

大口径测量系统主反射镜装调及精度分析

尤锐, 王晶, 王文革, 刘季春, 薛育

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要: 主镜的面形精度与光轴中心偏差影响经纬仪的成像质量与测量精度。为了(减小)调整装配前后主镜的(变形)面形精度, 本文介绍了检测主镜面形误差的几种方法及优缺点。为了保证经纬仪的测量精度, 首次提出了大口径主镜光轴中心偏差的调整与检验方法并确定主镜光轴中心偏差调整精度小于 0.05mm。

关键词: 面形精度; 光轴中心偏差

中图分类号: TH74

文献标识码: A

文章编号: 1672 - 9870 (2008) 03 - 0020 - 04

Adjustment and Error Analysis of the Large Mirror of Test System

YOU Rui ,WANG Jing ,WANG Wenge ,LIU Jichun ,XUE Yu

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

Abstract: Precision of surface shape and aberration effects imagery and test accuracy of a survey theodolite. In order to decrease deforms of a main mirror where assembly incur , the article introduces several methods to test the surface of a main mirror , to ensure testing precision of the theodolite , a method of adjustment and testing center error in a large main mirror is brought forward for the first time , it's adjusting precision of center error is less than 0.05mm.

Key words: precision of surface shape ; aberration

在望远系统中,主反射镜(简称主镜)占有重要位置并起着重要作用。在望远系统中主镜的装调主要有两个技术指标:装配后的主镜像质与主镜光轴中心偏差。前者要求主镜的像质不应比未装配前的主镜像质损失太多(具体多少可按照系统实际使用决定);主镜光轴中心偏差需要调整,以确保系统测量精度满足设计要求。

在二十世纪九十年代,将主镜从口径上划分大于 600mm 的称为大口径。随着现代光学的发展,望远镜通光口径不断加大,大口径主镜的实际应用日益广泛,一米、一米五等口径的主镜也屡见不鲜;因此目前将口径超过一米的主镜称为大口径。这为主镜的结构设计和装调工艺、装调设备改进及操作可行性、安全性提出了新的课题。

主镜以外形结构参数划分为球面反射镜和非球面反射镜。口径小于 600mm 的经纬仪主镜常采用球面镜;随着光电仪器的空间遥感技术的广泛应用,大口径仪器的研制不断完善;鉴于大口径设备的重量,大口径仪器的光学系统主镜、次镜全部使用非球面主镜,这样就简化光学系统结构并改善系统的像质、提高光学特性同时减轻重量。其中在大口径仪器光学系统主镜普遍使用的是抛物面镜。

1 主镜(装配前后)的几种调整方法

为了保证大口径主镜装配后的像质,主镜在装配前的像质必须进行检验。检验主镜像质的方法通常采用自准直法、补偿器法、计算全息法、环形子孔径拼接法等。

收稿日期: 2008-04-09

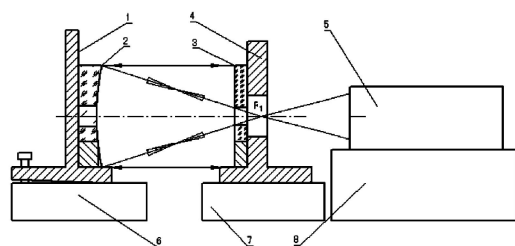
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60574089)

作者简介: 尤锐(1969-),女,辽宁锦州人,硕士研究生,主要从事光学仪器装校工艺及装调工作, E-mail: wangjkl66@sohu.com。

1.1 自准直法

这种方法是装配与检验最常用的,使用的设备是球面干涉仪。干涉仪能够定量测出主镜的面形精度。本文使用斐索球面干涉仪检验主镜面形偏差。斐索球面干涉仪是以一球面波同心地射到标准球面,并于待检球面形成共心干涉,再通过对干涉图的判读得知待检面的面形偏差。

大口径抛物面主镜的检验原理是利用离抛物面顶点为 $R/2$ 处的焦点 F_1 发出的光线,经反射后成平行光束射出(即 F_2 在无穷远处)的特性来检验抛物面的面形。在实际调整中干涉法检验主镜的方法是利用干涉仪上附带的标准透射球面镜应用上述抛物面的特性检验主镜。即:为了能测量到测量样品的全部表面,透射球面的光锥必须大得足以覆盖被测面。大口径抛物面主镜裸镜检验示意图如图1所示。

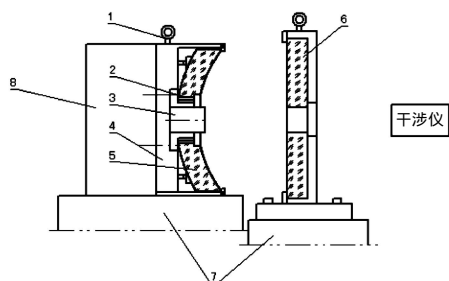


1、4—专用工装; 2—抛物面; 3—标准平面镜 5—干涉仪;
6、7、8—调整架 $F_1=R/2$ (抛物镜焦点)

图1 裸镜检验示意图

Fig.1 sketch map of testing mirror

装配主镜时为了防止装配应力和制造误差造成主镜面形发生变形,在主镜装配到主镜室后必须再次对主镜面形精度进行复验,如图2。装配后的主镜面形应与裸镜时的面形相同。



1—吊装结构 2—轴套 3—芯轴 4、5—(主镜)主镜室;
6—标准平面反射镜 7—支撑架

图2 装配后主镜检测示意图

Fig.2 sketch map of testing mirror after assembled

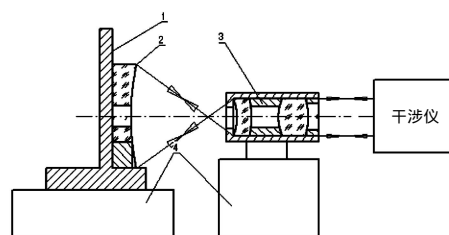
干涉仪是较昂贵的设备,保养及使用环境较严格。对于大口径主镜检测需要的辅助设备要求高,同时存在干涉仪检测的范围与被检测主镜口径、相

对孔径的匹配的局限,易造成检测的不是整个表面,而是某一部分;图2所示实际操作需要口径大于主镜并且面形精度高于被测主镜的带孔的平面反射镜、大尺寸的平台、独立地基、恒定的温度等条件。操作者需要有一定的经验,否则极易将测量误差带进待测的主镜面形中。

1.2 补偿法

检验非球面镜也常利用共轭无像差点方法。补偿法适宜于检验大口径的二次及高次非球面,是一种无接触测量。这种方法必须设计出一个球差曲线与被检验非球面法线像差完全补偿的光学系统,称为补偿器。补偿器直径比被检验镜面小好多倍,而且均为透镜。采用补偿法,能够保证定性和定量地评价面形偏差。它所检验到的是整个表面,而不是局部。

被检验表面的法线像差补偿法的原理是利用补偿器,把平面或球面波前转换为参考非球面波前使之与被检验非球面的理论形状重合。图3表示补偿器3和被检验非球面2的相对位置。非球面顶点曲率中心与补偿器的近轴焦点重合,补偿器的光轴与非球面的对称轴重合。入射在补偿器上的平行光束,出射后转换成所有光线均与非球面法线重合。由非球面反射后,所有光线沿原路返回,经补偿器出射后,重新形成平行光束。



1—专用工装; 2—主镜(或装配后的主镜);
3—补偿器; 4—支撑架

图3 补偿法检验主镜的示意图

Fig.3 sketch map of compensation method
in testing mirror

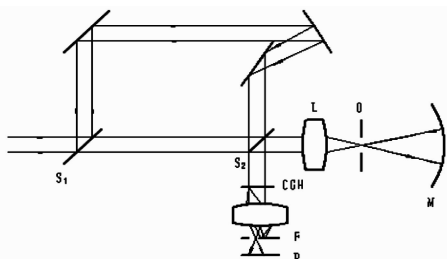
补偿器和非球面一起构成了理论上理想的自准系统,对波前的分析可利用阴影法或干涉法。如果补偿器具有所要求的质量,并相对于被检验非球面正确地安装,那么,波前的变形只能是由非球面的偏差所致,并且放大二倍传递给由补偿器出射的波前,确定波前变形的大小和符号的同时,作出关于非球面质量的结论。

无像差点检验是目前检验和加工、装调非球面主镜的常用方法。它要求补偿器光学设计严格,空

气间隔公差往往要求在 $0 \sim +0.0015\text{mm}$ 之间, 装调实测值要反馈到光学设计中重新验算; 因此装调设备要求精度高。实际操作需要大尺寸的平台、独立地基、恒定的温度等条件。

1.3 计算全息图法 CGH

由计算机计算并由图形输出, 所制备的全息样板, 它存储了标准波面的信息。因此应依照标准波面的解析表达式或离散数据, 算出该波面在全息图面处的振幅透射比函数, 并编码各取样单元的振幅与位相, 再由绘图仪绘制在纸上或塑料膜上得全息图原图, 然后经过适当缩版得一张二元的计算全息图。典型的 CGH 干涉系统如图 4 所示。



S1、S2—分光镜 M—待检非球面 L—扩束器;
F—空间滤波器 P—观察屏

图4 检测主镜的CGH干涉系统

Fig.4 CGH interference system of testing a main mirror

待检非球面 M 的顶点曲率中心 O 与扩束镜 L 的焦点重合。准直的 He-Ne 激光束经分束器后, 分为参考和测试两支光路。CGH 置于共同光路中, 以抵消全息样板基厚度不均引入的位相误差。

空间滤波器 F 只允许 CGH 再现的一级衍射波 (标准波面) 和测试光路的零级待检波面通过。如待检面理想, 则 P 处给出平行的直干涉条纹。若干干涉条纹有变形则表明待检面对理想非球面存在面形偏差。

这种方法对全息样板制造有较高要求。

1.4 环形子孔径拼接检验

上述三种方法都需要制造相应的辅助元件 (如大口径反射镜、补偿器、计算全息板) 在相应仪器上实施。环形子孔径拼接技术是一种无需辅助元件就能检测旋转对称大口径非球面镜的有效手段, 该检测技术不仅降低了检验成本, 而且可以消除辅助元件的设计、制造和调整误差对检测精度的影响。这种方法也能够拓展干涉仪测试非球面的动态范围, 使干涉仪测量非球面的口径和相对口径都有很大的增加, 且不需要补偿器就能实现对大口径非球面的定量检测方法。

环形子孔径技术通过改变被测非球面镜与干涉仪之间的相对距离, 使不同曲率半径的参考球面波前来匹配此非球面镜上的不同环带区域, 这样在所匹配的环带区域里的入射参考球面波前与被测非球面表面之间的偏离量减小到干涉仪测量范围内, 然后由适当的算法将各个分辨干涉条纹部分的子空间数据重构出全口径面形信息。

2 主镜与主镜室装配

大口径主镜, 定位方式一般使用过渡轴套与主镜孔间隙配合安装, 过渡轴套与芯轴间隙配合, 依靠胀圈固定。测量主镜轴套内孔和芯轴外径直径可使用三坐标测量仪精确测量, 芯轴和主镜过渡轴套的配合面需要配研装配, 配合间隙小于 0.01mm 。

大口径的主镜主镜室的结构较复杂, 除轴套与芯轴过盈配合外, 还加装侧支承和主镜底部多点浮动支承, 支承数目依据主镜直径的大小确定。

底部多点浮动支承要逐一修配对研, 保证球头自由运动舒适、接触良好。

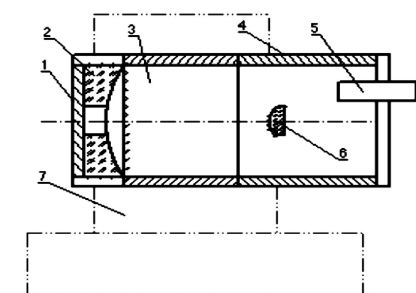
侧支承的结构目前接触的有使用水银带和弹簧结构两种。弹簧结构的侧支承未装配前必须将各侧支承的弹簧力调至相同, 装配时分别修磨各侧支承的调整垫消除加工带来的侧支承位置误差, 直至与主镜侧壁间隙为零。

底支承刚性检验。望远镜工作时由于在不同的高角工作, 将使底支承的受力情况发生变化, 望远镜垂直状态时变形最小, 水平状态下变形最大。底支承的变形回弹如果在各处不一致, 会引起主镜的倾斜, 不仅影响望远镜的指向精度, 而且还会影响像质。基于这个问题, 在装调中设计一种重量轻, 长度在 300mm 、焦距 1000mm 的光管作为检定的目标工具。如图 5 所示, 将主镜室固定在经纬仪水平轴四通的一侧, 水平轴的另一侧固定目标工具; 水平轴从 $0^\circ \sim 180^\circ$ 运动, 从监视器上观测目标点的晃动量。主镜倾斜不应大于 $5''$ 。

3 主镜光轴中心检验与校正

3.1 主镜光轴中心检验与校正

大口径的主镜中心差调整就相对复杂且操作有一定的危险性。大口径主镜重量常大于 50kg , 因此要选择承载力大于装配完主镜室重量的两倍以上, 并且确定负重后的转台轴系精度不大于 $1''$, 转台承载台面表面粗糙度不大于 1.6 、平面度不大于

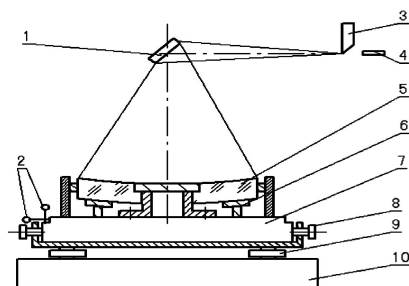


1—底支承 2—主镜 3—四通 4—次镜座;
5—目标管及固定工装;6—次镜;7—经纬仪

图5 底支承变形调整与测试示意图

Fig.5 Sketch map of adjustment and testing from bottom supporting

0.02 mm 及与转台中心轴垂直度不大于 0.01mm, 转台端面上应装有调整主镜座的调整结构, 如图 6 所示的调整螺钉和调整螺帽。



1—平面反射镜 2—百分表 3—刀口仪 4—显微镜;
5—主镜 6—调整垫 7—主镜室;8—水平调整机构;
9—垂直调整机构;10—1"精度转台;

图6 大口径主镜中心晃动调整示意图

Fig.6 sketch map of center error of the large mirror

大口径主镜中心差调整方法: 首先用手动吊车将已装好主镜的主镜室放在转台上, 安装好调整结构在主镜室的止口及端面如图 6 所示的水平和垂直位置放置两块百分表; 均匀缓速旋转转台, 同时观察水平和垂直两个方向的百分表的读数, 如读数大于 0.01mm 时应使用调整螺钉和调整螺帽后; 再次旋转转台观测百分表读数, 反复几次逐渐逼近时使之百分表的读数小于 0.01mm。上述调整完毕后将刀口仪安置在球心大致位置, 调整反射镜和刀口仪的相对位置直至刀口仪位于在球心处; 最后通过显微镜观察的就是实际主镜中心差值。参照公式 (1) 和 (2) 修磨调整垫, 直至主镜中心划圈量不大于 0.05mm。

计算公式如下:

$$\Delta = \Phi L / (R2\beta) \quad (1)$$

其中 Δ —修研调整量;

R —主镜半径;

Φ —显微镜中观察到的主镜像划圈量;

β —显微镜倍率。

$$h = \Phi / 2\beta \quad (2)$$

其中 h —旋转 180°的主镜像中心差;

Φ —显微镜中观察到的主镜像划圈量;

β —显微镜倍率。

3.2 主镜光轴中心差调整误差分析

在大于 600mm 口径的主镜晃动调整中, 影响主镜晃动精度的误差有: 双向测微目镜读数测量误差、对准误差、高精度转台误差、主镜室调整误差。

$$\sigma = \pm (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + 2\sigma_4^2)^{1/2}$$

其中 σ_1 —双向测微目镜读数示值误差误差为 1.91×10^{-3} ;

σ_2 —对准误差 0.67;

σ_3 —高精度转台误差 1;

σ_4 —专用工具与主镜室止口的配合误差 $0.01/R$ (R —主镜半径)。

4 结论

本文介绍了大口径主反射镜在与主镜室装配前后的检测方法主反射镜的光轴中心差的调整并在实际工作中已得到了应用。实践证明此主镜装调与精度分析是可行的。

确定检测主镜对其环境和辅助设备的要求。即高精度 1", 并成载 100kg 以上的转台, 检测环境应有独立的地基、大面积的平台、恒温室等; 对大口径主镜的主镜室要求其设计合理、易于操作及安全可靠的吊装设备。

参考文献

- [1] 杜俊峰, 张林波, 任戈. 1.3 米主镜的支承设计[J]. 光学精密工程, 2007, 15(10): 1483-1489.
- [2] 王之江. 光学技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [3] 侯溪, 伍凡, 杨力. 环行子孔径拼接检测大口径非球面镜的规划模型及分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 207-212.
- [4] 王孝坤, 张学军, 王丽辉. 环行子孔径拼接干涉检测非球面的数学模型和仿真研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 528-532.
- [5] 毛英泰. 误差理论与精度分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
- [6] 郑学文, 王全波. 精密仪器设计[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992.
- [7] 郭培基, 余景池. 用校正法提高补偿器检测法的精度[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 202-206.