

非球面主反射镜检测用支撑结构的优化设计

王权陡 郑卫平 余景池

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

摘要 在工程分析软件 SSA P91 上, 应用有限元分析的方法, 优化设计出 $\Phi 500\text{mm}$ 非球面主反射镜的支撑结构, 将此使用在干涉测量中, 为非球面的数控加工提供可靠的面形误差数据。

关键词 光学元件支撑结构(OSS)^[1] 有限元分析方法(FEM)^[2-3] 非球面主反射镜 非球面光学元件数控加工技术(COOP)^[4]

1 引言

光学检测是大口径光学元件数控加工的关键技术之一, 它是光学数控加工过程的数据来源和依据。而光学检测过程中大口径光学元件的支撑方式和支撑结构将直接影响检测结果的真实性和可靠性, 从而影响光学元件数控加工的精度和效率。本文应用有限元分析方法, 计算出非球面主反射镜在不同支撑结构下的误差结构及大小, 进而设计出优化的支撑结构用以满足检测和加工的需要, 并通过 Zygo Mark IV 相移干涉仪的检测结果来验证优化结构的可靠性。

应用优化设计的主镜支撑结构与非球面光学元件数控加工技术等^[5], 我们成功地加工口径 $\Phi 500\text{mm}$ 的非球面主反射镜($f/4$), 其最终面形精度峰谷值为 $1/10\lambda$, 均方根值为 $1/40\lambda$ ($\lambda = 632.8\text{nm}$), 表面粗糙度优于 2nm 。

2 有限元分析与优化设计

光学检测中波像差被分为倾斜、离焦、像散、慧差及球差等。在实际检测中, 对一个回转对称的光学元件倾斜、离焦、慧差可通过调节被检光学元件的空间位置和姿态加以消除, 然而像

散却不能通过简单的调节过程来加以消除,这是因为像散是由实际加工过程产生的面形误差和由自重及热效应引起的面形误差所组成。由于检测过程是在恒温条件下进行,因此可以不考虑由热效应引起的波像差。这样镜子在几何形状(面形、总高、边缘厚度等)一定的情况下,由镜子自重引起的面形误差大小主要取决于不同的支撑方式和支撑结构。而真正用于指导非球面数控加工过程的数据,来源于由实际面形所产生的误差,所以为获得有效的误差数据来指导加工以提高加工效率和加工精度,需要设计优化的支撑结构来尽可能地减少由自重引起的面形误差。

在口径 $\Phi 500\text{mm}$ 非球面主镜的加工任务中,我们应用了CCOP技术,它的控制文件来源于Zygo Mark IV相移干涉仪的干涉测量结果。受干涉仪工作条件的限制,检测过程必需采用水平工作方式,因此主镜的支撑结构就必需采用垂直支撑方式。这样在利用工程分析软件SS-AP91进行有限元分析时,根据非球面主镜的几何形状,我们提出了中心孔固定、中心孔弹性固定及中心孔弹性固定加多点辅助弹性支撑等支撑等方式。

2.1 几何形状和材料特性

图1显示出单弧非球面主镜的轮廓形状及相关尺寸。其中主镜直径为500mm,边缘厚度为40mm,中心孔直径为200mm,里孔边缘厚度为76mm。前表面为双曲凹型非球面光学表面($f/4$),后表面为圆弧状非光学表面。

主镜的材料为熔石英,具体性能参数如下:

杨氏模量: $7.15 \times 10^{11} \text{ dyne/cm}^3$

泊松比: 0.16

密度: 2.2 g/cm^3

主镜质量大约为20kg。弹性支撑材料选用橡胶,其特性参数如下:

杨氏模量: $5 \times 10^9 \text{ dyne/cm}^3$

泊松比: 0.04

密度: 0.4 g/cm^3

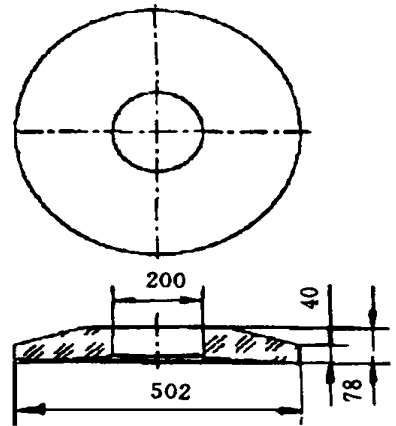


Fig. 1 Figure and dimension of the primary mirror

2.2 有限元模型构造

图2显示出非球面主镜的FEM网格划分图。

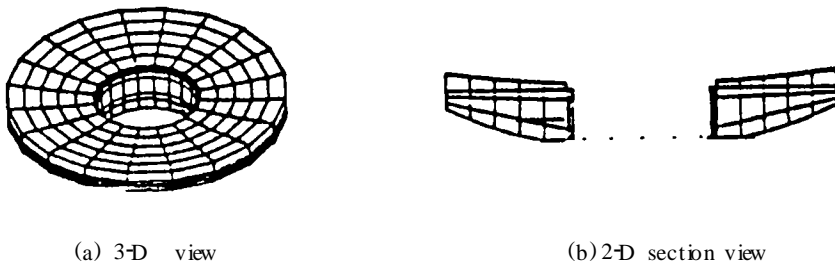


Fig. 2 FEM mesh of the primary mirror

为了寻找一种优化的支撑结构,我们选择了几种不同的支撑方式进行有限元受力分析。

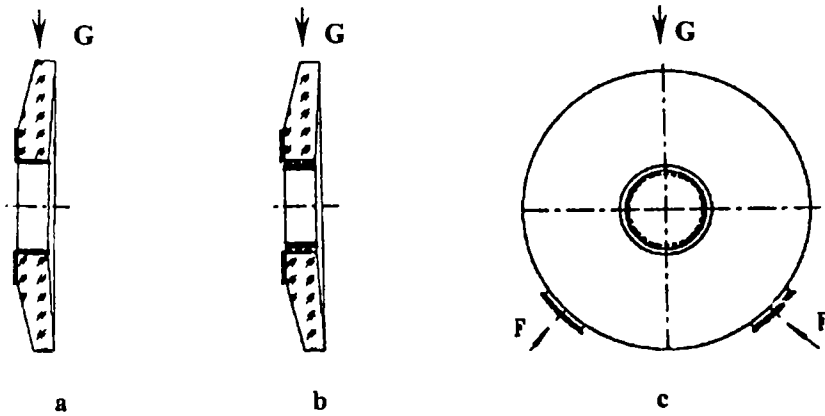


Fig. 3 Different support method of the primary mirror

其中图3 a 为中心孔及后表面固定。图3 b 为中心孔橡胶材料柔性固定及后表面固定。图3 c 为中心孔橡胶材料柔性固定、后表面固定及底部辅助弹性支撑。为避免产生超定位现象,图3 c 中不能采用刚性辅助支撑方式,另外底部采用辅助弹性支撑方式可以通过调节辅助支撑弹簧的压缩量来改变辅助支撑力的大小,从而使各参数更加匹配,结果更加优化。在模型 a 和 b 中,主镜负载仅为自重 G ,在模型 c 中除了自重 G 外,还有弹性力 F 。图3中的三个角符号代表约束。

2.3 有限元分析结果及优化的支撑方式

表1中列了三种支撑方式的有限元分析结果。

Tab 1 PV, RMS deflecting value of model a, b, and c in x, y, z direction (unit: mm)

MODEL	PV/RMS	X DIRECTION	Y DIRECTION	Z DIRECTION
a	PV	0.18E-04	0.31E-04	0.29E-05
	RMS	0.51E-05	0.59E-05	0.15E-05
b	PV	0.71E-04	0.22E-03	0.19E-04
	RMS	0.23E-04	0.59E-04	0.75E-05
c	PV	0.54E-04	0.19E-03	0.11E-04
	RMS	0.21E-04	0.52E-04	0.43E-05

根据表1中的有限元分析数据,我们应用 Zernike 多项式进行面形拟合^[6]。进一步去除平移、离焦和倾斜等像差后,得到了在不同支撑方式下所产生的面形变形数据,如表2中所示。

Tab 2 Processed data results (unit: nm)

MODEL	PV/RM S	BEST-FIT
		PROCESSING
a	PV	77
	RM S	8
b	PV	58
	RM S	6
c	PV	27
	RM S	3

从最终数据处理结果来看,主镜在第三种支撑方式下因自重所产生的面形变形量最小,PV值和RM S值均远低于设计值,满足要求,因而是比较理想的支撑方式。

Fig 4 Optics support structure

3 最终支撑结构的确定

根据FEM优化设计的支撑方式,确定了相应的支撑结构,如图4所示。由于理论分析的结果同实际应用仍有一定的偏差,因此我们利用Zygo Mark IV相移干涉仪的检测结果,来调节辅助支撑力F。经过调节、检测,再调节,再检测等几各周期后,得到了最佳的辅助支撑力F,使得主镜因自重产生的变形量最小,进而就最终确定了主镜检测用支撑结构。

图5、图6给出了非球面主镜在某一加工时期的干涉检测结果。

(a) fringe map (b) contour map (a) fringe map (b) contour map

Fig 5 Unrotation (PV = 0.867 RM S = 0.099) Fig 6 Rotation 90° (PV = 0.87 RM S = 0.097)

对比图5、图6两干涉图,我们不难看出当主镜旋转90°后面形缺陷(干涉条纹弯曲处)也随之旋转90°,同时在干涉图中并未发现明显不转动的缺陷,因此得出结论,应用这种优化的支撑结构对口径 $\Phi 500\text{mm}$ 的非球面主反射镜进行干涉测量时,并未引入因主镜自重变形产生的误差,所以干涉测量的结果如实地反映了光学表面的实际面形误差,从而能够正确地指导非球面的数控加工工作。

4 结束语

基于有限元分析和干涉计量结果,我们建立了一种优化的主镜支撑结构,利用这种优化结

构和相关技术,我们成功地加工出一块口径 $\Phi 500\text{mm}$ 的非球面主反射镜 ($f/4$),其最终检测结果如下图所示。

(a) fringe map (b) contour map
Fig. 7 Final testing result (PV = 0.112 RM S = 0.026)

参 考 文 献

- 1 Blanco D, Antebi J, Davison W. The optics support structure of the MM T. Proc SPIE, 1987, 748: 362~369
- 2 Ghazirian Vigen, Bella David. Mountings for a four meter glass mirror. Proc SPIE, 1990, 1303: 35~42
- 3 Bella David F. Connecting the finite element method with fringe analysis. Proc SPIE, 1987, 817: 190~192
- 4 Jones Robert A. Computer controlled polisher demonstration. Applied Optics, 1990, 19: 12~15
- 5 Cho Myung K, Richard Ralph M. Structure and optical properties for typical solid mirror shapes. Proc SPIE, 1990, 1303, 78~95
- 6 吴清文, 卢铿, 王家骥, 张学军, 牛晓明. 自重作用下中心支撑主反射镜面形变化研究. 光学 精密工程, 1996, 4(4): 23~28

Optimizing Optics Support Structure in Testing Primary Mirror

WANG Quan-Dou, ZHENG Wei-Ping, YU Jing-Ci
(Changchun Institute of Optics Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

Using the engineering analysis software SSA P91, optimized design of the aspherical primary mirror supporting structure is worked out by means of FEM. The actual data of the optical surface errors are provided to the technology of the computer controlled optics manufacturing according to the result of interference metrology on this optimized supporting structure.

Key words: Optics support structure, FEM, A spherical primary mirror, Computer controlled optical surface

王权陡 男, 1970年9月生, 1992年毕业于燕山大学, 获流体传动及控制专业学士学位, 同年分配到中国科学院长春光学精密机械研究所, 从事气体静压轴承与气体静压导轨的研究工作。1995年考入中国科学院长春光学精密机械研究所研究生部, 现从事光学非球面超精加工技术的研究工作。