

doi: 10.3788/gzxb20134201.0079

# 光电经纬仪主镜面型误差主动补偿技术研究

李零印<sup>1,2</sup>, 王一凡<sup>1</sup>

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 光电经纬仪俯仰动作时, 引起主镜的面型误差, 从而影响整个光学系统的准确度, 以往主镜支撑结构采用被动式补偿方式, 来保证实际面型最大误差在设计指标之内. 本文基于压电陶瓷主动面型补偿技术, 通过对俯仰变化引起面型误差曲线的实时修正, 来主动控制主镜装调和动作引起的面型误差. 使用光机系统联合仿真方法, 拟合主镜面型误差, 然后采用压电陶瓷的主动补偿技术修正面型误差, 能够使原主镜峰值下降到 66.9 nm, 均方根最大值下降到 12.9 nm, 满足 15.82 nm 的均方根要求. 基于压电陶瓷的主动面型补偿技术不仅可以很好地实时补偿主镜的动态面型误差, 提高光学系统的像质清晰度和视轴稳定性, 对大口径高精度主镜系统的装调与动态检测有重要的意义.

**关键词:** 光电经纬仪; 主镜; 压电陶瓷; 面型误差; 视轴稳定

中图分类号: V556.5

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)01-0079-5

## Active Compensation Technology of Photoelectric Theodolite Primary Mirror Surface-shape Error

LI Ling-yin<sup>1,2</sup>, WANG Yi-fan<sup>1</sup>

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Primary mirror surface-shape error bringing flaw to optical system accuracy, which is caused by the pitching of large diameter photoelectric theodolite, is classified to center position error, off-center error and gravity deformation error. Previous design methods mostly are based on passive compensation, that is, design rational support and prevent deformation measures to assure the primary mirror surface-shape error within the design specifications. In this paper, piezoelectric ceramic active compensation technology is used to revise primary mirror surface-shape error with the method of real time correction on the surface-shape error induced by the pitching for large diameter photoelectric theodolite. Simulation software is utilized to fit the PV and RMS before and after compensation. The max PV value and max RMS decrease to 66.9 nm and 12.9 nm, respectively. Piezoelectric ceramic active compensation technology could bring benefit to image definition quality and the visual axis stability, making contribution to primary mirror surface-shape error on assembly and dynamic detection.

**Key words:** Photoelectric theodolite; Primary mirror; Piezoelectric ceramic; Surface-shape error; Visual axis stability

## 0 引言

光电经纬仪的主望远镜系统是光学实况记录测量系统的主要部件. 主反射镜是主望远系统的核心

单元, 为导弹、卫星、红外测量系统所共用, 并且在底部承载了调光调焦系统. 主反射镜的设计、安装对光学系统的像质清晰度和视轴稳定性也起着决定性作用. 主镜的设计分析、装调、使用过程中, 都要考虑主

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (No. 2008AA0049) 资助

第一作者: 李零印 (1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为变焦距系统. Email: lilingyin\_02@163.com

责任作者/导师 (通讯作者): 王一凡 (1958-), 男, 研究员, 硕士, 主要研究方向为光机电系统设计. Email: wangyifan1958@163.com

收稿日期: 2012-02-27; 录用日期: 2012-03-31

镜面型准确度,如何提高大口径光学系统主镜面型准确度,是现光学仪器设计和指标评价不可或缺的环节<sup>[1]</sup>,不论是传统的串行式设计过程中,还是在现代的并行工程中,镜面系统结构的工程分析都占有重要的地位。

随着经纬仪通光口径的增加,主镜重量的增加,主镜的支撑复杂度也随之提高.这是因为主镜在自身重量的作用下,而且当望远镜处于不同俯仰角时,主镜的自重方向与主镜光轴夹角也不同,光学镜面必定产生不同程度的变形误差<sup>[2]</sup>.传统设计方法利用有限元建立主镜光机系统模型,准确计算出主镜支撑系统在重力和工况下在各个位置的变形,然后利用各种支撑方式,抵消重力引起的主镜变形,尽量只传递主镜室中的平移和倾斜分量,使得主镜的变形以平移和倾斜刚体位移为主,而减小对面形准确度产生影响<sup>[3]</sup>.但是由于支撑结构设计时,不可能充分考虑到实时动态指标,所以必定和现场装调数据不可能完全一致,被动的支撑的补偿方式很难达到高准确度的主镜需求.因此,本文就引入了基于压电陶瓷的主镜面型误差主动补偿技术,实施支撑与补偿相结合的方法,针对主镜不同俯仰位置,在装调过程中,采用实验检测技术设定主镜位移补偿曲线,通过压电陶瓷补偿器对已知误差进行补偿,从而保证光电经纬仪主镜面型误差。

## 1 主镜系统

主镜作为望远镜最为关键部件之一,它的准确度对整个光学系统都有影响,因此对主镜的面型准确度和视轴稳定度都有很高的要求,主镜技术指标如表1所示,电压位移为一次比例关系。

表1 主镜技术指标

Parameter	Value
Aperture	606 mm
Center deviation	<0.02 mm
Mirror tilt	5"
Surface-shape accuracy	RMS< $\lambda/40$
Surface-shape accuracy after assembly	RMS< $\lambda/20$
Work temperature	-35℃~+40℃

因主镜的材料为微晶玻璃,其线膨胀系数为 $-1 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ ,经过分析中心轴在受力 $5 \text{ kg m/s}^2$ 时主镜的径向位移仅为 $0.5 \mu\text{m}$ ,可以保证主镜的径向定位准确度.主望远镜的工作角度为 $-5^{\circ} \sim +185^{\circ}$ ,主镜光轴偏角最大时,重力在主镜光轴方向的分力 $F \approx 7 \text{ kg m/s}^2$ ,而 $F/6 \approx 1.2 \text{ kg m/s}^2$ ,则六套前支承组件中的弹簧力分别调整至 $2 \text{ kg m/s}^2$ .本系统使用六套前支承组件、三组底支承组件在轴向上支承主镜,六组侧支承组件在径向上支承主镜(见图1)。

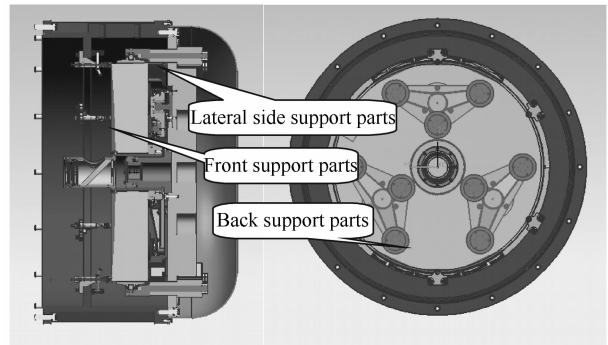


图1 主镜支撑结构

Fig. 1 Primary mirror support structure diagram

主镜室共装备六套前支承组件,轴座与调节杆之间为锥面与球面接触,使轴座能在小范围内自由调节角度,保证其端面与主镜正面边缘贴紧,减小主镜的局部变形;三组底支承组件在轴向上支承主镜,支承盘与三角支承板之间通过钢球连接,三角支承板与球头支承之间也是球头接触,并都使用拉簧压紧,使支承盘和三角支承板都能在小范围内自由调节角度;六组侧支承组件在径向上支承主镜,正、倒镜时分别有三组起作用,支承盘与主镜间隔有橡胶垫,使支承盘与主镜有效接触,配重杆与支承盘之间通过钢球连接,并使用四组拉簧压紧,使支承盘能在小范围内自由调节角度,保证了与主镜的紧密接触。

支撑系统中,都采用弹簧结构,利用挠性平衡原理来限制主镜的位置,挠性平衡的最大缺点在于被动式响应,只能对各个位置的主镜误差进行固定的判断和修正,修正误差的灵活性与主动性不够.作为微位移驱动器的驱动元件有很多种类,如电磁式、热变形式、磁致变形式、记忆合金式.现有的微位移执行机构中,压电陶瓷作为位移补偿机构,具有体积小、分辨率高、承载能力大等优点,是一种理想微位移补偿器.因此引入压电陶瓷驱动器补偿技术来实现主镜位置补偿。

## 2 压电陶瓷补偿原理

由于主镜的一些加工和装调微误差客观上很难完全消除,所以需要在控制点使用微位移补偿器,对上述误差进行相应的补偿,从而实现光学系统的准确度和实时补偿.压电驱动器利用逆压电效应,给压电陶瓷施加相应的控制电压,使压电陶瓷产生相应的应力和应变,可以按照控制信号的要求,将需要补偿的位移传递给主镜,确保主镜的实际位置与设计位置重合(见图2)。

控制系统采用计算机实现对压电陶瓷驱动器的控制,通过计算机对补偿数据的记忆曲线拟合,从而实现对各个方位俯仰的位置进行实时补偿;压电陶

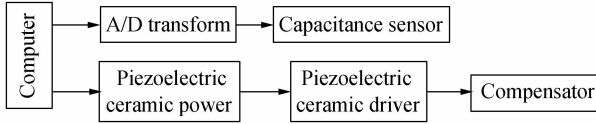


图 2 压电陶瓷补偿器原理

Fig. 2 Compensator principle of piezoelectric ceramic  
 瓷电源主要通过计算机控制信号,给压电陶瓷输出电压信号,从而产生驱动器的相应位移变化量.参考有限元分析结果和相关的主镜面型分析<sup>[4]</sup>,主镜的中心线偏移、主镜节点位移(有限元划分网格后产生的离散节点)的变化都在微米级别以下,故可以使用压电陶瓷补偿器进行动态补偿设计.压电陶瓷的电压位移特性如表 2 所示,在 0~180 V 内,电压位移是线性关系,误差度在 3% 以内.

表 2 电压-位移关系

**Table 2 Relation between output displacement and voltage**

Voltage/V	Displacement/ $\mu\text{m}$	Hysteresis error/(%)
0	0	1
20	80	1
40	160	1
60	240	1
80	320	2
100	400	2
120	480	3
140	560	3
160	640	2
180	720	1

### 3 波前理论分析

图 3 为主光学系统.图 4 为支撑结构.离轴反射

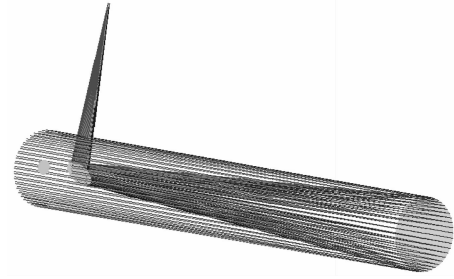


图 3 主光学系统

Fig. 3 Main optical system

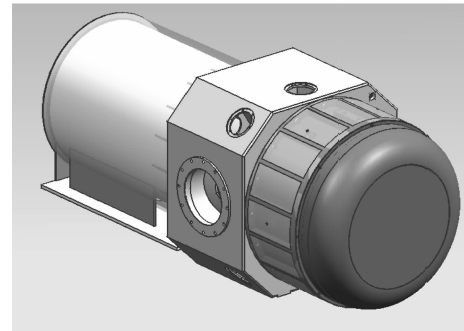


图 4 支撑结构设计

Fig. 4 Support structure design of main optical system

镜在空间坐标系有 6 个自由度,分别是沿着 X、Y、Z 的平动  $D_x$ 、 $D_y$ 、 $D_z$  和绕 X、Y、Z 的转动  $\theta_x$ 、 $\theta_y$ 、 $\theta_z$ .

由波相差引入的基本理论可知, $D_x$ 、 $D_y$  不会影响离轴抛物面镜轴上波相差, $D_z$  则主要引起离轴量的变化;由于离轴反射镜母镜是回转对称的,因而绕 Z 的转动  $\theta_z$  不会引入波相差,因此,对波相差的产生和补偿,主要针对  $\theta_x$ 、 $\theta_y$  分析<sup>[5-7]</sup>.

调整量在母镜中引入波相差表达式为

$$W_{\text{parent}} = 2\theta_y r \cos \theta - 2\theta_x r \sin \theta - \frac{\theta_y^2 + \theta_x^2}{R} r^2 - \left[ \frac{\theta_y^2 - \theta_x^2}{R} \right] r^2 \cos 2\theta + 2 \frac{\theta_y \theta_x}{R} r^2 \sin 2\theta + \frac{\theta_y}{R^2} r^3 \cos \theta - \frac{\theta_x}{R^2} r^3 \sin \theta \quad (1)$$

( tilt ) ( defocus ) ( astigmatism ) ( coma )

tilt、defocus、astigmatism、coma 均为常见的波相差中一部分,在式(1)基础上,坐标变换到离轴抛物面坐标系后调整量引入的波像差为

$$W_{\text{off}} = A_1 + A_2 \rho \cos \varphi + A_3 \rho \sin \varphi + A_4 \rho^2 + A_5 \rho^2 \cos 2\varphi + A_6 \rho^2 \sin 2\varphi + A_7 \rho^3 \cos \varphi + A_8 \rho^3 \sin \varphi + \dots \quad (2)$$

式中: $A_1$  表示平移; $A_2$ 、 $A_3$  表示倾斜; $A_4$  表示离焦; $A_5$ 、 $A_6$  表示像散; $A_7$ 、 $A_8$  表示彗差, $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ 、 $A_5$ 、 $A_6$ 、 $A_7$ 、 $A_8$  分别为  $\theta_x$ 、 $\theta_y$ 、 $R$ (顶点曲率半径)、 $\rho$ (离轴坐标系极径)、 $\varphi$ (极径和坐标轴夹角)、 $r$ ( $\sqrt{(\rho \cos \varphi)^2 + (\rho \sin \varphi + m)^2}$ )、 $m$ (离轴量)的函数,平移、倾斜、离焦、像散、彗差均为基本像差,具体推导过程见文献<sup>[5]</sup>.

对比装调量在离轴抛物面镜中引入的波相差表达式和其在母镜中引入波相差表达式,装调量母镜中由装调量引入的波相差主要是慧差,所以对母镜进行 x 方向和 y 方向调整,可有效地补偿母镜面型误差的慧差.同理,可以对其它几何相差和波相差根据  $\theta_x$ 、 $\theta_y$  的变化进行综合补偿.结合压电陶瓷位移补偿技术,我们可以在反射镜支撑部分,通过压电陶瓷主动点的控制,来调整  $D_x$ 、 $D_y$ 、 $D_z$ 、 $\theta_x$ 、 $\theta_y$ 、 $\theta_z$  来控制面型误差的峰值(Peak Value, PV)和均方根(Root-Mean-Square, RMS)变化.

### 4 补偿技术的实现方式

主镜筒通过四连通连接在跟踪架上,主镜筒在

工作情况下,随着俯仰的变化而动作,但是由于重力和主镜法向关系发生变化,所以主镜的变形情况不尽相同,经过采用有限元分析方法,对光电经纬仪主镜支撑系统的不同俯仰角度进行自重变形分析(在装调过程中,可以进行现场测试,底支撑和侧支撑各设置三个主动点)得出各个俯仰角度上的面型误差.同时,使用有限元软件分析拟合随着俯仰变化的压电陶瓷补偿后主镜面型误差,当主镜俯仰 $45^\circ$ 时,把有限元软件拟合的面型数据,导入光学设计软件中去,仿真技术得到得面型误差数据如图5、6所示.测量主镜随着俯仰的变化情况的补偿前后面型误差数据如表3所示<sup>[8-10]</sup>.

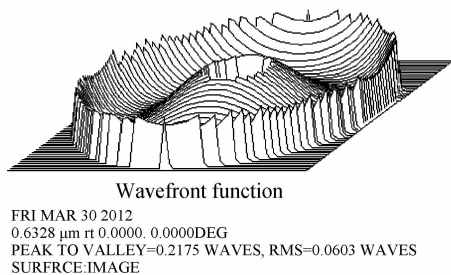


图5 初始主光学系统面型误差

Fig. 5 The original surface-shape error comparison

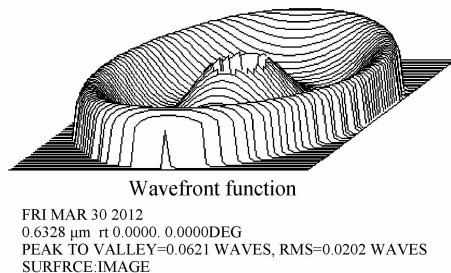


图6 采用压电陶瓷补偿前后面型误差

Fig. 6 The surface-shape error comparison with piezoelectric ceramic compensation

从表3看出,随着主镜俯仰的变化(也就是主镜光轴与天顶方向夹角),主镜面型误差起波动性变化,在 $45^\circ$ 和 $135^\circ$ 为两个峰值.这两个位置面型误差最大的原因是这两个位置由重力产生的主镜变形不均匀性最大,导致RMS和PV的增大.PV从 $1/5\lambda$ 下降到 $1/15\lambda$ ,RMS从 $1/15\lambda$ 下降到 $1/50\lambda$ ,最大PV值从139.7 nm下降到66.9 nm,最大RMS值从36.4 nm下降到12.9 nm,最小PV值从53.2 nm下降到20.6 nm,最小RMS值从18.1 nm下降到6.1 nm(满足表1中 $1/40\lambda$ ,即RMS值小于15.82的设计要求).用压电陶瓷驱动器代替弹簧机构,使得直径从挠性支撑转为基于压电陶瓷驱动器的主动补偿系统,而且更能有效地控制主镜系统面型误差.结果表明,此系统已经达到主镜位置误差补偿的准确度需求,即提高了大口径光学系统的整体准确度.

表3 主镜补偿前后面型误差对比

Table 3 Error comparison before and after compensation

Pitch angle/ ( $^\circ$ )	PV before compensation/ nm	RMS before compensation/ nm	PV after compensation/ nm	RMS after compensation/ nm
-5	53.2(min)	18.1(min)	20.6(min)	6.1(min)
5	69.4	20.8	24.0	7.1
15	94.8	24.6	31.3	8.3
25	112.7	27.9	38.5	9.4
35	128.7	31.3	50.2	10.3
45	136.1	35.3	60.8	12.6
55	132.5	32.4	48.2	11.5
65	120.4	28.3	41.0	10.0
75	100.4	26.4	32.5	9.2
85	88.5	22.1	22.1	7.6
95	82.3	20.7	29.6	7.1
105	96.8	25.5	41.0	8.8
115	112.5	30.1	45.7	9.3
125	120.6	31.9	59.8	11.2
135	139.7(max)	36.4(max)	66.9(max)	12.9(max)
145	110.6	33.2	56.9	11.3
155	97.8	28.5	48.4	9.6
165	82.1	24.2	42.1	8.2
175	71.2	20.3	28.3	7.9
185	63.3	19.6	21.7	6.8

## 5 结论

本文通过理论上分析俯仰的变化对主镜位置随误差的影响,采用压电陶瓷技术进行基于波相差理论的主动补偿技术,提高了主镜的面型准确度,可以对各个俯仰位置的主镜位置误差进行实时修正,有较好的工程应用前景.

在主镜支撑结构已经定下来的情况下,仍然可以后续对主镜的实时主动补偿,使得原有的静态准确度得到很好的保持,主镜系统就可以更加灵活地实时补偿主镜变形,当像质清晰度和视轴稳定性不够时,可以通过定量的分析后,合理调整各个主动点位移,改善光学系统成像质量.

### 参考文献

- [1] TU Feng-hua, WANG Wei-yang, DONG De-ping, *et al.* Piezoelectric ceramic actuators applied to G-Radiant cooler for FY-3M meteorological satellite [J]. *Science Technology and Engineering*, 2008, **8**(14): 4029-4032.  
涂锋华,王维扬,董德平,等.压电陶瓷微位移驱动器在FY-3卫星G型辐射制冷器上的应用[J].科学技术与工程,2008,**8**(14):4029-4032.
- [2] LIAO Sheng-kai, LIU Yin-nian, CHEN Xiao-wen, *et al.* High frequency motion compensation system based on PZT actuator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(3): 539-543.  
廖胜凯,刘银年,陈小文,等.采用压电陶瓷驱动器的高频像移补偿系统[J].红外与激光工程,2011,**40**(3):539-543.

- [3] SUN Ning. Optimal design of support system for a 1 m diameter primary mirror[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, **3**(6): 644-648.  
孙宁. 1m 口径主反射镜支撑系统的优化设计[J]. *中国光学与应用光学*, 2010, **3**(6):644-648.
- [4] HOU Jian-min, ZHUO Ren-shan, SUN Ning. Lightweight design and analysis for a theodolite based on finite element method[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2008, **31**(4):77-80.  
后建敏,卓仁善,孙宁. 基于有限元法的光电经纬仪主镜轻量化设计[J]. *长春理工大学学报*, 2008, **31**(4):77-80.
- [5] CHEN Qin-fang, LI Ying-cai, MA Qin, *et al.* Surface error compensation of off-axis parabolic mirrors by alignment[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(9): 1578-1581.  
陈钦芳,李英才,马臻,等. 利用调整技术补偿离轴抛物面反射镜面形误差[J]. *光子学报*, 2010, **39**(9):1578-1581.
- [6] CHEN Qin-fang, LI Ying-cai, MA Qin, *et al.* Computer-aided alignment of off-axis aspheric mirrors in null testing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(9): 2220-2223.  
陈钦芳,李英才,马臻,等. 离轴非球面反射镜补偿检验的计算机辅助装调技术研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(12):2220-2223.
- [7] LIU Guo-song, YANG Zhi-gang, ZENG Ping, *et al.* Novel sophisticate stepping 2-DOF piezoelectric actuator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(4): 602-606.  
刘国嵩,杨志刚,曾平,等. 新型压电步进式二维精密驱动器[J]. *光学精密工程*. 2006, **14**(4): 602-606.
- [8] DU Jun-feng, ZHANG Lin-bo, REN Ge. Mounting system design for 1.3m primary mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(10): 1483-1488.  
杜俊峰,张林波,任戈. 1.3 m 主镜的支撑设计[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(10): 1483-1488.
- [9] TAN Fan-jiao, QIAO Yan-feng, LI Yao-bin, *et al.* Finite element analysis for surface shape deformation of photo-electronic theodolite primary mirror [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **28**(4): 756-763.  
谭凡教,乔彦峰,李耀彬,等. 光电经纬仪主镜面形变化的有限元分析[J]. *光子学报*, 2008, **28**(4):756-763.
- [10] ZHANG Liao-yuan, GONG Yi-cai, LIU Yu-mei. Research on error compensation technology of micro-displacement system[J]. *Acta Armamentarii*, 2008, **29**(8): 970-973.  
张辽远,宫毅超,刘玉梅. 微位移机构误差补偿技术研究[J]. *兵工学报*, 2008, **29**(8):970-973.

\*\*\*\*\*

• 下期预告 •

## gyrator 变换全息图及其在图像加密中的应用

林睿

(重庆工商大学 计算机科学与信息工程学院, 重庆 400067)

**摘要:**提出了 gyrator 变换全息图,利用 gyrator 变换快速算法模拟实现了 gyrator 变换全息图的产生和再现,并研究了基于相移数字全息的 gyrator 变换全息图.在此基础上提出了采用正弦相位光栅实现光学图像加密的新方法.该方法利用 gyrator 变换在相空间的旋转特性,将 gyrator 变换的角度、光栅的频率及光栅的旋转角度作为加密密钥,并利用两个或两个以上的 gyrator 变换系统的级联实现图像加密,增加了系统的安全性.依据相移数字全息进行的两个 gyrator 变换系统级联的仿真实验验证了该方法的可行性、有效性及其良好的安全性能.

**关键词:**gyrator 变换; gyrator 变换全息图; gyrator 变换快速算法;相移数字全息;图像加密