

高精度标准镜支撑结构的研究与设计

丁 玲^{1,2}, 王 涛¹, 杨洪波¹, 贾宏光¹

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为了保证高精度光学元件面形检测精度, 必须对干涉仪标准镜自身的面形精度进行严格控制。在考虑标准镜自重的情况下, 采用有限元方法研究了不同胶点数量及分布形式、不同的镜框支撑方式对参考面面形精度的影响。根据研究结果, 针对球面标准镜面形精度要优于 $\lambda/40$ 的要求, 设计了口径 $\phi 150\text{mm}$ 的标准镜的支撑方式, 采用 12×3 点胶接、镜框底面六点的挠性支撑方式, 经有限元分析得到: 参考面面形的 PV 值为 7.36nm , RMS 值为 1.52nm ; 并验证了温度变形较自重变形很小。结果表明, 各项指标满足设计要求, 证明了结构设计的合理性。

关键词: 标准镜; 参考面; 支撑结构; 自重变形; 有限元法

中图分类号: TH703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)04-1172-04

Investigation and design for structure of high-precision reference mirror

Ding Ling^{1,2}, Wang Tao¹, Yang Hongbo¹, Jia Hongguang¹

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to ensure the measuring precision of high accuracy optical, the accuracy of the interferometer reference mirror must be controlled strictly. The influences of different number of adhered points and point distribution, and different support schemes on the shapes of reference mirror were investigated by means of finite element method under gravitational conditions. In order to achieve the peak to valley(PV) value of reference sphere mirror which is better than $\lambda/40$, a kind of support structure of $\phi 150\text{mm}$ reference mirror was designed according to the results of research. The experimental results by means of finite element method indicate that the peak to valley (PV) value and root mean square (RMS) value of the reference surface are only 7.36nm and 1.52nm by support scheme with 12×3 distributed and six-points flexible support, and the thermal deformation is less than gravity deformation. These results demonstrate that all targets validate the rationality of structure and it can well satisfy the requirements.

Key words: reference mirror; reference surface; support structure; gravity deformation; finite element method

收稿日期: 2013-08-21; 修订日期: 2013-09-24

基金项目: 中国科学院“三期”创新工程

作者简介: 丁玲(1987-), 女, 博士生, 主要从事精密机械结构设计方面的研究。Email: dingling7891@126.com

导师简介: 杨洪波(1963-), 男, 硕士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光机电一体化计算机辅助工程技术的研究。Email: yanghb@vip.163.com

0 引言

现代高精度光学仪器的快速发展不仅对光学透镜的设计、加工、装配及调校提出了越来越高的要求,对光学元件的检测要求也越来越高,尤其是微电子光刻技术即深紫外短波长光刻技术的发展与应用,其光学元件的精度达到纳米量级^[1]。而干涉仪是现代光学元件检测的常用仪器,它是利用光干涉的原理来检测被检光学元件的面形精度,其标准具为干涉检测提供标准参考面,因此其参考面的精度对干涉检测起决定性的作用^[2]。参考面的面形精度不仅取决于标准镜本身的加工质量,而且与其支撑方式、使用状态及使用环境有着紧密的关系。在不同的支撑方式下,自重变形是影响面形精度的一个非常重要的因素。因此,在考虑自重的影响下,对标准镜无应力支撑方式的研究具有重要意义。

目前国外对干涉仪标准具的研究已经取得了较大的成果:美国 WYKO 公司标准参考镜采用的是在标准参考镜与镜框之间引入微重力传感器和低应力胶粘剂来减小平镜的变形和振动的干扰;澳大利亚波长谐调移相干涉仪标准参考镜采用六点外圆轴向支撑,并采用三面互检法来检测参考镜的面形,测得面形误差最大 PV 值为 $\lambda/40$;日本 FUJI310 mm 斐索移相干涉仪标准参考镜采用 18×3 个胶点侧面支撑,采用三面互检法标定参考面的面形,测得面形误差最大 PV 值为 30 nm。国内关于标准具的机械结构研究也已取得一定成果:采用有限元方法研究了大型干涉仪镜子在不同支撑方式下的表面变形与温度影响^[3];采用有限元方法对参考镜不同支撑方式下的变形进行了分析及优化设计^[4];采用有限元方法研究了透镜结构形式及支撑方式与镜面变形之间的关系^[5];研究了 1.5 m 级大口径标准镜的支撑系统^[6]。

1 标准镜光机结构

根据光学检测需求设计口径 $\phi 150 \text{ mm}$, F 数 1.5 的球面标准具的支撑方式,其参考面的面形精度 PV 值要优于 $\lambda/40$ 。标准具的光机结构如图 1 所示。其中标准镜各部分构件材料性能见表 1。

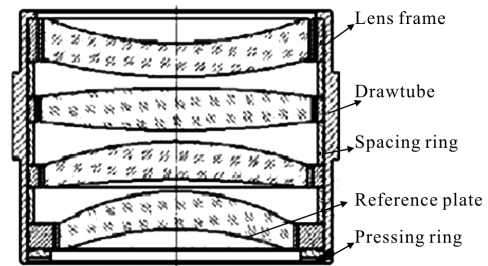


图 1 F 数 1.5 的 6 in 球面标准具光机结构

Fig.1 Opto-mechanical structure of 6 in $F/1.5$ reference sphere mirrors

表 1 材料属性表

Tab.1 Properties of different materials

Material	Density / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Elastic modulus/ GPa	Poisson's ratio	Coefficient of thermal expansion/ $^{\circ}\text{C}$
Fused silica	2.201	72.7	0.17	0.55×10^{-6}
Adhesive	1.1×10^3	20	0.49	200×10^{-6}
Steel	8.3×10^3	150	0.33	7.5×10^{-6}

2 标准镜光机结构支撑分析

2.1 透镜的支撑

标准镜设计中需要考虑的影响参考面面形精度的因素主要有标准镜自身重力的影响、环境温度变化的影响、外界的扰动等,这里仅对重力对面形的精度影响作一研究,而透镜的自重变形与其装卡方式及工作时的放置状态有着密切的关系,由于此标准具为立式干涉仪使用,标准镜处于水平放置状态。透镜常用的支撑方式主要有机械背部支撑及胶接,在胶接方式中随着胶接点数及胶接点分布形式的不同,镜面精度会有很大的变化,因此利用有限元软件分别研究了 3×1 、 6×1 、 12×1 、 12×2 、 18×3 及全胶胶接 7 种不同胶接形式对参考面面形精度的影响。其对比结果如图 2 所示。

由图 2 可以看出,各种不同支撑方式下参考面变形最大点在透镜中心,其中应力最大点在胶接边缘处。随着胶接点数的增多,参考面最大变形越来越小,最大应力也越来越小,全胶胶接参考面最大变形最小, 18×3 点胶接形式比 12×3 点胶接形式参考面最大变形要小,但相差并不是很大,综合考虑胶接工艺性,最终选择 12×3 点的胶接形式。

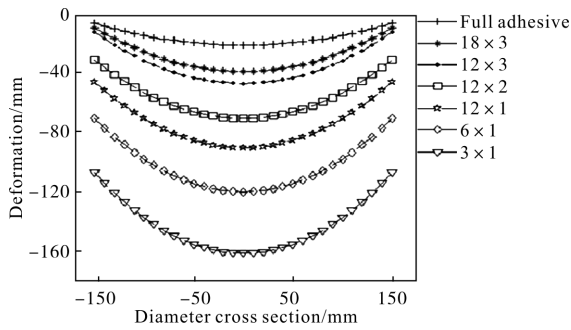


图 2 透镜横截面镜面自重下变形

Fig.2 Deformation of diameter cross section under gravitational conditions

2.2 镜框的支撑研究

由于标准镜质量较大，在对镜框进行支撑时也会产生变形。对于高精度要求的标准镜的支撑，镜框的变形会传递到透镜上，进而影响参考面的精度，因此有必要对不同镜框支撑方式下标准镜参考面的面形变化作一研究^[7]，在此对镜框的底面三点、底面六点、底面环面、侧面三点、侧面六点、侧面环面六种形式进行对比，其对比结果见表 2。

由表 2 可以看出，支撑点数越多参考面的面形精度越高，环面支撑方式镜面面形精度最高，但是与六点支撑方式相比变化量不是很大，镜框底面支撑

表 2 镜框在不同支撑方式下的下的参考面面形

Tab.2 Reference surface shapes with lens frame in different support schemes

Support schemes	Three-points on underside	Six-points on underside	Ring surface on underside	Three-points on side	Six-points on side	Ring surface on side
PV/nm	29.17	19.88	17.12	33.28	20.96	18.04
RMS/nm	8.04	5.98	5.36	8.76	6.42	5.78

方式比镜框侧面支撑方式镜面最大变形要小，因此，综合考虑选择镜框底面六点支撑方式。

2.3 标准镜光机结构

针对以上分析比较，最终标准镜装卡结构采取了侧面 12×3 点胶接，镜框底面 6 点均布的挠性支撑方式^[8-10]，该结构通过在镜框上加工出六条狭缝将镜框分为内环和外环两部分，这六个挠性结构将内环与外环隔离，透镜与内环通过胶黏剂连接在一起，外环采用底面六点支撑方式固定在镜筒上，这样外环产生的微小变形不会传递到内环，挠性结构起到了隔振的作用，六个挠性结构均匀布置，其刚度一致。因此在外界环境变化时，仍然可以使透镜保持共轴，当外部环境变化消失后，透镜能够恢复到正确的方位及位置。标准镜具体支撑结构如图 3 所示。

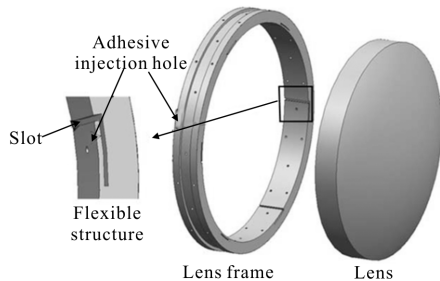


图 3 标准镜挠性支撑结构

Fig.3 Flexure-support structure of reference mirror

3 有限元仿真分析

3.1 标准镜重力变形分析

标准镜结构的凹面为参考面，其面形精度 PV 值要优于 $\lambda/40$ ，将标准镜结构运用 ANSYS 软件分析，其模型如图 4 所示。模型中一共 172 656 个单元，294 485 个节点，标准镜与胶黏剂、镜框与胶黏剂之间建立接触单元，整个结构组件施加重力场，镜框底面六点均布施加法向约束。分析得到标准镜自重下参考面变形图，具体如图 5 所示。提取各节点结果信息，将各节点变形前坐标与变形后坐标提出，并采用最小二乘法对数据进行球面拟合，得出参考面的面形质量，其最大 PV 值为 7.36 nm，最大面形误差 RMS 值为 1.52 nm，镜面结构的最大刚体位移为 0.048 μm ，其面形精度远小于系统提出的 $\lambda/40$ 。

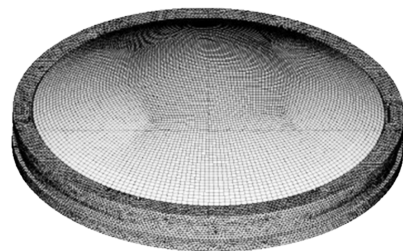


图 4 标准镜结构的有限元模型

Fig.4 Finite element model of reference sphere

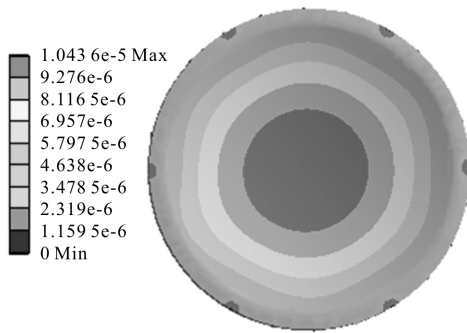


图5 标准镜参考面重力变形图

Fig.5 Displacement of reference surface with gravity load

3.2 标准镜的热稳定性分析

在光学检测中,随着检测时间的增加,标准镜所处的环境温度会不断变化,对于标准镜高精度的要求,有必要验证其在温度场变化情况下参考面的面形精度是否符合系统要求。在实验室的建设中环境温度控制在 $20\pm 1^{\circ}\text{C}$,因此将图4的有限元模型通过施加不同的温度场,分别计算了温度变化为 0.1°C 、 0.5°C 、 1°C 、 2°C 情况下的标准镜的面形精度,其分析结果见表3。

表3 标准镜参考面在不同温度下的面形值

Tab.3 Reference surface shapes of reference mirror at different temperatures

Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	PV/nm	RMS/nm
0.1	0.08	0.012 2
0.5	0.50	0.064
1	0.96	0.126
2	2.02	0.268

从表3中可以看出,在温度变化较小的情况下,标准镜的参考面的热变形与重力变形相比很小,因此在设计中可以主要考虑自身重力对面形精度的影响。

4 结论

根据光学检测的需求,分析并设计了口径 $\phi 150\text{ mm}$ 的标准镜的光机结构支撑方式,研究了不同胶接点数量及其分布、镜框的不同支撑方式及镜框支撑点数对标准镜在重力作用下面形精度的影响,通过综合分析比较,最终采用侧面 12×3 点胶接、镜框底面六点均布的挠性支撑方式,并对支撑结

构进行有限元分析,得出标准镜参考面面形精度,其最大PV值为 7.36 nm ,最大面形误差RMS为 1.52 nm 。通过对结构进行热稳定性分析,可以看出温度的变化对参考面面形精度影响不大,在设计中可以主要考虑自重的影响。此设计结构在自重作用下最大面形PV值远小于设计要求 $\lambda/40$,说明此设计结构是合理的,能够达到光学检测的需求。

参考文献:

- [1] Cote D, Ahouse D, Galburt D, et al. Advances in 193nm lithography tools[C]//SPIE, 2000, 4000: 542-550.
- [2] Peng Jianhua, Shen Yibing, Wang Kaiwei, et al. Error impact analysis and experimental research for absolute testing of spherical surfaces[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1345-1350. (in Chinese)
- [3] Xu Rongwei, Liu Liren, Liu Hongzhan, et al. Support schemes and thermal deformation analysis of large aperture interferometer mirrors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(6): 809-815. (in Chinese)
- [4] Wu Xuhua, Chen Lei, Wang Lei. Design and test of reference mirror in $\phi 300\text{ mm}$ interferometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15 (8): 1235 -1240. (in Chinese)
- [5] Lei Jiang, Jiang Shilei, Cheng Gang, et al. Deformation of high accuracy photolithographic object lens [J]. *Opto - Electronic Engineering*, 2005, 32(2): 12-14. (in Chinese)
- [6] Liu Yongqi, Wu Jinhua, Hu Mingyong, et al. Research on support system for 1.5m aperture mirror [J]. *Optical Technique*, 2011, 37(4): 429-432. (in Chinese)
- [7] Wang Yang, Zhang Jingxu, Yang Fei. Support structure of large -aperture telescope primary mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35: 31-34. (in Chinese)
- [8] Xin Hongwei, Yang Jinsong, Gao Minghui, et al. Support design for secondary mirror of high resolution space telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9): 1724-1729. (in Chinese)
- [9] Tan Jinguo, He Xin, Fu Liangliang. Support technique in centre of minitype reflector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1070-1074. (in Chinese)
- [10] Zhao Lei, Gong Yan. Design and analysis for the high -precision lens support structure of objective lens for lithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32 (9): 1-6. (in Chinese)