

文章编号: 0253-2239(2005)03-402-6

# 一种大口径大非球面度天文镜面磨制新技术\*

崔向群 高必烈\*\* 汪达兴 朱永田 杨世海 朱政 王磊 夏自立

(中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 南京 210042)

**摘要:** 主动抛光盘技术是近年来因天文望远镜的口径越来越大, 焦比越来越快而发展起来的一种能够根据需要主动将抛光盘实时地主动变形形成偏轴非球面来磨制大口径非球面度高精度天文镜面的磨制技术。非球面表面的曲率不仅各点不一致, 而且同一点的径向与切向曲率也不相同, 所以经典的大的抛光盘不可能使其表面形状始终与所接触的非球面表面形状相吻合; 常用的小磨盘抛光的致命缺点是解决不了高频切带, 抛光效率也低。而主动抛光盘技术正好解决这些难题。与传统方法相比, 它具有较高的磨削速率和较大范围内的自然平滑(无切带)。这是一种用计算机控制的磨镜技术, 通过它可以像加工球面一样来加工一个深度的非球面。介绍了我国成功研制的主动抛光盘以及它在直径 910 mm, 焦比  $F/2$  抛物面镜加工中的成功应用和加工的结果, 以及此项技术将在 2 m 以上直径天文镜面, 特别是 30 m 巨型天文光学/红外望远镜的分块子镜磨制中的应用前景。

**关键词:** 天文光学; 天文镜面技术; 主动抛光盘; 非球面镜

中图分类号: O43 文献标识码: A

## A New Polishing Technology For Large Diameter and Deep Aspherical Mirror

Cui Xiangqun Gao Bilie Wang Daxing Zhu Yongtian Yang Shihai  
Zhu Zheng Wang Lei Xia Zili

(National Astronomical Observatories, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology,  
The Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042)

**Abstract:** Stressed lap polishing technology is a new large and deep asphericity astronomical polishing mirror. Because the diameter of astronomical mirror is larger and larger, the asphericity is deeper and deeper, we develop the stress lap technology, it can actively deform the lap surface to become an off-axis asphere according to different lap position on mirror surface and different angle of lap. The curvature is different not only on different position, but also on different direction, so the classical large polishing lap cannot keep the lap surface with the aspherical mirror surface when it moves and spins on the mirror surface. The classical small polishing tool not only can get high frequency error on the mirror surface, but also has slow polishing speed. The stressed lap is just enough to solve these problems. Compared with traditional polishing methods, it has high polishing speed and natural smooth. It is computer-controlled polishing technology, using it the authors can polish a deep aspherical mirror just like polish a spherical mirror. This paper introduce our stressed lap and how to apply it to  $\phi 910$  mm, with  $F/2$  paraboloidal mirror and its testing result. Next step, the authors will develop this technology to polish the off-axis aspherical segment.

**Key words:** astronomical optics; technology of astronomical mirror; stressed lap; aspherical mirror

## 1 引 言

主动抛光盘(Stressed Lap)技术是近年来发展起来的一种能根据需要主动将抛光盘主动变形来磨制大

的深度非球面光学表面的计算机控制的磨镜技术。它主要是解决在加工快焦比、大非球面度的光学镜面时, 大的抛光工具表面与所接触光学镜面表面之

\* 国家自然科学基金(19633020)资助课题。

作者简介: 崔向群(1951~), 女, 四川省万县人, 研究员, 国家天文台副台长兼南京天文光学技术研究所所长, 国家重大项目 LAMOT 项目副总经理兼总工程师, LAMOST 工程指挥部主任。

\*\* 通信联系人。E-mail: blgao@niaot.ac.cn

收稿日期: 2004-03-22; 收到修改稿日期: 2004-08-18

间的形状不拟合的问题。因为非球面表面的曲率是变化的,不仅从镜面的顶点到边缘曲率半径变化,即使在同一位置上它的径向与切向曲率半径也是不一致的,因而就不可能用一个大的硬磨盘去加工出一个深度非球面的光学镜面来。而大的硬工具在加工光学镜面(对球面、平面)时,是有许多优点的,即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)。而主动抛光盘技术就是将大的硬磨镜盘,随着它在镜面上移动和旋转时,不停地改变其表面的形状,使之始终与所接触的镜面部分(呈偏轴非球面)的正确形状拟合,因而就可以像加工球面和平面一样加工出深度的非球面光学表面。而抛光盘表面形状的改变是通过磨盘周边的诸多力促动器的作用,使圆基板产生弯曲和扭曲来实现。

主动抛光盘的基底是一块  $\phi 450$  mm 的圆铝平板,上有一块相当于直径  $\phi 300$  mm 的尼龙板,尼龙板的一面是平的,粘贴在铝板上,另一面是球面,曲率接近于被加工的非球面表面上的某一曲率,尼龙板上又粘贴有柏油块,铝板的变形被传递到柏油块表面,使得在加工的过程中柏油表面始终持有与所接触的非球面部位应有的正确面形,以达到修磨非球面的目的。图 1 是主动抛光盘的基底粘贴尼龙板和柏油块的照片。

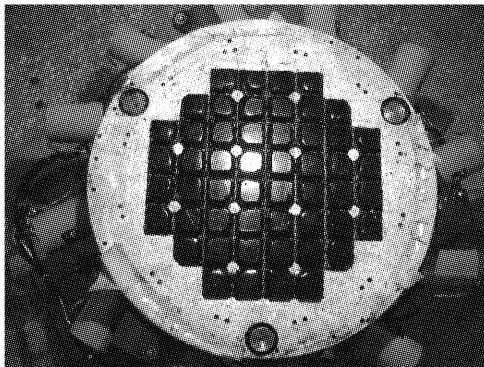


图 1 主动抛光盘基底及柏油工具照片

Fig. 1 Lap plate of stressed lap and its pitch net

主动抛光盘的一个最基本的目标,就是用计算机来控制抛光盘的变形和整个磨制过程,因而对于加工者来说,就可以像加工一个球面一样来加工一个深度的非球面。

## 2 基本结构和性能<sup>[1]</sup>

### 2.1 机械结构及其功能

图 2 是主动抛光盘的基本结构图,在基板的周边固定有 12 个装有促动器的六面柱筒,六面柱筒侧

面的力矩电机带动滚珠丝杆,丝杆套上的杠杆拉动六面柱筒顶上的传递拉力的钢丝,如图 3 所示,钢丝的另一端是一个力传感器,传感器固定在另一六面柱筒上,它们每三个组成一个等边三角形的施力组。加上不同的力,使板弯曲和扭曲,共有 4 组力。由于施加的板变形的力是不连续的,所以板的外缘呈现出荷叶边效应,可用于抛光的板中央的理想变形部分(尼龙板和柏油区域)只有铝板直径的 70%~80%左右。

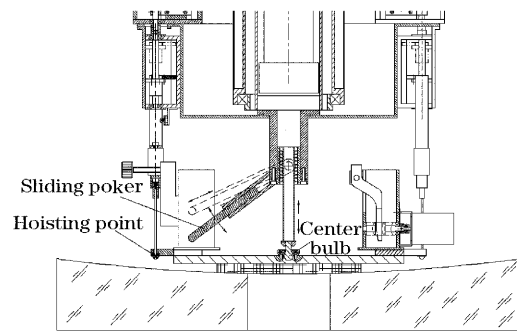


图 2 机械的基本结构图

Fig. 2 Basic mechanical structure

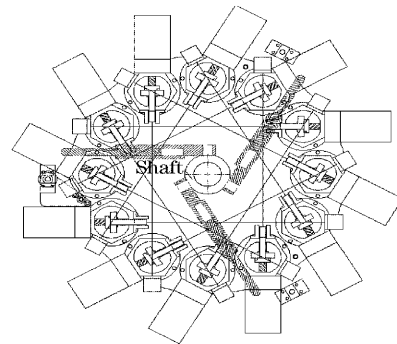


图 3 盘面变形结构图

Fig. 3 Deformation structure

主动抛光盘的转动是由旋转主轴上的三个拨叉来带动。

主动抛光盘的提升和倾斜是由三个提升力矩电机经蜗轮副带动滚珠丝杆,滚珠丝杆经由拉力传感器和钢丝连接到抛光盘外缘的耳朵上。主动抛光盘对镜面的恒压控制也是通过这套机构来实施。

主动抛光盘的中心球头作用是定位盘面的中心位置和防止盘面不规则的倾斜和翻转。

### 2.2 电控结构和控制界面

计算机控制的主动抛光盘磨镜机的电控总框图见图 4,它的主要功能是:

1) 控制磨镜机的三轴运动,并给出任何时候三轴的精确位置和状态。即主转台(载有被加工的镜坯)的方位和旋转速度,抛光盘在横梁上的位置和移

动速度,抛光盘自身的方位和旋转速度,并可通过图 5 的工作界面确定主动抛光盘的工作区间,及此区间上某些工作段上的速度。

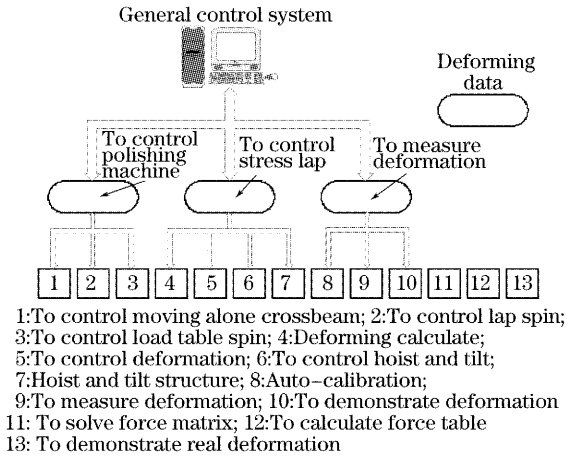


图 4 计算机控制的主动抛光盘磨镜机电控部分总的框图

Fig. 4 Electro-control sketch used in stress lap



图 5 主动抛光盘磨镜机的操作界面

Fig. 5 Operating interface of stress lap polishing machine

2) 在主动抛光盘的运动过程中实现抛光盘对镜面的恒压控制,同样在图 5 的工作界面上可自行根据镜面的状况设置所需的压力。

3) 根据主动抛光盘在横梁上的不同位置和其自身的方位查找预先存储在表中此位置上 12 个促动器上应加的力并由力矩电机执行和拉力传感器测出,反馈给计算机闭环控制,以确保此时抛光盘的面形与所接触的非球面部分的准确面形相一致。

4) 在装有 16 个线性微位移传感器 (Linearly variable differential transformer, LVDT) 的测试架上,测试主动抛光盘在机、电装配好的综合状态下的板的变形特性;根据计算出来的主动抛光盘在不同位置和方位时 12 个变形力促动器上应加的力,对此主动抛光盘面应有的变形进行静态和动态的测试和重复性测试。

图 5 是计算机控制的主动抛光盘磨镜机工作时的操作界面。我们只需在相应的方框内填上适当的参量,磨镜机和主动抛光盘就可以根据我们的要求进行工作。此外我们还编制了测量 12 个变形拉力传感器和 3 个提升压力传感器的工作界面,以及测量 16 个线性微位移传感器的工作界面,这样我们就可以很容易地检测到整个主动抛光盘的工作状况。

### 2.3 变形计算、修正及校验

如图 3 所示,12 个力促动器每三个组成一组,共 4 组均布在圆板周边。如前所述主动抛光盘变形所需加的力,不仅与基底圆铝板的杨氏模量等物理特性有关,还与 12 个力促动器的机械设计、加工、装配、调试有关,还与电路设计、制作、电机和电子元器件的性能不一致有关。因而在经过初步的计算后,还必须反复调试修正,才能得到满足准确变形所需的力。测试前我们给 12 个力促动器预先加上一定的预拉力,并确保主动抛光盘在镜面上的整个运动过程中的变形都在板的弹性变形的线形范围内。然后我们逐个给力促动器变换力  $\Delta f$ ,并测出相应的面形变换量  $\Delta w$ ,根据刚度矩阵公式:

$$\mathbf{K}_{16 \times 12} \times \Delta \mathbf{f}_{12 \times 1} = \Delta \mathbf{w}_{16 \times 1},$$

利用最小二乘法可以逐列求得矩阵  $\mathbf{K}$  中的元素,即求取铝板在此条件下的变换阵。再根据矩阵  $\mathbf{K}$  和抛光盘在不同位置时的应有变形量,再次利用最小二乘法或阻尼最小二乘法求取在此位置时的变形力。由于检测条件和元器件精度等的种种限制,测出来的力不甚理想,我们又根据实测情况逐步修正,最后得出比较理想的力。由于我们所用的国产线性微位移传感器的精度是峰谷误差为  $5 \mu\text{m}$ ,均方根误差约为  $1 \sim 1.5 \mu\text{m}$ ,加上测试时电压和电子元器件稳定性的误差,测试时的机械误差等,总的测量误差约为均方根误差  $2 \mu\text{m}$  左右。最后我们精确修正出的力,测量得到的面形和理想标准面形之间的误差为均方根误差  $3 \mu\text{m}$  左右。在主动抛光盘拆下再装上后重测,共 5 次,变形的均方根误差为  $2.4 \sim 3.3 \mu\text{m}$ ,同一种状态下,多次重测的精度为均方根误差  $0.9 \sim 1.2 \mu\text{m}$ 。重复精度很高。主动抛光盘从镜面中心到边缘的变形精度都差不多,因为都已接近测量精度的极限。而且这一精度也已完全能满足主动抛光盘的磨镜需要。

主动抛光盘在镜面上某一位置时,盘面旋转一周时调整修正后的力见图 6,由图可知,由于机械和电控的不一致性,12 个力促动器上的力幅值并不完

全一致,偏差超过 10%。图 7 是某一次测量时在某一位置测量得出的面形和理想标准面形的偏差,偏差的均方根误差为  $3.06 \mu\text{m}$ 。这是静态的测试结果。测试的重复精度是偏差的均方根误差为  $0.9 \mu\text{m}$ 。这几乎机械和电控误差的极限。

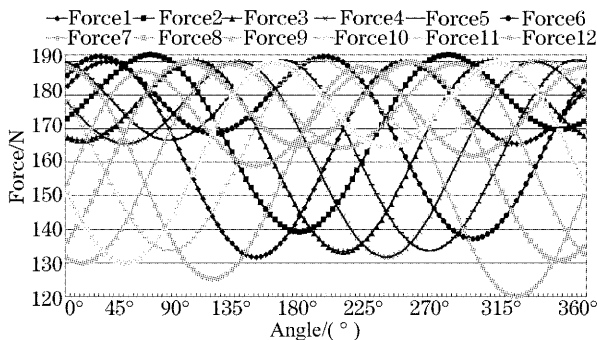


图 6 旋转一周时调整修正后的力

Fig. 6 Force after adjusting on 12 actuators on one circle

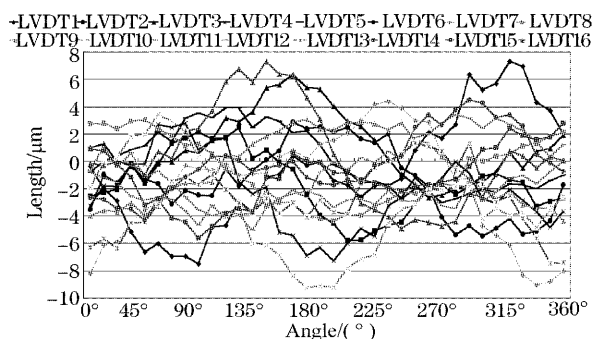


图 7 测量出的面形和理想面形的差

Fig. 7 Difference between ideal and measured deformation

根据静态的测试结果,我们就可以根据主动抛光盘中心在镜面上的径向位置和抛光盘面自身的方位角给出 12 个变形力促动器上应加的力,由此制定出一个查找表。在加工时,根据此 2 轴的位置,直接查找出 12 个促动器的力。

在动态测试时,当主动抛光盘旋转的速度达到  $2 \sim 3 \text{ r/min}$  时,变形的相位滞后问题已经显现出来,我们是通过不同的转速时给予不同的时间提前量来提前预加力去消除这一变形滞后的问题,这时我们仍然要求测量得出的动态面形和理想标准面形的偏差的均方根误差为  $3 \mu\text{m}$  左右。

### 3 在直径 910 mm, $F/2$ 抛物面镜加工中的应用

计算机控制的主动抛光盘加工的优点就是用较大的磨盘工具,去加工出快焦比的深度非球面的光学镜面<sup>[2,3]</sup>,在此我们根据现有镜坯的条件,加工一

个焦比  $F/2$  的非球面镜,图 8 是加工检验的总布置图。

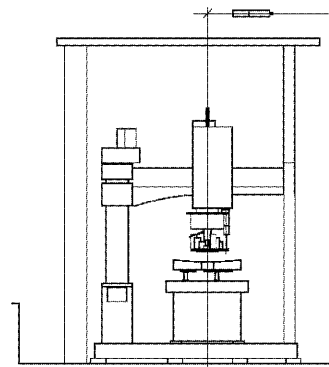


图 8 加工检验的总布置图

Fig. 8 Layout of polishing and testing

由于实验间空间的限制,磨镜机部分沉埋地下,采用垂直检验,检验时主动抛光盘随同横梁可转出检验光路,在这一位置主动抛光盘还可以在线性微位移传感器测试架上进行主动抛光盘变形的测试和校验。检验光路经平面镜折转后,经由 OFFNER 补偿器后用干涉仪检验、拍照。图 9 是主动抛光盘磨制镜面时的照片。图 10 是应用主动抛光盘磨制镜面前后的 1 组干涉检验照片,主动抛光盘仅上去工作 6 h,中央的约 1 个条纹的高就下去了。效率是很显著的。

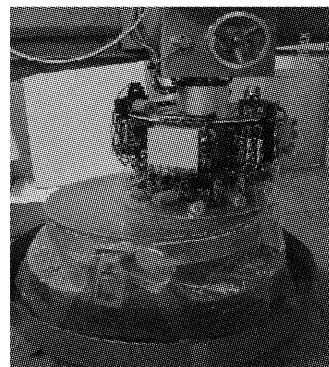


图 9 主动抛光盘磨镜照片

Fig. 9 Polishing mirror using stress lap

2003 年 11 月 28 日镜面最后加工结束,用 Shack 球面波干涉仪检验,获得条纹后经测算,在全口径范围内表面精度达到均方根误差小于等于  $\lambda/20$ 。扣除局部非对称的误差(不是主动抛光盘的作用引起的),在 95% 的范围内面形精度达到均方根误差小于等于  $\lambda/30$ 。图 11 是最后检验得到的干涉条纹图,图 12 是 95% 镜面面积范围内计算得到的面型图,检验结果均方根误差为  $0.032\lambda$ ,峰谷误差(PV)为  $0.295\lambda$ ,检验波长  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 。

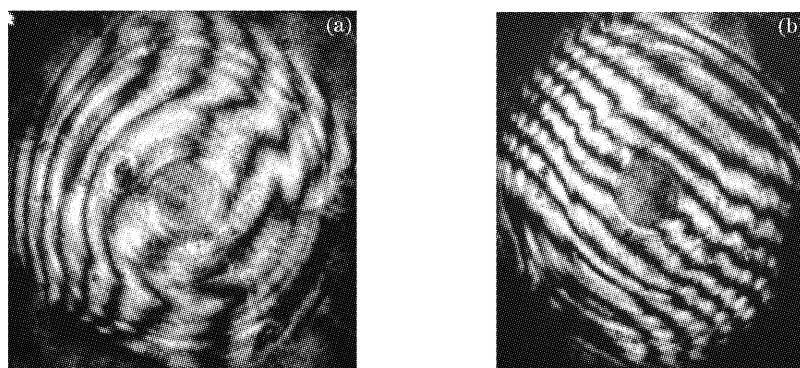


图 10 主动抛光盘磨制前后的两张照片

Fig. 10 Photographs before and after using stress lap

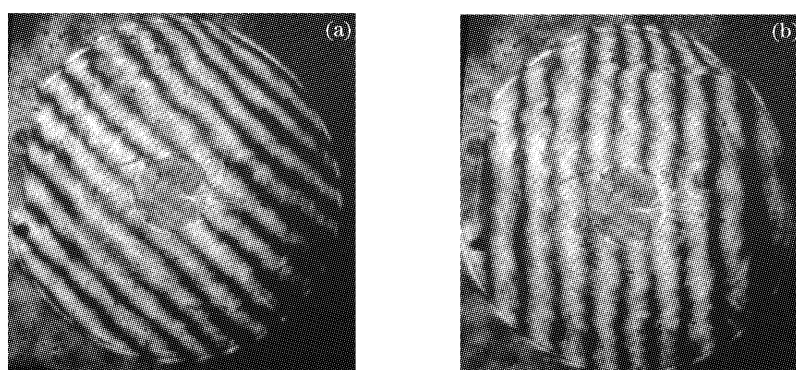


图 11 镜面最后检验的干涉条纹

Fig. 11 Last testing interferograms

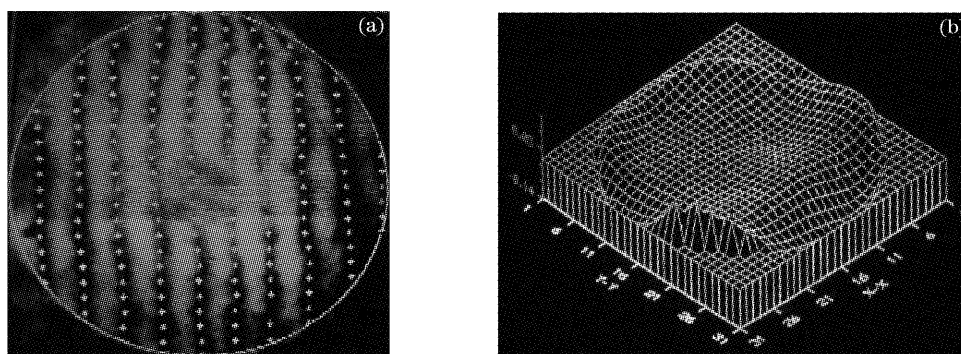


图 12 95%范围内的采样点图(a)和三维面形图(b)

Fig. 12 Sampling points on interferogram (a) and three-dimensional plots (b) of OPD on 95% area of mirror

#### 4 目前存在的问题

目前主动抛光盘的旋转是通过 3 根拨叉拨动变形促动器的立柱来实现的,由于立柱间的间隙较小,抛光盘在倾斜旋转时拨叉易于卡死,影响到盘面的升降运动和盘面中心偏离镜面中心距离的增大。现虽经改进后情况好转,但最终的彻底的解决办法还是采用 3 个四连杆机构<sup>[3]</sup>。

#### 5 应用前景

我们目前仅在 910 mm 的镜坯上成功应用。但是国外是将其应用到 3.5~8.4 m 的镜面上。我们现有一台 2.5 m 的磨镜机,它的机械结构、承重和刚度都很好,完全可以改造成一台 4 m 级的磨镜机,现在在这样一台磨镜机上还用传统的方法来磨镜子显然不适宜,因而完全可以将主动抛光盘技术

应用上去,就可以更快更好的加工出  $F/1$  左右的非球面。

目前国际上正在开展 30~100 m 巨型望远镜的预研,例如 CELT(美国加州 30 m 望远镜)的 30 m 望远镜主镜就是由 1080 块 1 m 的六边型离轴非球面组成的,用凯克(Keck)望远镜主镜的加工方法,是将圆形的镜坯预先应力变形,然后加工成球面,释放预应力后成非球面,然后切割成六边型,再用离子轰击消除因切割引起的边缘变形。而用主动抛光盘的技术,可以直接加工出六边型的离轴非球面,无须切割和离子束修改,因此其效益是十分明显的。美国 Steward 天文台的 Mirror Lab 正打算开展用主动抛光盘磨制离轴非球面的实验,并将其用到 21 m 望远镜的计划中<sup>[4]</sup>,因而主动抛光盘技术在下一代的望远镜的光学加工中肯定起到非常关键的作

用。所以下一步我们将继续完善主动抛光盘的技术,使其达到实用的水平,同时也将积极开展这方面的工作,进而为下一代望远镜的发展,为我国的天文光学事业做出贡献。

### 参 考 文 献

- 1 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
- 2 D. D. Walker, R. G. Bingham, D. Brooks. The production of highly aspheric secondary mirrors using active laps[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(7): 215~218
- 3 H. M. Martin, R. G. Allen, J. H. Burge *et al.*. Fabrication of mirrors for the Magellan telescopes and large binocular telescope [C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4837**: 609~618
- 4 H. M. Martin, J. R. P. Angel, J. H. Burge *et al.*. Optics for the 20/20 telescope[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4840**: 1~12