建设提出了很大的挑战。

为了更好地认识环境温度条件对高精度面形检测的影响,以利于合理的环境控制指标,分析环境温度引起的镜面变形是必要的。采用有限元方法分析镜面变形的技术已经很普遍,例如文献[6]应用有限元法分析了透镜自重变形引起的波像差,文献[7]分析了径向温度载荷下遥感器窗口的热光学特性,为分析镜面温度载荷-静力变形提供了参考,文献[8]进一步分析了平面薄透镜( $\phi 350 \text{ mm}$ )在不同厚度下受轴向热膨胀的影响,得到了最优的镜子厚度。但是应用于高精度干涉检验分析时,由于镜子处于受控的对流环境中,环境温度的不稳定性、空间分布的不均匀性以及各点温度波动的随机性都将对镜面产生影响,因此对分析工况的设定以及数值处理都提出了特殊的要求。基于以上考虑,本文结合项目高精度面形检测需求,分析了大口径凸透镜在干涉检验环境下的温度变形,为高精度面形检测的实施提供参考。

## 2 高精度干涉检验环境温度特点分析

在高精度干涉检测中,温度是一个非常重要的因素。环境温度的变化不仅会引起空气折射率的变化,而且会引起干涉仪结构及被检镜面的变形,导致测量误差。因此,高精度的面形干涉检验都需要在温度受控的环境中进行,被检镜子受环境温度变化影响的主要因素也可以分为以下三个方面:

1) 空调送风温度稳定性的影响。表现在两个方面,一方面是空调送风温度与设定值间的偏差,另一方面是送风温度随时间的变化。在镜子与周围环境换热的三种途径中,对流换热是主要因素,因此镜子的温度主要受空调送风温度的影响。镜子在不同的

温度水平下具有不同的面形,空调送风温度与设定值间的偏差将导致镜子温度水平的不同,从而引起测量误差。另一方面,在实际空调系统中,空调出口风温度也是在某个温度水平上作周期性变化,这种变化将导致镜子内外温度分布的不一致。

2) 热源/热沉分布不均匀性的影响。为了达到高精的环境温度控制,一般都需要对热源(包括照明灯具)进行热隔离,但是干涉仪主机和主动隔振系统等发热是没有办法完全隔离的。前者会形成从参考镜到被检镜方向上的温度梯度,后者会形成从地面到隔振台方向的温度梯度。其它热源的存在也会在不同程度上导致空间温度分布的不均匀性。

3) 大热容的影响。在干涉检验中大的热容,如隔振平台、地面等在温度上存在与空调送风温度相对滞后的差距,从而形成热源或热沉,导致空间温度的梯度分布。而地面由于和大地连接,容易受到外部大气温度一天的变化、季节的变化影响,形成周期性的温度波动,对室内温度分布也是成周期性的温度梯度影响。因此,需要对这些热容表面进行隔热处理。

通过以上分析,可以将镜子温度受环境温度的影响分为以下三种情况:

1) 镜子整体温度水平的变化,这在检测平板时的效果可能不明显,但是对于球面镜来说影响较大;

2) 镜子温度在空间分布不均匀,以沿镜子轴向、镜子中心到边缘以及镜子直径方向的温度梯度为代表;

3) 镜子温度随时间漂移,由于存在换热过程,镜子的内外温度分布不一致,从而产生热应力和应变。

从以上三个方面,以某光刻机投影物镜的工作温度  $21 \text{ }^\circ\text{C}$  为基准,分析了其中的  $\phi 300 \text{ mm}$  双凸球面透镜温度水平变化和空间分布不均匀性从  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $0.05 \text{ }^\circ\text{C}$  到  $0.01 \text{ }^\circ\text{C}$  变化时的镜面面形变化,得出了不同环境温度条件对镜面面形测量的影响。

## 3 镜面变形分析方法

### 3.1 有限元分析过程及面形计算方法

如图 1(a)所示,针对立式干涉检验中存在的三种温度工况进行分析,镜子温度空间分布不均匀性工况如图 1(b)~(d)所示。镜子为熔石英双凸球面透镜,光轴方向与重力方向一致,采用底部支撑与侧面辅助支撑相结合的支撑方式,支撑结构采用的是热膨胀系数与熔石英最接近的殷钢材料。为了直观地看到温度对面形的影响情况,分析时不施加重力条件。

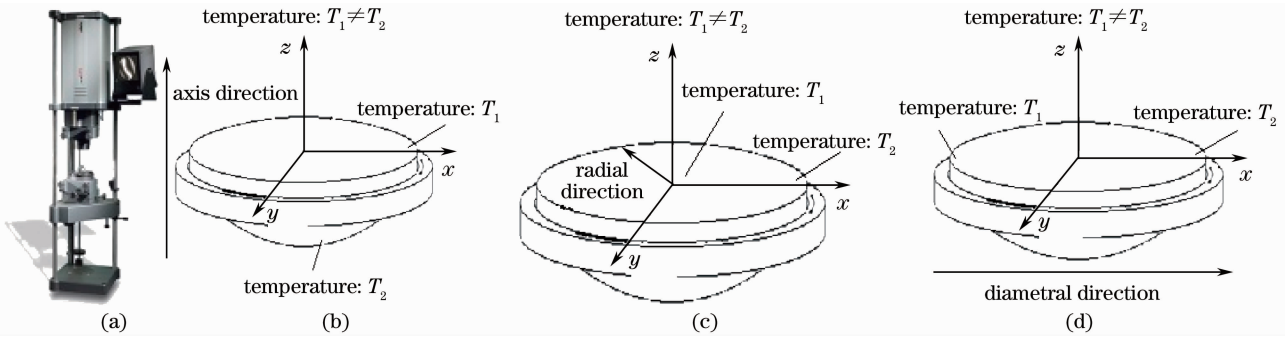


图 1 立式干涉仪及环境温度场示意图。(a)立式干涉仪,(b)轴向温差,(c)径向温差,(d)直径方向温差

Fig. 1 Schematic diagram of vertical interferometer and environment temperature field. (a) vertical interferometer, (b) axial temperature gradient, (c) radial temperature gradient, (d) diametral temperature gradient

有限元分析流程如下<sup>[9~11]</sup>：首先，在 Hypermesh 软件中划分网格，导入到 I-Deas TMG 中加温度载荷和边界条件，进行热分析；然后，将分析得到的温度场作为静力学分析的载荷条件，在 I-Deas 中建立静力学分析模型并施加边界约束，采用 MD Nastran 作为静力学分析求解器求解，求解的结果再导入 I-Deas 中进行后处理；最后，将静力学分析得到的镜面节点信息（包括变形前坐标和变形量）输出 excel 文件，编制 Matlab 程序计算面形。面形计算时，假设镜面变形量较小，变形后仍然是球面，采用最小二乘法进行球面拟合，求变形后各节点与最佳拟合球面间的峰谷(PV)值和 RMS 值，作为变形后镜面的面形值<sup>[12]</sup>。热分析和静力学分析采用的是同一个模型，避免了 Map 温度场时带来的误差，同时也充分发挥了 I-Deas TMG 热分析的优势，可以方便地应用瞬态热分析结果作为载荷情况进行静力学分析。

### 3.2 计算精度保证

该片镜子设计时提出了 1 nm 精度的面形要求，所以在分析时需要考察温度引起的 0.1 nm 量级的面形变化。由于需要分析的镜面变形量最小可能在  $10^{-9} \sim 10^{-10}$  m 量级，因此，不仅对网格质量要求很高，而且需要注意模型转换时的数据输出精度。普通输出时网格节点坐标值只能保证小数点后 4 位，这种舍去误差能达到  $10^{-7}$  m，远远超过了温度变形量，所以无论是模型转换的输出，还是计算结果

的输出，都要采用双精度格式。经计算，采用双精度输出格式时，舍去误差在  $10^{-12} \sim 10^{-13}$  m 量级，是需要检测的最高精度的 1%，能满足计算要求。镜子及支撑的有限元模型采用计算精度较高的六面体单元，如图 2 所示，共由 27207 个节点、25776 个单元组成。

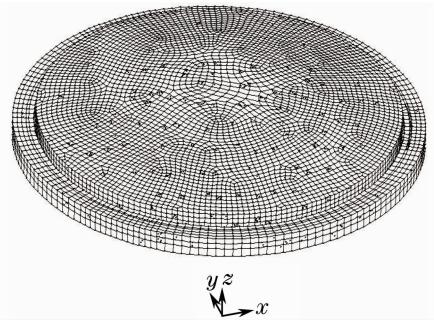


图 2 镜子及其支撑的有限元模型

Fig. 2 Finite element method model of the mirror and its support

## 4 有限元分析结果及讨论

### 4.1 环境温度水平对面形的影响

环境温度水平对镜子的影响，体现在环境基础温度不同时，镜子整体的温度也不同，测得的镜面面形也不一致，即所谓测量中的复现性不好。分析时将镜子及其支撑施加均匀温度场，计算不同温度水平下镜面面形的 PV 值和 RMS 值，计算结果如表 1 所示。

表 1 不同温度水平下镜面面形

Table 1 Mirror surface figure under different levels of temperature

| Mirror surface figure | Without temperature load | Temperature rise 1 °C | Temperature rise 0.1 °C | Temperature rise 0.05 °C | Temperature rise 0.01 °C |
|-----------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| PV /nm                | $1.5242 \times 10^{-3}$  | 2.5786                | 0.2579                  | 0.1289                   | $2.5782 \times 10^{-2}$  |
| RMS /nm               | $4.2592 \times 10^{-4}$  | 0.3011                | $3.0114 \times 10^{-2}$ | $1.5057 \times 10^{-2}$  | $3.0155 \times 10^{-3}$  |

## 4.2 空间温度分布不均匀对面形的影响

环境温度空间分布的不均匀,在稳态情况下也会传递到镜体内部。立式检测中,热源在上方,容易形成垂直方向温度分层,在镜体产生轴向温差,即镜子一面温度高于另一面,镜子内部温度呈轴向梯

度分布;另一方面,环境温度变化时,也会出现中心温度高于边缘温度的径向温差和沿镜子直径方向的温度梯度。分析了这三种情况下镜面的变形及面形的PV值和RMS值,计算结果如表2所示。

表2 不同空间温度分布下镜面面形

Table 2 Mirror surface figure under different spatial temperature distribution

| Mirror surface figure | Without temperature load | Axial temperature gradient |                         |                         | Radial temperature gradient |                         |                         | Diametral temperature gradient |                         |
|-----------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------|-------------------------|
|                       |                          | 1 °C                       | 0.1 °C                  | 0.05 °C                 | 1 °C                        | 0.1 °C                  | 0.05 °C                 | 1 °C                           | 0.1 °C                  |
|                       |                          | PV /nm                     | $1.5242 \times 10^{-3}$ | 7.5367                  | 0.7529                      | 0.3763                  | 5.2575                  | 0.5259                         | 0.2630                  |
| RMS /nm               | $4.2592 \times 10^{-4}$  | 1.8819                     | 0.1881                  | $9.3965 \times 10^{-2}$ | 0.5326                      | $5.3258 \times 10^{-2}$ | $2.6635 \times 10^{-2}$ | 0.3256                         | $3.2556 \times 10^{-2}$ |

## 4.3 环境温度随时间漂移对面形的影响

环境温度随时间的漂移会引起镜体温度水平的变化及镜子内外温度分布的不均匀。根据上述分析结果,只要保证环境温度水平的漂移量不超过0.1 °C,漂移速率不要太快,就可以保证镜面面形的改变量在可以接纳的范围内。

## 4.4 结果讨论

本文分析的是超高精度面形检测情况,涉及到的面形偏差在1 nm量级,所以需要严格保证模型计算的正确性。表1,2中无温度载荷时镜面的PV值和RMS值优于 $10^{-2}$  nm,表明模型网格输出精度满足分析要求。

从以上有限元分析结果可以看出:

1)在达到纳米量级的高精度检测中,环境温度水平的变化对面形具有重要的影响,为了保证1nm精度的面形测量,就需要保证环境温度水平的变化量不超过 $\pm 0.1$  °C;

2)比较表1,2可以看出,空间温度分布不均匀性对镜面面形的影响较镜子温度水平的影响更为显著,这也是在高精度面形干涉检测中要尽量消除环境温度梯度的原因;

3)从表2可以看出,轴向温度梯度对镜面面形的影响较径向温度梯度的影响显著,而这是立式干涉检验中最容易出现的情况,因此需要隔离镜面上方或下方的热源;

4)在保证镜子轴向温度梯度,即被检镜前后面间温差优于 $\pm 0.05$  °C的情况下,保证镜子直径方向上的总温度差不超过 $\pm 0.1$  °C,即可保证温度梯度引起的镜面面形偏差满足1 nm精度的检测要求,从镜面变形的角度为高精度干涉仪环境温度控制提供了参考。

## 5 结 论

在分析干涉检验环境温度条件的基础上,以某光刻机投影物镜中 $\phi 300$  mm凸透镜为例,分析了环境温度对镜面变形的影响,得出了在达到纳米量级精度的面形干涉检验中必须满足的环境温度条件,分析结果对同类光学检测具有参考价值,对高精度面形检测的实施具有指导意义。

## 参 考 文 献

- Dörband B, Seitz G.. Interferometric testing of optical surfaces at its current limit[J]. *Optik*, 2001, **112**(9): 392~398
- Leslie L. D.. Environmentally friendly interferometry [C]. *SPIE*, 2004, **5532**: 159~169
- Leslie L. D. Suppressing vibration errors in phase-shifting interferometry[C]. *SPIE*, 2007, **6704**: 670402
- Wu Xinmin. Research on Vibration-Resistance Technology for Optical Interferometry [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2001. 15~29  
吴新民. 光干涉测试中的抗振技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2001. 15~29
- Wolf E.. Progress in Optics[M]. New York: American Elsevier Publishing Company, 1976. 158~159
- Zhang Dejiang, Liu Liren, Xu Rongwei *et al.*. Finite element analysis for wavefront error of lenses induced by gravity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 538~541  
张德江, 刘立人, 徐荣伟 等. 透镜自重变形引起波像差的有限元分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 538~541
- Wu Qingwen, Lu Zesheng, Lu E *et al.*. Study on the thermal optics property of a window applied on a space remote sensor[J]. *Optical Technique*, 2001, **27**(3): 260~265  
吴清文, 卢泽生, 卢 铿 等. 空间遥感器中窗口的热光学特性研究[J]. *光学技术*, 2001, **27**(3): 260~265
- Li Ming, Wu Qingwen, Yu Fei. Optimization of optical window glass thickness based on the thermal optical analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 210~213  
黎 明, 吴清文, 余 飞. 基于热光学分析的光学窗口玻璃厚度的优化[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 210~213
- Tan Fanjiao, Qiao Yanfeng, Li Yaobin *et al.*. Finite element analysis for surface shape deformation of photo-electronic theodolite primary mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 756~763  
谭凡教, 乔彦峰, 李耀彬 等. 光电经纬仪主镜面形变化的有限元

- 分析[J]. 光学学报, 2008, **28**(4): 756~763
- 10 Yang Licheng, Ling Ning. Analysis on wavefront errors of active deformable mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29** (3): 569~574
- 杨李成, 凌 宁. 能动变形反射镜波面误差特性分析及实验研究 [J]. 光学学报, 2009, **29**(3): 569~574
- 11 Peng Qing, Chen Guangnan, Wang Xiufeng. Similarity criterion of laser-assisted pre-stress forming[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1261~1266
- 彭 青, 陈光南, 王秀凤. 激光辅助预应力成形的相似性问题 [J]. 中国激光, 2009, **36**(5): 1261~1266
- 12 Shi Jianliang, Ren Ge. Integrated analysis and simulation of opto-mechanical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29** (10): 2866~2870
- 史建亮, 任 戈. 光机系统集成分析仿真研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(10): 2866~2870