

文章编号 1004-924X(2018)07-1633-09

光电跟踪系统 $\Phi 1\ 000\ \text{mm}$ 主镜的装调

杨立保^{1,2}, 李艳红¹, 王 晶², 孙 宁², 谢京江², 史国权¹, 张 帆^{2*}

(1. 长春理工大学, 吉林 长春 130012;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 1 000 mm 口径主镜的光机装调质量直接影响望远镜光学系统的成像效果。为了改善大口径光电跟踪系统的成像质量, 本文对主镜的装调技术进行了研究。首先, 对影响主镜面形精度的误差进行分配; 其次, 结合具体的主镜支撑结构的形式, 采用典型装调方法对 800 mm 口径主镜进行详细的装调研究, 实时测得主镜的面形精度; 最后, 综合分析产生装调误差的来源, 提出了一种加工、检测、装调一体化的高精度装调方法。该方法使得 1 000 mm 主镜在装调后的面形精度波像差 RMS 值达到了 $\lambda/40$, 在提高装调质量的情况下显著提高了装调效率。

关键词: 光电跟踪系统; 主镜支承结构; 大口径; 装调技术

中图分类号: TP751.2 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20182607.1633

Alignment of $\Phi 1\ 000\ \text{mm}$ primary mirror for photoelectric tracking system

YANG Li-bao^{1,2}, LI Yan-hong¹, WANG Jing², SUN Ning²,
XIE Jing-jiang², SHI Guo-quan¹, ZHANG Fan^{2*}

(1. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130012, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

*Corresponding author, E-mail: zhangfan@ciomp.ac.cn

Abstract: The quality of optical machine installation in a 1 000 mm aperture reflector directly influences the imaging characteristics of the optical system of a telescope. In order to improve the imaging quality of a large-aperture photoelectric tracking system, the installation and adjustment technology of the reflector was investigated. First, the errors that affect the precision of the principal mirror were distributed. Second, a typical method was adopted to perform a detailed installation and adjustment investigation of the principal mirror with an aperture of 800 mm, and the reflection mirror shape accuracy was measured in real-time, in combination with the specific form of the reflector support structure. Finally, this paper included a comprehensive analysis of the source of installation and adjustment errors and proposed a high-precision method that integrates processing, testing, and installation. The method adopted resulted in an RMS value of $\lambda/40$ for the modified profile precision waveform aberration after installation, and significantly improved the efficiency and quality of the installation and adjustment.

收稿日期: 2017-11-01; 修订日期: 2017-12-10.

基金项目: 国防科技预研基金资助项目 (No. 1040603)

Key words: photoelectric tracking system; primary mirror bearing structure; large aperture; alignment technology

1 引言

光电跟踪系统是一种以光波为信息载体的机电一体化集成设备,具有高度灵敏的探测能力和快速响应的跟踪能力,在目标跟踪、轨迹测量、姿态解算、事件回溯、图像记录等方面具有重要的作用。对于 1 m 口径的光学系统,能否获得高质量的成像效果,不仅取决于光学设计和加工精度,还与装调质量密切相关。因此,光机装调技术在光学系统研制过程中占有十分重要的地位。近年来,随着计算机辅助装调技术的广泛应用,光机装调质量有了长足的进步。计算机辅助装调技术能够定量地给出光学系统成像质量的变化趋势,光机装调技术跨越了定性装调阶段进入了定量装调阶段。然而,光机装调质量仍然滞后于越来越高的光学成像质量要求。

本文研究了 1 m 口径主光学系统波像差的分配及 1 m 口径主镜的支承结构,重点介绍了 $\Phi 800$ mm 主镜的装调方法,并对该方法进行了优化。之后采用该方法装调 $\Phi 1\ 000$ mm 主镜,装调后主镜基本保持加工后的面形精度,装调未对

加工面形产生明显的影响,实现了装调误差最小化及高精度装调的目的。

2 误差分配

主光学系统的口径越大、成像质量要求越高,主镜的加工和装调精度要求越高,装调难度也越大。如果在工程实施之前,不建立合理的误差分配体系,就不能在加工、装调时进行有针对性地补偿修正误差^[1],最终全系统成像质量很难达到预期目标。

美国在研制 4 m 先进技术太阳望远镜(ATST)时,曾经对望远镜光学系统制订了多套误差分配方案,是较早建立光学系统波像差分配体系的事例,该误差分配体系为后续加工、装调及使用提供了依据^[2]。

明名等人对主光学系统的误差分配进行了研究,他采用 Bottom-Up 方式^[1],即由下而上的形式,下级全部子误差的平方和等于上级误差的平方。用 ZEMAX 软件工具对主光学系统的误差按加工误差和装调误差进行分配^[3],要求光学系统的波像差 < 2 倍衍射极限,给出的具体分配结果如图 1 所示。

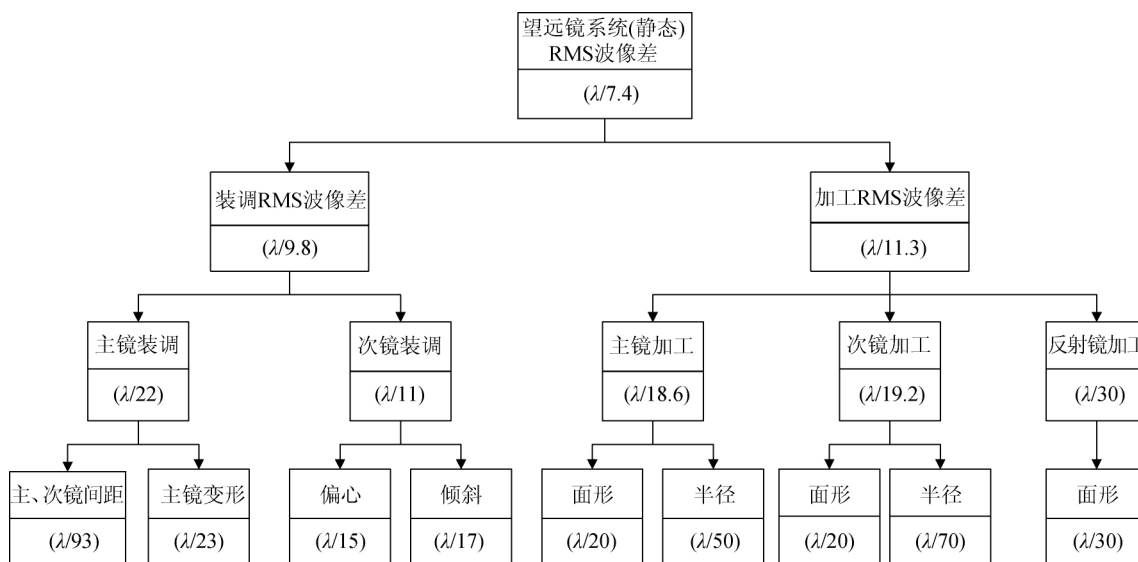


图 1 望远镜系统的误差分配

Fig. 1 Error distribution of telescopes

光学元件的加工误差包括半径、厚度等几何形状误差以及非球面系数误差和镜面面形误差^[1],本文所指的加工误差主要是主镜、次镜、反射镜的加工误差。

近年来,光学元件的加工能力有了很大进展,对于小口径平面反射镜基本可以达到 $\lambda/50$ 以上,高的可以达到 $\lambda/80$,但是对于 $1\ \text{m}$ 口径的非球面反射镜, $\lambda/40$ 算是比较高的水平。目前,中国科学院长春光机所正在研制 $2\ \text{m}$ 口径碳化硅非球面反射镜的加工,对 $\lambda/60$ 的面形精度进行技术攻关。

从上述误差分配可以看出,不论光学加工精度达到多高,系统受装调精度所限,成像质量不容易提高,装配技术水平提升成为目前制约光学系统成像质量的关键。

3 主镜支承结构

主镜支承结构即是主镜室,其最重要的功能是支承主镜并保持主镜面形在各个状态下稳定,是光电跟踪系统望远镜的重要组成部分,对光学系统的成像清晰度和视轴稳定性起着决定性作用。如果支承结构设计不合理,将引起主镜面形的变化,从而使像点的衍射斑失去对称性,影响系统的成像质量。

主镜支承结构的主要目的就是要限制主镜的六个自由度,保持主镜受力均匀,因此结构非常复杂,包括主镜底板、前支承组件、侧支承组件、底支承组件、中心轴组件、防转组件和后罩等零部件。其中除底板和后罩外,其余组件分别起到限制主镜自由度的作用。系统详细组成如图 2 所示。

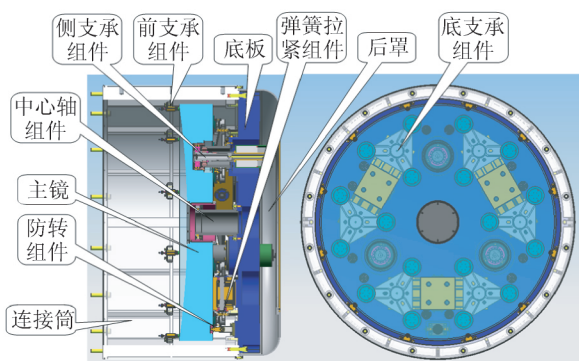


图 2 主镜室

Fig. 2 Composition of primary mirror room

使用三维设计软件进行结构设计,使主镜底支承重力分布、侧支承配重设计、系统总体配重等更加精确。使用有限元分析软件 Patran 对中心轴、主镜等零件进行变形分析,为结构设计提供重要的依据。

在光电跟踪系统工作的过程中,主镜会随着光学系统视轴指向的变化而运动。主镜在俯仰角 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间转动,此时它承载着重力和转动的惯性力。为了在这种状态下保持主镜的面形基本不变,要将主镜的受力进行合理分布。本文的 $\Phi 1\ 000\ \text{mm}$ 主镜采用了一套复合支承结构,径向定位采用芯轴结构,轴向支承采用 whiffle-tree 结构,径向支承采用杠杆平衡锤的浮动结构。当主镜光轴指向天顶时,支承结构起轴向支承作用;当主镜光轴处于水平状态时,支承结构的径向支承起作用;当主镜光轴介于水平和天顶状态之间时,轴向和径向两种支承均起作用。

运动过程中主镜的面形是随着主镜光轴俯仰角的变化而变化,可以按下式表达:

$$\delta_a = \sqrt{(\delta_A \sin \alpha)^2 + (\delta_R \cos \alpha)^2},$$

式中: δ_a 为主镜表面变形量; δ_A 为光轴水平时的表面误差; δ_R 为光轴垂直时的表面误差; α 代表主镜光轴与垂直轴的夹角,主镜光轴指向天顶时俯仰角 $\alpha = 0^\circ$ ^[4-5]。

从上述公式可知,当 $\alpha = 90^\circ$ 时,即主镜光轴水平时,受重力影响,面形变化最大。这是因为主镜的全部重量仅由 3 组径向支承分担,而轴向支承并没有起作用,所以此时主镜的面形精度较难保持;而当 $\alpha = 0^\circ$ 时,也就是主镜光轴指向天顶时,主镜的全部重量由轴向支承按圆周分布的 18 点分担,此时主镜受力比较均匀,所以主镜的面形精度也相对的较容易保持。综上可知,主镜光轴水平状态的面形精度超差的概率最大,如果主镜在该状态的面形精度满足指标要求,则认为其余状态均能满足指标要求,因此检测在主镜光轴水平状态进行。

假设主镜加工后的面形精度 PV 值为 $\lambda/8 = 79.1\ \text{nm}$,RMS 值为 $\lambda/40 = 15.8\ \text{nm}$ ($\lambda = 632.8\ \text{nm}$)。

通过有限元分析主镜支承结构对面形产生的影响,侧支承组件导致主镜面形精度变化的 PV 最大值为 $53.6\ \text{nm}$,RMS 最大值为 $10.7\ \text{nm}$,分别与 $\lambda/8$ 、 $\lambda/40$ 叠加后即得主镜面形精度的 PV 值为 $\lambda/4.8$ (极端情况),RMS 值为 $\lambda/33.2$ 。底支

承组件导致主镜面形精度变化的 PV 最大值为 20.1 nm, RMS 最大值为 4.6 nm, 分别与 $\lambda/8$ 、 $\lambda/40$ 叠加后即得主镜面形精度的 PV 值为 $\lambda/6.4$ (极端情况), RMS 值为 $\lambda/38.5$ 。主镜光轴处于不同角度时主镜面形精度的 PV 值和 RMS 值如图 3 所示。

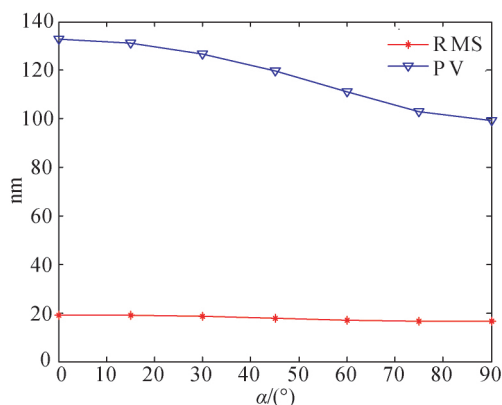


图 3 主镜光轴指向不同角度时的面形精度

Fig. 3 Mirror-shaped precision of main mirror with optical axis pointing to different angles

拉紧弹簧的拉紧力用于平衡主镜不同角度在重力状态下的分力。主镜在 $-5^{\circ} \sim 0^{\circ}$ 和 $180^{\circ} \sim 185^{\circ}$ 的最大角度是 5° , 这时重力在主镜轴向的分力 $F = 250 \text{ kg} \cdot 9.8 \text{ N/kg} \cdot \sin 5^{\circ} = 213.5 \text{ N}$, 拉紧弹簧在主镜圆周方向共分布 12 组, 这样每个拉簧分担的最小拉力 $F_{\min} = 213.5 \text{ N}/12 = 17.8 \text{ N}$ 。为了保证主镜在经纬仪工作状态下的安全, 将弹簧拉紧力设置为 30 N [6-7]。

4 $\Phi 800 \text{ mm}$ 主镜的装调及检测

4.1 $\Phi 800 \text{ mm}$ 主镜的装调方法

传统小口径反射镜的研制均采用裸镜加工后再装支承的办法。但是对于面形精度很高的 1 m 口径的反射镜而言, 显然这种方法已经不适用。裸镜加工时, 面形精度可达 $\lambda/40$, 但是经过装配支承后, 改变了裸镜加工时的受力状态, 因此装完支承后的面形很难保持原有的面形精度。

主镜装调多采用带支承的结构形式对主镜进行修磨的办法, 在修磨过程中需要反复精修或精调主镜支承 [8-11]。

以带支承的方式进行加工相比裸镜加工再装配是一个明显的技术进步, 但是带支承加工仍然

有很多技术问题需要研究。因为即使带支承加工, 也存在二次安装的问题, 比如镀膜前必须要将支承拆卸掉, 以裸镜形式镀膜, 镀完膜后仍然需要二次装配, 必然导致装配应力的变化, 引起主镜面形精度的改变。

主镜的装调过程如下: 首先将主镜室放置在高精度回转台上, 保证主镜室安装止口的旋转心与转台的旋转中心重合。由于芯轴与主镜精密同心配合, 因此芯轴的中心应与主镜室安装止口的中心重合, 将主镜的光轴调整到与转台的回转轴重合, 即完成了主镜与主镜室装配。这个调整过程即有同心调整也有倾斜调整。

当主镜与主镜室的位置调整到位后, 开始进行主镜面形的精修及检测工作。

首先, 为了方便主镜在加工和检测两种状态间的切换, 要将安装完主镜的主镜室放置在加工检测调整架上, 加工检测调整架具有一自由转动的回转轴, 方便两种状态间的切换, 1 m 主镜的加工检测现场如图 4 和图 5 所示。需要说明的是加工检测调整架要配平。采用干涉仪对光轴水平状态的主镜面形进行检测。



图 4 主镜的加工状态

Fig. 4 Processing status of main mirror



图 5 主镜的检测状态

Fig. 5 Detection status of main mirror

根据前面所述的装调方法,在 1 m 口径主镜的装调之前,针对 $\phi 800\ \text{mm}$ 口径的主镜装调,采用了完成主镜装配后对主镜进行加工再复位的方法,具体步骤如下:

(1)在主镜室内安装主镜时采用高回转精度的转台,使主镜光轴与主镜室和四通的安装止口同心,完成主镜与主镜室的初步安装;

(2)在主镜室内对主镜进行加工,为了便于主镜面形在精修和检测两种状态下的平稳切换,将带有主镜的主镜室安装到加工检测调整架上,并将加工检测调整架的回转轴配平;

(3)在主镜面形精修的过程中,采用修检一体化操作,即通过干涉仪结合大口径高精度平面镜采用自准直的方法实时监测主镜的面形误差并修磨主镜;

(4)在完成主镜面形的加工后,对主镜进行镀膜前的试拆装,确认装配误差量在可接受范围内;

(5)完成镀膜后,对主镜进行复位装配并复检主镜面形。

4.2 $\phi 800\ \text{mm}$ 主镜的装调过程及检测结果

在主镜室内完成对主镜的同心及倾斜等位置装配后,开始带支承状态的精修和检测。

4.2.1 完成主镜面形加工后的检测结果

验收时的检测结果为:PV=0.165 3λ ,RMS=0.022 8λ ,如图 6 所示。

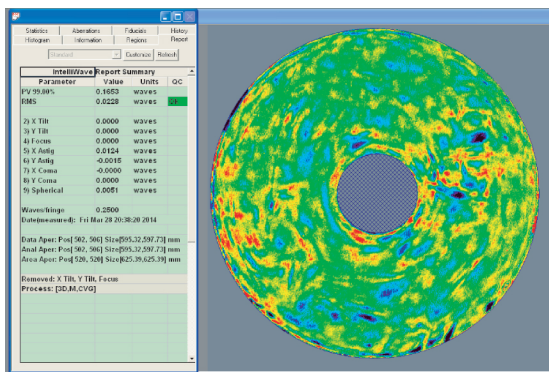


图 6 第一次完成主镜面形加工的检测结果
Fig. 6 Inspection result of primary mirror

从检测结果看,波像差的 RMS 值达到了 $\lambda/44$,这是光电跟踪系统中 1 m 量级口径微晶玻璃材料的反射镜目前所能达到的最高检测精度。

4.2.2 进行镀膜前的试装

在进行芯轴拆卸复位过程中,发现干涉图中

心附近有明显的突起和凹陷,波像差 RMS 值下降到 0.061 5λ ,如图 7 所示。之后无论如何仔细安装芯轴组件中的楔形环,均无法去除干涉图中心附近的突起和凹陷。经过反复分析及实验,发现第一次验收时检测的波像差 RMS 值 0.022 8λ ,是在芯轴组件未安装到位的情况下修磨的结果,具体就是芯轴组件中介于轴套和芯轴轴承之间的楔形环被装偏的情况下修磨主镜得到的检测结果,这种情况是无法重复的,其加工是无效的。因此不得不重新安装楔形环,使压紧后的楔形环对主镜的应力变形最小。以此为依据,多次重复安装不再影响主镜面形,通过干涉图确认楔形环的安装位置,之后重修主镜面形。

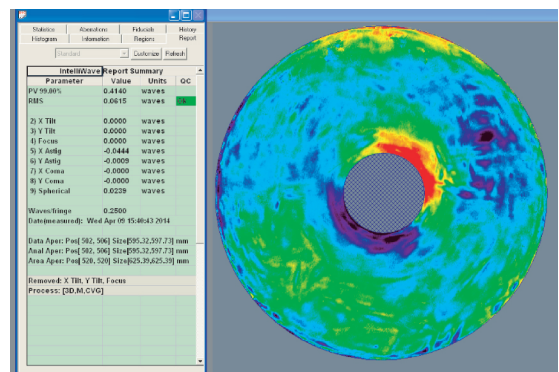


图 7 镀膜前试装复位后的干涉图

Fig. 7 Interferogram of pulse primary mirror before coating

4.2.3 返修后的主镜面形

返修完成后,重复检测主镜面形结果为:PV=0.145 5λ ,RMS=0.024 6λ ,如图 8 所示,满足 $\lambda/40$ 要求。

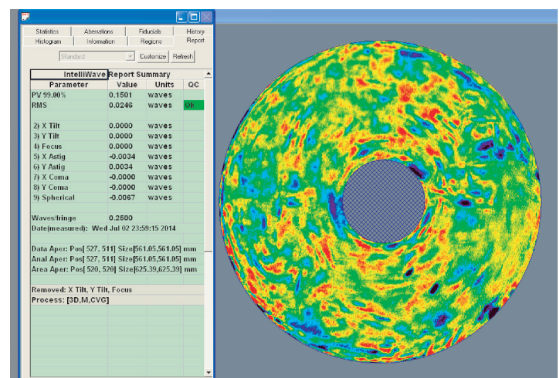


图 8 返修后主镜面形的检测结果

Fig. 8 Inspection result of primary mirror after rework

4.2.4 再次拆卸芯轴复位

重复试装芯轴,再次检测主镜面形,结果为:

PV=0.172 3λ,RMS=0.028 3λ,如图 9 所示。

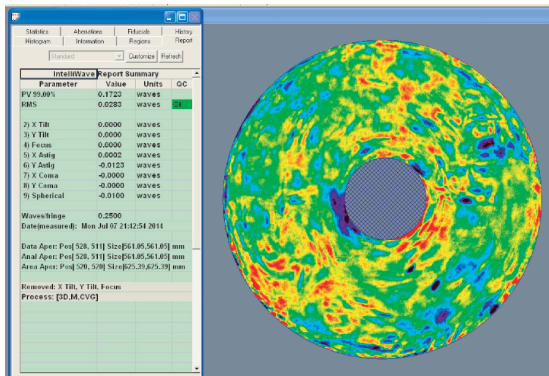


图 9 拆装芯轴复位后的主镜检测结果

Fig. 9 Inspection result of primary mirror after reset

通过拆卸楔形环,从干涉图来看,尽管与试装前的检测结果有变化,但是面形精度可重复,认为装配可复位,可以继续下一步工作。于是返回装校车间,将主镜与主镜支承完全脱开,进行主镜与主镜室的复位实验。

由于通过实验判断拉紧组件的弹簧弹性系数与设计结果相比偏大,因此按照设计值重新更换了拉紧组件的弹簧。复检时,干涉图上明显出现圆周均布的三点高区和三点低区,其分布情况与三点侧支承在径向的分布相对应。改变原来拉紧组件与三点侧支承组件在轴向的力平衡,所以改变弹簧的弹力会改变主镜的面形。

4.2.5 重新调整弹簧后的干涉图

被迫换回原来弹性系数的弹簧,仍然按 3 公斤力加载,但是干涉图中仍然有明显中三高区和三低区,这是后拉紧的弹簧拉力大所致。在干涉图检测的情况下精细调整拉伸弹簧的张紧力,但未彻底改变干涉图中三高三低的分布规律。检测结果为:PV=0.177 4λ,RMS=0.031 4λ,如图 10 所示。波像差 RMS 值为 0.031 4λ,无法恢复到 0.028 3λ 的状态。

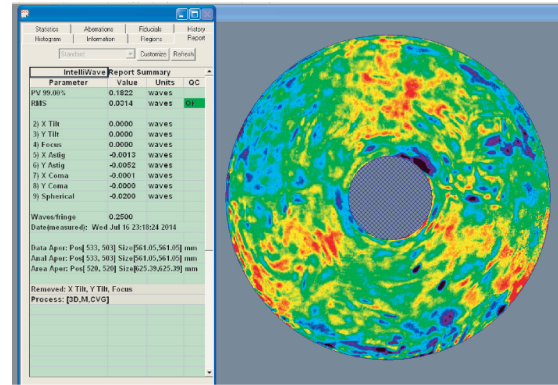


图 10 调整弹簧张紧力后的检测结果

Fig. 10 Test results of primary mirror after adjusting spring tension

4.2.6 恢复到原状态再次重装轴

在拉紧组件的弹簧恢复到初始状态的情况下,再次重新拆卸芯轴,主镜面形的检测结果为:PV=0.175 1λ,RMS=0.028 2λ,如图 11 所示。

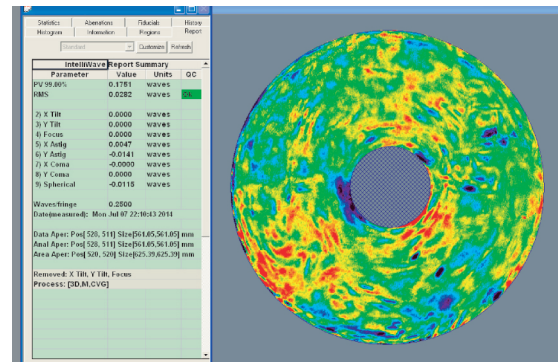


图 11 再次重新装芯轴的检测结果

Fig. 11 Test result of primary mirror after reassembling mandrel

根据上述干涉图,上述检测结果与第一次芯轴复位的检测结果 0.028 3λ 十分相近。因此,认为在调整拉紧组件的弹簧时主镜芯轴组件与主镜的结合部位聚集了有害应力。

4.2.7 镀膜后的结果

镀膜后再次复位芯轴得到的检测结果为:PV=0.175λ,RMS=0.028 6λ,如图 12 所示,与主镜第一次芯轴复位的波像差 RMS 值 0.028 3λ 基本

一致。从图 12 可知,镀膜后的检测结果与复位前的检测结果虽略有区别,但能够满足指标要求,因此予以验收。

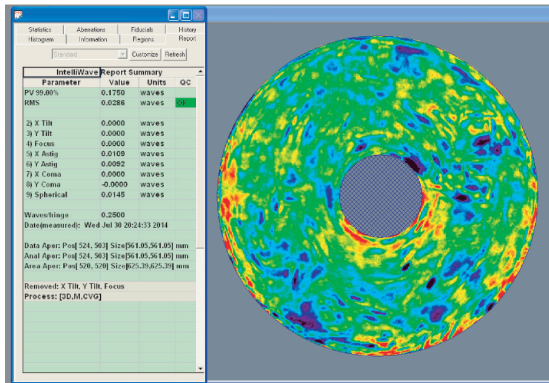


图 12 镀膜后的检测结果

Fig. 12 Test results of primary mirror after coating

从上述装调结果可知:装调方法基本有效,但是费时费力,是一个不断修正和摸索的过程,并充满偶然性,从中总结出以下几点经验:

(1)主镜与主镜室的装配应进行试拆装,如果两者的装调是虚位,尽管不影响主镜定位,但是将导致主镜后续的精修结果不可重复,加工周期将严重滞后。

(2)在主镜精修环节,不要试图通过调整底支撑组件、侧支撑组件以及拉紧组件等改变主镜的面形精度,任何单一调整均将改变主镜的受力状态,从而导致主镜面形发生变化。

(3)拉紧组件中,弹簧的弹性系数或弹力的改变会破坏主镜在轴向的受力平衡,引起主镜芯轴受力状态的改变。关于拉紧组件拉伸力的调整或确认应该在安装主镜之前进行。

(4)芯轴组件中楔形环的复位难度很大,由于无论通过什么线性计量工具也无法精确预测对面形精度已达到 $\lambda/40$ 的影响程度,因此不要试图通过标尺计量来确认楔形环复位。

(5)最重要的是主镜镀膜前的试拆装不能拆卸芯轴组件中在主镜轴套与芯轴轴承间的楔形环,仅在芯轴轴承与楔形环间将主镜与主镜室分离,而将楔形环留在主镜轴套内一起参与主镜镀膜。

针对主镜支承,在径向定位采用芯轴结构,轴

向支承采用 whiffle-tree 结构,径向支承采用杠杆平衡锤的浮动结构的复合支承结构。芯轴组件楔形环的装调十分关键,其位置如图 14 所示。

从图中可知楔形环直接通过锥面与轴套配合。随着楔形环沿轴向的位移加深,轴套上的径向力越大,轴套是与主镜通过环氧树脂胶胶合成一体的,因此作用到主镜上的应力将越大,从而导致主镜更大的变形。

5 $\Phi 1\ 000\ \text{mm}$ 主镜的装调

在 1 m 主镜的加工、检测及装调过程中借鉴了 $\Phi 800\ \text{mm}$ 主镜的装调经验。如图 13 所示,镀膜后的检测结果: $PV = 0.144\ 5\lambda$, $RMS = 0.025\ 0\lambda$ 。通常随着口径增大,加工和装调难度更大,加工周期也会更长,但是采用了新方法后,面形精度和加工周期均得到了改善,达到了高精度、高效率装调的目的。

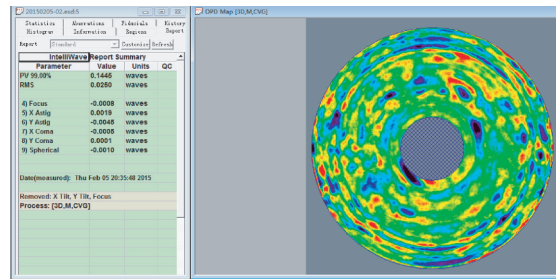


图 13 装配完成后的检测结果

Fig. 13 Test results of primary mirror after assembly

图 14 和图 15 分别为完成镀膜时和完成主镜室装配后的现场图。

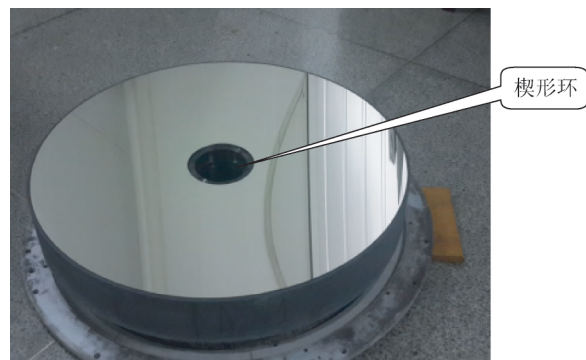


图 14 镀膜后主镜

Fig. 14 Primary mirror after coating



图 15 完成装配的主镜室

Fig. 15 Main mirror room after assembly

6 结 论

本文针对 1 m 口径主镜的装调方法进行了

参考文献:

- [1] 明名,王建立,张景旭,等. 大口径望远镜光学系统的误差分配与分析[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(1):104-108.
MING M, WANG J L, ZHANG J X, *et al.*. Error budget and analysis for optical system in large telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1):104-108. (in Chinese)
- [2] ROBERT H. ATST system error budget [R]. SPEC-0009, 2006.
- [3] ZEMAX development corporation. *ZEMAX Optical Design Program User's Guide* [EB/OL]. 2005-02-03.
- [4] 阮萍,胡永明,孙益善. 超音速机载成像探测设备的窗口设计与分析[J]. 光电子·激光, 2011, 12(7): 701-702.
RUAN P, HU Y M, SUN Y SH. The window design and analysis of airplane-carried facilities in supersonic mode [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2011, 12(7):701-702. (in Chinese)
- [5] 方煜,相里斌,吕群波,等. 光学窗口厚度设计及形变对相机性能影响[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0422007-1-0422004-7.
FANG Y, XIANG L B, LÜ Q B, *et al.*. Design of optical window thickness and influence of its deformation on multi-spectral camera's optical performance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0422007-1-0422004-7. (in Chinese)
- [6] 伞晓刚,孙宁,卓仁善,等. 大口径光电经纬仪主反射镜支撑结构设计[J]. 光学 精密工程, 2013, 21

研究,介绍了光学系统波像差的分配、装调方法。采用干涉仪实时检测波像差,借助计算机的超强运算能力解算光学系统的装配误差量,定量地给出光学系统成像质量的变化趋势,以此指导光学系统的装调。重点研究了主镜面形控制技术,在带主镜支承的状态下完成主镜的加工和检测,介绍了 $\phi 800$ mm 主镜的装调经验,总结优化了大口径主镜的装调方法,提出了主镜修磨、检测、装调一体化的高精度装调方法。最后,将该装调方法应用到 $\phi 1\ 000$ mm 主镜的装调中,取得了理想的效果,装调后主镜的面形精度 RMS 为 0.025λ ,达到了高精度、高效率装调的目的。

(12):3111-3117.

- SAN X G, SUN N, ZHUO R SH, *et al.*. Design of supporting structure for primary mirror of large aperture theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12):3111-3117. (in Chinese)
- [7] 杨立保,王晶,史国权. 米级口径跟踪架的设计与模态分析[J]. 光电工程, 2015, 44(1):45-49.
YANG L B, WANG J, SHI G Q. Design and modal analysis of the meter level caliber tracking frame [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, 44(1):45-49. (in Chinese)
- [8] 韩光宇,曹立华,高云国,等. 1 m 望远镜主反射镜的支撑和装配[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(9): 1922-1928. (in Chinese)
HAN G Y, CAO L H, GAO Y G, *et al.*. Supporting and assembling for primary mirrors of 1 m aperture telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 1922-1928. (in Chinese)
- [9] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. 中国光学, 2012, 5(4):327-336.
ZHANG J X. Overview of structure technologies of large aperture [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4):327-336. (in Chinese)
- [10] 刘振宇,李龙响,曾雪峰,等. 大口径非球面反射镜误差分离组合加工技术[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(4): 813-819.
LIU ZH Y, LI L X, ZENG X F, *et al.*. Fabrication of large aspheric mirror using multi-mode polishing based on error separation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(4): 813-819. (in Chinese)
- [11] 王克军,董吉洪,宣明,等. 空间遥感器大口径反

射镜的复合支撑结构[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(7): 1719-1730.
 WANG K J, DONG J H, XUAN M, *et al.*.

Compound support structure for large aperture mirror of space remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016,24(7): 1719-1730. (in Chinese)

作者简介:



杨立保(1972—),男,河北唐山人,博士研究生,副研究员,硕士生导师,2005年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事光学仪器总体设计以及空间光学载荷在轨维护技术的研究。E-mail: yanglibao228@163.com

导师简介:



史国权(1965—),男,吉林舒兰人,博士,教授,博士生导师,1996年于吉林大学获得博士学位,主要从事精密、超精密加工技术及装备的研究。E-mail: sgq@cust.edu.cn

通讯作者:



张帆(1979—),男,辽宁锦州人,博士研究生,副研究员,2003年于宁波大学获得学士学位,2008年、2011年于中科院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事空间相机电子学、光机结构、热设计及仿真分析。E-mail: zhangfan@ciomp.ac.cn

(本栏目编辑:曹金)