

主动抛光盘面形测试技术的研究*

李颖^{1,2} 汪达兴¹

(1 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 南京 210042; 2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 主动抛光盘技术是新发展起来的一种能够根据需要把抛光盘面实时地主动变形成为离轴非球面来磨制深非球度高精度天文镜面的磨制技术。简单介绍了抛光盘变形控制结构和面形检测机构, 对深非球面度面形变形进行了精度分析, 探讨了主动抛光盘的动态响应和校正, 并对抛光盘的改造提出了一些建议。

关键词 主动抛光盘; 大非球面度镜面; 变形技术

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

1 引言

主动抛光盘 (Active Stressed Lap) 技术是一种新发展起来的磨制大口径深度非球面天文镜面的计算机控制的磨镜技术。这一技术的原理是在大口径非球面镜面磨制过程中, 主动实时地将抛光盘变形为镜面上相应部分的非球面, 使抛物面的面形总是与所要求的镜面面形一致, 与传统的小工具磨盘磨制非球面相比, 它具有较高的玻璃磨削速率和较大频率范围内的自然平滑 (无切带) 等优点。

在国家自然科学基金重点项目——高精度大口径天文镜面磨制技术中, 已成功地研制出国内第一个采用主动控制技术的可实时控制抛光盘非球面面形的主动抛光盘, 并利用主动抛光盘加工了一个直径 910 mm、焦比 $F/2$ 的非球面镜。

主动抛光盘的变形是主动抛光盘研制的关键技术之一, 而深非球面度面形变形幅值较大, 更是一个难点。本文探讨了大非球面度面形变形技术, 为抛光盘今后的改进提供了实验数据和理论根据。

2 主动抛光盘面形控制力与面形关系的数学分析

在抛光盘材料的弹性极限范围, 所施加的力与面板的变形是一一对应的线形关系。设力促动器的变化值为 F , 面板的变形值为 U , 则 F 和 U 的关系为

$$K^*F=U \quad (1)$$

其中, K 为主动抛光盘的刚度矩阵, 在实验中通过实测抛光盘的影响函数来求取 K 。根据提供的理想面形 U_m 和 K , 用最小二乘法求得

$$F_m = (K^T K)^{-1} K^T U_m \quad (2)$$

当求得的变形力远远超出促动器的允许加力范围时, 应用阻尼最小二乘法。阻尼最小二乘法是用于解决影响函数的测量不精确, 即避免式 (2) 的解因高频误差求出的力很大 (离初始点很远), 超出加力范围的问题。阻尼最小二乘解为

$$F_m = (K^T K + PI)^{-1} \cdot K^T \cdot U_m \quad (3)$$

P 是阻尼因子, 在实验中通过试选得到。

3 主动抛光盘的变形控制和面形检测

抛光盘的变形是由盘背面的 12 个力促动器完成的。力促动器分为 4 组, 每组 3 个呈等边三角形分布并对拉, 完成盘面的随意变形, 以达到在镜面上的任一离轴抛物面所需的变形量。力促动器的控制属于开环控制或半闭环控制, 图 1 为其控制结构主动框图。

主动抛光盘的面形检测是在一个装有 16 个线性可变差动变压器式位移传感器 (Linearly Variable Differential Transformer, LVDT) 的测试架上上进行, 测试架上有 16 个固定的检测点, 按正方点阵排布。

收稿日期 2004-11-03; 修改稿日期 2005-01-30

作者简介 李颖 (1976-), 女, 硕士, 主要从事主动抛光盘的研究。E-mail: yingli@niaot.ac.cn

*国家自然科学基金 (19633020) 重点资助项目

在面形变形实验中,根据所测得 16 个点的变形面形与理想面形比较,计算出面形的均方根误差(RMS),来验证所求的变形力 F_m 是否符合要求。

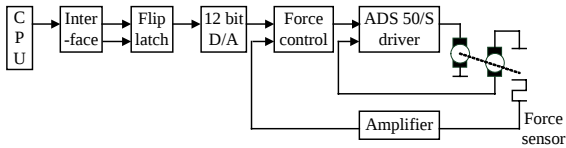


图1 力促动器控制结构框图

Fig.1 Control structure of force actuators

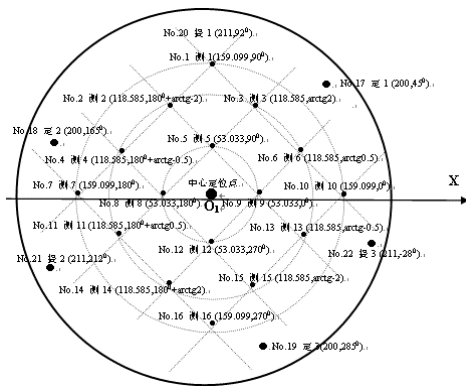


图2 LVDT 测试点分布图

Fig.2 Distribution of LVDT

4 大非球面度的主动抛光盘面形精度分析

在主动抛光盘的前期研究中,我们主要是对焦比 $F/2$ 的非球面进行变形实验。在此基础上,根据现有的主动抛光盘机电结构进行初步估算,选取了 $F/1.5$ 、 $F/1.2$ 的面形分别进行了静态变形实验,在实验中我们以变形幅值最大的离轴量为 365 mm 的计算面形为理想面形。根据计算,离轴量 365 mm, $F/2$ 的变形幅值为 0.07 mm,而 $F/1.5$ 达到 0.14 mm (见图3)。

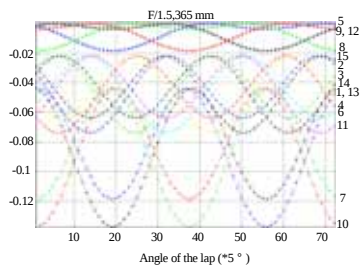


图3 $F/1.5$ 理想变形

Fig.3 Ideal deformation, $F/1.5$

经过重复实验,系统的测试误差大约为 0.67

μm , 这部分误差在磨制镜面的过程中并不存在。

以 $F/2$ 的面形为例,根据公式(3)求出 F_{m_2} ,根据公式(1)可求出 U_{m_2} ,并与给定的理想面形相比较,计算出面形的均方根误差为 $1.1 \mu\text{m}$ 。把 F_{m_2} 加到实际变形机构中,经过实测,得到 RMS 为 $1.8 \mu\text{m}$,扣除系统测试误差,可以证明实测的影响函数真实反映了抛光盘系统的结构性能,计算的变形误差基本反映了实际的变形误差情况。

根据相同的方法对 $F/1.5$ 、 $F/1.2$ 面形进行变形实验,由于抛光盘变形机构的加力范围设计在 0~400 N 之间(这个加力范围完全能够满足 $F/2$ 变形要求)实测面形的 RMS 相对较大 $F/1.5$ 为 $4 \mu\text{m}$,而 $F/1.2$ 为 $8 \mu\text{m}$ 。图4为 $F/1.5$ 变形力曲线图,图5为 $F/1.5$ 实测面形图。假设抛光盘的加力范围达到 0~800 N,我们用计算的变形误差来代替实际的变形误差, $F/1.5$ 为 $2.1 \mu\text{m}$,而 $F/1.2$ 为 $4.8 \mu\text{m}$,可以达到磨制镜面的要求。

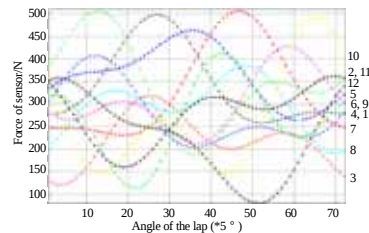


图4 $F/1.5$ 旋转一周加力曲线

Fig.4 Force of deforming actuators, $F/1.5$

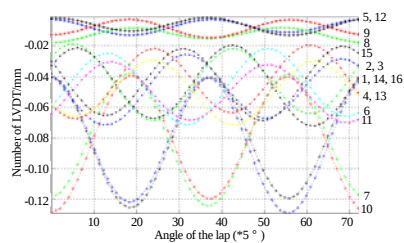


图5 $F/1.5$ 实测面形, RMS=3.95 μm

Fig.5 Measuring deformation, $F/1.5$, RMS=3.95 μm

5 主动抛光盘变形的动态响应和校正

在静态变形实验中,力变化频率为 1 Hz,但在镜面的实际磨制过程中,力变化频率必须增大。当力变化频率增大,抛光盘系统的机电响应速度较慢,抛光盘面形变形产生了幅值和相位误差,限制了主动抛光盘的使用转速。随着非球面度的增大,这种

滞后现象更加明显。当我们把力变化频率设为 8 Hz 时, $F/1.5$ 的 RMS 为 $5.6\text{ }\mu\text{m}$, 而 $F/1.2$ 的 RMS 达到 $9.8\text{ }\mu\text{m}$, 以这种精度磨制镜面是达不到要求的。

我们对系统变形机构的响应速度进行了测试分析。首先对系统进行了阶跃响应测试, 初始力为 100 N, 增加到 400 N, 记录下力的变化曲线, 见图 6。接着又对系统进行了正弦测试, 给系统加正弦力, 改变力变化的频率, 记录下力变化的曲线(见图 7、图 8)。从图中可以看出, 力变化频率为 8 Hz, 有幅值和相位误差, 当变化频率为 5 Hz 时, 幅值误差已不明显, 还有相位滞后的现象。

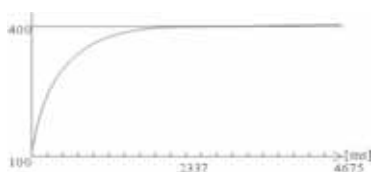


图 6 变形机构的阶跃响应, 从 100 N 到 400 N

Fig.6 Rising response, from 100N to 400N

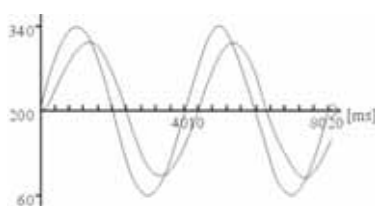


图 7 正弦响应, 8Hz

Fig.7 Sine response, 8Hz

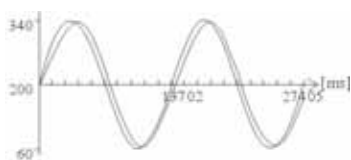


图 8 正弦响应, 5Hz

Fig.8 Sine Response, 5Hz

为了减小相位误差, 我们采取了相位补偿的方法, 通过对不同的变化频率给予不同的时间提前量来提前预加力解决相位滞后的问题。这种方法效果比较好, 8 Hz 时 $F/1.5$ 的 RMS 减少到 $4.5\text{ }\mu\text{m}$, $F/1.2$ 的 RMS 减少到 $8.7\text{ }\mu\text{m}$ 。在相位补偿的基础上, 我们还必须通过软件方法进行幅值补偿来进一步减小误差。

误差补偿是在现有系统的基础上采取的措施, 要想根本解决动态响应的问题, 必须对抛光盘结构进行局部改造, 通过减小抛光盘上载荷, 提高机械响应频率, 对变形力促动器进行 PID 调节等来提高响应速度。

6 结束语

要磨制出更大的高精度非球面镜面如 $F/1$ 、 $F/0.6$ 等, 还需对现有的抛光盘系统做进一步的改造。文中通过实验分析了现有抛光盘磨制大非球面度镜面的局限性, 对抛光盘今后的改造提供了依据。

现代天文学需要发展口径更大、非球面度更大、精度更高的天文镜面磨制技术。主动抛光盘技术将在下一代的望远镜的光学加工中起到关键的作用。

参考文献

- [1] Martin H M, Anderson D S, Angel J R P, *et al.* Progress in the stressed-lap polishing of a 1.8m f/1 mirror[C]. SPIE, 1990, 1236: 682~690
- [2] S C West, H M Martin, R H Nagel, *et al.* Practical design and performance of the stressed-lap polishing tool[J]. Appl Opt, 1994, 33(34): 8094~8100
- [3] Doughty Gordo, Smith James. Microcomputer-controlled polishing machine for very smooth and deep aspherical surfaces[J]. Appl. Opt., 1995, 26(12): 2421~2426
- [4] 杨世杰. 计算机在天文镜面加工中的应用[J]. 紫金山天文台台刊, 1987, 6(4): 385~390
- [5] 苏定强, 王亚男. 天文光学系统像差的自动校正[J]. 天文学报, 1974, 6(4): 51~60

Study on Measurement Technology of Active Stressed Lap

LI Ying^{1,2} WANG Da-xing¹

(1 National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China; 2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Active stressed lap polishing technology is a new technology that can actively deform the lap surface to become an off-axis aspheric surface according to the need and polish deep off-axis aspherical mirrors. The deformation control construction and measurement method of the lap are introduced. The dynamic response and emendation problem are explored, and the lap improvement is proposed.

Key words active stressed lap; deep off-axis aspherical mirror; technology of deformation