

文章编号: 0253-2239(2005)06-809-7

# 大型干涉仪镜子的支承设计与温度变形分析\*

徐荣伟 刘立人 刘宏展 张德江

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要:** 在星间激光通信中, 涉及对大口径衍射极限激光波面的检测, 为保证测量精度, 必须严格控制波面干涉仪镜子的自重和温度变形。采用有限元方法对大型干涉仪镜子在不同支承方式下的表面变形进行了分析, 结果表明, 接触角为  $180^\circ$  的钢带支承是较好的支承方式, 反射镜表面变形峰-谷(P-V)值仅为 1.35 nm, 均方根(RMS)值为 0.363 nm。根据这一结论, 设计了一个固定支承点与浮动支承相结合的超静定钢带支承结构。在该结构下, 分析了镜子轴向、径向、周向的温度梯度效应, 分析数据表明, 镜子的热弹性变形远大于自重变形, 建议采取一定的温控措施, 并采用平均效应的方法降低热效应的影响。

**关键词:** 应用光学; 光机热分析; 干涉仪镜子; 支承; 温度梯度; 有限元法

中图分类号: TH74 文献标识码: A

## Support Schemes and Thermal Deformation Analysis of Large-Aperture Interferometer Mirrors

Xu Rongwei Liu Liren Liu Hongzhan Zhang Dejiang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract:** In the field of inter-satellite communication, the measurement of large-aperture and diffraction limit wavefront is required. In order to ensure the measuring precision, the deformations of the interferometer mirrors induced by self-weight and the thermal effects must be controlled strictly. In a variety of support schemes, the surface deformations of large-aperture interferometer mirrors are computed by means of finite element method. By comparison, the band support of  $180^\circ$  wrap angle is accepted to be optimum. In that case, the peak-to-valley (P-V) value is only 1.35 nm and RMS value is 0.363 nm. According to the results, the statically indeterminate supporting structure is designed. In that mounting configuration, the thermoelastic analysis for the mirror is performed for special thermal effects (axial, radial, circumferential temperature gradients). According to the results, it is clear that the influence of thermal gradient effects is much greater than the ones of self-weight. Lastly, some suggestions (relative constant temperature circumstance and average processing) are given to reduce the influence of thermal effects.

**Key words:** applied optics; thermal-structural-optical analyses; interferometer mirror; support; temperature gradient; finite element method

## 1 引 言

在星间激光通信中, 涉及对大口径衍射极限激光波面的检测, 因而需要使用大型精密干涉仪。为保证测量精度, 必须严格控制干涉仪的精度, 干涉仪镜子是干涉仪的重要组成部分, 它的精度直接影响整个干涉仪的精度。对一块大型干涉仪镜子, 在检测和使用过程中除本身的加工误差、装配和调整误

差外, 最终质量还与以下两个方面的误差有关: 自重变形和温度变形。自重变形主要指, 由于自重作用干涉仪镜子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。温度变形是指, 干涉仪处于变化的热环境中, 各种热效应对镜子产生影响, 使镜子发生热弹性变形。镜子的自重和温度变形不仅导致表面变形, 并且会产生透射波畸变。

\* 上海市科学技术发展基金(046105004)和中国科学院创新计划资助课题。

作者简介: 徐荣伟(1975~), 男, 江苏溧阳人, 中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事干涉测试技术及光机结构的有限元分析研究。E-mail: rwxu@sohu.com

收稿日期: 2004-09-13; 收到修改稿日期: 2004-10-22

文献[1~6]中针对各种大型镜子在不同支承方式下的自重变形进行了分析和计算,采用的方法主要有差分法<sup>[2~4]</sup>和有限元法<sup>[5,6]</sup>;文献[7~13]中针对大型镜子的温度变形(主要是温度梯度)也给出了详细的分析结果。但是,上述文献中所涉及到的镜子大多数为反射镜,即使对透射镜,文中也仅给出了镜子的表面变形,对于透射镜自重和温度变形所产生的透射波畸变并没有涉及到。本文采用有限元的方法对大型干涉仪镜子的支承结构进行优化设计,并对最佳支承方式下温度梯度产生的热弹性变形进行了分析,给出了对应的表面变形值和透射波畸变量。

## 2 干涉仪镜子的垂直支承方式

大型镜子的支承方式,对镜子的应力分布和变形起决定性作用,支承方式的合理性直接影响到镜子的光学性能。对大型镜子一般采用固定支承点和浮动支承点相结合的超静定系统,其中,固定支承点起定位作用,浮动支承起卸荷作用。通常,大型镜子的垂直支承方式有点支承(集中力)、气囊、气垫支承(常压力)、钢带支承(常压力)、水银带(变压力)、硅胶(连续力)和弹簧组支承(正弦支承)等。综合考虑到经济性、安装方便、镜面变形小等方面,本文的工作主要针对点支承、钢带支承和钢带-刀口组合支承等进行讨论,在此基础上,设计出干涉仪镜子的最佳支承结构。

### 2.1 评价原则

镜子的变形主要引起光学性能的降低,应该采用光学性能的降低程度来评价。对于高精度、小像差系统通常计算变形引起的波面误差大小,其指标为峰-谷(P-V)值和均方根(RMS)值。对于反射镜,波面误差主要指反射波面误差,一般关心的是镜子表面轴向变形的大小,包括峰-谷峰谷值和 RMS 值,即表面各点相对于某一“最佳拟合面”的轴向偏差的均方根值。对于透射镜,波面误差主要指透射波畸变,在平面波入射的前提下,可以用实际出射波面与理想出射波面的光程差,即波像差来表示,指标为 P-V 值和 RMS 值,其中 RMS 值是以透射各条光线的有限元单元面积为权重。

### 2.2 有限元模型

干涉仪由 6 块镜子组成,外形尺寸相同,材料不同,2 块透反镜为熔石英玻璃,4 块反射镜为 K9 玻璃。镜子的外形尺寸及有限元模型如图 1 所示,镜子为平行平板,直径 460 mm,厚 60 mm,有限元模

型一共有 3000 多个 3 维实体单元(solid45)。

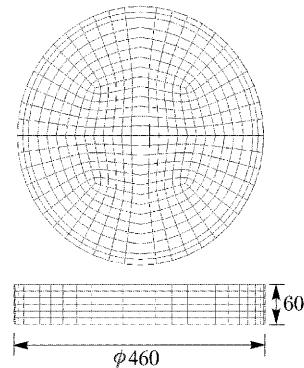


图 1  $\phi 460$  mm 镜子

Fig. 1  $\phi 460$  mm mirror

### 2.3 点支承

在大型镜子的垂直支承方式中,点支承(如图 2)是一种比较简单的支承结构,支承点与边缘的接触方式通常有点接触、线接触(刀口支承)和面接触。实践中采用较多的是刀口支承和面接触方式。下面对这两种支承方式,在不同的支承角度( $2\theta$ )下的变形进行了分析,表面变形值如表 1 所示,并给出了  $60^\circ$  支承角下的应力分布状况。由表 1 和图 3 可见,就变形量而言,面接触支承要优于刀口支承,但在支承点位置仍有较大的集中应力,容易产生局部变形,图 3 中 A~I 表示应力值。

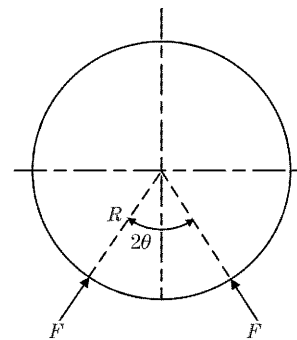


图 2 点支承

Fig. 2 Point edge support

表 1 点支承

Table 1 Surface deformations of point edge support

Supporting angle	Knife edge support		Area contact support	
	P-V /nm	RMS /nm	P-V /nm	RMS /nm
$0^\circ$	18.88	0.791	18.26	0.632
$30^\circ$	9.76	0.611	6.43	0.565
$60^\circ$	10.88	0.642	5.33	0.542
$90^\circ$	13.29	0.711	6.83	0.630
$120^\circ$	18.82	1.055	11.32	0.821

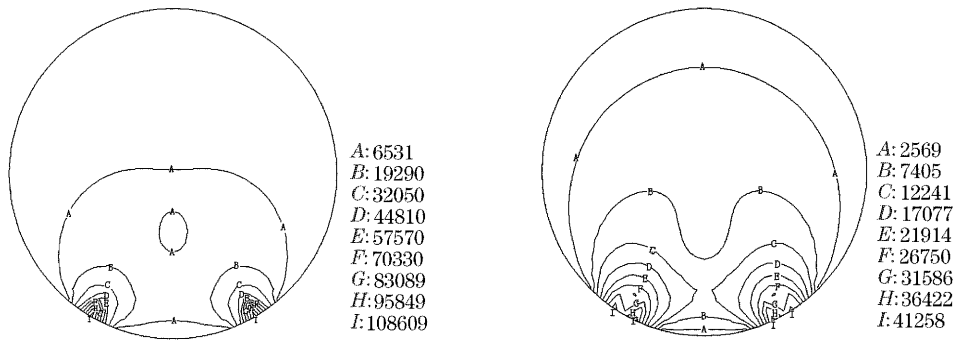


图3 应力分布图( $2\theta=60^\circ$ )。(a) 刀口支承,(b)面接触支承

Fig. 3 Stress distribution ( $2\theta=60^\circ$ ). (a) Knife support, (b) area contact support

2.4 钢带支承

钢带支承在大型镜子的垂直支承中被广泛采用,是一种传统的支承结构,其方式如图4所示,图中 $2\varphi$ 是钢带与镜子边缘的接触角,在不考虑钢带的重量和钢带与镜子边缘摩擦力的情况下,并假设钢带的张力处处相等,则钢带作用于镜子的法向压力 $P$ 为常量,根据静力平衡关系,可以求得 $P = G/(2Rd\sin\varphi)$ (在有限元模型中,连续分布的力离散为节点上的支承力),其中 $G$ 为镜子的自重, $R$ 为半径, $d$ 是厚度。

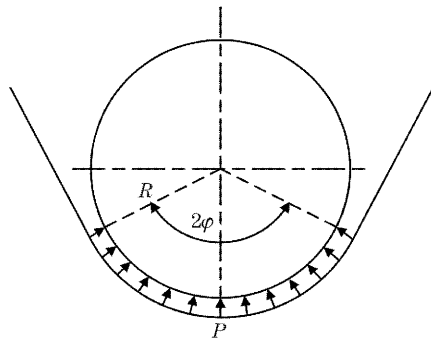


图4 带支承

Fig. 4 Band support

在这里,接触角 $2\varphi$ 从 $120^\circ$ 到 $220^\circ$ ,每隔 $20^\circ$ 为一工况,载荷为镜子自重和钢带对镜子边缘的均匀压力。在不同接触角下镜子表面的轴向变形值如表2所示,由表中可见,当接触角 $2\varphi=180^\circ$ 时,镜子表面变形最小,此时的P-V值为1.35 nm,远小于 $0.1\lambda$ ( $\lambda=632.8$  nm)。

表2 带支承

Table 2 Surface deformations of band support

Contact angle	P-V /m	RMS /nm	Contact angle	P-V /m	RMS /nm
$120^\circ$	1.52	0.375	$180^\circ$	1.35	0.363
$140^\circ$	1.41	0.367	$220^\circ$	1.43	0.369
$160^\circ$	1.36	0.364	$220^\circ$	1.46	0.370

图5给出了对应的应力分布等值线图,与点支承相比,带支承产生的表面变形下降了许多,但在接触角范围内的边缘部分仍有局部应力存在。

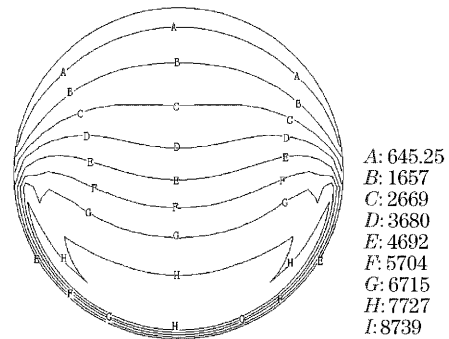


图5 带支承的应力分布图( $2\varphi=180^\circ$ )

Fig. 5 Stress distribution of band support ( $2\varphi=180^\circ$ )

2.5 钢带-刀口组合支承

如图6所示,钢带与刀口组合支承也是一种常用的垂直支承方案。图中 $2\varphi$ 为接触角, $2\theta$ 为支承角, $P$ 为钢带压力, $F$ 为刀口的支承力。由静力平衡关系,可以求得 $P = (G - 2F\cos\theta)/(2Rd\sin\varphi)$ , $P$ 为 $\varphi, \theta, F$ 的函数,通过接触角 $2\varphi$ ,支承角 $2\theta$ 和支承力 $F$ 的优化组合,或许可以找到一种最佳的支承方式。因而,问题就归结于寻找合适的 $\varphi, \theta, F$ 的组合,使得镜子表面变形最小。根据前面的分析结果,

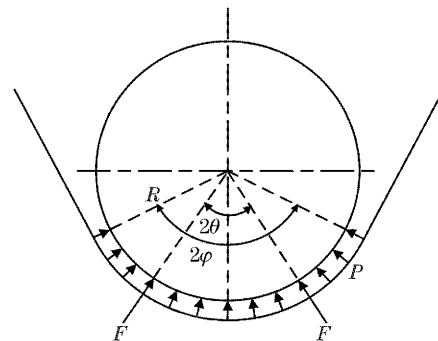


图6 钢带-刀口组合支承

Fig. 6 Band-knife combination support

在这里,一共选取了 6 种工况,支承角  $2\theta$  分别为  $60^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $120^\circ$ ,每一个角度下,F 分别承担镜子自重的 20% 和 30%,所有 6 种工况的接触角  $2\varphi$  均为  $180^\circ$ 。分析结果如表 3 所示,图 7 为支承角  $2\theta=60^\circ$  时的应力分布等值线图。可以看出,镜面的变形比点支承要小的多,但稍大于简单的钢带支承,并且在刀口支承处有集中应力出现。

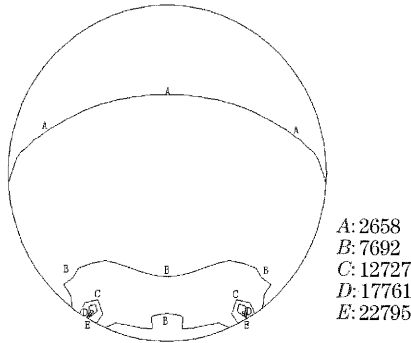


图 7 组合支承的应力分布图

Fig. 7 Stress distribution of combination support

表 3 钢带-刀口组合支承的表面变形

Table 3 Surface deformations of Band-knife combination support

Supporting angle	F bears 20% weight		F bears 30% weight	
	P-V /nm	RMS /nm	P-V /nm	RMS /nm
$60^\circ$	2.039	0.362	2.459	0.366
$90^\circ$	2.069	0.367	2.550	0.373
$120^\circ$	2.350	0.374	2.690	0.385

通过对点支承、钢带支承、钢带-刀口组合支承三种支承方式下多种工况的分析,可以知道,接触角为  $180^\circ$  简单的钢带支承产生的镜子表面变形是最小的。根据这一结论,如图 8 所示,我们设计采用一种装配方便并且镜面变形小的支承方式,即通过钢带与带轮的相对运动,收紧钢带沿侧面将镜子吊起,将镜子受力分布到整个接触面上,考虑到稳定性,接触角略大于  $180^\circ$ ,使镜子表面变形控制在  $0.1\lambda$  范围内。同时,在钢带与镜子之间衬有一层橡胶齿条(在图 8 中齿条被放大),使镜子边缘的集中应力释放转变为齿条的变形,以减少镜子自身变形。另外,还通过三根圆杆来从上、下外围来固定镜片,使它稳定地

处于某个位置。整个支承结构为固定支承点与浮动支承相结合的超静定系统。

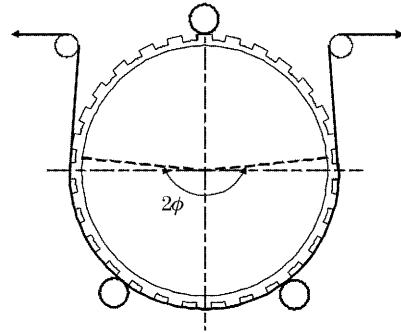


图 8 干涉仪镜子的钢带支承结构

Fig. 8 Band support configuration of mirrors

### 2.6 透射波畸变

对于透射镜,关心的是透射波畸变。根据马吕斯等光程定律,入射波面和出射波面之间是等光程的,由于光学系统的像差,使得实际出射波面偏离理想波面,偏离量用波像差来表示。通过求出实际出射波面上各点到理想出射面之间的光程,即可得到各光线之间的光程差。透射波畸变的大小取决于镜子的两个工作表面的面形和玻璃材料的光学均匀性。从最小二乘的角度出发,透射波畸变是相对于某一最佳拟合面的,在这里该最佳拟合面平行于理想出射平面波。

在钢带支承方式下,通过结构的有限元分析,可得到所有单元的轴向变形,通过编程求出轴向每一条光线通过镜子的光程,再减去平均光程,可求得每条光线的光程差,然后再以透射该条光线的单元面积为权重求出光程差的均方根值 RMS。根据上述方法,最终求出透射镜的透射波畸变 P-V 值为  $1.32 \text{ nm}$ ,RMS 值为  $0.280 \text{ nm}$ 。

在光学工程领域,通常采用泽尼克多项式来描述波前像差,泽尼克多项式是互为正交、线性不相关,并且是唯一可以描述圆形孔径波前的多项式。泽尼克多项式每一项均有一定的物理含义,分别对应于某种像差项,与赛德尔像差系数很容易建立起联系,因而得到广泛应用。泽尼克多项式的极坐标表达形式如下<sup>[14]</sup>:

$$W(\rho, \theta) = \sum_{n=0}^k \sum_{m=0}^n A_{nm} U_{nm} = \sum_{n=0}^k \sum_{m=0}^n A_{nm} R_n^{\alpha-2m}(\rho) \begin{cases} \sin \\ \cos \end{cases} (n-2m)\theta,$$

$$R_n^{\alpha-2m}(\rho) = \sum_{s=0}^m (-1)^s \frac{(n-s)!}{s!(m-s)!(n-m-s)!} \rho^{n-2s},$$

其中,  $A_{nm}$  为泽尼克系数,  $R_n^{2m}(\rho)$  为径向多项式,  $\rho$  为归一化半径, 对于正弦函数  $n-m > 0$ , 对余弦函数  $n-m \leq 0$ 。通过最小二乘拟合, 可以得到透射波畸变的泽尼克多项式, 项数的确定是由残余误差要求来决定的, 在这里取前 9 项即可以满足残余误差要求, 透射波畸变的波面图如图 9 所示。

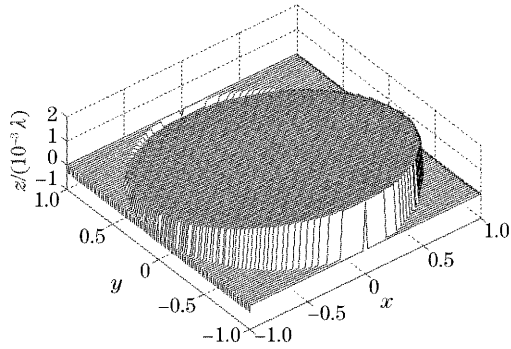


图 9 透射波畸变 ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )

Fig. 9 Transmitted wavefront distortions ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )

### 3 温度变形

在实际使用过程中, 干涉仪处于热环境中, 各种热效应将影响到干涉仪镜子的光学性能, 导致镜子的热弹性变形, 发生表面变形和透射波畸变, 这将极大影响干涉仪的测量精度。热弹性变形是指当环境温度变化时, 镜子内部也产生温度变化, 由于玻璃的热传导系数较小, 热交换不均匀, 一方面导致折射率的梯度变化, 另一方面镜子内部产生的热应力导致

不均匀热膨胀, 使镜面变形。通常有三种典型的热效应, 当周围环境发生整体温度水平变化时, 光学镜子内部温度变化不均匀产生的应力使镜面变形, 产生“边缘效应”; 光学镜子内部形成温度梯度分布时发生镜面变形; 以及光学镜子外部空气层存在温度梯度时, 使空气的折射率发生梯度效应, 对干涉图样产生影响。对于在温控实验室中使用的干涉仪镜子, “边缘效应”与空气层温度梯度分布的影响是较小的, 所以本文主要讨论镜子内部的温度梯度分布对镜子光学性能的影响。下面采用有限元分析的方法对镜子内部存在轴向、径向、周向温度梯度时, 进行热弹性分析。

应用有限元软件 ANSYS 进行热-结构分析, 基本过程如下: 首先, 进行热分析, 设定镜子的边界条件, 求出轴向、径向、周向梯度分布的温度场; 将温度场作为温度载荷加入到结构的有限元模型中, 进行结构分析, 在同时考虑镜子自重、支承压力和温度梯度的情况下, 进行热弹性分析; 提取镜子所有单元的三维坐标和变形量, 并通过编程计算出表面变形和透射波畸变, 再用泽尼克多项式进行拟合, 最后得到表面变形和透射波畸变的数值和波面图。根据上述方法, 下面求出了在不同的轴向、径向、周向温度梯度下, 镜子的表面变形和透射波畸变, 结果如表 4~表 6 所示, 图 10~图 12 给出了温度梯度为  $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$  时对应的波面图。

表 4 K9 镜子的表面变形 ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )

Table 4 Surface deformations of K9 mirror ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )

Temperature / $^\circ\text{C}$	Axial temp. gradient		Radial temp. gradient		Circumferential temp. gradient	
	P-V	RMS	P-V	RMS	P-V	RMS
0.01	1.1426	0.1943	1.1426	0.1943	1.1426	0.1943
0.05	1.1464	0.1977	1.1695	0.2024	1.1686	0.2025
0.10	1.1680	0.2156	1.1662	0.2028	1.1694	0.2025
0.50	2.9143	0.7456	1.1678	0.2109	1.3652	0.2105

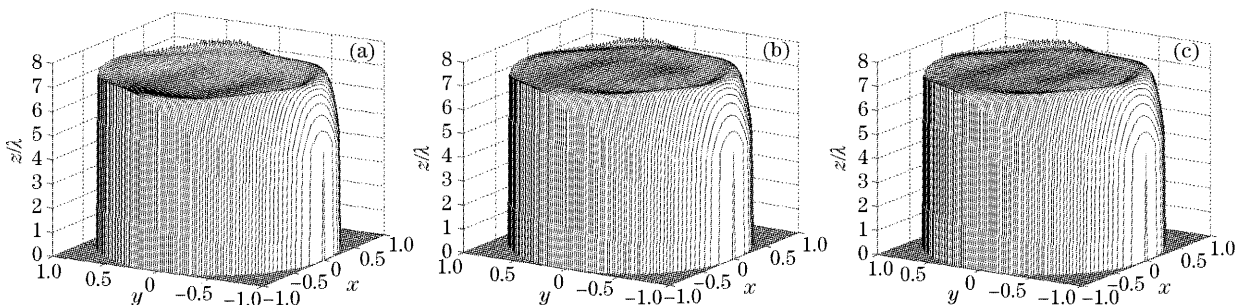


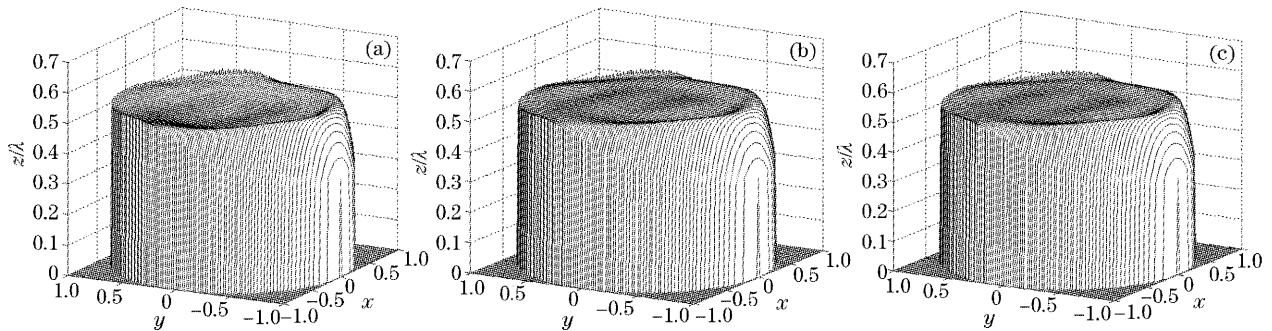
图 10 K9 镜子的表面变形 ( $\Delta T = 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )。 (a) 轴向温度梯度, (b) 径向温度梯度, (c) 周向温度梯度

Fig. 10 Surface deformations of K9 mirror ( $\Delta T = 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$  and  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ). (a) Axial temp. gradient,

(b) radial temp. gradient, (c) circumferential temp. gradient

表 5 熔石英镜子的表面变形 ( $\lambda=632.8 \text{ nm}$ )Table 5 Surface deformations of fused silica mirror ( $\lambda=632.8 \text{ nm}$ )

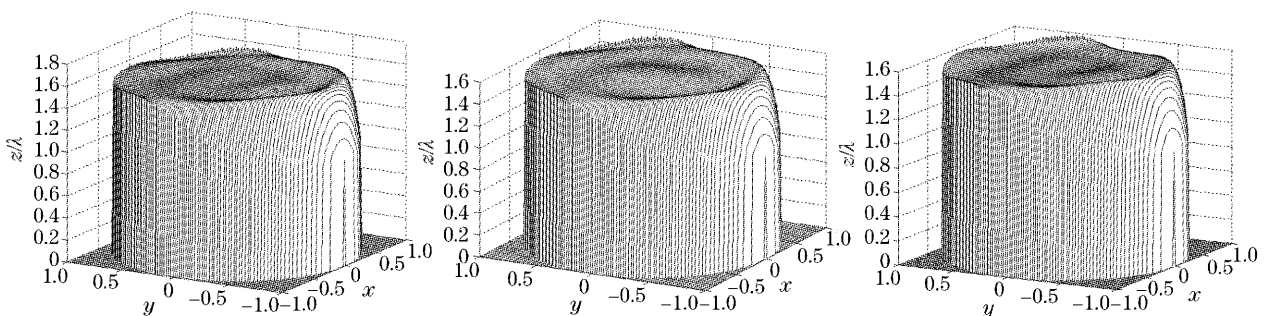
Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Axial temp. gradient		Radial temp. gradient		Circumferential temp. gradient	
	P-V	RMS	P-V	RMS	P-V	RMS
0.02	0.0814	0.0142	0.0814	0.0142	0.0814	0.0142
0.05	0.0827	0.0143	0.0859	0.0148	0.0860	0.0148
0.10	0.0844	0.0157	0.0859	0.0148	0.0861	0.0148
0.50	0.2114	0.0544	0.0860	0.0150	0.1164	0.0213

图 11 熔石英镜子的表面变形 ( $\Delta T=0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $\lambda=632.8 \text{ nm}$ )。 (a) 轴向温度梯度, (b) 径向温度梯度, (c) 周向温度梯度Fig. 11 Surface deformations of fused silica mirror ( $\Delta T=0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $\lambda=632.8 \text{ nm}$ ). (a) Axial temp. gradient,

(b) radial temp. gradient, (c) circumferential temp. gradient

表 6 熔石英镜子的透射波畸变 ( $\lambda=632.8 \text{ nm}$ )Table 6 Transmitted wavefront distortions of fused silica mirror ( $\lambda=632.8 \text{ nm}$ )

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Axial temp. gradient		Radial temp. gradient		Circumferential temp. gradient	
	P-V	RMS	P-V	RMS	P-V	RMS
0.02	0.2529	0.0434	0.2503	0.0432	0.2513	0.0432
0.05	0.2530	0.0434	0.2503	0.0434	0.2514	0.0432
0.10	0.2534	0.0434	0.2530	0.0445	0.2715	0.0439
0.50	0.2552	0.0438	0.4260	0.0654	0.3158	0.0473

图 12 熔石英镜子的透射波畸变 ( $\Delta T=0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $\lambda=632.8 \text{ nm}$ )。 (a) 轴向温度梯度, (b) 径向温度梯度, (c) 周向温度梯度Fig. 12 Transmission wavefront distortions of fused silica mirror ( $\Delta T=0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $\lambda=632.8 \text{ nm}$ ).

(a) Axial temp. gradient, (b) radial temp. gradient, (c) circumferential temp. gradient

由分析结果可以看出,温度梯度对镜子的表面变形和透射波畸变的影响比镜子的自重和支承变形要大得多;由于熔石英玻璃具有较低的热膨胀特性,因而在温度梯度下的表面变形比 K9 玻璃要小的多;而熔石英透镜的透射波畸变,即使在较小的温度梯度下 ( $\Delta T=0.02 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), P-V 值都超出了  $\lambda/4$  ( $\lambda=$

$632.8 \text{ nm}$ )。

理论上,当干涉仪装置处于绝热环境或较好的温控环境中,就可以有效地避免热效应的影响,事实上考虑到技术性和经济性,这是不可能的,因而温度梯度的影响是客观存在的。在一定的温控措施下,温度梯度的发生带有随机性和瞬时性,但随着时间

的推移温度场趋于稳定,因此,如果在干涉图样采集过程中避开图样扰动的状况,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。

## 4 结 论

利用有限元方法对大型干涉仪镜子的垂直支承进行了优化设计,分析结果表明  $180^\circ$ 接触角的钢带支承是较好的支承方式,此时,表面变形 P-V 值仅为 1.35 nm, RMS 值为 0.363 nm。根据这一结论,设计了一个固定支承点与浮动支承相结合的超静定支承结构。在该支承方式下,分析了镜子轴向、径向、周向温度梯度效应,分析数据表明,镜子的热弹性变形远大于自重和支承变形,因而建议采取一定的温控措施,并采用平均效应的方法降低热效应的影响。

由于分析过程中不免对实际问题进行了简单化、理想化处理,因而分析结果还须经后续实验进一步验证(这也是下一步工作的重点),在实验的基础上改进模型和边界条件再进行计算,用分析指导设计,优化设计。

## 参 考 文 献

- Gerhard Schwesinger. Optical effect of flexure in vertically mounted precision mirrors[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1954, **44**(5): 417~424
- A. J. Malvick, E. T. Person. Theoretical elastic deformations of a 4-m diameter optical mirror using dynamic relaxation[J]. *Appl. Opt.*, 1968, **7**(6): 1207~1212
- A. J. Malvick. Dynamic relaxation: a general method for determination of elastic deformation of mirrors[J]. *Appl. Opt.*, 1968, **7**(10): 2117~2121
- A. J. Malvick. Theoretical elastic deformations of the steward observatory 230-cm and the science center 154-cm mirrors[J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(3): 575~585
- Alson E. Hatheway. Mountings for a four meter glass mirror [C]. *Proc. SPIE*, 1990, **1303**: 142~147
- B. C. Bigelow. Finite element analysis of large lenses for the Keck Telescope high resolution echelle spectrograph [C]. *Proc. SPIE*, 1991, **1532**: 15~26
- E. Person, L. Stepp. Response of large mirrors to thermal distributions [C]. *Proc. SPIE*, 1987, **748**: 215~228
- Myunk K. Cho. Surface distortion of a 3.5-meter mirror subjected to thermal variations [C]. *Proc. SPIE*, 1991, **1532**: 137~145
- Wu Fan. Influence of temperature effects to the quality of large mirrors [J]. *Opt. Eng.*, 1986, (4): 24~29 (in Chinese)
- 伍凡. 温度对大型光学镜子质量的影响 [J]. *光学工程*, 1986, (4): 24~29
- Wu Qingwen, Lu E, Wang Jiaqi *et al.*. A study on static properties of primary mirror [J]. *Optical and Precision Engng.*, 1996, **4**(6): 47~53 (in Chinese)
- 吴清文, 卢 镗, 王家骥 等. 主镜稳定温度场特性分析 [J]. *光学精密工程*, 1996, **4**(6): 47~53
- 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): 260~261, 265 (in Chinese)
- 吴清文, 卢泽生, 卢 镗 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): 260~261, 265
- Shan Baozhong, Chen Entao, Lu E *et al.*. Thermal/structural/optical intergrated analysis of space cameras [J]. *Optical and Precision Engng.*, 2001, **9**(4): 377~381 (in Chinese)
- 单宝忠, 陈恩涛, 卢 镗 等. 空间光仪光机热集成分析方法 [J]. *光学精密工程*, 2001, **9**(4): 377~381
- Zhao Lixing. Thermal-optical evaluation to optical windows of space camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(10): 1440~1444 (in Chinese)
- 赵立新. 空间相机光学窗口的热光学分析 [J]. *光学学报*, 1998, **18**(10): 1440~1444
- D. Malacare, S. L. de Vore. *Optical Shop Testing* [M]. New York: John & Sons, Inc., 1992. 455~472